

CE

**Oplossingen voor
milieu, economie
en technologie**

Oude Delft 180

2611 HH Delft

tel: 015 2 150 150

fax: 015 2 150 151

e-mail: ce@ce.nl

website: www.ce.nl

Besloten Vennootschap

KvK 27251086

Naar een duurzame chemische industrie

Productieketen van styreen

Rapport

Delft, augustus 2001

Opgesteld door: I. de Keizer



Colofon

Bibliotheekgegevens rapport:

Keizer, I. de

Naar een duurzame chemische industrie : productieketen van styreen

Delft, CE, 2001

Chemische industrie / Duurzaamheid / Duurzaam produceren / Grondstoffen
/ Styreen / Polystyreen / Koolstof / Kringloop / Energieverbruik

Publicatienummer: 01.6000.19

Verspreiding van CE-publicaties gebeurt door:

CE

Oude Delft 180

2611 HH Delft

Tel: 015-2150150

Fax: 015-2150151

E-mail: publicatie@ce.nl

Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de projectleider Jessica van Swigchem

© copyright, CE, Delft

CE

Oplossingen voor milieu, economie en technologie

CE is een onafhankelijke onderzoeks- en adviesbureau, gespecialiseerd in het ontwikkelen van structurele en innovatieve oplossingen van milieuvraagstukken. Kenmerken van CE-oplossingen zijn: beleidsmatig haalbaar, technisch onderbouwd, economisch verstandig maar ook maatschappelijk rechtvaardig.

CE is onderverdeeld in vijf secties die zich richten op de volgende werkterreinen:

- economie
- energie
- industrie
- materialen
- verkeer & vervoer

Van elk van deze secties is een publicatielijst beschikbaar. Geïnteresseerden kunnen deze opvragen bij CE tel: 015-2150150. De meest actuele informatie van CE is te vinden op de website: www.ce.nl

Voorwoord

“Problems cannot be solved at the same level of awareness that created them”.

Deze uitspraak heeft Albert Einstein ooit gedaan. En ik denk dat dit zeker geldt voor de milieuproblemen en –oplossingen waar wij in onze tijd mee te maken hebben.

Na discussies over de chemische industrie en de milieuproblemen die deze met zich meebrengt, ben ik vol enthousiasme begonnen aan een onderzoek om deze chemische industrie duurzamer te maken.

Vooraf dacht ik daarbij aan het verbruik van aardolie en de CO₂-problematiek. ‘Radicale veranderingen wat betreft grondstofgebruik!’ ‘Hergebruik van afval!’ Dat waren de conclusies die ik naar alle waarschijnlijkheid uit mijn onderzoek zou halen.

De praktijk bleek anders!

Uit het onderzoek kwam wel naar voren dat onderzoek naar alternatieve grondstoffen belangrijk is, maar aan de toepassing van bijvoorbeeld biomassa kleven toch ook bezwaren.

En recycling van kunststofafval is niet in *alle* gevallen de beste oplossing wat betreft milieubelasting.

Al met al leverde het onderzoek een aantal interessante conclusies op die ruim voldoende uitdaging bieden voor de toekomst!

Ingeborg de Keizer

augustus 2001

Inhoud

Samenvatting	1
1 Inleiding	7
1.1 Achtergrond	7
1.2 Doel van het project	8
1.3 Werkwijze	9
1.4 Definiëring 'duurzame chemische industrie'	9
2 Selectie en afbakening productieketen	13
2.1 Selectieprocedure voor keuze van product	13
2.2 Het product: styreen (monomeer)	14
2.3 Uitgangspunten en afbakening rondom styreen monomeer	17
3 Overzicht huidige productie	19
3.1 De productieketen	19
3.2 Energiebehoefte bij de productie van polystyreen	20
3.3 Milieueffecten bij de productie van polystyreen	22
3.4 Totaaloverzicht productieketen en effecten	24
4 Naar een duurzame chemische industrie	25
4.1 Routes naar duurzaamheid	25
4.2 Fasering van de keten	25
4.2.1 De grondstoffase	26
4.2.2 De productiefase	27
4.2.3 De productgebruiksfase	27
4.3 Uitwerking van de keten in het onderzoek	28
5 De productgebruiksfase	29
5.1 Op welke manier naar een duurzame productgebruiksfase?	29
5.2 Is de productie van (poly)styreen eigenlijk noodzakelijk?	30
5.3 Vervangen door natuurlijke materialen	30
5.4 Herontwerp	31
5.5 Recycling	31
5.6 Storten en verbranden	33
5.6.1 Mogelijkheden van storten en verbranden	33
5.6.2 Berekening van verbranding van kunststofafval	34
5.7 Vergelijking van de verschillende mogelijkheden	35
5.8 Conclusies	37
6 De productiefase	41
6.1 Op welke manier naar een meer duurzame productiefase?	41
6.2 Optimalisatie van de processen	41
6.2.1 Cascade-principe	41
6.2.2 Pinch technologie	42
6.3 Alternatieve processen voor de productie van (poly)styreen	42
6.4 Inzet van duurzame energie in de processen	43
7 De grondstoffase	45
7.1 Op welke manier naar een meer duurzame grondstoffase?	45
7.2 Aardgas	45
7.3 Praktijkvoorbeeld: oxidatieve koppeling van aardgas	46
7.3.1 Het proces van oxidatieve koppeling	46
7.3.2 Energiebehoefte en milieueffecten	47

7.4	Discussie over inzet van aardgas	47
7.5	Biomassa	48
7.5.1	Is biomassa de oplossing?	48
7.5.2	Biopolymeren	48
7.5.3	Biomassa conversietechnologieën	49
7.6	Praktijkvoorbeeld: pyrolyse van biomassa	51
7.6.1	Het proces van pyrolyse van biomassa	51
7.7	Discussie over inzet van biomassa	54
7.7.1	Voldoende areaal voor de verschillende toepassingen?	54
7.7.2	Voldoende areaal voor de productie van styreen?	54
7.7.3	Biomassa als grondstof of als brandstof?	55
8	Conclusies over de mogelijkheden voor een duurzame productie	59
8.1	Inleiding	59
8.2	Mogelijkheden duurzame productgebruiksfase	59
8.2.1	Conclusies productie van polystyreen	59
8.2.2	Conclusies chemische industrie algemeen	60
8.3	Mogelijkheden duurzame productiefase	62
8.3.1	Conclusies productie van polystyreen	62
8.3.2	Conclusies chemische industrie algemeen	62
8.4	Mogelijkheden voor een duurzame grondstoffase	63
8.4.1	Conclusies productie polystyreen	63
8.4.2	Conclusies chemische industrie algemeen	63
9	Aanbevelingen om te komen tot een meer duurzame chemische industrie	67
	Literatuur	69
A	Overzicht van de productieprocessen in de chemische industrie in Nederland	75
B	Productieketen van styreen en polystyreen	79
C	Energiegebruik van de productieketen	83
D	Milieueffecten van de productieketen	87
E	Verwerkingsmogelijkheden voor huishoudelijk kunststofafval	89
F	Mogelijkheden voor duurzame energie	91

Samenvatting

Duurzaamheid

Duurzaamheid speelt een steeds belangrijker rol in onze samenleving. De chemische industrie is een essentiële factor in deze samenleving. Nadenken over de mogelijkheden voor een meer duurzame chemie is daarom belangrijk, zowel voor de samenleving als voor de industrietak zelf.

Het doel van dit onderzoek is antwoord te geven op de vraag op welke manier op de lange termijn een meer duurzame chemische industrie kan worden bereikt.

Hierbij kan duurzaamheid op een tweetal manieren worden opgevat:

- *'Fundamentele' duurzaamheid*
Een duurzame chemische industrie wordt over het algemeen gezien als een chemie die voorziet in de vraag naar basisstoffen voor productieprocessen en energiedragers op een manier waarbij kringlopen zijn gesloten. Zonder emissie van afvalstoffen en zonder uitputting van voorraden.
- *Duurzaamheid door optimalisatie*
De huidige grondstoffen en producten zijn hierbij het uitgangspunt. De processen die vanuit de grondstoffen de eindproducten maken, worden geoptimaliseerd.

Om te komen tot een fundamenteel duurzame chemische industrie kunnen deze routes naast elkaar worden gevolgd. Verduurzamen van de productieketen is een noodzakelijke eerste aanzet tot duurzaamheid. In een aantal gevallen kan deze optimalisatie misschien voldoende zijn om te kunnen spreken van een duurzame chemie.

Daarnaast kunnen de mogelijkheden voor alternatieve grondstoffen en processen worden onderzocht met de daarbij behorende voor- en nadelen.

(Poly)styreen

Om onze ideeën concreet te maken is ervoor gekozen één productieketen uit te werken. Wij hebben hierbij gekozen voor de productieketen van (poly)styreen, omdat de omvang van de productie van styreen ten opzichte van andere chemische processen groot is: 2500 kton per jaar¹.

Daarnaast kost de productie van styreen veel energie: 76 tot 84 GJ per ton. Ter vergelijking: de fabricage van etheen en benzeen kost na styreen de grootste hoeveelheden energie, respectievelijk 61 en 64 GJ/ton.

Een andere reden waarom we gekozen hebben voor styreen is de omvang van de vrijkomende hoeveelheden CO₂. Bij de productie komt 2400 kg CO₂ vrij per ton. Dit is met name het gevolg van brandstofgebruik en productie als toegevoerde energie². Ter vergelijking: bij de productie van vinylchloridemonomeer, het product dat na styreen de grootste emissies kent, komt 1700 kg CO₂/ton vrij.

¹ Een overzicht van de omvang van diverse producten in de chemische industrie is weergegeven in bijlage A.

² De energie die nodig is voor de productie van styreen kan worden onderverdeeld in feedstock energie (ongeveer 55%) en toegevoerde energie (ongeveer 45%).

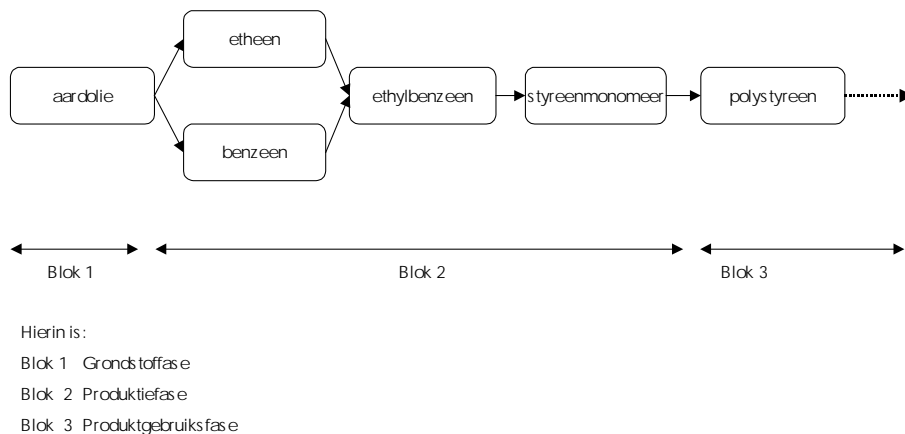
Ook wordt bij de productie van styreen veel water verbruikt: 158 l per ton. Ter vergelijking: voor de productie van benzeen is na styreen de grootste hoeveelheid water nodig: 124 l/ton.

Styreen (C_3H_8) is een vloeibare koolwaterstof dat als monomeer dient bij het maken van polystyreen. Dit is een product waarvan uiteindelijk bijvoorbeeld wegwerpservies, fastfood-verpakkingen en CD-hoesjes worden gemaakt.

Fasering productieketen

In het onderzoek hebben we de productieketen gefaseerd volgens Figuur 1.

Figuur 1 Fasering van de productieketen van polystyreen



Om te komen tot een meer duurzame chemische industrie kunnen oplossingen worden gevonden in elk van de aangegeven fases. Hierbij zijn 'end-of-pipe' oplossingen doorgaans het gemakkelijkst. We hebben er daarom voor gekozen de productgebruiksfase als eerste te behandelen.

Hoe meer in de richting van de grondstoffase oplossingen worden gezocht, hoe fundamenteeler de discussies en mogelijke oplossingen worden. Deze worden daarom als laatste behandeld.

Productgebruiksfase

Het verduurzamen van de productgebruiksfase ligt vooral in de verschillende mogelijkheden voor verwerking van het kunststofafval.

Lange tijd werd gedacht dat materiaalrecycling de meest gunstige manier was om afval te verwerken. Voor een klein deel van het kunststofafval is dit vanuit milieuoogpunt inderdaad het geval.

Uit berekeningen blijkt echter dat bijvoorbeeld verbranding van dit afval goede perspectieven biedt. Het verbranden van het afval levert energie. Deze energie hoeft niet opgewekt te worden door inzet van primaire energiedragers en resulteert dus in een *vermeden CO₂-emissie*.

In Tabel 1 is deze berekening weergegeven.



Tabel 1 Berekening van de netto CO₂-emissie bij verbranding van polystyreen

Proces	Energieopbrengst (MJ/kg)	CO ₂ -emissie (kg)	CO ₂ -emissie / energieopbrengst (g CO ₂ / MJ)
Verbranding van kolen	24,4	2,28	93
Verbranding van polystyreen	39,6	2	51
Vershil tussen processen			42

Idealiter kan de grootste duurzaamheid (lees: laagste milieubelasting) in deze fase worden bereikt door:

- 1 Te kiezen voor materialen met een zo laag mogelijke milieubelasting.
- 2 Met zo weinig mogelijk materiaal in een zo groot mogelijke behoefte te voorzien.
- 3 Zo veel mogelijk (chemische) recycling toe te passen om ophoping van CO₂ in de atmosfeer te voorkomen.
- 4 De rest van het kunststofafval te verbranden met terugwinning van energie.

Productiefase

De productieprocessen kunnen op een drietal manieren duurzamer worden:

- optimalisatie van processen door middel van cascadering en pinch technologie. De inzet van grondstoffen en energie wordt hierdoor geminimaliseerd;
- ontwikkeling van alternatieve processen op basis van de huidige grondstof aardolie;
- inzet van duurzame energie in de processen.

Aan optimalisatie van processen wordt al relatief veel aandacht besteed. Dit is en blijft echter wel een belangrijk onderwerp. Alternatieve processen op basis van de huidige grondstoffen bieden geen mogelijkheden.

De mogelijkheden voor een meer duurzame productiefase liggen met name op het vlak van het verduurzamen van de benodigde toegevoerde energie.

Inzet van biomassa als energiebron biedt hierin goede perspectieven. Energie uit wind, zon en water biedt op dit moment te weinig mogelijkheden. De rendementen zijn weliswaar goed. Het grootste probleem is echter de oppervlakten die nodig zijn om voldoende energie te genereren. In de toekomst bieden deze waarschijnlijk meer mogelijkheden. Tabel 2 en Tabel 3 geven een overzicht van de mogelijkheden voor duurzame energie.

Tabel 2 Benodigde hoeveelheden van verschillende soorten duurzame energie voor de productie van toegevoerde energie van styreen

Soort energie	Opbrengst (PJ/jaar)	Benodigd ³
Bio-energie	Zie Tabel 3	Zie Tabel 3
Windenergie	0,00684 per turbine	Bijna 11.000 moderne windturbines van 600 kW
Zonne-energie	0,00936 per dak van een woning	Bijna 8.000 daken vol zonnepanelen
Waterkracht	0,0972 per centrale	Ruim 760 waterkrachtcentrales van 10 MW

³ Bij de berekeningen is uitgegaan van een gemiddelde capaciteit van een energiebron.

Tabel 3 Benodigde hoeveelheden van verschillende vormen van bio-energie voor de productie van toegevoerde energie van styreen

<i>Materiaal</i>	<i>Energie inhoud (MJ/ton)</i>	<i>Verwerkingsroute</i>	<i>Energie opbrengst (MJe/ton)</i>	<i>Benodigd aantal ton (Mton)</i>
Hout (droog)	18000	Bijstook centrale	5940	12,5
		Houtverwerkende industrie	3600	20,6
Afval	10000	Verbranding	1656	44,9
GFT ⁴ (nat)	3375	Vergisting	540	138
Stortgas	19000*	Vergisting	5,4**	13760***
Koolzaad (droog)	27600	Extractie	675****	-

* kJ/m³

** MJe/m³

*** m³

**** liter biodiesel/ton

Grondstoffase

Het gebruik van aardolie als grondstof is niet duurzaam, omdat het gebruik van deze grondstof grote emissies van CO₂ met zich meebrengt, terwijl het bij fossiele grondstoffen lange tijd duurt voordat diezelfde hoeveelheid CO₂ weer wordt vastgelegd. Het inzetten van alternatieve grondstoffen kan deze grondstoffase verduurzamen.

Een mogelijk alternatief is het gebruik van aardgas. Dit lost echter het probleem niet duurzaam op, omdat ook hier de omzetting van CO₂ in afval (veel) groter is dan de vastlegging.

Een ander alternatief is de inzet van biomassa als grondstof. Hierbij kunnen we onderscheid maken tussen biomassa die direct kan worden verwerkt tot biopolymeren, en biomassa die eerst omgezet wordt en vervolgens gebruikt als grondstof in de chemische industrie.

Op dit moment ontwikkelen zich steeds meer initiatieven op het gebied van biopolymeren. Voorbeelden van biopolymeren zijn Solanyl (een product op basis van aardappelschillen), Paragon (gebaseerd op zetmeel uit aardappels), EcoMould et cetera.

De andere mogelijkheid is de biomassa eerst om te zetten met behulp van een thermo- of biochemisch proces. Een voorbeeld hiervan is pyrolyse. Hiermee wordt uit biomassa een bio-olie geproduceerd die als vervanger van aardolie op kan treden.

Het gebruik van biomassa als feedstock in de chemische industrie staat echter nog in de kinderschoenen, waardoor nog weinig bekend is over de mogelijkheden en onmogelijkheden hiervan.

De inzet van biomassa leidt tot een aantal discussiepunten.

Het eerste punt is de concurrentie met andere vormen van landgebruik. De hoofdvraag is: is er voldoende biomassa beschikbaar op de wereld voor voedselvoorziening, energieproductie én organische grondstoffen?

Wereldwijd is er volgens Van Bekkum [3] ruim voldoende voor de genoemde toepassingen. Echter voor de huidige productie van styreen in Nederland is een oppervlakte van 1,9 tot 19% van Nederland nodig uitgaande van berekeningen van Faaij e.a. [45].

⁴ GFT = Groente-, Fruit- en Tuinafval.



Een andere discussie die hiermee samenhangt, is de vraag of biomassa beter als grondstof of als brandstof kan worden ingezet.

Volgens DTO [3] is het mogelijk om in 2040 de petrochemie volledig om te schakelen op gebruik van biomassa als grondstof.

Aan de andere kant blijkt uit de Nationale Energieverkenningen [15] dat het maximum van biomassa potentieel beperkt is wat betreft inzet als energiebron. Het potentieel kan wel worden vergroot door gebruik van energieteelt.

Een laatste punt van discussie is de vraag of biomassa eigenlijk wel duurzaam genoemd mag worden. Uit onderzoek van Reijnders [40] blijkt de verbranding van biomassa, in dit geval hout, niet altijd CO₂-neutraal genoemd mag worden.

Conclusies en aanbevelingen

Productgebruiksfase

Voor de productgebruiksfase zien wij een drietal aanbevelingen:

- 1 Gebruik zo min mogelijk materialen in de ontwerpfase.
- 2 Recycle zo veel mogelijk producten en materialen.
- 3 Als recycling geen optie is, verbrand de producten dan met energierecuperatie.

Productiefase

De studie levert een tweetal aanbevelingen op voor de productiefase:

- 1 Ga door met optimalisatie van processen.
- 2 Zet duurzame energie in waar mogelijk.

Grondstoffase

Om daadwerkelijk een duurzame chemische industrie te bereiken is in onze ogen een fundamenteel andere grondhouding nodig ten aanzien van het gebruik van grondstoffen. Het verbruik van grondstoffen moet in balans zijn met de natuurlijke aanwas. Kringlopen moeten dus gesloten worden.

Voor het bereiken van deze fundamenteel andere houding zullen op korte termijn (maatschappelijke) discussies gevoerd moeten worden.



1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Duurzame chemie

Chemie is een essentiële factor in de samenleving. Chemie staat aan de basis van de energievoorziening en van de levenscyclus van tal van consumptieartikelen. Deze producten en de processen die ze voortbrengen worden steeds vaker beschouwd in het licht van duurzaamheid.

In onze samenleving speelt duurzaamheid een steeds belangrijkere rol. Ook in de chemische industrie wint het begrip duurzaamheid aan belang (o.a. publicaties VNCI⁵, Responsible Care-programma). Het wordt een belangrijker randvoorwaarde in het functioneren. Daarnaast wordt in toenemende mate onderkend dat duurzaamheid belangrijke kansen schept in het behalen van concurrentievoordeel.

De hedendaagse chemie is echter niet duurzaam door het gebruik van eindige grondstoffen (kolen, olie, gas).

Een duurzame chemische industrie wordt over het algemeen gezien als een chemie die voorziet in de vraag naar basisstoffen voor productieprocessen en energiedragers op een manier waarbij kringlopen zijn gesloten. Zonder emissie van afvalstoffen en zonder uitputting van voorraden. Een dergelijke chemie is mogelijk volgens DTO⁶ en biedt niet alleen een aantrekkelijk perspectief voor de lange termijn, maar biedt ook een kader voor kansrijke innovaties op korte termijn.

Ketendenken

Hierbij wordt in toenemende mate beseft dat voor het kunnen bereiken van een meer duurzame chemische industrie over de gehele productieketen gekeken moet worden. Materiaalefficiëntie van een enkel proces kan niet los worden gezien van de materiaalefficiëntie van de totale keten en van de ketens waar deze grondstoffen aan leveren of van ontvangen. Verandering van grondstoffen van een enkele keten heeft gevolgen voor andere ketens in het netwerk.

De wijze waarop een meer duurzame chemische industrie precies kan worden bereikt, is nog onduidelijk. Een nieuwe manier van denken over de processen in de chemische industrie lijkt echter noodzakelijk. Hierbij zouden ketens het uitgangspunt moeten zijn. Aan de ene kant moeten daarvoor in de huidige productieprocessen potentiële optimalisaties onderzocht worden. De huidige processen zijn in vergelijking met andere sectoren al zeer efficiënt, maar optimalisatie in de processen heeft zijn grenzen nog niet bereikt. Aan de andere kant zouden de grondstoffen en eindproducten kritisch kunnen worden bekeken. Het gebruik van aardolie als feedstock kan worden afgewogen tegen inzet van alternatieve grondstoffen. Evenzo kan het functieniveau van producten onderwerp zijn van een kritische analyse. Misschien kunnen bepaalde producten vervangen worden door andere met eenzelfde functie, maar een lagere milieubelasting. Of misschien is de productie van bepaalde producten vanuit het oogpunt van functionaliteit niet per se noodzakelijk.

⁵ Vereniging van de Nederlandse Chemische Industrie.

⁶ Interdepartementaal Onderzoekprogramma Duurzame Technologische Ontwikkeling.

Technologie en beleid

Technologie is een middel om een meer duurzame chemische industrie te bereiken. Echter om dit daadwerkelijk te realiseren moeten naast deze technologische ingrepen wellicht discussies worden gevoerd over de noodzaak van (de omvang van) productie van bepaalde stoffen en producten. In het verlengde hiervan kan nagedacht worden over alternatieve productieroutes, grondstoffen of toepassingen van eindproducten.

Aan de ene kant zou de samenleving zich bewuster moeten worden van bepaalde aspecten en consequenties die de huidige chemische industrie met zich meebrengt en deze ter discussie stellen.

Aan de andere kant liggen hier voor de industrie uitdagingen en kansen in het verschiet. De ontwikkeling van een meer duurzame chemische industrie vele mogelijkheden.

Het milieubeleid speelt hierbij een grote rol. Beleid kan zowel remmend als stimulerend werken, waardoor dit een belangrijk aspect is bij de ontwikkeling in de richting van een meer duurzame chemische industrie. Beleidsinstrumenten worden ingezet om deze ontwikkeling te sturen en te stimuleren. Ook de belangen van de diverse betrokken actoren en de potentiële knelpunten spelen hierbij spelen een rol.

1.2 Doel van het project

Het doel van het project is te inventariseren op welke manier op de lange termijn een meer duurzame chemische industrie kan worden bereikt. Het onderzoek verschaft inzicht in mogelijkheden voor technologische milieuwinst door middel van:

- optimalisatie van een proces;
- optimalisatie van de ketens;
- ontwikkeling van alternatieve ketens.

De centrale onderzoeksvraag luidt als volgt.

- Op welke manier kan een meer duurzame chemische industrie worden bereikt?
- Welke rol kunnen technologische optimalisaties van de huidige systemen spelen?
- Welke alternatieve productieroutes zijn mogelijk en wat leveren deze op?
- Op welke termijn zijn deze technologische veranderingen realiseerbaar?

Aan het onderzoek is een aantal randvoorwaarden gesteld:

- het onderzoek richt zich op de Nederlandse situatie;
- in het onderzoek wordt één productieproces geanalyseerd;
- een actor- en beleidsanalyse vormen geen onderdeel van het hier beschreven onderzoek.



1.3 Werkwijze

Het onderzoek is uitgevoerd in verschillende stappen.

Stap 1: Inventarisatie milieueffecten van bulkproducten

Op basis van literatuur is een overzicht gemaakt van de productie van de chemische bulkproducten met de grootste volumestroom en de grootste milieubelasting. Hierbij is de gehele productieketen gezien. De keten begint bij de levering van grondstoffen en eindigt bij de productie van het eindproduct. Hierbij worden alle stromen die binnen deze keten (tussentijds) binnenkomen of verlaten ook tot de keten gerekend.

Stap 2: Keuze van het bulkproduct

Op basis van stap 1 is een definitieve keuze gemaakt voor de keten waarmee het onderzoek verder is uitgevoerd. Deze stap is verder uitgewerkt in hoofdstuk 2.

Stap 3: Definiëren van het begrip 'duurzame chemische industrie'

Om uiteindelijk conclusies te kunnen trekken uit de gegevens die verzameld en verwerkt zijn, moet duidelijk zijn wat in dit onderzoek wordt verstaan onder het begrip 'duurzame chemische industrie'. In deze stap is dit begrip gedefinieerd (zie paragraaf 1.4).

Stap 4: Verdere technische uitwerking van het gekozen product

Het product dat is gekozen in stap 2 is in deze vierde stap verder uitgewerkt. Gedetailleerde gegevens van de productieketen en de mogelijke alternatieven zijn in kaart gebracht.

Stap 5: Discussie duurzaamheid in de chemie

Op basis van de gegevens uit de voorgaande stappen is een aanzet gegeven voor discussie. Hierbij is ingegaan op de vraag wat (fundamentele) duurzaamheid betekent in de chemische industrie. Daarnaast zijn de huidige en alternatieve productieroutes vergeleken in het licht van de milieubelasting die deze routes veroorzaken. Ook de toepassingsmogelijkheden en alternatieven hiervoor worden bediscussieerd.

Stap 6: Combineren van voorgaande stappen om de onderzoeksvragen te kunnen beantwoorden

De gegevens en resultaten uit de voorgaande stappen zijn gecombineerd waardoor inzicht is ontstaan in de mogelijkheden voor een meer duurzame chemische industrie in Nederland op de lange termijn. Hierbij komen tevens potentiële knelpunten naar voren.

Stap 7: Verslaglegging, presentatie & communicatie

De resultaten, conclusies en aanbevelingen zijn vastgelegd in dit rapport. Daarnaast wordt het onderzoek zowel in- als extern gepresenteerd en gecommuniceerd.

1.4 Definiëring 'duurzame chemische industrie'

In de literatuur worden verschillende definities gehanteerd voor een 'duurzame chemische industrie'. Een aantal van deze definities is min of meer afgeleid uit de definitie die de Commissie Brundtland heeft geformuleerd: "Duurzame ontwikkeling is een vorm van ontwikkeling waarbij aan de behoeften van de nu levende generatie tegemoet wordt gekomen, zonder dat

daarvoor de mogelijkheden van toekomstige generaties om in hun behoeften te voorzien, in gevaar worden gebracht”.

Definities van duurzaamheid die voortkomen uit of afgeleid zijn van deze Brundtland-definitie noemen wij in dit onderzoek ‘fundamenteel’.

‘Fundamentele duurzaamheid’

Uitgangspunt van fundamentele duurzaamheid is economische en demografische groei zonder uitputting van grondstofvoorraden: het verbruik moet in balans worden gehouden met de (natuurlijke) aanwas. Hierdoor worden voorraden niet uitgeput en de C-kringloop is gesloten, zonder aantasting van biodiversiteit en zonder accumulatie van afvalstoffen. Een consequentie van die keuze is, dat reducties van de milieubelasting met een factor 20 of daarentrent noodzakelijk zijn [4, 7].

Factor 20

$$MB = B * W * M$$

MB = milieubelasting

B = bevolkingsomvang

W = gemiddelde welvaart per persoon

M = metabolisme/milieubelasting per eenheid van welvaart

B zal over 50 jaar naar schatting 2x zo groot zijn als nu. W zal dan gemiddeld 5x zijn gestegen. Willen we de totale milieudruk halveren, dan volgt daaruit dat M met een factor 20 moet worden teruggebracht.

Voor het bereiken van fundamentele duurzaamheid zijn trendbreuken nodig, waarbij sociale, culturele en technologische dimensies gezamenlijk worden aangepakt.

Naast deze ‘fundamentele duurzaamheid’ wordt duurzaamheid vaak opgevat als ‘optimalisatie van de bestaande situatie’.

‘Duurzaamheid door optimalisatie’

Duurzaamheid is in de ogen van met name fabrikanten van producten te bereiken door optimalisaties in de huidige processen. De huidige productiewijze en producten zijn hierbij het uitgangspunt, evenals het gebruik van de huidige grondstoffen. Duurzaamheid kan worden bereikt door efficiëntere processen. Dit brengt tevens reductie van de kosten met zich mee.

In een duurzame chemische industrie zijn processen zo efficiënt mogelijk, zowel wat betreft de omzetting als de efficiëntie van het gebruik van energie. Daarnaast wordt de uitstoot van emissies geminimaliseerd. Processen in een duurzame chemische industrie worden zoveel mogelijk gekoppeld. Op deze manier kunnen afvalstromen uit het ene proces benut worden als grond- of hulpstof in een ander proces. Tevens kunnen water- en energiestromen optimaal worden benut: afvalwater uit het ene proces kan ingezet worden als koelwater in een ander proces.

Een duurzame chemische industrie = ?

Voor het bereiken van een duurzame chemische industrie is het in onze ogen noodzakelijk te beginnen bij het kritisch bekijken van de huidige processen en producten en het gebruik van grondstoffen. Hierbij willen we ons steeds de vraag stellen op welke manier deze processen, producten en ge-



bruik van grondstoffen duurzamer kunnen: is optimalisatie de oplossing of kunnen beter fundamenteel andere oplossingen worden gezocht?

Optimalisatie van processen is vaak een noodzakelijke eerste aanzet en kan in een aantal gevallen misschien voldoende zijn.

Soms lijkt het echter wel degelijk beter een alternatief proces in te zetten. Dit zou bijvoorbeeld kunnen gelden voor de huidige producten. De fabricage van een synthetische plastic veroorzaakt een grote milieubelasting. Een oplossing zou kunnen zijn gebruik te maken van natuurlijke processen, waardoor producten kunnen worden voortgebracht die eenzelfde functie vervullen, maar waarbij de milieubelasting zowel bij de vervaardiging als bij de toepassing van het product vele malen kleiner is [6]. Voorbeeld hiervan is het gebruik van polymelkzuur ten behoeve van de productie van plastics. Of Biopol, een volledig afbreekbaar plastic op basis van koolhydraten dat qua eigenschappen en verwerking te vergelijken is met conventionele kunststoffen [1].

In de petrochemie wordt ruwe olie gebruikt als basisgrondstof in vele processen. Olie kan echter op dit moment ook worden gemaakt uit hout en ander gft-afval (biomassa). Deze 'bio-olie' draagt niet bij aan het broeikas-effect [8].

In dit licht is het bijvoorbeeld de vraag of het beter is het huidige gebruik van aardolie te vervangen door inzet van biomassa. Misschien is het vanuit milieuoogpunt juist beter in te zetten op optimalisatie in plaats van een fundamenteel andere grondstof? Deze afweging komt aan de orde in hoofdstuk 7.

Zowel bij optimalisatie als fundamentele verandering zou in onze ogen inzet van duurzame energie niet mogen ontbreken in een duurzame chemische industrie. Alle energie die wordt toegevoerd zou opgewekt kunnen worden uit wind, zon en water. Ook het gebruik van biomassa als energiebron lijkt hier goede perspectieven te bieden.



2 Selectie en afbakening productieketen

2.1 Selectieprocedure voor keuze van product

Op basis van een inventarisatie van de belangrijkste chemische processen, grondstoffen en producten is een keuze gemaakt voor de uitwerking van één bepaalde productieketen. Uitgangspunt van deze inventarisatie was met name de informatie uit een rapport van de Chemiewinkel Amsterdam geschreven door Heesen e.a. [9]. Hierin is een overzicht gegeven van de belangrijkste chemische producten van de chemische industrie in Nederland.

De petrochemie is vervolgens verder uitgewerkt, omdat deze tak van chemie mogelijkheden biedt voor fysieke en logistieke netwerken en daarnaast een belangrijke materiaalstroom is binnen de Nederlandse chemie. Aardolie wordt hierin omgezet in een aantal fracties (Figuur 2) die op hun beurt direct toegepast kunnen worden of omgezet in andere producten.

Figuur 2 Overzicht van de verschillende fracties die in de petrochemie uit aardolie worden bereid

Destillatietemperatuur	Fractie	Aantal C-atomen	Typen koolwaterstoffen	Gebruik
< 15 °C chemie	Gas	C ₁ - C ₄	Methaan, ethaan, propaan, butaan	Brandstof, LPG grondstoffen
15 - 80 °C chemie	Lichte nafta	C ₅ - C ₆	Alkanen	Motorbrandstof grondstoffen
80 - 155 °C	Zware nafta	C ₆ - C ₁₀	Alkanen en aromaten	Grondstoffen chemie
155 - 230 °C	Kerosine	C ₉ - C ₁₅	Hogere alkanen, aromaten, cyclo-alkanen	Vliegtuig-brandstof
230 - 385 °C	Gasolie, diesel	C ₁₄ - C ₁₉	Complexe alkanen, aromaten, cyclo-alkanen	(Motor)brandstof huisbrandolie
385 - 550 °C	Smeerolie en was	C ₁₉ - C ₃₅	Lange (vertakte) ketens alkanen, aromaten en complexe cyclo-alkanen	Smeerolie
> 550 °C	Stookolie, Bitumen	> C ₃₅	Lange (vertakte) ketens alkanen, complexe aromaten, harsen	Brandstof voor grote schepen, asfalt

Voor elk van de in beschouwing genomen processen is een overzicht gemaakt van productievolume, gebruik van grondstoffen, energiebehoefte, milieueffecten en toepassingsmogelijkheden. Voor een compleet schematisch overzicht wordt verwezen naar bijlage A. In Tabel 4 wordt een kort kwalitatief overzicht gegeven van de belangrijkste aspecten uit het overzicht in de genoemde bijlage. De productie van brandstoffen is buiten beschouwing gelaten.

Tabel 4 Schematisch kwalitatief overzicht van productieprocessen in de (petro)chemie met betrekking tot productievolume, energiebehoefte en milieueffecten

Productie van	Productievolume ⁷	Energiebehoefte ⁸	Milieueffecten ⁹
Ammoniak	+++	+++	+
Chloor-alkali	+	+	+
Soda	+	n.b. ¹⁰	+++
Fosforzuur	+	+	++
Zwavelzuur	++	n.b. ⁸	++
Methanol	+	++	n.b. ⁵
<i>Petrochemie</i>			
Propeen	++	++	++
Vinylchloridemonomeer	++	++	+++
Benzeen	+	++	++
Styreenmonomeer	++	+++	+++
Etheen	+++	++	++

Tevens zijn voor deze processen de mogelijkheden voor het gebruik van alternatieve grondstoffen onderzocht.

De uiteindelijke keuze voor een product is gemaakt op basis van de volgende criteria:

- de omvang van de productie moet zowel nu als in de toekomst voldoende groot zijn (dat wil zeggen: niet marginaal);
- de huidige keten moet relatief veel milieubelasting veroorzaken;
- voor de productie van het uit te werken product moeten alternatieve grondstoffen beschikbaar zijn die minder milieubelastend zijn dan in het huidige proces;
- de keten moet relatief eenvoudig zijn, waardoor een goed overzicht mogelijk blijft en een niet té specifiek netwerk ontstaat. Daarnaast moet een keten echter wel voldoende mogelijkheden bevatten om een netwerk in kaart te kunnen brengen waarmee optimalisatie of inzet van alternatieve (grond)stoffen mogelijk is.

2.2 Het product: styreen (monomeer)

Styreen

Het product dat verder zal worden uitgewerkt, is styreen (monomeer). De productie hiervan is voldoende groot en vraagt veel energie. De productie van styreen kost 76 GJ [14] tot 84 GJ [24]. Ten opzichte van andere producten uit de petrochemie is dit een aanzienlijke hoeveelheid. De fabricage

⁷ Gehanteerde criteria: < 1000 kg/ton = +
1000 – 2000 kg/ton = ++
> 2000 kg/ton = +++

⁸ Gehanteerde criteria: < 20 GJ/ton = +
20 – 75 GJ/ton = ++
> 75 GJ/ton = +++

⁹ Voor een uitleg en overzicht van de milieueffecten van de verschillende processen verwijzen wij u graag naar bijlage A.

¹⁰ In de geraadpleegde bronnen [12], [14] en [24] was geen informatie beschikbaar over de energiebehoefte van de soda- en de zwavelzuurproductie en over de emissies bij de productie van methanol. Onze voorkeur ging op het moment van de keuze voor het product toch al uit naar de petrochemie, waardoor deze informatie ook niet meer actief is gezocht.



van bijvoorbeeld etheen en benzeen kost respectievelijk 61 en 64 GJ/ton [14].

Bij de productie van styreen komen grote hoeveelheden CO₂ vrij: 2400 kg/ton. Dit is met name het gevolg van brandstofgebruik- en productie als toegevoerde energie.

Ook wordt veel water verbruikt ten opzichte van andere producten uit de petrochemie: 158 l/ton (154 l als koelwater en nog ruim 4 liter als proceswater).

Ter vergelijking: bij de productie van vinylchloridemonomeer, het product dat na styreen de grootste emissies kent, komt 1700 kg CO₂/ton vrij. Voor de productie van benzeen is na styreen de grootste hoeveelheid water nodig: 124 l/ton.

Bij de productie van styreen zijn de mogelijkheden voor een netwerk aanwezig, evenals alternatieve grondstoffen.

Aan alle criteria wordt dus voldaan. De productie van styreen is tevens gekoppeld is aan die van etheen, een product dat na styreen monomeer eveneens relatief veel energie verbruikt en een grote CO₂-emissie geeft (zie Tabel 4 en bijlage A).

Productievolume

Styreen (C₈H₈) is een vloeibare koolwaterstof dat als monomeer dient bij het maken van polystyreen. De productie van styreen monomeer in Nederland geschiedt door Shell Moerdijk (1455 kton/jaar) en Dow Benelux (1000 kton/jaar) in Terneuzen.

Ter indicatie: in totaal wordt wereldwijd circa 16,2 miljoen ton styreen geproduceerd. DOW is met 1,7 miljoen ton per jaar (in een viertal landen met in Nederland de grootste productieomvang) de grootste producent van styreen [10].

De wereldmarkt van styreen groeit elk jaar als gevolg van de grote vraag naar producten gebaseerd op styreen, zoals polystyreen, acrylonitriet, butadienstyreen, styreenbutadienrubber [12].

Toepassing van polystyreen

Uiteindelijk wordt het styreen monomeer gepolymeriseerd tot onder andere polystyreen (PS).

Ongeveer 5% van alle eindproducten in de Nederlandse chemische industrie zijn kunststoffen ofwel polymeren. In deze kunststofindustrie wordt onderscheid gemaakt tussen bulkkunststoffen en overige kunststoffen. Van de totale kunststofproductie in Nederland beslaan bulkkunststoffen ongeveer 70%. Dit zijn onder meer [9]:

- PE (polyetheen);
- PP (polypropeen);
- PVC (polyvinylchloride);
- PS (polystyreen).

De productie van polystyreen is in Nederland ongeveer 2500 kton per jaar¹¹. De verwachting is dat het productievolume zal groeien.

Schattingen van deze groei zijn voor Nederland niet gevonden. Voor West-Europa verwachten Gielen e.a. (onderzoek van ECN, [2]) in de periode van 2000 – 2015 een ontwikkeling volgens Tabel 5.

¹¹ Productievolumes zijn over het algemeen geheim, waardoor bijvoorbeeld het CBS geen algemene overzichten heeft. Dit soort informatie kan daarom alleen worden gevonden door (zeer) verschillende bronnen te combineren.

Tabel 5 Productie van polystyreen, 2000-2015 (Mt/yr) (bron: [2])

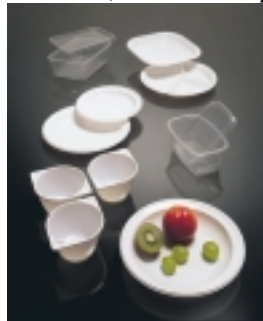
Jaar	Verwachte productie	Groefactor t.o.v. 2000
2000	1.8	
2005	2.1	1,2
2010	2.4	1,3
2015	2.6	1,4

Polystyreen is onder te verdelen in drie productgroepen:

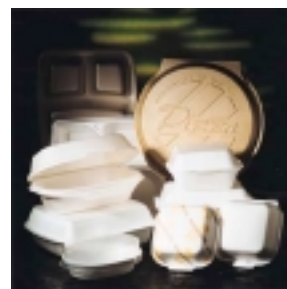
- *Normaal of standaard PS ('general purpose' PS)*
Dit is het strikte polymeer van de grondstof styreen. Het is glasdoorzichtig en bros en wordt voornamelijk gebruikt in de verpakkingindustrie, bijvoorbeeld voor de productie van hoesjes van CD's.



- *Slagvast PS ('high purpose' PS)*
Aan slagvast PS is rubber toegevoegd, waaraan het zijn stevigheid en slagvastheid ontleent. Het wordt toegepast voor verpakkingen, huishoudelijke artikelen, koffiebekertjes e.d.



- *Schuim of expandeerbaar PS*
Door een gas (bijv. pentaan) toe te voegen kan een expandeerbaar PS of een PS-schuim worden gemaakt. Schuim-PS en expandeerbaar PS vinden hun toepassing als thermisch isolatiemateriaal, zowel als isolatieplaten in woningen als isolerende verpakking van voedsel, bijvoorbeeld in de vorm van fastfood-verpakkingen.



Styreen wordt ook vaak gebruikt in copolymeren met andere monomeren, zoals acrylonitril (ABS) en butadieen (SBR).

2.3 Uitgangspunten en afbakening rondom styreen monomeer

Bij de uitwerking van het technische en milieukundige netwerk van de productie van styreen monomeer is een aantal uitgangspunten geformuleerd waarmee het onderwerp afgebakend wordt.

Binnen het productienetwerk worden voor de grondstoffen twee alternatieven beschouwd. Voor de productie van styreen monomeer worden twee alternatieve routes in kaart gebracht. Voor elk van deze routes worden productievolumes, energieverbruik en milieueffecten (emissies) onderzocht.

Uit styreen monomeer worden verschillende eindproducten vervaardigd. Nederland telt circa 20 kunststofproducenten. Aan deze sector is de kunststofverwerkende industrie gekoppeld met ongeveer 1150 bedrijven [1]. Eén product wordt onderzocht wat betreft mogelijkheden voor alternatieve productie en toepassingen. Daarnaast wordt gekeken naar de mogelijkheden om energie te winnen uit het product wanneer het zich in de afvalfase bevindt.

In de praktijk blijkt styreen voornamelijk te worden omgezet in polystyreen, dat een van de meest toegepaste kunststoffen is. Het eindproduct dat wordt onderzocht is om deze redenen polystyreen (PS).

Binnen het productienetwerk van styreen monomeer wordt expliciet geen verdere aandacht besteed aan:

- overige productieroutes voor grondstoffen als benzeen, etheen en styreen;
- eventuele overige productieroutes voor polystyreen;
- productieroutes voor andere (co)polymeren dan polystyreen, zoals Acrylonitril Butadieen Styreen (ABS), Styreen Butadieen Rubber (SBR) en PolyButaDieen (PBD).



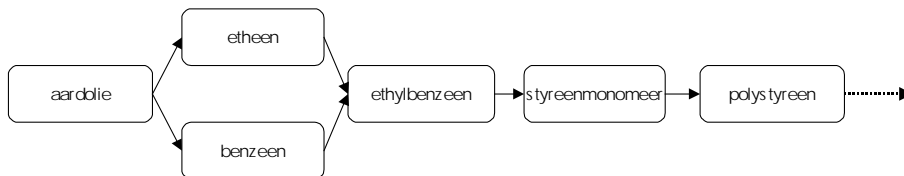
3 Overzicht huidige productie

3.1 De productieketen

Op de beide locaties in Nederland waar styreen en polystyreen worden geproduceerd, Dow Chemical (Terneuzen) en Shell Chemie (Moerdijk), worden etheen en benzeen met behulp van een katalysator omgezet in ethylbenzeen. Vervolgens wordt ethylbenzeen omgezet in styreen monomeer. Bij Shell is de productie van styreen monomeer uit ethylbenzeen gekoppeld aan de productie van propeenoxide [12, 13].

Onderstaand schema, Figuur 3, geeft de productieroute weer van styreen en polystyreen in Nederland.

Figuur 3 Productieketen van polystyreen

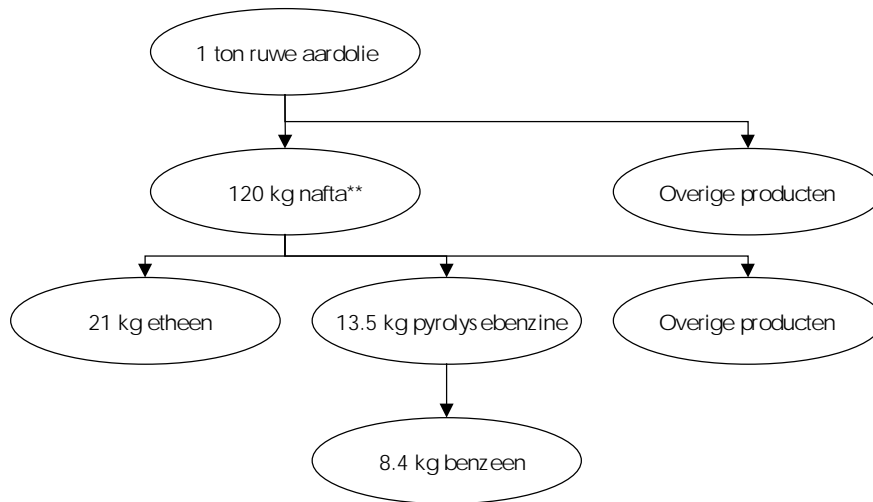


De grondstof van styreen en polystyreen is ruwe aardolie. Uit deze olie wordt door middel van kraken nafta gewonnen. Deze nafta wordt vervolgens omgezet in verschillende producten, waaronder etheen en pyrolyse-benzine. De pyrolyse-benzine wordt vervolgens omgezet in benzeen.

Uit de reactie tussen benzeen en etheen ontstaat ethylbenzeen. Hieruit wordt styreen gemaakt door dehydrogenering. Polymerisatie levert uiteindelijk polystyreen.

Om enig idee te geven van de hoeveelheden grondstoffen die nodig zijn om een eindproduct te maken hebben we Figuur 4 ingevoegd.

Figuur 4 Hoeveelheden grondstoffen die nodig zijn voor de productie van styreen



** 50% hiervan wordt als grondstof gebruikt

Naast deze grondstoffen zijn voor de productie van 1 ton general purpose polystyreen (GPPS) grote hoeveelheden water nodig. Om een idee te geven van de ordegrrootte van deze hoeveelheden verwijzen wij u naar Tabel 6.

Tabel 6 De hoeveelheden water die nodig zijn voor de productie van 1 ton polystyreen (GPPS) (bron: [24])

<i>Toepassing</i>	<i>Hoeveelheid (liter)</i>
Proceswater	4.900
Koelwater	177.000
Totaal	182.000

Voor de productie van de andere twee verschijningsvormen, high impact polystyrene (HIPS) en expandable polystyrene (EPS), zijn ongeveer dezelfde hoeveelheden water nodig. Voor behoud van het overzicht zijn deze buiten beschouwing gelaten.

3.2 Energiebehoefte bij de productie van polystyreen

De energie die nodig is om vanuit de grondstof olie het eindproduct polystyreen te maken is weergegeven in Tabel 7. Hierbij is uitgegaan van de productie van General Purpose polystyreen (GPPS). Het energieverbruik van de andere twee verschijningsvormen, HIPS en EPS, ligt in dezelfde ordegrrootte, maar wordt hier niet expliciet verder uitgewerkt.

Voor elke stap in de keten is een bepaalde hoeveelheid energie nodig. Deze bestaat gedeeltelijk uit energie die wordt toegevoerd in het productieproces (in het vervolg Toegevoerde Energie, TE, genoemd) en gedeeltelijk uit aardolie die gebruikt wordt als grondstof (in het vervolg feedstock energie genoemd, FS).

Per productiestap wordt in de tabel onderscheid gemaakt tussen deze verschillende soorten energie.



Tabel 7 Overzicht van de benodigde hoeveelheid energie voor de productie van styreen en polystyreen (bron: [14,24])

<i>Productie van:</i>	<i>Toegevoerde energie (GJ/ton product)</i>	<i>Energie als feedstock (GJ/ton product)</i>	<i>Totaal benodigde Energie (GJ/ton product)</i>
Grondstoffen =			
1 ton nafta	3	42,7	45,7
1 ton benzeen	20,9	42,7	63,6
1 ton etheen	18,5	42,7	61,2
1 ton styreen =			
0.288 ton etheen	5,3	12,3	17,6
0.798 ton benzeen	16,7	34,1	50,8
Energie voor transport	0,1		0,1
Energie voor dehydrogenering	4,0		4,0
Energie voor strippen	1,3		1,3
Energie voor pompen e.d.	2,3		2,3
Totaal nodig voor 1 ton styreen	29,7	46,4	76,1
1 ton polystyreen =			
1.028 ton styreen ¹²	30,5	47,7	78,2
Energie voor transport	0,1		0,1
Energie voor polymerisatie	7,3		7,3
Totaal nodig voor 1 ton polystyreen	37,9	47,7	85,6

Het totale energieverbruik voor de productie van polystyreen wordt voor 59% bepaald door de hoeveelheid energie die nodig is voor de productie van benzeen.

Voor de benodigde hoeveelheid benzeen is 50,8 GJ/ton energie nodig op een totaal van 83,5 GJ/ton voor de productie van polystyreen:
 $(50,8 / 85,5) * 100\% = 59\%$.

Dit komt doordat voor de productie van benzeen is uitgegaan van de productie uit pyrolyse-benzine. Dit een energie-intensieve productieroute. Als benzeen direct uit nafta wordt gewonnen (via het katalytisch reformproces) dan is voor de benodigde hoeveelheid benzeen 44,7 GJ/ton energie nodig.

Voor de productie van polystyreen is dan in totaal 79 GJ/ton nodig. De berekening van het percentage energie die nodig is voor benzeen ten opzichte van het totaal is dus:

$$(44,7 / 79) * 100\% = 56\%.$$

Daarnaast is gekozen voor productie van polystyreen via het suspensieproces in plaats van het batch-proces dat minder energie verbruikt: ongeveer 2 GJ per ton polystyreen [14].

Uit de tabel wordt tevens duidelijk dat de verhouding tussen de hoeveelheid toegevoerde energie en de hoeveelheid energie uit feedstock verandert tijdens het productieproces. In Tabel 8 hebben we deze hoeveelheden uitgedrukt als percentages van de totaal benodigde hoeveelheid energie om het betreffende product te maken.

¹² Voor de productie van 1 ton expandeerbaar polystyreen (EPS) is 1.028 ton styreen en pentaan nodig. Expandeerbaar PS bevat 5-7% pentaan. Daar dit een kleine hoeveelheid betreft, wordt aangenomen dat eveneens 1.028 ton styreen nodig is voor de productie van normaal polystyreen (GPPS) [14].

Tabel 8 Het percentage toegevoerde en feedstock energie ten opzichte van de totaal benodigde hoeveelheid energie om het betreffende product te maken, cumulatief weergegeven (bron: [24])

Product	Toegevoerde energie (%)	Feedstock energie (%)	Totaal (%)
Nafta	7	93	100
Benzeen	33	67	100
Etheen	30	70	100
Styreen	39	61	100
Polystyreen	44	46	100

Het aandeel toegevoerde energie wordt gedurende het productieproces steeds groter. Iedere productiestap vraagt energie. Hoe meer stappen en hoe specifiek deze stappen, hoe meer energie nodig is. Daarnaast treden in elke stap energieverliezen op.

3.3 Milieueffecten bij de productie van polystyreen

Overzicht van de belangrijkste emissies naar de lucht respectievelijk naar het water als gevolg van de productie van 1 kg polystyreen (GPPS) zijn weergegeven in Tabel 9 en Tabel 10.

Tabel 9 Grootste emissies naar de lucht bij productie van 1 ton polystyreen (GPPS) (bron: [24])

Emissie	a.g.v. productie brandstof (kg)	a.g.v. brandstof gebruik (kg)	a.g.v. transport (kg)	a.g.v. processen (kg)	a.g.v. gebruik biomassa (kg)	Totaal (kg)
Stof	0.92	0.56	0.009	0.035	-	1.5
CO	0.19	1.3	0.1	0.025	-	1.6
CO ₂	440	2100	23	4.4	-1.3	2600
SO _x	2.6	6.5	0.27	0.067	-	9.5
NO _x	3.7	7.3	0.18	0.091	-	11
Koolwaterstoffen	0.85	0.4	0.053	1.3	-	2.6
Methaan	6.1	2.5	-	0.35	-	9

Tabel 10 Grootste emissies naar water bij productie van 1 ton polystyreen (GPPS) (bron: [24])

Emissie	a.g.v. productie brandstof (kg)	a.g.v. brandstof gebruik (kg)	a.g.v. transport (kg)	a.g.v. processen (kg)	Totaal (kg)
COD	5	-	-	330	330
Suspended solids	17	-	-	290	310
Na ⁺	-	-	-	540	540
Metalen	<1	-	-	380	380
Cl ⁻	-	-	-	5500	5500
SO ₄ ²⁻	-	-	-	260	260
CO ₃ ²⁻	-	-	-	190	190

In de gegevens van deze tabellen is het productieproces van polystyreen in zijn geheel bekeken. Er is geen onderscheid gemaakt naar productiestappen.



Algemene gegevens over de emissies per productiestap zijn niet beschikbaar. Wel kan een indruk worden verkregen door middel van een SPIN rapport uit 1993 [10]. Dit rapport beschrijft de emissies per productiestap bij DOW Terneuzen. Een gedetailleerd overzicht van deze emissies hebben we opgenomen in bijlage D.

De belangrijkste milieueffecten die optreden in deze keten zijn weergegeven in Tabel 11 en Tabel 12. Dit betreft de componenten met een emissiefactor > 1 kg van de component, per ton van het product dat wordt geproduceerd in de betreffende stap van de keten.

Dus:

$$\text{emissiefactor} = \frac{\text{kg component die wordt geëmitteerd}}{\text{ton product van de processtap}}$$

Tabel 11 De belangrijkste milieueffecten (d.w.z. emissiefactor > 1) naar de lucht bij de productie van polystyreen bij DOW Terneuzen (bron: [10])

Processtap	Component	Emissie (ton/jaar)	Emissiefactor (kg/ton)	
Productie van etheen	CO ₂	1.811.867	3624	¹
Productie van etheen	CO	1.094	2.19	¹
Productie van etheen	NO _x	1.868	3.74	¹
Productie van etheen	Methaan	2.119	4.24	¹
Productie van benzeen	Kws, alifatisch C ₂ -C ₁₀	818	1.64	²

¹ op basis van 500.000 ton etheen

² op basis van 500.000 ton benzeen

Tabel 12 De belangrijkste milieueffecten (d.w.z. emissiefactor > 1) naar water bij de productie van polystyreen bij DOW Terneuzen (bron: [10])

Processtap	Component	Emissie (ton/jaar)	Emissiefactor (kg/ton)	
Productie van etheen	CZV ¹³	749	1.5	¹
Productie van styreen	Aluminium	600	1.2	³

¹ op basis van 500.000 ton etheen

³ op basis van 500.000 ton styreen

De emissies die zijn weergegeven in deze tabellen zijn afkomstig van de gehele productieketen van polystyreen, van grondstofwinning tot en met de eigenlijke productie van polystyreen. De gebruiks- en afvalfase worden hierbij buiten beschouwing gelaten. De energie die in de producten zit in de vorm van feedstock is om die reden nog altijd aanwezig. Deze energie komt namelijk pas vrij bij bijvoorbeeld verbranding van de kunststoffen.

De emissies die vrijkomen tijdens het productieproces zijn daarom het gevolg van de toegevoerde energie.

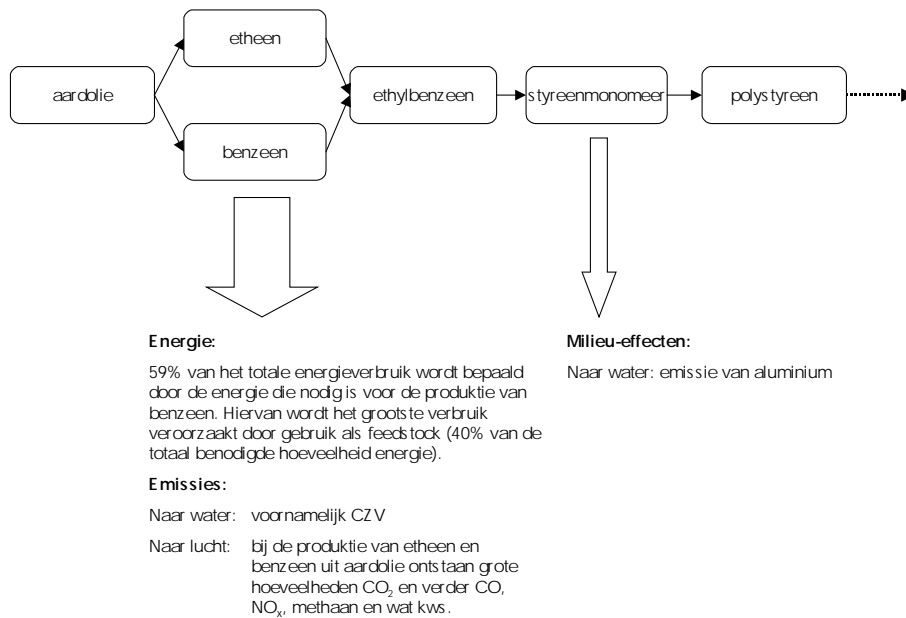
Deze conclusie is van belang voor de berekeningen die worden gedaan in paragraaf 5.6.

¹³ CZV = Chemisch Zuurstof Verbruik. Dit is geen component, maar een grootheid waarmee de hoeveelheid stoffen aangegeven wordt die zuurstof verbruiken als ze in water terecht komen. CZV is dus een maat voor de vervuiling van water.

3.4 Totaaloverzicht productieketen en effecten

De belangrijkste effecten wat betreft energieverbruik en milieueffecten is weergegeven in Figuur 5 .

Figuur 5 Globaal overzicht van de belangrijkste aspecten in de productieketen van polystyreen¹⁴



¹⁴ In het overzicht zijn zowel de algemene gegevens uit de literatuur als de individuele gegevens van het SPIN rapport verwerkt, waardoor in één figuur een indruk gegeven kan worden van de belangrijkste aspecten en de plaats hiervan binnen de gehele keten.



4 Naar een duurzame chemische industrie

4.1 Routes naar duurzaamheid

De belangrijkste grondstoffen van de chemie zijn steenkool, aardolie en aardgas. Aan het gebruik hiervan kleven echter steeds grotere nadelen. In de loop van de tijd worden de resterende voorraden moeilijker bereikbaar waardoor de winning hogere kosten met zich meebrengt. Om de positie van de chemie ook op langere termijn veilig te stellen, kan de sector zich oriënteren op andere grondstoffen.

Naast dit aspect worden vanuit het oogpunt van duurzaamheid tevens steeds hogere eisen gesteld aan de productieprocessen wat betreft emissies naar het milieu en verbruik van energie. Ook de afvalfase van een product wordt steeds belangrijker.

Wereldwijd schrijven diverse instanties (zoals het Wuppertal Instituut, World Business Council for Sustainable Development, Raad voor Milieu- en NatuurOnderzoek) dat het noodzakelijk is de efficiëntie van het grondstof- en energieverbruik in productieketens met een factor 20 te verbeteren (zie hiervoor tevens het informatiekader 'Factor 20' op pagina 9).

Voor de ontwikkeling van een duurzame chemische industrie bestaat, zoals aangegeven in paragraaf 1.4, een tweetal mogelijkheden:

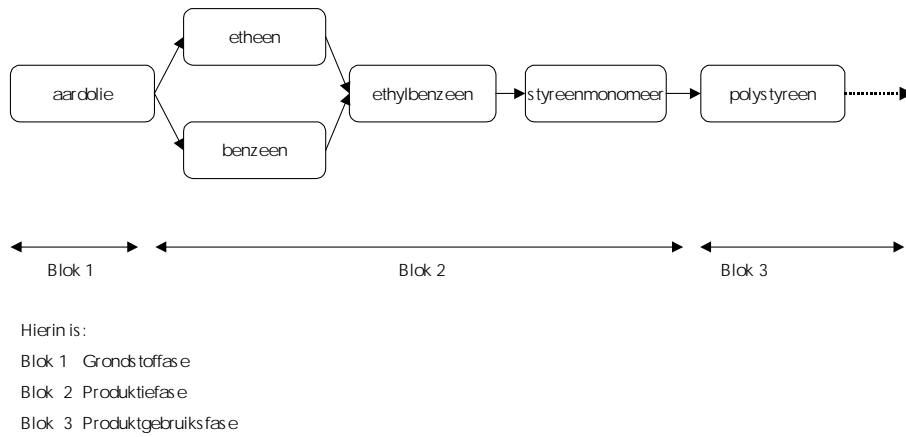
- 1 *Optimalisatie*: verduurzamen van de keten met behoud van grondstoffen en eindproducten.
- 2 *Fundamentele verandering*: ontwikkelen van een keten met alternatieve grondstoffen en eindproducten.

Om te komen tot een fundamenteel duurzame chemische industrie, zoals gedefinieerd in hoofdstuk 1, kunnen deze routes naast elkaar worden gevolgd. Verduurzamen van de productieketen is een noodzakelijke eerste aanzet tot duurzaamheid. In een aantal gevallen kan deze optimalisatie misschien voldoende zijn om te kunnen spreken van een duurzame chemie. Daarnaast kunnen de mogelijkheden voor alternatieve grondstoffen en processen worden onderzocht met de daarbij behorende voor- en nadelen.

4.2 Fasering van de keten

Bij de aanpak van de huidige productieketen onderscheiden wij een drietal fases binnen de keten, zie Figuur 6.

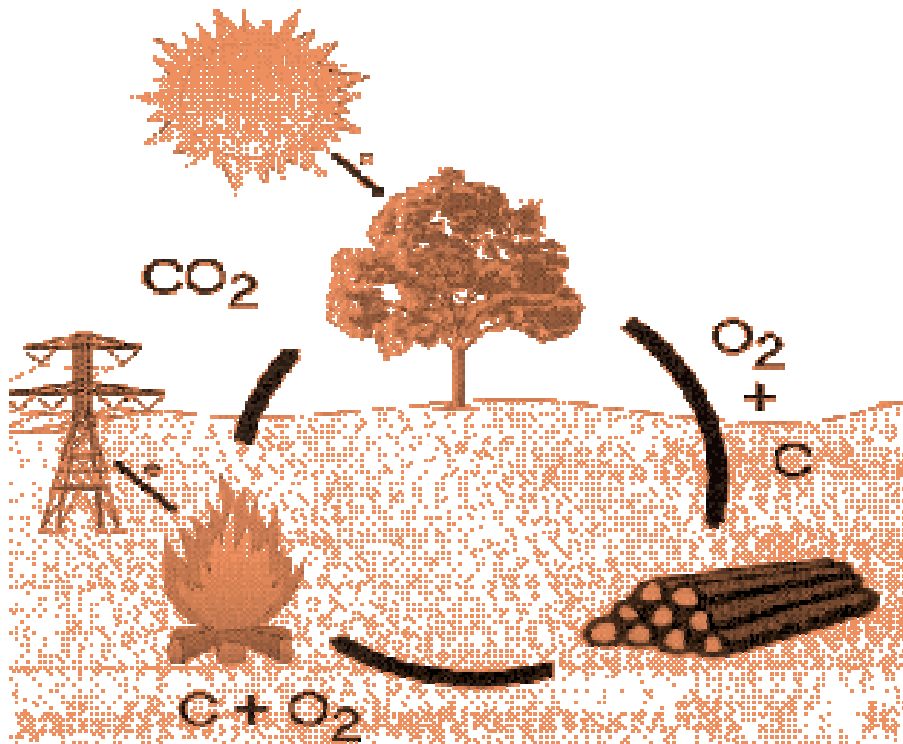
Figuur 6 Productieketen van polystyreen, gefaseerd



4.2.1 De grondstoffase

De grondstof van de huidige keten is aardolie, een fossiele grondstof. Het grote gebruik van deze grondstof gaat ten koste van de natuurlijke voorraden. Als alternatief in een duurzame chemische industrie kunnen andere fossiele grondstoffen worden ingezet. Tevens bestaat de mogelijkheid om in plaats van fossiele grondstoffen afkomstig uit de lithosfeer plantaardige grondstoffen te betrekken uit de biosfeer. Stofkringlopen worden daardoor in relatief korte tijd gesloten en er ontstaat een duurzaam systeem (Figuur 7).

Figuur 7 De koolstofkringloop bij gebruik van biomassa



De vastlegging van koolstof in de lithosfeer duurt tienduizenden jaren. Bij het gebruik van fossiele grondstoffen komt de opgeslagen koolstof in zeer korte tijd vrij. De vastlegging van koolstof in de biosfeer duurt, afhankelijk van het gewas, slechts één tot enkele tientallen jaren [4].

4.2.2 De productiefase

In de huidige productieprocessen wordt aardolie via diverse chemische mechanismen omgezet in tussen- en eindproducten. Het verduurzamen van deze productiefase kan op twee manieren. Ten eerste kunnen de diverse processen worden geoptimaliseerd. Deze optimalisatie kan gericht zijn op het verminderen van het energie- en waterverbruik. Hierbij zijn middelen als pinchstudies en cascadering toepasbaar. Groot voordeel van dit soort optimalisaties is het ontstaan van een win-win situatie: het is beter voor het milieu en het levert een kostenbesparing op. Voor het bedrijfsleven is dit laatste argument van wezenlijk belang.

Met name in de petrochemische industrie is al veel aandacht besteed aan optimalisatie van de processen, omdat het energieverbruik in deze sector enorm groot is. Een vermindering van het energieverbruik brengt dus een kostenreductie met zich mee.

De tweede manier om de productiefase te verduurzamen is het toepassen van alternatieve productieprocessen. De mogelijkheden op dit gebied worden onderzocht en verder uitgewerkt.

4.2.3 De productgebruiksfase

Het verduurzamen van de productgebruiksfase kan via twee fundamenteel verschillende wegen.

De eerste mogelijkheid is uit te gaan van de kunststoffen in de huidige vorm. Verduurzaming ligt dan vooral in het optimaliseren van de (her)verwerking van kunststofafval. Belangrijke hulpmiddelen hierbij zijn onder meer toepassing van het cascade-principe, in samenhang met preventie van reststoffen, schone technologie met als doel dematerialisatie en levensduurverlenging [1]. Daarnaast worden de mogelijkheden onderzocht die recycling en verbranding van kunststofafval bieden, zowel met als zonder terugwinning van energie.

Om te komen tot een fundamenteel duurzame chemie is het in onze ogen daarnaast noodzakelijk te discussiëren over de noodzaak van productie van kunststoffen in de huidige vorm. Hierbij spelen vragen als: In hoeverre is de productie van styreen en polystyreen eigenlijk noodzakelijk? Of meer algemeen: is de productie van kunststoffen noodzakelijk? Hoe belastend zijn de huidige kunststoffen?

In het verlengde hiervan wordt onderzocht welke alternatieve materialen en producten beschikbaar zijn met eenzelfde toepassing, maar die vanuit milieukundig oogpunt beter zijn (of: minder slecht). Het heeft tenslotte weinig zin om de milieueffecten van een product te verbeteren, als bij een milieustrategische analyse blijkt dat het product eigenlijk helemaal niet nodig is, bijvoorbeeld omdat dezelfde functie veel beter kan worden vervuld door een heel ander product of dienst [1].

4.3 Uitwerking van de keten in het onderzoek

Om te komen tot een meer duurzame chemische industrie kunnen oplossingen worden gevonden in elk van de hiervoor aangegeven fasen. Deze mogelijkheden worden verder uitgewerkt in de volgende hoofdstukken, waarbij de fasen in omgekeerde volgorde worden behandeld.

De reden hiervoor is dat 'end-of-pipe' oplossingen doorgaans het gemakkelijkst zijn. De aanpak van de productgebruiksfase is daarom relatief het gemakkelijkst. Hoe meer in de richting van de grondstoffase, blok 1, oplossingen worden gezocht, hoe fundamenteeler de discussies en mogelijke oplossingen worden.

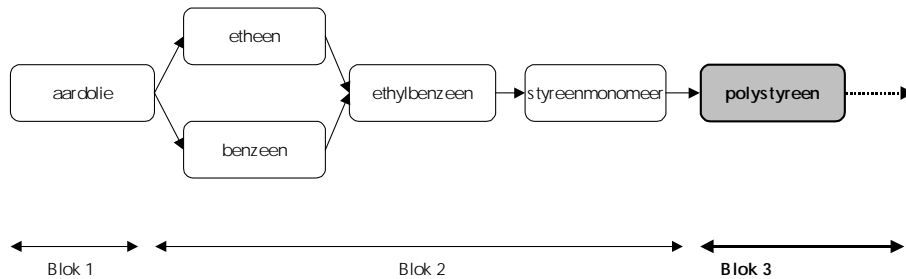
Ook de termijn waarbinnen veranderingen plaats kunnen vinden loopt op van blok 3 naar blok 1. Aanpassingen in de productgebruiksfase zijn vaak minder lastig en ingrijpend dan in de grondstoffase, waardoor deze aanpassingen ook sneller doorgevoerd kunnen worden.

Om deze redenen wordt in hoofdstuk 5 de productgebruiksfase behandeld. Hoofdstuk 6 gaat vervolgens in op de productiefase en hoofdstuk 7 wordt tenslotte gewijd aan de grondstoffase.



5 De productgebruiksfase

Figuur 8 Productieketen van polystyreen. Centraal staat de productgebruiksfase.



Hierin is:

Blok 1 Grondstoffase

Blok 2 Produktiefase

Blok 3 Produktgebruiksfase

5.1 Op welke manier naar een duurzame productgebruiksfase?

Verpakkingen vormen de omvangrijkste toepassing van kunststoffen. Westerse landen consumeren een enorme hoeveelheid kunststoffen: globaal 100 kg per persoon per jaar. Men zou verwachten dat de kunststof afvalstromen even groot zijn, omdat recycling nog nauwelijks wordt toegepast. Deze stroom loopt echter qua volume achter op de consumptie. De in gebruik zijnde hoeveelheid kunststoffen neemt dus nog steeds toe [1]. Ongeveer 40% van de kunststof artikelen belandt binnen twee jaar op de afvalberg [31].

Hoofdprobleem bij een duurzame toekomst met kunststoffen is het sluiten van de stoffenkringlopen. Het huidige kunststofverbruik is niet duurzaam, omdat het tempo waarin aardolie wordt omgezet in kunststofafval en CO₂ vele malen hoger ligt dan dat waarin de natuur via CO₂ en biomassa opnieuw aardolie vormt.

Vaak worden kunststofproducten daarom beschouwd als inferieur en een verspilling van grondstoffen en energie. Aan de andere kant hebben zij echter voordelen vanwege het lage gewicht en de goede vervormbaarheid, waardoor energiebesparing in overslag en transport is te realiseren. Verder zijn ze vaak ongevoelig voor corrosie waardoor de producten langer meegaan, en minder (vaak milieubelastend) onderhoud nodig hebben [1].

Leeswijzer hoofdstuk 5

In de productgebruiksfase (zie figuur 6) is de belangrijkste vraag: passen kunststoffen binnen een duurzame samenleving?

Om deze vraag te kunnen beantwoorden worden verschillende mogelijkheden onderzocht. Ten eerste wordt gekeken naar de noodzaak van de productie van (poly)styreen (5.2). Vervolgens worden de mogelijkheden geïnventariseerd om de huidige kunststoffen te vervangen door natuurlijke materialen. Hierbij wordt tevens onderzocht welke milieuvordelen vervanging op kan leveren (5.3). In 5.4 is aandacht voor herontwerp van producten. Voor de verwerking van kunststofafval zijn verschillende mogelijkheden. In 5.5 wordt ingegaan op recycling en de consequenties die dit heeft, terwijl in 5.6

de mogelijkheden van verbranden en storten van kunststofafval worden onderzocht.

De mogelijkheden die zijn geschetst in deze paragrafen worden vergeleken in 5.7 om tot slot hieruit conclusies te trekken (5.8).

5.2 Is de productie van (poly)styreen eigenlijk noodzakelijk?

Op dit moment wordt polystyreen voornamelijk gebruikt als verpakkingsmateriaal. Hierbij is onderscheid te maken in eenmalig gebruik, zoals wegwerpservies en isolerende fastfood-verpakkingen, en meermalig gebruik. Een voorbeeld hiervan zijn CD-hoesjes.

De vraag is of deze *functies* per se noodzakelijk zijn.

De discussie die hieruit ontstaat is zeer ingewikkeld, omdat de beleving van 'noodzaak' voor iedere persoon anders is. De een vindt bijvoorbeeld wegwerpservies noodzakelijk in bepaalde situaties, terwijl voor een ander alternatieve oplossingen mogelijk zijn.

In dit onderzoek gaan we niet in op deze discussie. Wel vinden we het van belang kritisch na te (blijven) denken over de noodzakelijke productie. 'Productie naar behoefte' vinden wij hierbij een belangrijk punt.

Ervan uitgaande dat de *functies* die polystyreen op dit moment vervult noodzakelijk zijn, kan kritisch worden gekeken naar de mogelijkheden om deze functies door andere materialen te laten vervullen.

Hierbij bestaat een tweetal mogelijkheden:

- polystyreen wordt zo goed mogelijk nagemaakt met behulp van andere materialen;
- de functie die polystyreen vervult, wordt door een geheel andere materiaal overgenomen.

Een voorbeeld van het eerste punt is het product NatureWorks van Cargill Dow dat perfect op polystyreen lijkt.

Voor punt twee geldt dat enkele toepassingsgebieden, zoals polystyreen-schuimgebruik bij 'fastfood and drinks' en bij verpakkingen, overgenomen kunnen worden door op zetmeel gebaseerde materialen [3].

De mogelijkheden die deze alternatieven bieden worden uitgewerkt in hoofdstuk 7.

5.3 Vervangen door natuurlijke materialen

Voor het kunnen bereiken van een duurzame toekomst zouden kunststoffen weer door natuurlijke materialen vervangen kunnen worden. Sommige producten, zoals CD's, lijken zonder kunststoffen echter niet te vervaardigen. Ten opzichte van andere materialen maken ze bovendien vaak enorme energie- en materiaalbesparingen mogelijk. Meestal heeft (her)vervangen door papier, glas of metaal geen zin voor het milieu.

Verpakkingen van staal, aluminium en glas zijn beter recyclebaar dan kunststof, maar vergen veel meer energie bij de productie en het transport. Papier en karton kosten evenveel energie bij de productie als kunststoffen, maar zijn vaak lastiger te verwerken en zonder kunststofcoating niet waterbestendig [1].

Toch zijn op dit gebied voorbeelden waarbij polystyreen is vervangen door bijvoorbeeld karton. De productdivisie DAP van Philips heeft bijvoorbeeld gekozen in een groot aantal toepassingen EPS, Expandeerbaar Polystyreen



oftewel 'piepschuim', als bufferend materiaal te vervangen door karton, omdat karton een milieuvriendelijker imago heeft. Bij dit besluit is ingespeeld op de milieuperceptie van de klant. Uit onderzoek is nooit bewezen dat karton inderdaad milieuvriendelijker is dan EPS. Ook is geen informatie bekend over de waardering van klanten over deze verandering [39]. De keuze voor vervanging van polystyreen door natuurlijke materialen kan dus vanuit marketingoverwegingen worden gemaakt.

Naast de vervanging door natuurlijke materialen worden op dit moment ook veel initiatieven ontplooid waarbij kunststoffen direct uit biomassa worden geproduceerd.

Een voorbeeld hiervan is het product 'Solanyl'. Dit is een biopolymeer, gebaseerd op aardappelschillen, dat zowel plantaardig als afbreekbaar is. Het product valt daarom na enkele maanden tot een jaar uiteen [20].

Inzet van alternatieve grondstoffen in combinatie met herontwerp (zie 5.4) van een product zou in dit geval in de toekomst bijvoorbeeld kunnen leiden tot verdwijning van de zwerfvuilproblematiek op dit gebied.

5.4 Herontwerp

Het gebruik van kunststoffen is door een uitgekiend herontwerp in een flink aantal toepassingen terug te dringen. Vooral bij (wegwerp)verpakkingen en andere kortcyclische toepassingen [1].

Herontwerp van producten is vaak ook gevolg van het toepassen van alternatieve grondstoffen. Cargill Dow produceert bijvoorbeeld een biopolymeer onder de naam NatureWorks. Het is gebaseerd op zetmeel uit maïs en lijkt perfect op polystyreen [20, 21].

Meer informatie over biopolymeren en de mogelijkheden hiervan vindt u in hoofdstuk 7.

Het toepassen van alternatieve grondstoffen leidt overigens niet altijd tot herontwerp van een product.

Andersom is herontwerp van producten natuurlijk lang niet altijd het gevolg van overwegingen met betrekking tot het milieu. Kostenbesparingen, een aantrekkelijker uitziend product, een beter imago et cetera zijn goede argumenten voor herontwerp.

5.5 Recycling

Elk type productiesysteem zal uiteindelijk resulteren in een (laagwaardige) afvalstof: een afgedankt product. Productiesystemen zouden zo kunnen worden ontworpen dat al deze afvalstoffen weer kunnen worden opgewerkt tot grondstoffen die in het productiesysteem kunnen worden toegepast. De koolstofkringloop wordt hierdoor gesloten.

Recycling kan plaatsvinden op verschillende niveaus [2, 5, 31], zie ook Figuur 9:

1 *Het product reinigen en direct hergebruiken*

Dit is mogelijk bij hoogwaardige kunststof statiegeldverpakkingen. Vaak bestaan echter hygiënische bezwaren tegen deze vorm van recycling.

Aan de andere kant spaart hergebruik wel de grootste hoeveelheid CO₂ uit ten opzichte van de andere mogelijkheden [32].

Een product waarbij deze vorm van recycling mogelijk is, is een krat, bijvoorbeeld een bierkrat. Hergebruik van flessen stuit juist vaak op het bezwaar van de hygiëne.

2 *Het materiaal verkorrelen (smelten) en herverwerken in nieuwe producten (mechanische recycling)*

Deze vorm, die ook wel Back-to-polymer (BTP) wordt genoemd, is alleen mogelijk bij kunststoffen die in grote hoeveelheden en in bekende samenstelling beschikbaar komen, zoals PVC waterleidingbuizen of bierkratten.

Uit onderzoek van Bergsma e.a. [32] blijkt dat een groot deel van het huishoudelijk kunststofafval in principe kan worden herverwerkt middels mechanische recycling. Huishoudelijk kunststofafval bestaat voor circa 95% uit thermoplasten. Mits goed gescheiden kunnen de thermoplasten in principe worden herverwerkt tot regranulaat waarmee primair materiaal kan worden vervangen. Bij een voldoende hoge regranulaat kwaliteit en voor bepaalde producten die niet te scherpe eisen stellen aan de eigenschappen van de kunststof grondstoffen is de verhouding waarin primair materiaal wordt vervangen door regranulaat 1:1.

De kunst is echter om het materiaal in voldoende zuivere mate te isoleren. Voor de productie van een kwalitatief hoogwaardige regranulaat zou daarom eigenlijk niet alleen op kunststofsoort, maar ook op grade¹⁵ moeten worden gescheiden.

Voor veel toepassingen is regranulaat echter ongeschikt of niet toegestaan. Bijvoorbeeld bij verpakkingen die direct in contact komen met voedsel.

3 *Kraken (pyolyseren) tot monomeren*

Dit wordt ook wel de Back-to-monomer (BTM) route genoemd. De monomeren kunnen vervolgens weer omgezet worden in polymeren. Ook hier geldt dat de afvalstroom zuiver moet zijn om monomeren te kunnen winnen waaruit opnieuw polymeren gemaakt kunnen worden. Wel kan bijvoorbeeld uit polyethen afval naast nieuw polyethen ook EPDM rubber worden gemaakt.

4 *Omzetting in olieachtige grondstoffen (Back-to-fuel route, BTF)*

De kunststoffen worden niet volledig gekraakt, maar omgezet in olie- of wasachtige producten die teruggevoerd worden naar het begin van de cyclus. Deze methode wordt (nog) niet veel toegepast, vanwege hoge kosten van het proces zelf [5]. Daarnaast speelt de lage olieprijs een rol.

Probleem bij kunststofrecycling is dat na afvalscheiding juist vaak een mengsel van kunststoffen overblijft. Voor dit soort stromen bestaan andere verwerkingsmogelijkheden. De mogelijkheden variëren van dikwandige plastic producten¹⁶ tot vervanging van fossiele energiedragers of daaruit ge-

¹⁵ Binnen de kunststofsoorten zelf bestaat een verscheidenheid aan zogenaamde grades. Dit zijn deelsoorten waarvan de eigenschappen zijn afgestemd op een bepaalde verwerkings-techniek. Zo bestaat er bijvoorbeeld HDPE spuitgietkwaliteit en HDPE blaasvormcapaciteit.

¹⁶ Bij verwerking tot dikwandige producten moet het grootste deel van het afval bestaan uit één thermoplast soort. Dit is nodig om een homogene smelt te kunnen produceren, die zich voldoende goed tot producten laat persen. De producten zijn bijvoorbeeld straatmeubilair, zoals banken en paaltjes.



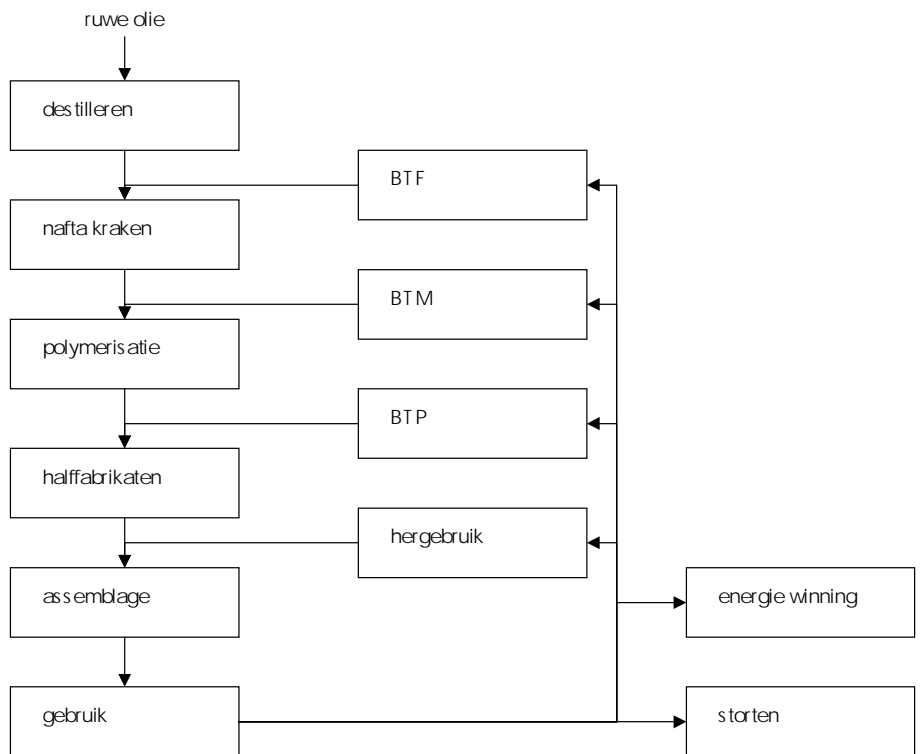
produceerde chemicaliën (chemische recycling, bijstoken). Een overzicht van alle verwerkingsmogelijkheden is weergegeven in bijlage E.

Als de afvalstroom bestaat uit een mengsel van zuivere kunststoffen dan is de enige vorm van recycling die in dat geval mogelijk is de BTF-route. Mengsels van verschillende zuivere kunststoffen kunnen niet gescheiden worden, waardoor de omzetting in olieachtige grondstoffen de enige overgebleven mogelijkheid is voor verwerking van het kunststofafval.

Uiteindelijk blijven altijd producten over die niet gemakkelijk kunnen worden (af)gescheiden en hergebruikt. Denk hierbij bijvoorbeeld aan margarinekuipjes met botterresten, vieze koffiebekertjes e.d. De enige oplossing om dit afval te verwerken is verbranding. Op deze vorm van verwerking wordt ingegaan in de volgende paragraaf.

Een overzicht van alle mogelijkheden voor verwerking van kunststofafval is weergegeven in Figuur 9.

Figuur 9 Plaats van de kunststofafvalverwijderingstechnieken in het productiesysteem (bron: [11])



5.6 Storten en verbranden

5.6.1 Mogelijkheden van storten en verbranden

Voor een overzicht van de plaats van storten en verbranden in de productieketen verwijzen wij u naar Figuur 9.

Storten van kunststofafval

Een van de mogelijkheden om kunststofafval kwijt te raken is storten. Sinds 1 januari 1996 geldt echter een stortverbod, dus deze mogelijkheid is uitgesloten.

Verbranding

Een andere mogelijkheid om het kunststofafval te verwerken is verbranding. Hierbij zijn verschillende mogelijkheden: verbranding met en zonder energierugwinning.

Verbranding zonder energierugwinning vindt bijvoorbeeld plaats als het kunststofafval niet afgescheiden wordt uit het huisvuil en meeverbrand wordt in een afvalverbrandingsinstallatie.

Met de hete rookgassen die ontstaan bij de verbranding kan echter ook bijvoorbeeld stoom worden geproduceerd waarmee een stoomturbine wordt aangedreven. Deze turbine wekt vervolgens elektriciteit op. Wanneer kunststoffen op deze manier worden verwerkt, wordt weinig extra CO₂ geproduceerd, omdat olie of andere fossiele grondstoffen worden uitgespaard. Met deze methode wordt energie teruggewonnen uit de verbranding.

Op dit moment ontstaan steeds meer initiatieven op dit gebied. Een van deze initiatieven was Subcoal. Dit is ontwikkeld door Essent, EZH¹, DSM en de VMK¹ met als doel kunststofafval uit huisvuil om te zetten in elektriciteit. Hierbij wordt een plastic-papierfractie uit huisvuil afgescheiden en verwerkt in een afvalverwerkingsinstallatie.

CE heeft dit onderzoek uitgevoerd. Hierin is dit Subcoalinitiatief milieukundig beoordeeld [27]. CE heeft daarbij verschillende verwerkingsmethodes doorgerekend voor nagescheiden kunststofafval: verwerking in een kolencentrale is vergeleken met biomassa, vergassing, verwerking in een cementoven en in een afvalverbrandingsinstallatie (AVI).

Uit het onderzoek is gebleken dat het gebruik van Subcoal duidelijk milieuvriendelijker is dan verbranding van de bestanddelen in een standaard AVI.

Het Subcoalproces is daarentegen maar beperkt milieuvriendelijker dan gebruik van kunststof in een cementoven. De vergelijking met vergassing was hier zeer specifiek gericht op een bepaalde situatie, waardoor wij hieraan in dit onderzoek geen verdere aandacht besteden.

Tot slot werd een vergelijking gemaakt met de milieuwinst van het zogenaamde Biomassaproject, waarin biomassa (RWZI-slib, hout, papierslib) wordt bijgestookt in de Maasvlaktecentrale. Biomassa is CO₂-neutraal, zodat dit project inzake het broeikaseffect uiteraard beter scoort. Subcoal veroorzaakt echter minder verzuring en verspreiding van toxische stoffen. Uiteindelijk komt de opgestelde milieu-indicator van deze beide projecten per GJ elektriciteit vrijwel gelijk uit.

Voor verdere informatie en inzicht in de onderbouwing van deze conclusies verwijzen wij u graag naar het rapport dat deze studie heeft opgeleverd: [27].

5.6.2 Berekening van verbranding van kunststofafval

Struik [5] heeft berekend dat voor de productie van 1 ton eindproducten van een combinatie van PE, PP, PS, PVC et cetera, gemiddeld 1.72 ton ruwe olie nodig is. De mix van deze kunststoffen heeft nagenoeg dezelfde verbrandingswaarde als olie: 42-43 GJ/ton. Dus als de mix even efficiënt zou worden verbrand als olie, dan kan een rendement op grondstof worden behaald van 1/1.72, oftewel 58% [5].

Deze besparing kan ook worden uitgedrukt in CO₂-equivalenten.

De hoeveelheid energie die in kunststofafval zit als feedstock komt in de vorm van CO₂ vrij bij verbranding.



Door het inzetten van kunststofafval als brandstof hoeft minder gebruik te worden gemaakt van fossiele grondstoffen, bijvoorbeeld kolen. Voordeel hiervan is dat de CO₂-emissies bij verbranding van kunststoffen veel lager liggen dan bij kolen.

Deze hoeveelheid wordt hier voor polystyreen berekend.

De CO₂-emissie van het huidige elektriciteitspark in Nederland is gemiddeld 660 gram CO₂ per kWh_{elektrisch} [44]. Per MJ is dat 183 gram CO₂¹⁷.

In Tabel 13 is de CO₂-uitstoot weergegeven bij de inzet van verschillende energiedragers in een centrale.

Tabel 13 CO₂-uitstoot bij inzet van energiedragers (bron: [43])

Energiedrager	CO ₂ -emissie (gram/MJ)
Aardgas	56
Kolen	94
Olie	73
Elektriciteit	183

De verbranding van kolen levert 24,4 MJ op aan energie per kg. Daarbij komt 2,28 kg CO₂ vrij. Oftewel: 93 g CO₂ per MJ.

De verbranding van polystyreen levert 39,6 MJ per kg op. Hierbij komt 2 kg CO₂ vrij. Oftewel: 51 g CO₂ per MJ.

Door het inzetten van polystyreen voor het opwekken van elektriciteit wordt dus 42 g CO₂ per MJ minder geëmitteerd.

Tabel 14 geeft een overzicht van deze redenering.

Tabel 14 Berekening van de netto CO₂-emissie bij verbranding van polystyreen

Proces	Energieopbrengst (MJ/kg)	CO ₂ -emissie (kg)	CO ₂ -emissie / energieopbrengst (g CO ₂ / MJ)
Verbranding van kolen	24,4	2,28	93
Verbranding van polystyreen	39,6	2	51
Verskil tussen processen			42

5.7 Vergelijking van de verschillende mogelijkheden

Rendement op grondstoffen

De verschillende routes kunnen pas gewaardeerd worden op basis van kwantitatieve gegevens. Voor het grondstofverbruik heeft Struik [5] de kunststoffen omgerekend naar energie of olie. Tabel 15 geeft de resultaten weer van deze omrekening. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat slechts

¹⁷ Hierbij is uitgegaan van een CO₂-emissie die vermeden wordt door de generatie van stroom en een rendement van 95% voor de opwekking van stoom die vermeden wordt.

één aspect in beschouwing is genomen, het grondstofverbruik. Andere punten, zoals milieubelasting zijn hierin niet meegenomen.

Tabel 15 Rendement op grondstoffen, omgerekend naar energie, bij verschillende routes voor de verwerking van kunststofafval [2, 5]

Verwerkingsroute	Rendement (%) ¹⁸
Product reinigen en direct hergebruiken	95
Het materiaal verkorrelen en herverwerken	85-90
Kraken tot monomeren (BTM)	75-85 *
Omzetting in olieachtige grondstoffen (BTF)	75-85 *
Verbranden als energiebron en de warmte gebruiken	60
Verbranden samen met huisvuil	45
Storten van kunststofafval	n.v.t.

* Dit rendement is alleen gebaseerd op laboratoriumexperimenten.

Deskundigen verwachten dat met materiaalrecycling tot maximaal 15-25% van het kunststofafval kan worden opgeruimd. De echt grootschalige oplossing moet dus komen van chemische recycling en hergebruik van energie, aldus Struik [5]. Daarbij moet op termijn duidelijk worden welke route het meest gunstig is: Back to fuel (BTF) of Back tot monomer (BTM). Op dit moment is het voordeel van de BTF route, dat er gebruik gemaakt kan worden van bestaande infrastructuur van een raffinaderij.

Struik [5] laat een treffende vergelijking zien met de natuur. Recycling in de natuur verloopt via precies dezelfde wijze: chemische afbraak tot laagmoleculaire bouwstoffen.

Het huidige beleid zou wat betreft de kunststofindustrie meer gebaseerd moeten worden op de hier voorgestelde mogelijkheden in plaats van puur materiaalrecycling. Op die manier is een fundamenteel duurzamere chemische industrie mogelijk.

CO₂-emissies

In Nederland komt jaarlijks 521 kton huishoudelijk kunststofafval vrij. Bergsma e.a. [32] hebben onderzoek verricht naar de CO₂-emissies van de verschillende herverwerkingsroutes voor dit afval en de bijbehorende kosten. Tabel 16 geeft een kort overzicht van de resultaten van dit onderzoek. Een uitgebreider overzicht met onderbouwing is opgenomen in bijlage E.

Voor de volledige resultaten van dit onderzoek verwijzen wij u graag naar het eindrapport: [32].

¹⁸ Een rendement van 60% op de grondstoffen wil zeggen dat 1 ton kunststofafval 0.6 ton nieuwe grondstoffen levert.



Tabel 16 Bruto CO₂-balans van de verschillende verwerkingsroutes voor de 521 kton kunststofafval die per jaar in Nederland wordt geproduceerd (bron: [32])

		<i>integraal verbranden in AVI</i>	<i>maximale inzet als secundaire brandstof</i>	<i>maximale recycling</i>	
				Integraal Verbranden grijs huisvuil	nascheiding grijs huisvuil
CO ₂ -emissie totaal	(kton)	752	197	208	-66
CO ₂ -emissie	(kg/ton)	1.568	410	434	-138
kosten	(NLG/ton)	200	235	563	584
CO ₂ -bestrijdingskosten	(NLG/ton CO ₂)		30	320	225

Wat opvalt is dat het scenario 'maximale recycling' eigenlijk geen reductie van de netto CO₂-emissie per ton kunststofafval geeft ten opzichte van het scenario 'maximale inzet als secundaire brandstof', wanneer geen nascheiding van grijs huisvuil plaatsvindt. Daartegenover staat dat de kosten (bij de gehanteerde berekeningsmethodiek) ongeveer verdrievoudigen. Omgerekend bedragen de CO₂-bestrijdingskosten circa f 320 / ton CO₂¹⁹.

Samenvattend kan uit bovenstaande tabel in combinatie met de achterliggende informatie uit bijlage E worden geconcludeerd dat er weinig spanning is tussen hergebruik van kunststofafval en inzet als brandstof. Mechanische recycling zelf levert niet genoeg op, maar kost wel veel geld. Alleen bij een combinatie van beide opties wordt tegen nog enigszins acceptabele kosten een aanzienlijke reductie van de CO₂-emissies per ton huishoudelijk kunststofafval gerealiseerd.

Maximale productie van secundaire brandstoffen aan de andere kant is op zichzelf wel een optie die tegen zeer acceptabele kosten een aanzienlijke reductie van CO₂-emissies per ton huishoudelijk kunststofafval geeft.

Het enige wat hierover wel gezegd kan worden is dat hergebruik van plastic aanzienlijk meer CO₂ uitspaart dan inzet als secundaire brandstof [32]. Voor een overzicht van de CO₂ die wordt uitgespaard, verwijzen wij u naar bijlage E.

5.8 Conclusies

Is de productie van (poly)styreen noodzakelijk?

In dit onderzoek gaan we ervan uit dat deze productie inderdaad noodzakelijk is, omdat discussies hierover te sterk samenhangen van persoonlijke meningen van personen. Het lijkt ons zinvol deze discussie een keer te voeren, maar in dit onderzoek wordt deze buiten beschouwing gelaten.

Ook bestaat op dit moment (nog) geen alternatief materiaal dat de geschetste problemen van (poly)styreen kan vervangen.

¹⁹ De gepresenteerde waarde voor de CO₂-balans heeft overigens betrekking op de aanname dat bijvoorbeeld kunststof paaltjes 4 maal zo lang meegaan als de betonnen variant. Bij een vergelijkbare levensduur wordt de waarde van de CO₂-balans 611 kg CO₂/ton, hoger dan bij maximale productie van secundaire brandstoffen. In dat geval wordt dus geld voor niets uitgegeven. Zie hiervoor ook bijlage E.

Vervanging door natuurlijke materialen

Vanuit milieuoogpunt kan vervanging van sommige producten door natuurlijke materialen wenselijk zijn. Dit is echter maatwerk.

Vaak is vervanging juist geen goede oplossing, omdat door gebruik van kunststoffen grote energie- en materiaalbesparingen mogelijk zijn.

Toch is de productdivisie DAP van Philips een voorbeeld waarbij Expandeerbaar Polystyreen (piepschuim) is vervangen door karton. Dit is echter gedaan vanuit marketingoverwegingen: karton blijkt in de ogen van klanten milieuvriendelijker dan EPS.

Daarnaast worden op dit moment veel initiatieven ontplooid waarbij kunststoffen direct uit biomassa worden geproduceerd. Een voorbeeld hiervan is het product Solanyl.

Herontwerp van producten

Herontwerp is doorgaans een bijkomstigheid en geen doel op zich. Gebruik van alternatieve grondstoffen levert bijvoorbeeld vaak – maar niet noodzakelijk – een herontwerp op.

Recycling

Reiniging en hergebruik

Deze vorm van recycling spaart de grootste hoeveelheid CO₂, maar er kleven vaak hygiënische bezwaren aan.

Back-to-polymer

Herverwerking tot granulaat is een goede optie, mits het afvalmateriaal in voldoende zuivere mate kan worden geïsoleerd. Daarnaast kunnen de producten niet te scherpe eisen stellen aan de eigenschappen van de grondstoffen.

Back-to-monomer

Ook hier zijn zuivere afvalstromen noodzakelijk. De BTP en BTF route lijken over het algemeen interessanter.

Back-to-fuel

Bij afvalscheiding blijft vaak een mengsel van kunststoffen over. De BTF route is hiervoor de meest geschikte verwerkingsroute.

Storten

Storten is per 1 januari 1996 verboden.

Verbranden

Met name verbranding met energierterugwinning biedt goede perspectieven om kunststofafval te verwerken. Door 1 kg polystyreen te verbranden worden fossiele brandstoffen gespaard. In CO₂-equivalenten uitgedrukt is dit een hoeveelheid van 1,989 kg CO₂. Bij de verbranding zelf komt 3,38 kg CO₂ vrij per kg polystyreen, waardoor netto 1,39 kg CO₂ vrijkomt bij de verbranding van 1 kg polystyreen.

Dus wat te doen?

Lange tijd werd gedacht dat materiaalrecycling de meest gunstige manier was om afval te verwerken. Het schoonmaken van gemengde stromen, het scheiden van de verschillende soorten plastic en vervolgens het omsmelten en regranuleren werd gezien als de beste oplossing vanuit milieu oogpunt. In het Convenant Verpakkingen staat bijvoorbeeld nog steeds een hergebruiksdoelstelling voor (huishoudelijk) kunststofafval.



Voor een zeer klein deel van het kunststofafval is dit inderdaad het geval. Hergebruik van plastic spaart aanzienlijke hoeveelheden CO₂ uit (meer dan bij bijvoorbeeld inzet als secundaire brandstof [32]). De mogelijkheden voor reiniging en hergebruik zijn echter uit hygiënische overwegingen (zeer) beperkt, waardoor voor het grootste deel van het kunststofafval deze route niet mogelijk is.

Voor de productie van staal en aluminium geldt bijvoorbeeld wél dat minder milieubelasting optreedt als recycling wordt toegepast. Als een product van staal of aluminium in de afvalfase terecht komt, is er maar één grootschalige route voor hergebruik: recycling naar nieuw staal of aluminium. Andere mogelijkheden zijn er niet: staal is niet om te zetten in energie en kan ook niet op grootschalige wijze gebruikt worden als grondstof voor andere nuttige producten [5].

Voor kunststoffen is deze situatie wezenlijk anders. Dit is een gevolg van het feit dat in de loop der tijd vele verschillende soorten plastic zijn ontwikkeld voor vele verschillende en vaak zeer specifieke toepassingen. Een voorbeeld is polyetheen: een type dat geschikt is voor het maken van een krat is ongeschikt voor een gaspijp, terwijl een gaspijp uit krattenmateriaal niet voldoet aan de gestelde veiligheidseisen. Een krat is niet te maken met een pijptype en om een folieproductieproces goed te laten verlopen zijn weer heel andere typen nodig. Met deze drie PE grades door elkaar gemengd, kan men dus weinig beginnen, terwijl het praktisch scheiden van grades onmogelijk is [5].

Hiernaast moet rekening worden gehouden met het feit dat moderne kunststoffen vaak zeer subtiel in elkaar zitten en uit evenveel componenten bestaan als moderne metaallegeringen²⁰.

Vaak wordt door voorstanders van materiaalrecycling naar voren gebracht dat de industrie maar minder grades en polymeer typen moet gaan maken. Een kritisch onderzoek naar de noodzaak van de vele verschillende soorten is in onze ogen inderdaad belangrijk.

Toch betekent sanering van het aantal typen niet dat materiaalrecycling dan wel een mogelijkheid is. Gezien de veelheid van toepassingen en verwerkingstechnieken zullen waarschijnlijk altijd honderden typen en grades overblijven. Dit zijn er nog altijd te veel voor een eenvoudige materiaalrecycling op grote schaal [5].

Voor kunststofafval van niet huishoudens is uit verschillende studies duidelijk dat afscheiding en mechanische recycling de voorkeur verdienen.

Voor kunststofafval uit huishoudens geldt dat het CO₂-netto resultaat van maximaal recyclen vrijwel gelijk is aan het maximaal inzetten als brandstof. De combinatie van beide technieken scoort het beste qua CO₂-netto resultaat ten opzichte van de kostprijs van 225 gulden per ton CO₂ [32].²¹

²⁰ Het is bijvoorbeeld niet ongebruikelijk volgens Struik [5] dat een kunststof bestaat uit een polymere matrix, met daarin rubberbolletjes van een zeer bepaalde morfologie. In deze bolletjes zitten dan weer occlusies van het matrixmateriaal of een ander polymeer, terwijl de hechting van de rubber aan het matrixmateriaal weer geregeld wordt door zeer stofspectifieke compatibilisatoren. Daarnaast worden vulstoffen en andere stofspectifieke additieven gebruikt voor bijvoorbeeld het tegengaan van thermische degradatie tijdens verwerking of degradatie door UV-licht tijdens de levensduur van het product [5].

²¹ In de ons omringende landen, waar mechanische recycling in (veel) grotere mate wordt toegepast, wordt het volledig verwerken van alle plastics volgens deze techniek toch ook niet als reële mogelijkheid gezien [32].

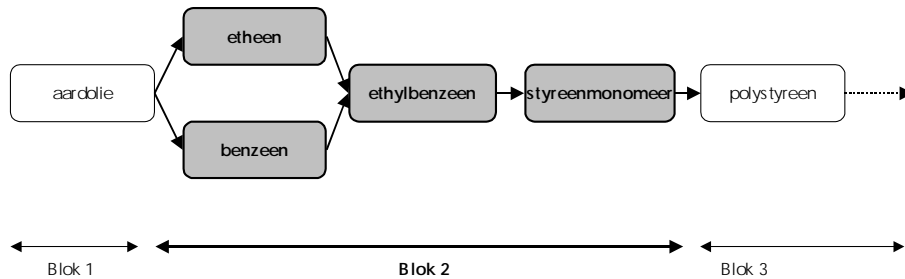
Op basis van de voorgaande paragrafen is idealiter het volgende gewenst:

- a Keuzes tussen verschillende materialen maken op grond van hun milieuprestaties en –kosten. Deze zijn afhankelijk van de mate van kringloopsluiting die voor de verschillende materialen mogelijk is.
- b Kunststofgebruik optimaliseren: met zo weinig mogelijk materiaal in een zo groot mogelijke behoefte voorzien.
- c Opeenhoping van CO₂ in de atmosfeer voorkomen en grondstofgebruik beperken door kunststofafval te recyclen. Deze recycling zal dan vooral lopen via chemische afbraak tot laagmoleculaire bouwstoffen.
- d Opeenhoping van onverwerkbaar kunststofafval voorkomen door (voorlopig) verbranding met optimale terugwinning van energie.



6 De productiefase

Figuur 10 Productieketen van polystyreen. Centraal staat de productiefase.



Hierin is:

Blok 1 Grondstoffasie

Blok 2 Produktiefase

Blok 3 Produktgebruiksfase

6.1 Op welke manier naar een meer duurzame productiefase?

De productieprocessen waarmee uit aardolie uiteindelijk polystyreen wordt gemaakt (zie figuur 10) kunnen op een aantal manieren meer duurzaam worden. Ten eerste kunnen deze processen worden geoptimaliseerd. Hieronder wordt verstaan dat zo min mogelijk gebruik wordt gemaakt van grondstoffen en energie. De tweede optie is het inzetten van alternatieve processen. De derde mogelijkheid is het inzetten van duurzame energie in de twee eerder genoemde opties.

Leeswijzer hoofdstuk 6

De mogelijkheden voor optimalisatie worden verder uitgewerkt in paragraaf 6.2. Vervolgens wordt in 6.3 aandacht besteed aan alternatieve processen. De inzet van duurzame energie in de verschillende processen met de bijbehorende consequenties wordt tot slot uitgewerkt in paragraaf 6.4.

6.2 Optimalisatie van de processen

6.2.1 Cascade-principe

Bij iedere transformatie van energie en grondstoffen, zonder de toevoeging van nieuwe energie, ontstaat een kwalitatief steeds laagwaardiger vorm daarvan. Het is mogelijk deze kwaliteitsdaling sterk te reduceren en zodoende een aantal stappen tussen 'virgin' materiaal en afgedankt materiaal in te bouwen. Dit is het principe van de cascade.

Cascade-type productiesystemen realiseren zeer aanzienlijke besparingen op het gebruik van primaire grondstoffen en energie. Het volle potentieel van een grondstof wordt over een zo lang mogelijke periode en in meerdere stadia benut. Omdat per stap van de cascade minder energie respectievelijk kwaliteit verloren gaat dan in de gebruikelijke productiesystemen, is de gebruiksefficiëntie in beginsel hoog.

In de energiewereld en bij de vervaardiging van papier wordt cascade-gewijze productie tot op zekere hoogte al toegepast, met name omdat het lonend is. In andere sectoren zijn dergelijke productiesystemen echter nog nauwelijks ontwikkeld.

6.2.2 Pinch technologie

Pinch technologie is een relatief eenvoudig ontwerpprincipe dat is gericht op energie- en tegenwoordig ook waterbesparing in de procesindustrie.

In ieder proces zijn stromen te onderscheiden die opgewarmd moeten worden, en andere die gekoeld moeten worden. Deze stromen worden respectievelijk de koude en warme stromen genoemd.

Van elk proces kan in een temperatuur-enthalpie diagram (T-H diagram) de gevraagde respectievelijk beschikbare warmte van de processtromen worden uitgezet tegen het temperatuurniveau, waarop deze warmte gevraagd wordt of beschikbaar is.

Uit het diagram kunnen nu de totaal beschikbare hoeveelheid warmte en koude worden opgemaakt²². Vaak blijkt hierbij dat vraag en aanbod elkaar overlappen. Dit betekent dat door middel van pinch technologie duidelijk wordt op welke plaatsen in het proces warmte gebruikt kan worden om koude stromen op te warmen.

In de chemische industrie is al relatief veel gebruik gemaakt van deze vorm van optimalisatie, mede omdat dit vaak een kostenbesparing met zich meebrengt. Zowel vanuit milieuoogpunt als uit kostenoverwegingen blijft dit een belangrijk onderwerp. Hierdoor kunnen win-win situaties ontstaan.

6.3 Alternatieve processen voor de productie van (poly)styreen

Etheen, benzeen en ethylbenzeen

De productie van etheen en benzeen uit de huidige grondstof aardolie kan in principe slechts op één manier: via het kraakproces uit nafta. Dit geldt ook voor de vorming van ethylbenzeen uit etheen en benzeen.

Alleen op basis van alternatieve grondstoffen, zoals biomassa of aardgas, ontstaan alternatieve processen voor de productie. De mogelijkheden die alternatieve grondstoffen bieden worden onderzocht in hoofdstuk 7.

Styreenmonomeer

Ook voor styreenmonomeer geldt dat alternatieve productieroutes op basis van de huidige grondstoffen niet bekend zijn. Door middel van het gebruik van alternatieve grondstoffen zijn wel alternatieve processen mogelijk.

Styreenmonomeer is echter niet zo eenvoudig uit biomassa te bereiden. Te denken valt aan routes via butadieen, dat in stappen uit bio-ethanol of bio-butanol gesynthetiseerd kan worden. Vanuit ethanol kan geopereerd worden naar acetaldehyde gevolgd door aldoldimerisatie en dehydratering. Heel interessant lijkt het zgn. Lebedew proces, waarbij een en ander in één processtap plaatsvindt over een MgO-SiO₂-katalysator. Van butadieen naar

²² Zowel van de verschillende warmte als van de koude stromen worden samengestelde curves gemaakt: de hot composite en de cold composite curves genoemd. Deze beide curves kunnen in één diagram worden gecombineerd. Het punt waar deze curves elkaar het dichtst naderen wordt de 'pinch' genoemd. In het systeem boven de 'pinch' is een netto tekort aan warmte (heat sink), terwijl in het systeem beneden de 'pinch' een netto overschot aan warmte (heat source).



styreen (Cu-gekatalyseerde Diels Alder cyclo-additie) en dehydrogenering) is recent ontwikkelde technologie (o.a. DSM) [3].

Een methanol-naar-etheen/propeenproces levert ook butenen, die door dehydrogenering (huidige proces) naar butadien voeren. Gezien de benodigde grote hoeveelheden etheen en propen is dit wellicht de beste optie. De mogelijkheden die alternatieve grondstoffen kunnen bieden, worden verder uitgewerkt in hoofdstuk 7.

Polystyreen

De omzetting van styreenmonomeer naar polystyreen kan maar op één manier plaatsvinden: polymerisatie.

6.4 Inzet van duurzame energie in de processen

In de productieprocessen voor polystyreen wordt gebruik gemaakt van twee soorten energie: feedstock en toegevoerde energie.

De mogelijkheden voor het gebruik van alternatieve materialen als feedstock worden onderzocht in hoofdstuk 7.

De productiefase kan duurzamer worden gemaakt door de toegevoerde energie duurzaam op te wekken.

Voor de productie van styreenmonomeer is 29,7 GJ per ton toegevoerde energie nodig, voor de productie van polystyreen 39,7 GJ/ton (zie Tabel 7 in hoofdstuk 3).

De totale productie van styreen in Nederland ligt op 2500 kton/jaar.

Dus in totaal is voor de productie van styreen (met de huidige productieomvang) een hoeveelheid toegevoerde energie nodig van 74,3 PJ.²³

Deze energie kan op verschillende manieren duurzaam worden opgewekt:

- energie uit de biosfeer, bijvoorbeeld biomassa;
- energie uit de atmosfeer, bijvoorbeeld windenergie;
- rechtstreekse benutting van zonne-energie;
- energie uit de hydrosfeer, bijvoorbeeld waterkracht.

Deze voorraden energie worden in korte tijd door de natuur aangemaakt. Zolang we het verbruik in balans houden met de (natuurlijke) aanwas, worden geen voorraden uitgeput en is de koolstofkringloop gesloten.

Een overzicht van de vele mogelijkheden en de opbrengsten hiervan zijn weergegeven in bijlage F. In deze paragraaf wordt in tabel een korte samenvatting gegeven van de informatie uit de bijlage.

Voor de verschillende vormen van duurzame energie is een gemiddelde energieopbrengst berekend. Voor de productie van styreen is 74,3 PJ toegevoerde energie nodig op basis van de huidige productieomvang van 2500 kton per jaar. Vervolgens is berekend welke consequenties de vervanging door duurzaam opgewekte energie heeft voor de verschillende vormen.

²³ Daarnaast wordt nog een deel van het styreenmonomeer omgezet in polystyreen. Dit kost nog eens 7,4 GJ/ton. Stel dat 5% van het styreenmonomeer wordt omgezet dan is hiervoor nog eens 0,9 PJ nodig. Het percentage dat wordt omgezet is ons niet bekend. Echter, de energie die hiervoor nodig is, zal ten opzichte van de energie die nodig is voor de productie van styreenmonomeer klein zijn. Om deze reden is deze niet meegenomen in verdere berekeningen.

Tabel 17 Benodigde hoeveelheden van verschillende soorten duurzame energie voor de productie van toegevoerde energie van styreen

Soort energie	Opbrengst (PJ/jaar)	Benodigd
Bio-energie	Zie Tabel 18	Zie Tabel 18
Windenergie	0,00684 per turbine	Bijna 11.000 moderne windturbines van 600 kW (oftewel: 600 kJ)
Zonne-energie	0,00936 per dak van een woning	Bijna 8.000 daken vol zonnepanelen nodig
Waterkracht	0,0972 per centrale	Ruim 760 waterkrachtcentrales van 10 MW (oftewel: 10 MJ)

Tabel 18 Benodigde hoeveelheden van verschillende vormen van bio-energie voor de productie van toegevoerde energie van styreen

Materiaal	Energie inhoud (MJ/ton)	Verwerkingsroute	Energie opbrengst (MJe/ton)	Benodigd aantal ton (Mton)
Hout (droog)	18000	Bijstook centrale	5940	12,5
		Houtverwerkende industrie	3600	20,6
Afval	10000	Verbranding	1656	44,9
GFT ²⁴ (nat)	3375	Vergisting	540	138
Stortgas	19000*	Vergisting	5,4**	13760***
Koolzaad (droog)	27600	Extractie	675****	-

* kJ/m³

** MJe/m³

*** m³

**** liter biodiesel/ton

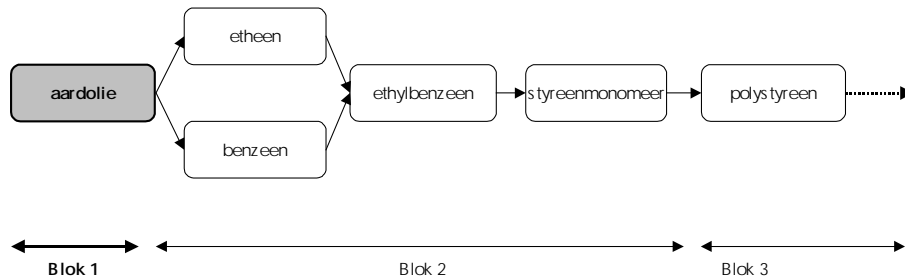
Voor het volledig duurzaam opwekken van de toegevoerde energie die nodig is voor de productie van polystyreen biedt biomassa de meeste perspectieven. De overige vormen van duurzame energie vragen grote investeringen of ruimtebeslag en lenen zich om die reden alleen voor maatwerk. Afhankelijk van bijvoorbeeld de praktische situatie op een industrieterrein kunnen de mogelijkheden voor wind-, water- of zonne-energie worden onderzocht. Op een groot terrein dat uit veiligheidsoverwegingen bijvoorbeeld niet bebouwd mag worden, kunnen misschien windturbines worden geplaatst. Of een grote fabriekshal die met het oog op zonnepanelen een gunstige ligging heeft, kan wellicht gebruikt worden voor het opwekken van zonne-energie.

²⁴ GFT = Groente-, Fruit- en Tuinafval.



7 De grondstofffase

Figuur 11 Productieketen van polystyreen. Centraal staat de grondstofffase.



Hierin is:

Blok 1 Grondstoffase

Blok 2 Productiefase

Blok 3 Productgebruiksfase

7.1 Op welke manier naar een meer duurzame grondstoffase?

Grondstoffen voor de productie van styreen zijn etheen en benzeen. In de huidige processen worden deze geproduceerd uit het stoomkraken van nafta. De grondstof die in de huidige chemische industrie voor nafta wordt gebruikt is aardolie, een fossiele grondstof.

Het gebruik van deze grondstof brengt grote emissies van CO₂ met zich mee, terwijl het bij fossiele grondstoffen lange tijd duurt voordat diezelfde hoeveelheid CO₂ weer wordt vastgelegd.

Het inzetten van alternatieve grondstoffen kan deze grondstoffase (zie figuur 11) verduurzamen.

Leeswijzer hoofdstuk 7

In dit hoofdstuk worden de mogelijkheden voor een duurzamer grondstoffase in kaart gebracht. De vervanging van aardolie door aardgas is het eerste onderwerp dat hierbij centraal staat (7.2), waarbij één van de conversiemethoden, oxidatieve koppeling, wordt uitgewerkt in 7.3. In 7.4 wordt gediscussieerd over de inzet van aardgas.

Het tweede onderwerp is biomassa als vervanger van aardolie (7.5). De mogelijkheden die biomassa kan bieden worden onder andere uitgewerkt in een voorbeeld van de pyrolysetechnologie (7.6). Tot slot wordt een discussie gevoerd over de mogelijkheden die de inzet van biomassa kan bieden in 7.7.

7.2 Aardgas

Nederland is afhankelijk van de import van aardolie. Jaarlijks wordt ongeveer 90 miljoen ton ruwe aardolie en olieproducten ingevoerd uit met name Noorwegen (30%), Saoedi-Arabië (25%), Verenigd Koninkrijk (14%), Koeweit (9%) en Iran (8%) [16]. In de jaren '70 importeerde Nederland aardolie uit met name de Arabische landen. In die tijd ontstond schaarste als gevolg van een boycot.

Van absolute schaarste is echter geen sprake. Uit onderzoek van o.a. CE [37] en DTO [4] blijkt dat het argument van *absolute schaarste* dat vaak wordt gebruikt niet terecht is. De hoeveelheid economisch winbare fossiele grondstoffen is sinds de jaren '70 niet afgenomen.

Een oplossing voor de *politieke* schaarste kan gevonden worden in het gebruik van aardgas als alternatieve grondstof en tevens als brandstof, omdat dit in Nederland wordt gewonnen. Voor het gebruik als grondstof zijn twee mogelijkheden: het benutten van methaan uit het aardgas en het toepassen van ethaan hieruit.

Methaan uit aardgas

Uit aardgas kan het methaan worden gebruikt voor de productie van etheen. Hiervoor zijn diverse routes mogelijk:

- Fischer-Trops synthese;
- methanol naar olifenen;
- oxidatieve koppeling van aardgas.

Deze laatste methode lijkt goede perspectieven te bieden voor de toekomst en zal daarom als voorbeeld verder worden uitgewerkt in paragraaf 7.3.

Ethaan uit aardgas

Ethaan kan worden omgezet in etheen door middel van pyrolyse bij hoge temperatuur. Deze methode wordt voornamelijk toegepast in de VS en het Midden-Oosten, omdat ethaan daar bij de olieproductie vrijkomt als bijproduct.

In Nederland kleeft een tweetal nadelen aan deze methode:

- het percentage ethaan in aardgas is relatief laag, waardoor scheiding van ethaan hieruit erg duur kan zijn;
- ethaan heeft in Nederland een grote waarde als brandstof. Toepassing als grondstof is daarom niet rendabel. Daarbij komt dat het duur is om te transporteren.

Deze situatie in Nederland zal in de toekomst niet snel veranderen, waardoor deze optie niet erg aantrekkelijk is.

7.3 Praktijkvoorbeeld: oxidatieve koppeling van aardgas

7.3.1 Het proces van oxidatieve koppeling

Aardgas is een natuurlijk voorkomende mix van voornamelijk lichte koolwaterstoffen. Hoofdbestanddeel van dit gas is methaan. Daarnaast kunnen andere gassen voorkomen, zoals ethaan, propaan, H_2S en CO_2 .

Ter indicatie is de samenstelling van het aardgas in Slochteren weergegeven in Tabel 19.

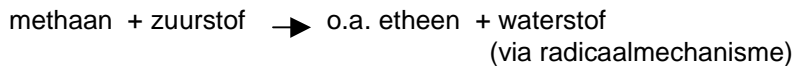
Tabel 19 Samenstelling van aardgas in Slochteren (volume %) (bron: [42])

CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	H_2S	CO_2	N_2
81,4	2,9	0,4	0,2	-	0,9	14,2

Methaan kan met zuurstof reageren tot etheen. Deze reactie wordt oxidatieve (methaan) koppeling genoemd.



Oxidatieve (methaan)koppeling



De zuurstof dient om de radicalen die ontstaan uit methaan af te vangen. De opbrengst van etheen kan worden vergroot door waterstof steeds weg te nemen. Het evenwicht van de reactie schuift hierdoor naar rechts, waardoor meer etheen ontstaat.

Bijproducten bij de reactie zijn: CO en CO₂. Deze zijn ongewenst, omdat ze de benodigde hoeveelheid zuurstof vergroten en de opbrengst van etheen verlagen.

Het proces wordt ook wel aangeduid als 'cogeneratieproces', omdat de vrijkomende reactiewarmte kan worden omgezet in hoge druk stoom en/of elektriciteit [30].

De reactie vindt, met behulp van katalysatoren, plaats bij atmosferische druk en een temperatuur van 750 – 900 °C.

Het cogeneratieproces kan binnen een bestaande kraker worden ingepast, waardoor deze alternatieve grondstof relatief gemakkelijk kan worden toegepast.

7.3.2 Energiebehoefte en milieueffecten

Ten opzichte van de gescheiden opwekking van etheen en stoom heeft het cogeneratieproces een 33% lager energieverbruik en een 40% lagere CO₂-emissie. Voor DSM betekent de inpassing van het cogeneratieproces, volgens onderzoek door Heijmans [30], een CO₂-emissiereductie van 55.000 ton per jaar.

Door recente ontwikkelingen op het gebied van nieuwe katalysatoren lijkt het mogelijk om CO₂ naast methaan als grondstof voor het cogeneratieproces te gebruiken. Hiermee is een nieuw cogeneratieproces ontworpen dat onder bepaalde voorwaarden geen CO₂-emissie geeft [30].

7.4 Discussie over inzet van aardgas

De ons bekende aardgasreserves zijn de laatste 25 jaar met een factor 4 toegenomen, waardoor grote hoeveelheden beschikbaar zijn. Het probleem is echter dat de meeste voorraden aardgas zich in (zeer) verlaten gebieden bevinden

Daarbij komt dat de chemische industrie op dit moment niet duurzaam is, omdat het tempo waarin de aardolie wordt omgezet in bijvoorbeeld kunststof (afval) en CO₂ vele malen hoger ligt dan dat waarin de natuur via CO₂ en biomassa opnieuw aardolie vormt. Het gebruik van aardgas lost dit probleem niet duurzaam op, omdat ook hier de omzetting in afval (veel) groter is dan de vastlegging.

7.5 Biomassa

7.5.1 Is biomassa de oplossing?

Een alternatieve grond- en brandstof waarbij de stofkringloop wel wordt gesloten is biomassa. In plaats van fossiele grondstoffen uit de lithosfeer is het mogelijk plantaardige grondstoffen te gebruiken uit de biosfeer. Stofkringlopen worden daardoor in relatief korte tijd gesloten en er ontstaat een duurzaam systeem. De vastlegging van koolstof in de lithosfeer duurt tienduizenden jaren, terwijl bij het gebruik van fossiele grondstoffen deze opgeslagen koolstof in zeer korte tijd vrijkomt. De vastlegging van koolstof in de biosfeer duurt, afhankelijk van het gewas, slechts één tot enkele jaren [4].

Biomassa kan als grondstof en als brandstof worden toegepast. De substitutie van fossiele grondstoffen door biomassa kan op verschillende manieren plaatsvinden. De ideale manier zou zijn als biomassa direct als voeding in de raffinaderijen kan worden gebruikt. Het voordeel daarvan zou zijn, dat grote investeringen voor nieuwe fabrieken voor de omzettingen van biomassa niet nodig zijn. De chemische industrie zou op die manier relatief gemakkelijk kunnen overschakelen op het gebruik van biomassa. Het probleem is echter dat biomassa niet geschikt is om direct als voeding te worden toegepast, omdat het een te hoog gehalte zuurstof heeft. Tevens bevat biomassa relatief veel verontreinigingen.

7.5.2 Biopolymeren

In de natuur zijn echter tal van verbindingen te vinden die, eventueel via chemische of enzymatische modificatie, uitermate geschikt zijn als monomeren. Hiermee kunnen polymeren met interessante eigenschappen worden gesynthetiseerd [19]. Biomassa, zoals aardappels of lignine, kan bijvoorbeeld direct worden omgezet in zogenaamde 'biopolymeren'. Deze wijze van produceren van zogenaamde bioplastics is in opkomst, maar staat nog in de kinderschoenen. Er heerst nog veel onduidelijkheid over de mogelijkheden en effecten op het milieu.

Op dit moment ontwikkelen zich steeds meer initiatieven op het gebied van biopolymeren. In Oosterhout wordt bijvoorbeeld een fabriek gebouwd van Rodenburg Bioplastic. Deze fabriek, met een capaciteit van 40.000 ton, gaat Solanyl produceren, een biopolymeer op basis van aardappelschillen. Solanyl is, in tegenstelling tot veel andere biopolymeren, plantaardig én afbreekbaar. Het wordt gemaakt uit het afval van fritesfabrieken en het valt, afhankelijk van de samenstelling na enkele maanden tot een jaar uit elkaar. En het belangrijkste is dat Rodenburg het voor fl. 3,50 (€ 1,13) per kilo denkt te kunnen produceren [20]. Daarmee wordt Solanyl het eerste biopolymeer dat in dezelfde prijsklasse valt als klassieke kunststoffen.

Een ander voorbeeld van een biopolymeer is Paragon, een biopolymeer op basis van zetmeel dat op beperkte schaal al jaren wordt geproduceerd door Avebe (zie Figuur 12).



Figuur 12 From potatoes to Paragon (bron: [23])



Een niet-giftig alternatief voor harsen (epoxy en polyurethaan) wordt geproduceerd door Bio Tool onder de naam EcoMould.

Eastman Chemical heeft een paar jaar geleden een niet plantaardige maar wel afbreekbare polyesterfilm op de markt gebracht. Deze Easter Bio is in beperkte hoeveelheden te koop. Op dit moment bestaan grote plannen voor uitbreiding van de capaciteit. In Nebraska wordt momenteel een installatie gebouwd met een capaciteit van 140.000 ton/jaar [20].

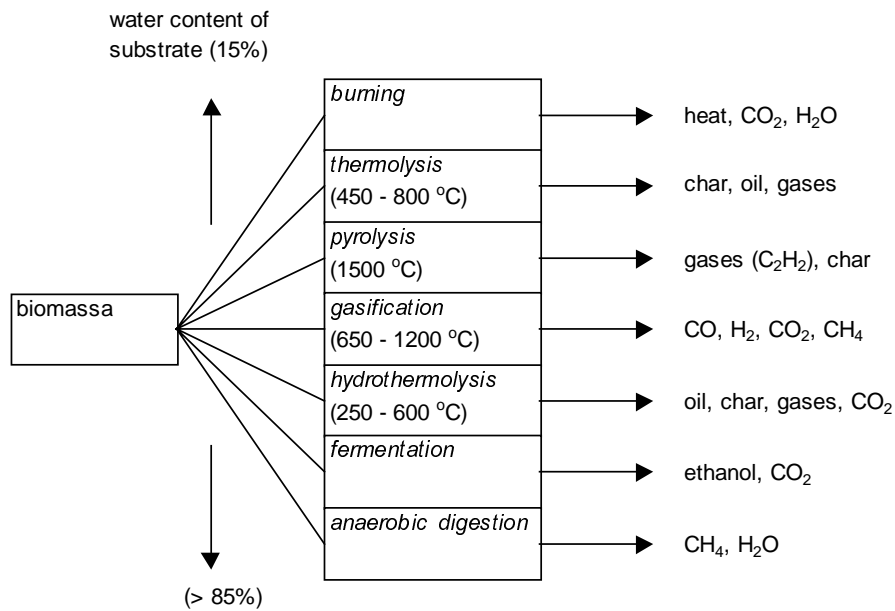
Een laatste voorbeeld is de biopolymeer van Cargill Dow. Dit draagt de naam NatureWorks en is gebaseerd op melkzuur, dat gewonnen wordt uit maïs. Dit product lijkt zeer sterk op polystyreen [21].

7.5.3 Biomassa conversietechnologieën

Raffinaderijprocessen zijn (nog) niet berekend op direct gebruik van biomassa als voeding. Met name de vorming van water leidt hierbij tot grote energie- en opbrengstverliezen.

Om als voeding te kunnen dienen zal biomassa eerst thermo- of biochemisch omgezet moeten worden. Biomassa kan hiermee langs verschillende wegen tot verschillende producten worden omgezet. Dit is weergegeven in Figuur 13.

Figuur 13 Biomassa conversie technologieën (bron: [3])



Bij de thermochemische processen – verbranding, thermolyse, pyrolyse, vergassing en hydrothermolysie – kunnen in principe alle typen biomassa worden toegepast. Bij biochemische kunnen vaak slechts bepaalde componenten van biomassa omgezet worden zoals zetmeel en suiker. Deze biochemische processen omvatten de fermentatie tot alcohol en de omzetting met behulp van micro-organismen tot biogas (een mengsel van methaan en kooldioxide).

Globaal kan gesteld worden dat relatief droge producten, zoals tarwe (korrel en stro), hennep, hout en riet het meest geschikt zijn voor verbranding, vergassing, pyrolyse en liquefractie. Natte producten, zoals gras, aardpeer, suikerbieten en aardappelen zijn zeer geschikt voor vergisting.

De meest veelbelovende biomassa omzettingstechnieken zijn de thermochemische processen: verbranding, vergassing en pyrolyse. Deze verschillen van elkaar wat betreft de hoeveelheid lucht die aan de biomassa wordt toegevoerd. Bij verbranding wordt een overmaat lucht toegevoerd, bij pyrolyse is dat geen tot slechts een geringe hoeveelheid, terwijl de hoeveelheid die bij vergassing wordt gebruikt hier tussenin ligt.

De mate van toevoer van zuurstof is bepalend voor het verloop van het proces en de samenstelling van het eindproduct.

Voor het gebruik van biomassa als feedstock zijn vergassing en pyrolyse de meest veelbelovende omzettingroutes.

Vergassing van biomassa levert synthesegas. Hiermee kan met gebruikmaking van bekende technologieën eerst methanol worden gemaakt en vervolgens diverse lagere olifenen. Het maken van producten uit synthesegas wordt ook wel C1-chemie genoemd.

Een andere mogelijkheid is het HTU-proces: Hydrothermal Upgrading van biomassa naar bio-crude. Deze olie kan op dezelfde manier worden toegepast als aardolie [3].

Door middel van pyrolyse van biomassa ontstaat eveneens bio-olie [37]²⁵. In dit onderzoek is gekozen om het pyrolyseproces verder uit te werken (zie 7.3), omdat de technologie op zich relatief ver ontwikkeld is [17]. Daarbij komt dat pyrolyse de enige technologie is die transporteerbare energiedragers produceert die gemakkelijk opgeslagen kunnen worden [18]. Verscheppen van de bio-olie is om deze reden een goede mogelijkheid. Ook kan bio-olie eenvoudig worden opgeslagen tot het moment dat veel energie nodig is, bijvoorbeeld in een koude periode in de winter. Daarnaast kan volgens de Biomass Technology Group gedacht worden aan kleinschalige productie ('on farm') van bio-olie in combinatie met elektriciteitsproductie op grotere schaal nabij steden [18].

Naast de inzet van biomassa als grondstof kan het tevens toepassing vinden als brandstof. Het gebruik van biomassa als brandstof is al verder ontwikkeld dan toepassing als feedstock. Wij verwijzen u hierbij graag naar paragraaf 4 van hoofdstuk 6.

7.6 Praktijkvoorbeeld: pyrolyse van biomassa

7.6.1 Het proces van pyrolyse van biomassa

Het pyrolyseproces is een thermische degradatie in afwezigheid van zuurstof of met een zodanige hoeveelheid zuurstof dat vergassing niet voorkomt. Het proces vindt plaats onder relatief lage temperaturen (500 – 800 °C) ten opzichte van vergassing. De drie producten zijn gas, vloeistof en vast kool. Deze kool of roet is het koolstof dat bij verbranding als CO₂ zou bijdragen aan het broeikaseffect.

De verhoudingen waarin de producten voorkomen is afhankelijk van welk type pyrolyse gebruikt wordt en de proces omstandigheden.

De producten kunnen verder worden verwerkt tot eindproducten. Een overzicht van de mogelijkheden is weergegeven in Tabel 20.

Hierbij wordt met secondary processing de eerstvolgende stap na pyrolyse bedoeld, en met tertiary processing de stap daarna. Het finaal product is het eindproduct dat resulteert na de genoemde stappen.

²⁵ Bio-olie ontstaat door snelle afkoeling van pyrolysedampen. Voor verdere uitleg verwijzen wij naar 7.6.1.

Tabel 20 The status of primary, secondary and tertiary processing of pyrolysis products. Indicated in bold are the most promising options on a short time scale (bron: [29])

<i>Primary product</i>	<i>Secondary Processing</i>	<i>Secondary product</i>	<i>Tertiary Processing</i>	<i>Final product</i>
Liquid	Transport⁵	Fuel	Combustion⁵	Heat/steam/electricity
	Combustion ²	Heat/steam Elektricity	Steam turbine ⁵	Electricity Electricity
	Stabilisation ¹	Stabilised oil	Engine/turbine ¹	Diesel/gasoline
	Upgrading ¹	Hydrocarbons	Refining ²	Chemicals
	Extraction ^{1,5}	Chemicals	Refining ^{1,5}	Chemicals
	Conversion ³	Chemicals	Refining ^{1,2}	Chemicals
	Conversion ¹	Gas	Refining ^{1,2}	Electricity
Gas	Conversion ²	Gas	Fuel cell ¹	
	Combustion⁵	Heat/steam	Steam turbine⁵	Electricity
	Engine/turbine ³ Fuel cell ¹	Electricity Electricity		
Char	Transport⁵	Fuel	Combustion⁵	Heat/steam/electricity
	Combustion ⁵	Heat/power		
	Slurrying ²	Liquid fuel	Combustion ³	Heat/power

1 Conceptual

2 Laboratory

3 Pilot

4 Demonstration

5 Commercial

Pyrolyse is aantrekkelijk, omdat vast afval en biomassa op deze manier relatief eenvoudig omgezet kunnen worden in bijvoorbeeld vloeistoffen. Deze vloeistoffen hebben als voordeel dat ze makkelijk getransporteerd en in voorraad gehouden kunnen worden. Tevens zijn ze makkelijk te verbranden en flexibel in producten om te zetten en te verkopen [17, 29].

Het pyrolyseproces op zich wordt al eeuwen toegepast voor de productie van houtskool [29, 38]. Als hout verhit wordt in afwezigheid van zuurstof vallen de langgerekte houtmoleculen uiteen in kleinere exemplaren. Daarnaast komen pyrolysedampen vrij. Door deze damp snel af te koelen, vormt zich een bruine vloeistof: bio-olie.

Productie van houtskool vindt plaats door relatief langzame reacties bij lage temperaturen, waardoor nauwelijks pyrolysedampen ontstaan. Door veranderingen in de snelheid van verwarming en de reactietemperatuur (flash of fast pyrolysis) kunnen hoge opbrengsten van pyrolysedampen en dus van bio-olie worden verkregen. BTG gebruikt hiervoor houtdeeltjes tot 5 millimeter die zo snel mogelijk worden opgewarmd. Op deze manier vormt zich veel damp en weinig kool [38].

De karakteristieken van deze bio-olie zijn weergegeven in Tabel 21.



Tabel 21 Karakteristieken van bio-olie (bron: [18])

Karakteristiek	Waarde	Eenheid
Volumetrische energie	20	GJ/m ³
Dichtheid	1200	kg/m ³
Viscositeit bij 40 °C	53	Mm ² /s
Zuurgraad	2.5	PH
Olie water inhoud	18	Gew%
As inhoud	0.02	Gew%

In de pyrolysevloeistoffen zijn vele chemische componenten aanwezig. Door de potentieel veel hogere waarde van speciale chemicaliën in vergelijking met brandstoffen kan in de toekomst zelfs de winning van kleine concentraties economisch haalbaar worden. Immers, als deze speciale componenten eruit gehaald worden kunnen ze als spin off extra opbrengst genereren. High Temperature flash pyrolysis geeft bijvoorbeeld etheen en propaan, maar de concentraties zijn op dit moment nog zo laag dat de winning niet economisch rendabel is [17].

Naast deze vloeistoffen ontstaat ook pyrolysegas. Dit gas heeft een stookwaarde van 6-12 MJ/m³. Van Daatselaar geeft in zijn rapport aan dat het gas dat vrijkomt bij de pyrolyseprocessen voornamelijk wordt toegepast om de voeding te drogen, en voor proces verwarming en/of elektriciteitsproductie [17].

Uit telefonische contacten, onder andere met BTG [41], en Tabel 20 blijkt het gebruik van biomassa als feedstock in de chemische industrie nog in de kinderschoenen te staan. Getallen over benodigde hoeveelheden voor bijvoorbeeld de huidige productie van styreen zijn om deze reden niet bekend. Onderzoeken in deze richting hebben nog geen openbare resultaten opgeleverd [41].

Energiebehoefte en milieueffecten

Pyrolyse van biomassa biedt voordelen ten opzichte van bijvoorbeeld vergassing. De temperatuur is hierbij veel hoger, waardoor allerlei milieuvriendelijke stoffen in het gas komen die eerst verwijderd moeten worden. De productie van bio-olie daarentegen is een soort destillatieproces en dus meteen een reinigingsstap. Verontreinigingen door bijvoorbeeld zware metalen en alkali's komen in de as en niet in de olie terecht [29, 38].

Bij het proces komen echter wel emissies naar de lucht vrij. Dit betreft voornamelijk CO₂, H₂O, CO, NO_x en kleine hoeveelheden organische componenten die gevormd worden door de decompositie van aerosolen. Verbranding is de meest eenvoudige en meest efficiënte manier om de meeste van deze bijproducten te verwijderen [29]. Vanwege het kleine aantal industriële units die op dit moment werken met het pyrolyseproces is er verder nog weinig bekend van dit soort emissies.

Bij het pyrolyseproces komt ook water vrij dat veel organische stoffen bevat. Dit afvalprobleem kan opgelost worden door deze organische stoffen te scheiden uit het water.

Prins [38] schat het rendement van het pyrolyseproces tussen 30 en 35%. Het is moeilijk een schatting te geven, omdat dit sterk afhankelijk is van de grootte van de elektriciteitscentrale. Het rendement ligt waarschijnlijk tussen het rendement van verbranding (hooguit 20%) en dat van vergassing (35-40%) in.

7.7 Discussie over inzet van biomassa

7.7.1 Voldoende areaal voor de verschillende toepassingen?

De vraag is hoeveel biomassa de aarde kan produceren in de toekomst voor de wereldproductie voedsel, energie en/of organische grondstoffen. Van Bekkum geeft op basis van een scenario voor de situatie in 2040 een illustratieve berekening [3]. Deze is weergegeven in Tabel 22.

Tabel 22 Illustratieve berekening van de hoeveelheden beschikbare biomassa in 2040

	Uitgangsgegevens		Oppervlakte	Biomassa
Wereldbevolking	$10 \cdot 10^9$			
Beschikbare landbouwgrond			$2,8 \cdot 10^9$ ha	
Benodigd voor voedsel ²⁶	Graan ²⁷	$159 \cdot 10^6$ ha		
	Melk en vlees	$495 \cdot 10^6$ ha		
	Overig	$833 \cdot 10^6$ ha		
	Totaal		$2 \cdot 10^9$ ha	
Nog beschikbaar			$0,8 \cdot 10^9$ ha	
Dit levert	50 ton biomassa/ha			$40 \cdot 10^9$ ton/a
Bossen kunnen leveren				$4 \cdot 10^9$ ton/a
Verzamelbare afvalstromen leveren				$5 \cdot 10^9$ ton/a
Totale hoeveelheid biomassa beschikbaar				$50 \cdot 10^9$ ton/a
Nodig voor organische grondstoffen ²⁸	$1000 \cdot 10^6$ ton/a			$5 \cdot 10^9$ ton/a

Uit de berekening van Van Bekkum blijkt dus dat ruim voldoende areaal beschikbaar kan zijn *in de wereld* ten behoeve van de wereldproductie van organische grondstoffen.

7.7.2 Voldoende areaal voor de productie van styreen?

Bij een omschakeling van de economie op vernieuwbare grondstoffen rijst de vraag of dit niet zal leiden tot grote milieuschade, gegeven een belangrijke mate van dematerialisatie van de economie. Overexploitatie van natuurlijke hulpbronnen (bodem, water) en levende natuur mag natuurlijk niet optreden.

Illustratief hiervoor is de berekening van het benodigd areaal biomassa ten behoeve van de productie styreen bij de huidige productieomvang (zie kader).

²⁶ Aanname: standaard dagelijks dieet bestaat uit 0,48 kg graan/cap; 0,75 kg melk en 0,08 kg vlees. Daarnaast is aangenomen dat het landbouwsysteem een rendement heeft van 75%.

²⁷ Aanname: maximale opbrengst/ha = 22 ton/ha jr, waarvan 50% graan en 50% stro.

²⁸ Aanname: conversierendement = 20%.



Faaij e.a. [45] hebben berekend welk areaal land nodig is als biomassa wereldwijd wordt gebruikt als grondstof voor de productie van verschillende producten.

Voor de petrochemie levert dit het volgende beeld op.

Huidig materiaalgebruik	200	<i>Mton/jr</i>
Marktaandeel biomassa	10 – 100	%
Ton biomassa/ton product ¹⁾	2.5	
Totaal biomassa	50 – 500	<i>Mton/jr</i>
Biomassa opbrengst ²⁾	10	<i>droge ton/ha</i>
Landbeslag (wereldwijd)	5 – 50	<i>Mha</i>

¹⁾ Ton/ton biomassaproduct geeft aan hoeveel biomassa nodig is voor het maken van een ton gewenst product. Voor de productie van (petro)chemicaliën is met name sprake van energetische verliezen in het productieproces.

²⁾ De productiviteit van biomassa is afhankelijk van de materiaaltoepassing. Voor chemicaliën kan gebruik worden gemaakt van ruwe biomassa. Dit in tegenstelling tot bijvoorbeeld katoen. Slechts een klein deel van de gewassen is hiervoor geschikt.

Voor de productie van styreen kan eenzelfde berekening worden gemaakt. Hierbij is uitgegaan van de huidige productie van styreen in Nederland van ongeveer 2500 kton per jaar.

Huidige productie	2,5	<i>Mton/jr</i>
Marktaandeel biomassa	10 – 100	%
Ton biomassa/ton product ¹⁾	2.5	
Totaal biomassa	0,63 – 6,25	<i>Mton/jr</i>
Biomassa opbrengst ²⁾	10	<i>droge ton/ha</i>
Landbeslag	0,063 – 0,63	<i>Mha</i>

Het landoppervlak van Nederland bedraagt 3,4 miljoen hectare.
Dit betekent dat voor de huidige productie van styreen 1,9 tot 19 % van het oppervlak in Nederland nodig is om biomassa als grondstof te kunnen gebruiken!

7.7.3 Biomassa als grondstof of als brandstof?

Over wijze van inzet van biomassa in de chemische industrie kan worden gediscussieerd: is het beter biomassa te gebruiken als energiebron of kan het beter worden toegepast als grondstof?

Biomassa als grondstof

Ten aanzien van petrochemische grondstoffen is het volgens het Interdepartementaal Onderzoeksprogramma Duurzame Technologische Ontwikkeling (IOP/DTO) mogelijk om met de ontwikkeling van bepaalde typen technologieën in 2040 voor 100% over te stappen op de vernieuwbare bronnen biomassa en zonne-energie. Daarbij gaat men uit van een verdubbeling van de wereldbevolking en een gemiddelde stijging van het energieverbruik per hoofd met circa 30% [3].

Theoretisch gezien kan de petrochemie dus volledig worden gebaseerd op biomassa. Deze toepassing staat echter nog in de kinderschoenen. Rendementen van omzettingsprocessen van biomassa wegen op dit moment niet op tegen het rendement dat gehaald wordt op de omzetting van aardolie. Op dit moment brengt de inzet van biomassa als grondstof dus veel kosten met zich mee als gevolg van lage rendementen en energieverliezen.

Biomassa als brandstof

Volgens onderzoek van Faaij e.a. [45] kan de potentiële bovengrens van de bijdrage van biomassa aan de wereldenergievoorziening op langere termijn zeer hoog liggen: een technisch (niet economisch) potentieel van 1100 EJ. Hiervan is het grootste deel afkomstig van energieteelt op *de huidige* landbouwgronden die daartoe aanmerkelijk intensiever moeten worden benut, met name in ontwikkelingslanden [45]. Vergeleken met het huidige wereldenergiegebruik van ruim 400 EJ is dit theoretisch potentieel dus zeer groot.

Het rapport Nationale Energie Verkenningen 1995 – 2020 [15] geeft aan dat het voor de Nederlandse situatie zeker interessant is naar energieteelt te kijken, omdat het maximum van 'bestaand' biomassa potentieel beperkt is. Verwacht wordt dat in 2020 dit potentieel volledig gerealiseerd zal zijn. Het gaat daarbij om ca. 70 PJ wat aan fossiele brandstof uitgespaard kan worden op jaarbasis.

Energieteelt biedt goede mogelijkheden het potentieel uit te breiden. Daarbij gaat het veelal om vervanging van fossiele brandstoffen in kolengestookte centrales. Door ECN is een studie gedaan naar de bijdrage die energieteelt kan leveren aan het aandeel duurzame energie in 2020. In deze studie wordt gesteld dat, mede gelet op het aspect duurzaamheid, uiteindelijk maximaal ca. 7 procent van het huidige primaire energiegebruik door binnenlandse energieteelt gedekt kan worden. Dit is ca. 200 PJ primaire energie uit biomassa. Daar echter verwacht wordt dat de prijzen voor import van biomassa lager zullen zijn dan de prijzen voor biomassa uit binnenlandse teelt, wordt in het algemeen aangenomen dat tot 2020 vooral de import van biomassa uit energieteelt een realistische optie is.

Welke inzet heeft prioriteit?

Biomassa kan dus zowel ingezet worden als grondstof en als brandstof.

De vraag is nu wat prioriteit krijgt.

De koolstof in de biomassa is een noodzakelijke voorwaarde voor het gebruik als grondstof in de chemie. Bij de inzet als brandstof is hiervan geen sprake. Op basis van deze constatering zou inzet als grondstof de voorkeur hebben.

De inzet van biomassa als brandstof is echter goedkoper en ten opzichte van de huidige brandstoffen CO₂-neutraal. Daarnaast zijn de rendementen van omzettingsprocessen van biomassa nog relatief laag en treden veel energieverliezen op.

De conclusie kan zijn dat inzet als brandstof dan toch de voorkeur verdient boven inzet van biomassa als grondstof op basis van voornamelijk economische gronden.

Is biomassa eigenlijk een duurzame energiebron?

Het gebruik van biomassa als energiebron blijkt niet altijd duurzaam te zijn.

Uit onderzoek van Reijnders [40] blijkt verbranding van biomassa, in zijn onderzoek staat hout centraal, niet altijd CO₂-neutraal mag worden genoemd.

Hout dat afkomstig is van Noord Scandinavische bossen of bossen op ontwaterd veen in Nederland fungeren tijdens de groei van het bos veelal niet als netto-sink²⁹ voor kooldioxide. Kap kan ertoe leiden dat bossen gedurende een aantal jaren een netto bron van koolstofhoudende gassen worden. Na kap komen door respiratie en eventueel anaëroobe omzetting grote hoeveelheden koolstof houdende gassen vrij. Een hout verstokende centrale voegt daar vervolgens nog CO₂ aan toe.

²⁹ Een sink is een bos waarin geëmitteerde CO₂ wordt vastgelegd. Het fungeert dus als een soort opslagplaats voor CO₂.



Voor een onderbouwing van deze resultaten verwijzen wij naar het artikel van Reijnders: [40].

De gevolgen die houtverbranding heeft, kan om deze redenen niet CO₂ neutraal worden genoemd. Voor klimaatbescherming is het beter het bos ongestoord te laten en voor de elektriciteitsvoorziening gebruik te maken van fotovoltaïsche- en windenergie. In dat geval gaat de netto vastlegging van CO₂ gewoon verder. De CO₂-emissie blijft dan nagenoeg beperkt tot die verbonden met het gebruik van fossiele brandstoffen tijdens de levensketen van zonnecellen en windturbines. Deze ligt als regel onder de 10% van de energieopbrengst van zonnecellen en windturbines [40].



8 Conclusies over de mogelijkheden voor een duurzame productie

8.1 Inleiding

De algemene doelstelling van het onderzoek is een verkenning van de mogelijkheden om te komen tot een meer duurzame chemische industrie. In de beperkte tijd die beschikbaar was voor dit onderzoek hebben we gekozen voor de uitwerking van een casus om deze mogelijkheden in beeld te brengen. Daarnaast hebben we de uitkomsten geëxtrapoleerd naar de chemische industrie in het algemeen.

Uitgangspunt van de verkenning was de definitie van 'een duurzame chemische industrie'.

Geconcludeerd is dat duurzaamheid op twee manieren kan worden opgevat:

- 1 *Duurzaamheid door optimalisatie*
De huidige productiewijze en producten zijn hierbij het uitgangspunt.
- 2 *Fundamentele duurzaamheid*
Uitgangspunt is het sluiten van kringlopen.

Om te komen tot een fundamenteel duurzame chemische industrie kunnen deze routes naast elkaar worden gevolgd. Verduurzamen van de productieketen is een noodzakelijke eerste aanzet tot duurzaamheid. In een aantal gevallen kan deze optimalisatie misschien voldoende zijn om te kunnen spreken van een duurzame chemie.

Daarnaast zijn de mogelijkheden voor alternatieve grondstoffen en processen in kaart gebracht met de daarbij behorende voor- en nadelen.

Leeswijzer

In dit hoofdstuk worden de conclusies uit het onderzoek weergegeven. In elke paragraaf staat één productiefase centraal. Voor elke productiefase worden casus-specifieke conclusies getrokken. Daarnaast wordt geprobeerd deze conclusies te extrapoleren naar de chemische industrie in het algemeen.

In 8.2 worden de mogelijkheden voor een duurzame productgebruiksfase geschetst. De paragrafen 8.3 en 8.4 geven respectievelijk deze mogelijkheden weer voor de productie- en grondstoffase.

8.2 Mogelijkheden duurzame productgebruiksfase

8.2.1 Conclusies productie van polystyreen

De productie van polystyreen groeit nog altijd en de verwachting is dat dit ook in de toekomst zo zal zijn.

Als we er vanuit gaan dat deze productie noodzakelijk is dan biedt het vervangen van polystyreen door natuurlijke materialen soms mogelijkheden in het kader van duurzaamheid. Een voorbeeld hiervan is de vervanging van EPS door karton als buffermateriaal zoals dit is gebeurd bij de productdivisie DAP van Philips. De vraag is hierbij alleen of dit milieuwinst oplevert. Dit is nooit bewezen.

Een andere mogelijkheid is de ontwikkeling van biopolymeren, bijvoorbeeld Solanyl. Dit soort polymeren is gebaseerd op plantaardige grondstoffen, is afbreekbaar en heeft om deze redenen een lagere milieubelasting.

Herontwerp van producten kan in het geval van polystyreen ook een oplossing zijn. Het product NatureWorks bijvoorbeeld is gebaseerd op zetmeel uit maïs en lijkt perfect op het gangbare polystyreen.

Wat betreft de mogelijkheden voor recycling gelden voor polystyreen dezelfde conclusies als voor kunststoffen in het algemeen. Hiervoor verwijzen wij u dan ook graag naar 8.2.2.

De mogelijkheid van storten is voor alle kunststoffen vanwege een verbod uitgesloten.

Verbranden biedt voor alle kunststoffen goede perspectieven.

Specifiek voor de verbranding van polystyreen is berekend welke CO₂-emissie wordt vermeden³⁰ door deze kunststof te verbranden.

Tabel 23 Berekening van de netto CO₂-emissie bij verbranding van polystyreen

Proces	Energieopbrengst (MJ/kg)	CO ₂ -emissie (kg)	CO ₂ -emissie / energieopbrengst (g CO ₂ / MJ)
Verbranding van kolen	24,4	2,28	93
Verbranding van polystyreen	39,6	2	51
Verschil tussen processen			42

8.2.2 Conclusies chemische industrie algemeen

Recycling?

Lange tijd werd gedacht dat materiaalrecycling de meest gunstige manier was om afval te verwerken. Het schoonmaken van gemengde stromen, het scheiden van de verschillende soorten plastic en vervolgens het omsmelten en regranuleren werd gezien als de beste oplossing vanuit milieu oogpunt.

In het Convenant Verpakkingen staat bijvoorbeeld nog steeds een hergebruiksdoelstelling voor (huishoudelijk) kunststofafval.

Voor een zeer klein deel van het kunststofafval is dit inderdaad het geval. Hergebruik van plastic spaart aanzienlijke hoeveelheden CO₂ uit (meer dan bij bijvoorbeeld inzet als secundaire brandstof [32]). De mogelijkheden voor reiniging en hergebruik zijn echter uit hygiënische overwegingen (zeer) beperkt, waardoor voor het grootste deel van het kunststofafval deze route niet mogelijk is.

Voor de productie van staal en aluminium geldt bijvoorbeeld wél dat minder milieubelasting optreedt als recycling wordt toegepast. Als een product van staal of aluminium in de afvalfase terecht komt, is er maar één grootschalige route voor hergebruik: recycling naar nieuw staal of aluminium. Andere mogelijkheden zijn er niet: staal is niet om te zetten in energie en kan ook niet op grootschalige wijze gebruikt worden als grondstof voor andere nuttige producten [5].

³⁰ De verbranding van PS levert energie. Deze energie hoeft dus niet opgewekt te worden door middel van fossiele grondstoffen en resulteert dus in een *vermeden CO₂ emissie*.



Recycling is moeilijk

Voor kunststoffen is deze situatie wezenlijk anders. Dit is een gevolg van het feit dat in de loop der tijd vele verschillende soorten plastic zijn ontwikkeld voor vele verschillende en vaak zeer specifieke toepassingen. Een voorbeeld is polyetheen: een type dat geschikt is voor het maken van een krat is ongeschikt voor een gaspijp, terwijl een gaspijp uit krattenmateriaal niet voldoet aan de gestelde veiligheidseisen. Een krat is niet te maken met een pijptype en om een folieproductieproces goed te laten verlopen zijn weer heel andere typen nodig. Met deze drie PE grades door elkaar gemengd, kan men dus weinig beginnen, terwijl het praktisch scheiden van grades onmogelijk is [5].

Hiernaast moet rekening worden gehouden met het feit dat moderne kunststoffen vaak zeer subtiel in elkaar zitten en uit evenveel componenten bestaan als moderne metaallegeringen.

Vaak wordt door voorstanders van materiaalrecycling naar voren gebracht dat de industrie maar minder grades en polymeer typen moet gaan maken. Een kritisch onderzoek naar de noodzaak van de vele verschillende soorten is in onze ogen inderdaad belangrijk vanuit het oogpunt van 'productie naar behoefte'.

Toch betekent sanering van het aantal typen niet dat materiaalrecycling dan wel een mogelijkheid is. Gezien de veelheid van toepassingen en verwerkingstechnieken zullen waarschijnlijk altijd honderden typen en grades overblijven. Dit zijn er nog altijd te veel voor een eenvoudige materiaalrecycling op grote schaal [5].

Recycling versus verbranding

Voor kunststofafval van niet huishoudens is uit verschillende studies duidelijk dat afscheiding en mechanische recycling de voorkeur verdienen.

Voor kunststofafval uit huishoudens geldt dat het CO₂-netto resultaat van maximaal recycelen vrijwel gelijk is aan het maximaal inzetten als brandstof.

Gewenste volgorde verwerkingsmogelijkheden

Op basis van de voorgaande constatering is in het algemeen idealiter het volgende gewenst:

- a Keuzes tussen verschillende materialen maken op grond van hun milieubronnen en -kosten. Deze zijn afhankelijk van de mate van kringloopsluiting die voor de verschillende materialen mogelijk is.
- b Kunststofgebruik optimaliseren: met zo weinig mogelijk materiaal in een zo groot mogelijke behoefte voorzien.
- c Opeenhoping van CO₂ in de atmosfeer voorkomen en grondstofgebruik beperken door kunststofafval te recycelen. Deze recycling zal dan vooral lopen via chemische afbraak tot laagmoleculaire bouwstoffen.
- d Opeenhoping van onverwerkbaar kunststofafval voorkomen door (voorlopig) verbranding met optimale terugwinning van energie.

8.3 Mogelijkheden duurzame productiefase

8.3.1 Conclusies productie van polystyreen

Optimalisatie

Naar de mogelijkheden voor optimalisatie van de processen is niet specifiek voor de productie van polystyreen gekeken. Algemene conclusies op dit gebied zijn weergegeven in 8.3.2.

Alternatieve processen

Een duurzame productiefase door middel van alternatieve productieprocessen voor polystyreen op basis van de huidige grondstoffen zijn ons niet bekend. Dit houdt in dat wij in het bestek van dit onderzoek geen alternatieve productieprocessen zijn tegengekomen die uitgaande van de standaard grondstoffen vergelijkbare styreenkwaliteit maakt.

Als alternatieve grondstoffen worden toegepast, zoals aardgas of biomassa, kunnen wel alternatieve processen worden ingezet, waardoor mogelijk milieuvoordeel kan worden behaald. De mogelijkheden hiervan zijn verder uitgewerkt in hoofdstuk 7. De conclusies hieruit zijn weergegeven in 8.4.

Duurzame toegevoerde energie

De mogelijkheden voor een duurzamer productiefase voor polystyreen liggen vooral op het gebied van de toegevoerde energie. Deze energie zou duurzaam kunnen worden opgewekt.

Voor het volledig duurzaam opwekken van de toegevoerde energie die nodig is voor de productie van polystyreen biedt biomassa de meeste perspectieven. De overige vormen van duurzame energie vragen grote investeringen of ruimtebeslag en lenen zich om die reden alleen voor maatwerk. Afhankelijk van bijvoorbeeld de praktische situatie op een industrieterrein kunnen de mogelijkheden voor wind-, water- of zonne-energie worden onderzocht. Op een groot terrein dat uit veiligheidsoverwegingen bijvoorbeeld niet bebouwd mag worden, kunnen misschien windturbines worden geplaatst. Of een grote fabriekshal die met het oog op zonnepanelen een gunstige ligging heeft, kan wellicht gebruikt worden voor het opwekken van zonne-energie.

Deze vormen van duurzame energie staan echter nog aan het begin van hun ontwikkeling. Wij verwachten om die reden dat op langere termijn het rendement hieruit groter zal zijn, waardoor deze vormen concurrerend worden met bijvoorbeeld energie uit biomassa.

8.3.2 Conclusies chemische industrie algemeen

Optimalisatie

Optimalisatie van processen wordt al op relatief grote schaal toegepast door middel van cascadering en pinchtechnologie. Deze vormen van optimalisatie blijven ook in de toekomst belangrijk, omdat deze zowel milieuwinst als kostenbesparingen opleveren.

Alternatieve processen

De mogelijkheden voor de inzet van alternatieve processen zijn per productieproces verschillend. Hieraan is in dit onderzoek geen verdere aandacht besteed.



Duurzame toegevoerde energie

Voor kunststoffen in het algemeen geldt dat de processen zeer specifiek zijn en veel productiestappen vereisen. In iedere productiestap wordt energie toegevoerd. Hierdoor wordt relatief steeds meer toegevoerde energie gebruikt ten opzichte van feedstock energie.

Om deze reden gelden voor kunststoffen in het algemeen dezelfde conclusies als voor polystyreen in het bijzonder. De mogelijkheden voor een duurzamer productiefase liggen dus met name op het gebied van duurzaam opgewekte toegevoerde energie.

8.4 Mogelijkheden voor een duurzame grondstoffase

8.4.1 Conclusies productie polystyreen

Aardgas

Specifiek voor de productie van etheen, een van de belangrijkste grondstoffen voor polystyreen, kan gebruik worden gemaakt van aardgas. Hieruit kan het methaan of ethaan worden benut, bijvoorbeeld door middel van het proces van oxidatieve methaankoppeling.

Zowel voor de productie van polystyreen als voor kunststoffen in het algemeen geldt dat het toepassen van aardgas geen duurzame oplossing is. Zie hiervoor 8.4.2.

Biomassa

De vervanging van aardolie door biomassa biedt zowel voor de productie van polystyreen als voor die van kunststoffen in het algemeen goede perspectieven.

Biomassa kan direct gebruikt worden. Een voorbeeld hiervan is het product NatureWorks dat sterk lijkt op polystyreen. Daarnaast biedt biomassa vele mogelijkheden na omzetting, bijvoorbeeld door middel van pyrolyse.

De conclusies hierover zijn weergegeven in 8.4.2.

Discussie

De vraag is of er voldoende areaal beschikbaar is in Nederland om de huidige productie van polystyreen geheel te baseren op biomassa.

Uit berekeningen blijkt dat 1,9 tot 19% van het totale oppervlak in Nederland nodig zou zijn!

8.4.2 Conclusies chemische industrie algemeen

Aardgas

De vervanging van aardolie door aardgas is geen duurzame oplossing. De snelheid waarmee aardgas wordt omgezet in kunststof(afval) en CO₂ ligt, net als bij aardolie, vele malen hoger dan die waarin de natuur via CO₂ en biomassa opnieuw aardgas vormt.

Biomassa

De vervanging van aardolie door biomassa biedt wél perspectieven³¹.

Uit biomassa kunnen direct biopolymeren worden geproduceerd die de huidige kunststoffen (op basis van aardolie) kunnen vervangen. Hierbij kunnen we onderscheid maken tussen bioplastics die sterk lijken op de huidige plastics en bioplastics met geheel eigen karakteristieken.

Op dit moment worden veel initiatieven ontwikkeld op dit gebied.

Biomassa kan niet direct als voeding worden gebruikt in raffinaderijprocessen met name vanwege de grote energie- en opbrengstverliezen.

Na conversie van biomassa zijn er echter meer mogelijkheden.

Pyrolyse

Eén van deze conversiemethoden biedt hierin met name goede perspectieven: pyrolyse. Dit is een proces van thermische degradatie in afwezigheid van zuurstof, waarbij gas, vloeistof en vaste stoffen ontstaan.

Het gas dat vrijkomt, wordt snel gekoeld, waardoor een vloeistof ontstaat: bio-olie. Uit deze bio-olie kunnen vervolgens chemische producten worden gemaakt.

Bio-olie kan tevens als brandstof worden toegepast: de calorische waarde is vergelijkbaar met die van aardolie.

Uit het onderzoek is gebleken dat het pyrolyseproces op dit moment vooral toegepast wordt om brandstoffen te winnen.

Het gebruik van biomassa als feedstock in de chemische industrie, bijvoorbeeld door middel van het pyrolyseproces, staat nog in de kinderschoenen. Getallen over benodigde hoeveelheden voor bijvoorbeeld de huidige productie van styreen zijn (nog) niet openbaar en om deze reden bij ons niet bekend.

Discussie

Biomassa wordt ingezet voor verschillende toepassingen: voedsel, energie en/of organische grondstoffen.

Uit berekeningen is gebleken dat voor al deze toepassingen in theorie wereldwijd ruim voldoende areaal beschikbaar is.

Een ander punt van discussie is welke toepassing van biomassa prioriteit krijgt: inzet als grondstof of brandstof?

De koolstof in de biomassa is een noodzakelijke voorwaarde voor het gebruik als grondstof in de chemie. Bij de inzet als brandstof is hiervan geen sprake. Op basis van deze constatering zou inzet als grondstof de voorkeur hebben.

De inzet van biomassa als brandstof is echter goedkoper en ten opzichte van de huidige brandstoffen CO₂-neutraal. Daarnaast zijn de rendementen van omzettingprocessen van biomassa nog relatief laag en treden veel energieverliezen op.

De conclusie kan zijn dat inzet als brandstof dan toch de voorkeur verdient boven inzet van biomassa als grondstof.

Een laatste punt van discussie is de CO₂-neutraliteit van biomassa.

Biomassa blijkt niet altijd CO₂-neutraal genoemd te mogen worden. Het kappen van hout uit Noord Scandinavische bossen kan ertoe leiden dat bossen gedurende een aantal jaren een netto bron van koolstofhoudende gassen

³¹ Biomassa kan worden toegepast als brandstof en als feedstock. De mogelijkheden die biomassa als brandstof biedt, zijn behandeld bij het hoofdstuk 'productiefase'.



worden. Na de kap komen door respiratie en eventueel anaërobe omzetting grote hoeveelheden koolstofhoudende gassen vrij. De mate van CO₂-neutraliteit wordt dus bepaald door de keuze voor bepaalde soorten biomassa. Daarnaast is het moment waarop de biomassa onttrokken wordt aan het natuurlijke systeem bepalend.



9 Aanbevelingen om te komen tot een meer duurzame chemische industrie

Kunststoffen bieden als materiaal vaak grote technische en milieuvordelen, ook in het licht van een duurzame ontwikkeling.

Om te komen tot een meer duurzame productieketen komen uit het onderzoek naar polystyreen drie aspecten naar voren die belangrijke aanknopingspunten bieden:

- productgebruiksfase: de manier van omgaan met kunststofafval;
- productiefase: de inzet van duurzame energie;
- grondstoffase: de inzet van alternatieve grondstoffen.

Productgebruiksfase

Voor de productgebruiksfase zien wij een drietal aanbevelingen:

- 1 Gebruik zo min mogelijk materialen in de ontwerpfase.
- 2 Recycle zo veel mogelijk producten en materialen.
- 3 Als recycling geen optie is, verbrand de producten dan met energiete-rugwinning.

De mogelijkheden voor verwerking van kunststofafval in de productgebruiksfase staan op dit moment al sterk in de belangstelling. Verschillende onderzoeken zijn al gedaan of worden uitgevoerd.

In onze ogen is dit soort onderzoek van wezenlijk belang om zo veel mogelijk energie, in de vorm van herbruikbare grondstoffen of brandstoffen, te genereren uit het kunststofafval. Dit betekent overigens niet dat alle afval bijvoorbeeld door middel van recycling moet worden hergebruikt. Soms is verbranding met terugwinning van energie een betere optie wat betreft milieubelasting.

Onderzoek kan uitwijzen welke verwerkingsmethode in specifieke gevallen de meeste milieuwinst (of: minste milieuschade) oplevert.

Productiefase

De studie levert een tweetal aanbevelingen op voor de productiefase:

- 1 Ga door met optimalisatie van processen.
- 2 Zet duurzame energie in waar mogelijk.

Een eerste, relatief gemakkelijke, aanzet voor een meer duurzame chemische industrie is het duurzaam opwekken van de benodigde toegevoerde energie. Aanbevolen wordt daarom om in combinatie met optimalisatie van processen in te zetten op duurzame energie.

Grondstoffase

Om daadwerkelijk een duurzame chemische industrie te bereiken is in onze ogen een fundamenteel andere grondhouding nodig ten aanzien van het gebruik van grondstoffen. Het verbruik van grondstoffen moet in balans zijn met de natuurlijke aanwas. Kringlopen moeten dus gesloten worden.

De inzet van alternatieve grondstoffen in de chemische industrie staat op dit moment nog in de kinderschoenen. Uit het onderzoek blijkt echter dat met name biomassa goede perspectieven kan bieden. Hierbij kan onderscheid worden gemaakt tussen het directe gebruik van biomassa in producten en het gebruik van biomassa na omzetting.

In onze ogen is het belangrijk deze beide mogelijkheden verder te onderzoeken.

Discussie voeren!

Wij vinden dat op korte termijn (maatschappelijke) discussies gevoerd moeten worden over een fundamentele verandering in de chemische industrie.

Een blind geloof in de technologie als oplossing voor alle problemen is in onze ogen onterecht. Een toekomstdebat over kunststoffen voeren vanuit de waan van de dag voldoet evenmin. Voortdurend zal er ruimte moeten zijn voor de onverwachte uitkomsten van experimenten en onderzoek. Dit betekent dat uitkomsten niet vooraf exact zijn vast te leggen, maar dat een voortdurend interactieproces nodig is om tot de gewenste duurzame ontwikkeling te komen³².

Potentieel probleem

Een potentieel probleem zit in de keuze voor het optimaal oplossen van korte termijn problemen, zonder rekening te houden met de langere termijn. Door blijvende afhankelijkheid van een bepaalde technologie en gedane investeringen, kan men op het verkeerde paard wedden. Alternatieve oplossingen komen dan pas weer in beeld wanneer de wal het schip keert.

Wij bevelen daarom aan zowel de korte als de lange termijn te betrekken in de strategie voor het bereiken van een fundamenteel duurzame chemische industrie.

Fasering van aanbevelingen

De weg naar een duurzame chemische industrie vraagt inspanningen, zowel op korte als op langere termijn. De acties naar aanleiding van de gegeven aanbevelingen kunnen worden gezien in een tijdspad: zie Tabel 24. Hierin is weergegeven op welke termijn wij mogelijkheden zien voor de implementatie van de verschillende aanbevelingen.

Tabel 24 Fasering van de verschillende aanbevelingen om te komen tot een meer duurzame chemische industrie

<i>Termijn</i>	<i>Actie</i>
Vanaf heden	Inzetten van duurzame energie en optimalisatie van processen Discussies over de inzet van alternatieve grondstoffen en de toekomst van de chemische industrie
Binnen enkele jaren ³³	Implementatie van de verschillende mogelijkheden voor verwerking kunststofafval
Enkele tientallen jaren	Daadwerkelijke inzet van alternatieve grondstoffen

³² Door Biekart e.a. wordt dit een proces van Constructief Technology Assessment genoemd [1].

³³ Op dit moment worden al activiteiten ontplooid op dit gebied. De grootschalige implementatie verwachten wij echter pas binnen enkele jaren.



Literatuur

- [1] J.W. Biekart, A. Nigten, D. Stoppelenburg; *Duurzame chemie; Werkstrategieën voor duurzaamheid in de chemische industrie met een toetsing aan de huidige praktijk*; Stichting Natuur en Milieu, Vereniging Milieudefensie, Waddenvereniging; Houten; 1997
- [2] D.J. Gielen, D. Vos, A.W.N. van Dril; *The petrochemical industry and its energy use; Prospects for the Dutch energy intensive industry*; ECN; Petten; 1996
- [3] DTO Projectteam Chemie; *Duurzaamheid en chemie; een bundel essays geschreven op verzoek van het Interdepartementaal Onderzoekprogramma Duurzame Technologie (DTO)*; DTO; Delft, 1996
- [4] DTO Sleutel Chemie; *zon en biomassa: bronnen van de toekomst*; DTO; Den Haag; 1997
- [5] L.C.E. Struik; *Mogelijkheden en vooruitzichten voor chemische recycling en hergebruik van energie*; Symposium 'Kunststofafval geëvalueerd' van de Nederlandse Federatie voor Kunststoffen op 8 oktober 1992; Bussum
- [6] www.kun.nl/kunnieuws/nieuws/archief/27/34/plastic.html
- [7] *De bedrijfsagenda voor de toekomst; Duurzaamheid als doelstelling van strategisch ondernemersbeleid*; Stichting Natuur en Milieu; 2000
- [8] www.rug.nl/uk/-jaargang30/10/301011.htm
- [9] Th.J. Heesen, J. Verwoert, F. Hoefnagels, m.m.v. P. Fraanje; *Een schets van de Nederlandse chemische industrie en petrochemie*; Chemiewinkel, Onderzoeks- en Adviescentrum Chemie Arbeid Milieu, Universiteit van Amsterdam; 1996
- [10] K. Huizinga, A.W.H.M. Hoogenkamp; *Procesbeschrijvingen industrie DOW Terneuzen; Samenwerkingsproject Procesbeschrijvingen Industrie Nederland*; 1993
- [11] D.J. Gielen, P.A. Okken; *De invloed van kunststofrecycling op de Nederlandse CO₂-emissie*; ECN; 1993
- [12] A. Struiker, K. Blok; *Sectorstudie Organische Chemie; Ecofys Advies en Onderzoek*; Utrecht; 1995
- [13] www.shellchemicals.com
- [14] R.J.J. van Heijningen, J.F.M. de Castro, E. Worell; *Energiekentallen in relatie tot preventie en hergebruik van afvalstromen*; Van Heijningen Energie- en Milieuvadvis, Castro Consulting Engineer, Vakgroep Natuurwetenschap & Samenleving der Rijksuniversiteit Utrecht; 1992
- [15] <http://www.tue.nl/tdo/mdp2050/doc/nationaleenergieverkenningen1995-2020.pdf>

- [16] Directoraat-generaal voor Energie, ministerie van Economische Zaken
- [17] A.M.H. van Daatselaar; Groene chemie Een studie naar de mogelijkheden van biomassa als grondstof in de huidige petrochemische industrie; IVEM-doctoraalverslag nr. 7; Rijksuniversiteit Groningen Interfacultaire Vakgroep Energie en Milieukunde; 1994
- [18] <http://btgs1.ct.utwente.nl/btgworld/presentations/pyrolysis/pyrolysisintro/>
- [19] E. Pras; ATO, DOW en Twente samen in biopolymeren; in: Chemisch Weekblad 17; 2000
- [20] A. Dijkgraaf; Biopolymeren schillen; PT Industrie nr. 12; 2001
- [21] <http://www.cargilldow.com/product.asp>
- [22] www.vdkooy.nl/concurrerend.htm
- [23] www.avebe.nl
- [24] Boustead, I.; Ecoprofiles of plastics and intermediates; APME; Brussel; 1999
- [25] www.duurzame-energie.nl/over-energie/de/duurzameenergie_6.html
- [26] www.nma-org.nl/besluiten/1999/bao/bao0471-9901.htm
- [27] H.J. Croezen, G.C. Bergsma; Subcoal milieukundig beoordeeld Nagesecheiden huidhoudelijk kunststofafval in een kolencentrale vergeleken met biomassa, vergassing, verwerking in cementoven en AVI; Delft; 2000
- [28] J. van Swigchem, F. de Haan; Meerprijs klimaatneutrale consumentenproducten; Delft; 2001
- [29] R.H. Venderbosch, J. Vos, W. Prins; Flash pyrolysis technologies for biomass usage in small decentralised co-generation units; In: Vereniging van Milieukundigen; Biomassa verbranden, vergassen, vergisten, pyrolyse; Proceedings van het Symposium; Utrecht; 2000
- [30] www.sai.tue.nl/contest/Pag.3.pdf
- [31] www.teleacnot.nl/sites/studiehuis/nt/nt3c3.htm
- [32] G. Bergsma, H. Croezen, O. Bello; De netto CO₂-emissie van hergebruik en energieproductie uit afval vergeleken Case studie voor afvalhout, mest, kunststof en papier; Delft; 2001
- [33] http://www.duurzame-energie.nl/over-energie/be/bioenergie_3.html
- [34] <http://stro9.vub.ac.be/wind/brochureFinancieel.html>
- [35] http://www.duurzame-energie.nl/over-energie/wk/waterkracht_3.html
- [36] <ftp://ftp.ecn.nl/pub/www/library/report/2000/p00001.pdf>



- [37] J.H.J. Roos, F.R. Rooijers m.m.v. J. van Swigchem; Energie in de 21ste eeuw: een verkennende studie naar mogelijke ontwikkelingen in de komende eeuw van de energievoorziening, in het algemeen en in het bijzonder voor de sector verkeer en vervoer; Delft; 1998
- [38] <http://www.refdag.nl/weet/010313weet01.html>
- [39] Informatie uit telefoongesprek met Philips, 3 augustus 2001
- [40] L. Reijnders; Is hout verbranding kooldioxideneutraal? Een benadering vanuit levenscyclus perspectief; publicatie in voorbereiding
- [41] Informatie uit telefoongesprek met dhr. D. van den Berg van Biomass Technology Group, 3 augustus 2001
- [42] http://216.92.194.138/Gasvormige_brandstoffen.htm
- [43] Optiedocument voor emissiereductie van broeikasgassen; ECN/RIVM; 1998
- [44] Elektriciteit in Nederland; SEP; 1998
- [45] A. Faaij, R. van den Broek, E. Lysen, D. Gielen, M. Hoogerwijk en J. Wolf; Synthese van het project: Beschikbaarheid van biomassa voor energie-opwekking
- [46] <http://www.rivm.nl/milieucompendium/A-24.html>



CE

**Oplossingen voor
milieu, economie
en technologie**

Oude Delft 180

2611 HH Delft

tel: 015 2 150 150

fax: 015 2 150 151

e-mail: ce@ce.nl

website: www.ce.nl

Besloten Vennootschap

KvK 27251086

Naar een duurzame chemische industrie

Productieketen van styreen

Bijlagen

Rapport

Delft, augustus 2001

Opgesteld door: I. de Keizer





A Overzicht van de productieprocessen in de chemische industrie in Nederland

Tabel 25 geeft een overzicht van de verschillende productieprocessen binnen de chemische industrie in Nederland.

Tabel 25 Overzicht van de chemische industrie in Nederland

Productie van	Capaciteit (kton/jaar)	Grondstoffen	Energiegebruik (GJ/ton) ³⁴	Milieu-effecten ³⁵	(kg/ton) ³⁶	Bron
Ammoniak	3700	Aardgas	85	Ammoniak NOx	- 0.3 1	9
Chloor-alkali	Chloor: 640 NaOH: 720	Zeezout	18	Kwik Chloor (l) Chloor (w) Dichloorfluormethaan (w) Asbest	0.002 0.05 0.38 0.017 0.026	14,9
Soda	600	Zout	n.b.	Stof (l) Ammoniak (l) CaCl ₂ Sulfaat	<1 <1 1045 43	9
Fosforzuur	400	Zwavelzuur uit ertsen en afvalproducten	5	Gips Fluor (w) Fosforzuur (w)	Tot 6 90 80	9
Zwavelzuur	1000	Elem. S uit petrochemie Verbranding S (l)	n.b.	Zwavedioxide (l) Zwavelzuur (w)	Tot 17 Tot 60	9
Methanol	740	Aardgas	37 ³⁷			12
Petrochemie						
Propeen	1190	Aardolie	61 (67)	CO ₂ (l) SO _x (l) NO _x (l) Koolwaterstoffen (l) Methaan (l)	1200 5 5.9 1.5 4.3	14 (24)

³⁴ Dit is de energie die voor het gehele proces nodig is.

³⁵ (l) = emissies naar de lucht

(w) = emissies naar water

³⁶ Dit zijn de voor het betreffende proces belangrijkste milieueffecten die over de gehele keten optreden als gevolg van de productie van het betreffende product. Hierbij zijn (l) emissies naar de lucht en (w) emissies naar water.

³⁷ In de geraadpleegde bronnen [12], [14] en [24] was geen informatie beschikbaar over de emissies van de productie van methanol. Onze voorkeur ging op het moment van de keuze voor het product toch al uit naar de petrochemie, waardoor deze informatie ook niet meer actief is gezocht.

Vinylchloridemonomeer	1000	Aardolie	48	CO ₂ (l)	1700	12, 14			
				SO _x (l)	6.7				
				NO _x (l)	8.3				
				Koolwaterstoffen (l)	1.7				
				Methaan (l)	6.7				
				Stof (l)	2.3				
				CO (l)	2.1				
				Dissolved solids (w)	3.8				
				Suspended solids (w)	1.5				
				Na ⁺ (w)	18				
				Cl ⁻ (w)	43				
				SO ₄ ²⁻ (w)	2.5				
			Benzeen	400	Aardolie	64	CO ₂ (l)	1400	14,26
							SO _x (l)	4	
	NO _x (l)	6.1							
	Koolwaterstoffen (l)	1.4							
	Methaan (l)	5.5							
	CO (l)	1.5							
Styreen Monomeer	1200	Aardolie	76	CO ₂ (l)	2400	14			
			(84)	SO _x (l)	6.8	(24)			
				NO _x (l)	9.2				
				Koolwaterstoffen (l)	2.4				
				Methaan (l)	7.9				
				Stof (l)	1.1				
				CO (l)	1.6				
				Cl ⁻ (w)	3.5				
			Etheen	2400	Aardolie	61	CO ₂ (l)	1200	14,26
						(68)	SO _x (l)	3.2	(24)
	NO _x (l)	4.7							
	Koolwaterstoffen (l)	1.2							
	Methaan (l)	4.1							
	CO (l)	1.2							

Opmerkingen:

Ammoniakproductie

Grote productie salpeterzuur nodig t.b.v. productie kunstmest. Op dit moment bestaat een overproductie kunstmest en is een discussie gaande over de toekomst van de landbouw.

Chloor-alkali proces

Kwik wordt een (groot) probleem in de toekomst door het verbod op het gebruik van kwik in dit soort processen (kwikbaden).

Fosforzuurproductie

Grote productie van het bijproduct gips. Dit wordt beschouwd als afvalproduct.

Petrochemie

Klein energieverbruik per product, maar door de productieomvang toch een enorm verbruik.

Ruwe olie wordt voornamelijk omgezet in brandstoffen (73%). Daarnaast gaat het grootste aandeel naar kunststoffen (5%).



Mogelijkheden voor alternatieve grondstoffen:

- 'groene' grondstoffen, bijv. plantaardige oliën. Gevolg: aantal benodigde syntheseschappen gaat omlaag en er ontstaan beter afbreekbare producten;
- rol van biotechnologie: bijv. de productie van melkzuur waaruit de kunststof polymelkzuur wordt gemaakt;
- gebruik van secundaire grondstoffen, met name plastics. Dit vermindert eveneens het aantal syntheseschappen, geeft minder emissies en verlaagt het energieverbruik;
- gebruik van 'lichte grondstoffen' (methaan, ethaan etc.) t.b.v. synthese van hogere kws en, op lange termijn, het overschakelen op een basischemie uitgaand van CO en H, oftewel synthesesgas (dit kan verkregen worden uit zowel fossiele brandstoffen als afval);
- inzet van methanol;
- inzet van biomassa.

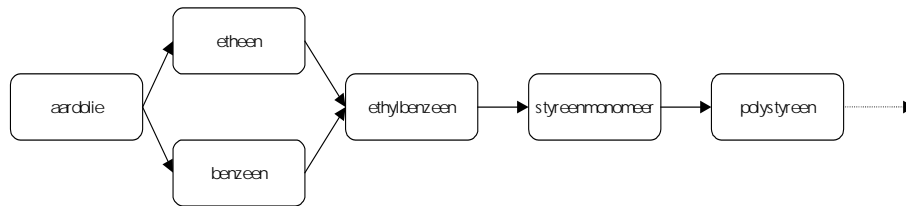


B Productieketen van styreen en polystyreen

B.1 Overzicht productieketen

De productie van styreen en polystyreen in Nederland vindt plaats zoals weergegeven in het schema van Figuur 14.

Figuur 14 Productieroute van polystyreen



B.2 Van ruwe olie naar polystyreen

B.2.1 Van ruwe olie naar nafta

De grondstof voor veel eindproducten van de petrochemische industrie is ruwe olie. Het grootste gedeelte van deze olie wordt geïmporteerd. Jaarlijks wordt ongeveer 90 miljoen ton ruwe aardolie en olieproducten ingevoerd uit met name Noorwegen (30%), Saoedi-Arabië (25%), Verenigd Koninkrijk (14%), Koeweit (9%) en Iran (8%) [16].

De ruwe olie wordt gedestilleerd tot een aantal fracties (zie figuur 1), waaronder nafta.

B.2.2 Van nafta naar etheen

Uit de nafta wordt etheen geproduceerd door middel van stoomkraken. Deze methode is in Europa het meest toegepaste proces om o.a. etheen te produceren. Het proces wordt over het algemeen geoptimaliseerd naar een maximale etheenproductie, omdat dit het meest waardevolle product is. Etheen kan ook uit ethaan worden geproduceerd; dit proces wordt veel toegepast in de Verenigde Staten. Andere mogelijke grondstoffen zijn gasolie en LPG.

B.2.3 Van nafta naar benzeen

Benzeen kan worden geproduceerd uit pyrolyse-benzine, eveneens een product van het stoomkraakproces van nafta. Benzeen kan ook worden gewonnen uit het reformaat van het zogenaamde katalytisch reformproces. Dit proces heeft nafta als voeding. In dit proces ontstaat een aromatenmengsel dat rijk is aan benzeen. Er is een extractieproces nodig om zuivere benzeen te maken. Dit proces wordt in de VS veel toegepast voor de productie van aromaten.

Tenslotte bestaat nog de mogelijkheid benzeen te maken door hydrodealkylering van tolueen.

B.2.4 Van benzeen en etheen naar etylbenzeen

Bij *Dow* wordt ethylbenzeen op twee manieren geproduceerd (1000 kton/jaar) uit benzeen en etheen. In het ene geval gebeurt dat met aluminiumchloride als katalysator (volgens het Monsanto/Lummus Crest proces), in het andere geval met zeoliet als katalysator (Mobil/Badger proces).

Shell produceerde tot eind 1991 ethylbenzeen via de reactie tussen benzeen en etheen volgens het zogenaamde 'UOP-proces'. Hierna is de nieuwe fabriek met dezelfde productiecapaciteit in bedrijf genomen welke volgens het al eerder genoemde Mobil/Badger-procédé werkt. Als katalysator wordt ook hier zeoliet gebruikt.

Enige achtergrondinformatie

De reactorsectie bestaat uit twee parallelle reactoren waarvan er telkens 1 in bedrijf is, terwijl de andere stand-by gehouden wordt. Periodiek wordt de met koolafzetting vervuilde katalysator geregenereerd met een hete lucht/stikstofstroom.

Styreen wordt in dezelfde fabriek geproduceerd als waar ethylbenzeen en ook propeneoxide bereid wordt. Voor de productie van styreen wordt behalve ethylbenzeen ook propene ingezet.

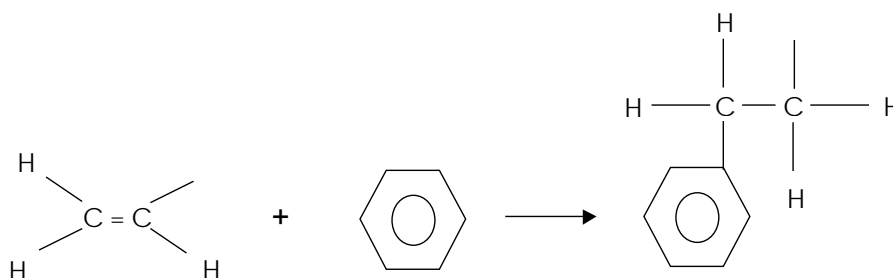
Naast de eigen productie worden sinds 1 juli 1999 de grondstoffen ethyleen en benzeen ingekocht van BP Nederland B.V. waarna *Shell* deze omzet in styreen monomeer en vervolgens weer verkoopt aan BP [26]. In Nederland wordt ethylbenzeen ten behoeve van styreen dus op twee verschillende manieren geproduceerd:

- 1 Monsanto/Lummus Crest proces.
- 2 Mobil/Badger proces.

Monsanto/Lummus Crest proces

Etheen wordt samen met benzeen en een katalysator (AlCl_3) en promotor in een reactor gebracht. De reactie tussen etheen en benzeen levert ethylbenzeen. Dit is weergegeven in Figuur 15.

Figuur 15 De reactie tussen etheen en benzeen waarbij ethylbenzeen ontstaat



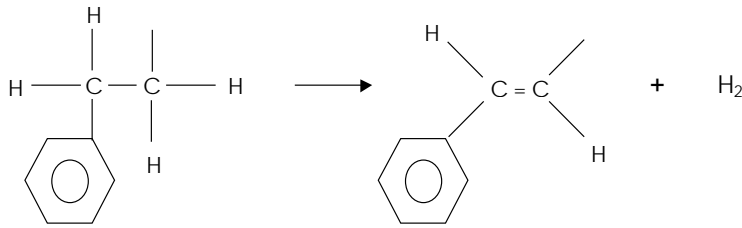
Hiernaast wordt in de reactor polyethylbenzeen getransalkyleerd tot ethylbenzeen.

Uiteindelijk wordt de katalysator uit het proces teruggewonnen en hergebruikt. De ethylbenzeen wordt verder gezuiverd, waarbij eventuele resten van benzeen en polyethylbenzeen worden afgescheiden en gerecycled.

Vervolgens wordt de ethylbenzeen gedehydrogeneerd tot styreen (zie Figuur 16).



Figuur 16 Dehydrogenering van ethylbenzeen tot styreen



Deze dehydrogeneringsreactie vindt plaats met behulp van metaaloxides (Fe, Cr, Si, Co, Zn of een mix) als oxidator. Hierbij ontstaat een kleine hoeveelheid toluen als bijproduct. De reactie verloopt bij een temperatuur van 600-700 °C en onder atmosferische of lage druk.

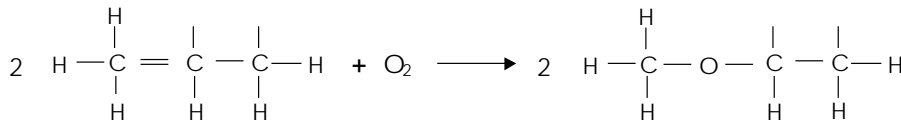
Mobil/Badger proces

Etheen, voorverwarmde benzeen en gerecyclede alkyl-aromaten worden met een katalysator, ZSM-5, in een 'single fixed bed reactor' gebracht. In de reactor vinden vervolgens simultane transalkylaties plaats. De uitgangsstoffen en eindproducten zijn dezelfde als bij het Monsanto proces (zie hierboven).

De reacties vinden plaats bij hoge temperaturen en matige druk.

Bij Shell wordt de omzetting van ethylbenzeen in styreen gecombineerd met die van propeen in propeenoxide (oxidatiereactie).

Figuur 17 De oxidatiereactie van propeen tot propeenoxide



B.2.5 Van ethylbenzeen naar styreen

Grondstof voor de productie van styreen is ethylbenzeen. De door Shell en DOW geproduceerde ethylbenzeen (1000 kton/jaar) wordt voor een klein gedeelte verkocht. Het grootste gedeelte wordt echter in aanwezigheid van stoom en een vaste Fe₂O₃-katalysator gedehydrogeneerd tot styreen (920 kton/jaar) [10]. Voor de reactievergelijking verwijzen wij u naar figuur 12.

B.2.6 Van styreen naar polystyreen

De geproduceerde styreen wordt gedeeltelijk extern afgezet en gedeeltelijk intern verwerkt tot o.a. polystyreen en styreen-butadien rubber [10]. Styreen wordt ook vaak gebruikt in copolymeren met andere monomeren, zoals acrylonitril (ABS) en butadien (SBR).

In ons onderzoek staat de polymerisatie van styreen tot polystyreen centraal.

Deze polymerisatie kan verlopen volgens het Huntsman Chemical Corporation/Lummus Crest Inc. Proces en bestaat uit een batch suspensie reactor gevolgd door een continue ontwateringseenheid en een droogproces.

Polystyreen wordt in verschillende vormen geproduceerd:

- *Normaal of standaard PS ('general purpose' PS)*
Dit is het strikte polymeer van de grondstof styreen. Het is glasdoorzichtig en bros en wordt voornamelijk gebruikt in de verpakkingindustrie.
- *Slagvast PS ('high purpose' PS)*
Aan slagvast PS is rubber toegevoegd, waaraan het zijn stevigheid en slagvastheid ontleent. Het wordt toegepast voor verpakkingen, huishoudelijke artikelen, koffiebekertjes e.d.
- *Schuim of expandeerbaar PS*
Door een gas (bijv. pentaan) toe te voegen kan een expandeerbaar PS of een PS-schuim worden gemaakt. Schuim-PS en expandeerbaar PS vinden hun toepassing als thermisch isolatiemateriaal, zowel als isolatieplaten in woningen als isolerende verpakking van voedsel.



C Energiegebruik van de productieketen

C.1 Energiegebruik voor de productie van etheen

In Tabel 26 staan de kerncijfers van de eenheidsoperaties voor de productie van etheen (en propeen).

Tabel 26 Energiekentallen voor de productie van etheen en propeen (GJ per ton product)

<i>Eenheidsoperatie</i>	<i>Olie</i>	<i>Elektriciteit</i>	<i>Stoom</i>	<i>Totaal finaal</i>	<i>Totaal primair</i>
Energie-inhoud grondstof	42.7			42.7	42.7
Nafta	2.8	0.03	0.1	2.9	3.0
Kraakfornuis	10.8	0.33	-3.8	7.3	7.9
Compressie	2.5	0.33		2.8	3.4
Productscheiding	3.3	0.33		3.6	4.2
Etheen/propeen	62.1	1.03	-3.7	59.3	61.2

Het energiegebruik bij de winning van olie is klein. In [14] wordt geschat dat 0.5% van de geproduceerde olie wordt ingezet voor de winning. Dit komt overeen met 0.21 GJ per ton geproduceerde olie. De energie-inhoud van aardgas wordt om deze reden niet meegenomen in het onderzoek.

Overigens komt bij de winning van aardolie een aanzienlijke hoeveelheid gas vrij. Dit gas wordt meestal afgefakkeld. Het gas wordt echter meer en meer geïnjecteerd in het olieveld of gebruikt voor de productie van methanol of kunstmest.

Transport van ruwe olie uit Europa en de Oostbloklanden vindt plaats via pijpleidingen. Dit pijpleidingentransport kost nauwelijks energie en kan daarom verwaarloosd worden [14].

Transport uit het Midden-Oosten en Afrika gebeurt met een bulkcarrier. Het gewogen gemiddelde van de afstand is 11000 km. Het energiekental voor dit type transport is 0.07 MJ per ton per km [14]. Transport van 1 ton ruwe olie naar West-Europa vraagt dus 0.78 GJ aan energie, waarbij ervan uit gegaan wordt dat dit in de vorm van olieproducten is.

C.2 Energiegebruik voor de productie van benzeen

Het energieverbruik per ton benzeen is afhankelijk van het soort proces. Het verbruik bij het katalytisch reformproces ligt veel lager dan bij het stoomreformproces. In dit laatste proces ontstaat benzeen als nevenproduct in kleine hoeveelheden. De grondstoffen waaruit benzeen wordt bereid, dus bijproducten van de etheenproductie, zijn echter alleen geschikt als brandstof of voor de benzeenproductie. Daar de benzeenprijs hoger ligt dan de brandstofprijs, kiest de producent meestal voor de benzeenproductie.

In Tabel 27 en staan de kerncijfers van de eenheidsoperaties voor de productie van benzeen.

Tabel 27 Energiekentallen voor de productie van benzeen (GJ per ton benzeen) (bron: [14])

<i>Eenheidsoperatie</i>	<i>Olie</i>	<i>Elektriciteit</i>	<i>Stoom</i>	<i>Totaal finaal</i>	<i>Totaal primair</i>
Energie-inhoud grondstof	42.7			42.7	42.7
Nafta	2.8	0.03	0.1	2.9	3.0
Kraakfornuis	10.8	0.33	-3.8	7.3	7.9
Benzeen-extractie		1.9	4.5	6.4	10.0
Benzeen	56.3	2.26	0.8	59.3	63.6

C.3 Energiegebruik voor de productie van ethylbenzeen

Cijfers over het specifieke energiegebruik voor de omzetting van etheen en benzeen in ethylbenzeen zijn niet beschikbaar.

C.4 Energiegebruik voor de productie van styreen

Het energiegebruik voor de productie van styreen volgens het Monsanto/Lummus Crest proces is 5.7 GJ per ton styreen [14]. Het betreft hier een gemiddelde waarde, die echter wel representatief is voor dit proces.

Het energiegebruik kan geoptimaliseerd worden voor specifieke grondstofinzet (zuiverheid, verhouding), de plaatselijke energievoorziening en kostencondities. Het is mogelijk 2.1 GJ per ton styreen aan lage-kwaliteitswarmte terug te winnen, zonder dat extra compressoren nodig zijn. Hiermee wordt in de berekeningen en overzichten geen rekening gehouden.

C.5 Energiegebruik voor de productie van polystyreen

Voor de productie van 1 ton expandeerbaar polystyreen (EPS) is 1.028 ton styreen en pentaan nodig. Expandeerbaar PS bevat 5-7% pentaan. Daar dit een kleine hoeveelheid betreft, wordt aangenomen dat eveneens 1.028 ton styreen nodig is voor de productie van normaal polystyreen (GPPS).

Het elektriciteitsverbruik van het proces bedraagt 0.63 GJ per ton PS. Deze relatief kleine hoeveelheid wordt gebruikt door de reactor en de opslagtank, die beiden geroerd worden, de compressoren en de centrifuge.

Het stoomgebruik is aanzienlijk: 5.04 GJ per ton PS (1.8 ton stoom). Stoom is nodig voor het op temperatuur brengen en houden van het reactiemengsel. Tevens is warmte nodig voor de afvalwaterzuivering.

In Tabel 28 worden de kentallen gegeven voor de productie van 1 ton normaal polystyreen (GPPS) uit 288 kg etheen en 798 kg benzeen. Aannames hierbij zijn:

- 70% ethylbenzeen wordt per doorgang omgezet in styreen.
- Polymerisatie verloopt 100%.
- Verliezen in de styreen productie bedragen 8.4%.
- Verliezen in het polymerisatieproces bedragen 2.8% (op massabasis).



Tabel 28 Kentallen voor de productie van styreen en polystyreen (GJ per ton PS) (bron: [14])

	<i>Massa (ton/ton PS)</i>	<i>Elektriciteit</i>	<i>Stoom</i>	<i>Totaal finaal</i>	<i>Totaal primair</i>
<i>Styreenproductie</i>					
Etheen	0.288			17.1	17.6
Benzeen	0.798			47.3	50.8
Transport benzeen	0.798			0.1	0.1
Dehydrogenering	1.516			3.6	4.0
Styreen/ethylbenzeen stripper	1.516		3.6	1.2	1.3
Pompen e.d.	-	0.9	1.2	0.9	2.3
Styreen	n.v.t.	0.9	4.8	70.2	76.1
<i>Polymerisatie</i>					
Transport styreen	1.028			0.1	0.1
Hele proces	1.028	0.63	5.04	5.67	7.3
Normaal polystyreen (GPPS)	n.v.t.	1,53	9,84	76.0	83.5

Het totale energieverbruik voor de productie van PS wordt voor 59% bepaald door de hoeveelheid energie die nodig is voor de productie van benzeen. Dit wordt veroorzaakt doordat voor de productie van benzeen is uitgegaan van de productie uit pyrolyse-benzine. Dit is een energie-intensieve productieroute. Als benzeen direct uit nafta wordt gewonnen (via het katalytisch reformproces) is het energieverbruik ongeveer 56 GJ per ton benzeen.

Daarnaast is gekozen voor productie van PS via het suspensieproces in plaats van het batch-proces dat minder energie verbruikt: ongeveer 2 GJ per ton PS [14].

Opgemerkt moet worden dat styreen en polystyreen worden niet altijd op hetzelfde complex geproduceerd, waardoor transport, voornamelijk per schip, soms noodzakelijk is. Het energiekental voor transport per binnenschip is 0.39 MJ per ton per km. Voor het transporteren van styreen naar de polystyreenfabriek dient dus 0.08 GJ per ton styreen in rekening te worden gebracht.



D Milieueffecten van de productieketen

D.1 Milieueffecten van de productie van etheen

In Tabel 29 wordt een overzicht gegeven van de emissies bij de productie van etheen.

Tabel 29 Emissies en emissiefactoren bij de productie van etheen (bron: [10])

<i>Component</i>	<i>Emissie (ton/jaar)</i>	<i>Emissiefactor (kg/ton)*</i>
Naar lucht		
CO ₂	1.811.867	3624
CO	1.094	2.19
NO _x	1.868	3.74
Kws, verbrandingsgassen	188	0.38
Etheen	100	0.2
Methaan	2.119	4.24
Propeen	65	0.13
N-butaan	20	0.04
Roet, verbranding afvalgassen	44	0.088
Naar water		
N-Kjeldahl	32	0.064
CZV	749	1.5
Fenol	14.5	0.029
Benzeen	2.9	0.006
Xyleen	2.5	0.005
Tolueen	2.2	0.004

* op basis van 500.000 ton etheen

D.2 Milieueffecten van de productie van benzeen

In Tabel 30 wordt een overzicht gegeven van de emissies bij de productie van benzeen.

Tabel 30 Emissies en emissiefactoren bij de productie van benzeen door Dow Chemical Terneuzen (bron: [10])

<i>Component</i>	<i>Emissie (ton/jaar)</i>	<i>Emissiefactor (kg/ton)*</i>
Naar lucht		
SO ₂	190	0.38
Kws, aromatisch	62	0.12
Kws, verzadigd C ₁ -C ₄	28	0.056
Kws, alifatisch C ₂ -C ₁₀	818	1.64
Benzeen	30	0.06
Pentanen	39	0.078
Tolueen	1.3	0.0026

* op basis van 500.000 ton benzeen

D.3 Milieueffecten voor de productie van ethylbenzeen

De specifieke milieueffecten van de productie van ethylbenzeen zijn niet bekend. Het SPIN rapport [10] geeft wel informatie over de productie van styreen. Hierin zijn de gegevens voor de productie van ethylbenzeen verwerkt. Voor een overzicht hiervan verwijzen wij u naar Tabel 31.

D.4 Milieueffecten voor de productie van styreen

In Tabel 31 wordt een overzicht gegeven van de emissies naar lucht en water bij de productie van ethylbenzeen en vervolgens styreen.

Hierbij moet opgemerkt worden dat de tweede styreenfabriek van DOW is opgestart in de tijd van verschijnen van het rapport dat hier als bron is gebruikt, [10]. Gegevens over deze tweede fabriek zijn daarom niet meegenomen in onderstaande tabel.

Tabel 31 Emissies en emissiefactoren bij de productie van styreen door Dow Chemical Terneuzen (bron: [10])

<i>Component</i>	<i>Emissie (ton/jaar)</i>	<i>Emissiefactor (kg/ton)*</i>
Naar lucht		
Benzeen	1.7	0.0034
Ethylbenzeen	2.6	0.0052
Kws, aromatisch	3.0	0.006
Kws, verbrandingsgassen	21	0.42
NO _x	78	0.16
Styreen	3.5	0.007
Tolueen	0.2	0.0004
Naar water		
N-Kjeldahl	2.3	0.0046
CZV	43	0.086
Benzeen	8	0.016
Styreen	0.4	0.0008
Aluminium	600	1.2

* gebaseerd op 500.000 ton styreen

D.5 Milieueffecten voor de productie van polystyreen

In Tabel 32 wordt een overzicht gegeven van de emissies bij de productie van polystyreen.

Tabel 32 Emissies en emissiefactoren bij de productie van polystyreen door Dow Terneuzen (bron: [10])

<i>Component</i>	<i>Emissie (ton/jaar)</i>	<i>Emissiefactor (kg/ton)*</i>
Naar lucht		
Difenyldifenyloxyde	4.7	0.0094
Styreen	5.3	0.011

* gebaseerd op 500.000 ton polystyreen



E Verwerkingsmogelijkheden voor huishoudelijk kunststofafval

Zoals aangegeven in Tabel 33 kan een groot deel van het huishoudelijke kunststofafval (in Nederland 521 kton/jaar) in principe worden herverwerkt middels mechanische recycling. Huishoudelijk kunststofafval bestaat voor circa 95% uit thermoplasten. Mits goed gescheiden kunnen de thermoplasten in principe worden herverwerkt tot regranulaat waarmee primair materiaal kan worden vervangen. Bij een voldoende hoge regranulaat kwaliteit en voor bepaalde producten die niet te scherpe eisen stellen aan de eigenschappen van de kunststof grondstoffen is de verhouding waarin primair materiaal wordt vervangen door regranulaat 1: 1. De afzetmarkt voor regranulaat vormt geen probleem. Een deel van het regranulaat kan in principe worden ingezet voor non-food verpakkingen. Verpakkingen vormt slechts een deel van de totale markt voor kunststof materiaal. Andere afzetmarkten, zoals de GWW-sector³⁸ zouden eveneens aanzienlijke hoeveelheden regranulaat kunnen opnemen.

Tabel 33 Overzicht verwerkingsmogelijkheden voor huishoudelijk kunststofafval [32]

Verwerkingswijze	Toepasbaar voor	Uitgespaard	Eisen aan Materiaal	Bruto CO ₂ -balans ten opzicht van primaire producten	
				Product	Kg CO ₂ / ton afval
Mechanische recycling	Thermoplasten	Primair granulaat	hoge zuiverheid (> 99%) het liefst ook scheiding op grade	Grote folie uit huisvuil	-736
				Flacons uit huisvuil	-1.140
				Zuivelbekers uit huisvuil	-2.108
Verwerking tot dikwandige producten	Thermoplasten	Beton of hout	Tenminste 70% PE of PS, Weinig PVC	Maximaal	-693
Chemische recycling	Alle kunststoffen	Aardgas, Aardolie, Producten nafta- kraker	Afhankelijk van techniek	Vergassing (Texaco-proces)	750
Bijstoken	Alle kunststoffen	Bruinkool, Steenkool, Aardolie	< 1 gew% Cl, <15% as stookwaarde > 18 MJ/kg	PPF uit HHA	-352
AVI	Alle kunststoffen	Elektriciteit, Warmte uit fos- siele energiedra- gers	Geen	Huish.kunststof Afval	1.139
Stort	Alle kunststoffen	Niets	Geen		nul

³⁸ Grond-, Weg- en Waterbouw sector.

De kunst is om het materiaal in voldoende zuivere mate te isoleren. Als gezegd zou voor productie van een kwalitatief hoogwaardig regranulaat eigenlijk niet alleen op kunststofsoort, maar ook op grade moeten worden gescheiden.

Voor minder zuiver kunststofafval bestaan andere verwerkingsmogelijkheden, zoals in de tabel genoemd. De mogelijkheden variëren van dikwandige plastic producten tot vervanging van fossiele energiedragers of daaruit geproduceerde bulkchemicaliën (chemische recycling, bijstoken).

Bij verwerking tot dikwandige producten moet het grootste deel van het afval bestaan uit één thermoplast soort. Dit is nodig om een homogene smelt te kunnen produceren, die zich voldoende goed tot producten laat persen. De producten zijn bijvoorbeeld straatmeubilair, zoals banken en paaltjes. PVC ontleedt bij thermische belasting onder de vorming van HCl en veroorzaakt blazen in het product. Vandaar dat het in niet te grote hoeveelheden in het afval aanwezig mag zijn.

Ook bij bijstoken mag niet al te veel chloor aanwezig zijn vanwege risico's op corrosie, vorming van chloorhoudende vliegassen en emissies naar lucht. Het spectrum aan initiatieven voor chemische recycling is zo breed dat niet goed aan te geven is welke eisen moeten worden aangehouden.

De markt voor bijstoken of voor producten uit chemische recycling is enorm in vergelijking met het 'beetje' huishoudelijk kunststofafval, dat vrijkomt. De omvang van de markt voor dikwandige producten is niet bekend.

CO₂-balans per verwerkingsmogelijkheid

In de tabel is ook een schatting gegeven van de CO₂-balans voor de verschillende verwerkingsmogelijkheden. De balans omvat de aan verwerking gerelateerde emissies en de door afzet van de bij verwerking ontstane producten uitgespaarde emissies. Omdat door afzet van producten uit mechanische en chemische recycling en uit bijstoken en verbranding in een AVI geen producten op basis van andere materialen worden verdrongen is voor deze verwerkingswijzen de bruto balans ook de netto balans.

De bruto CO₂-balans voor de productie van dikwandige producten hangt sterk af van de gehanteerde aannames. In de tabel zijn als voorbeeld de balansen gegeven voor het vervangen van betonnen paaltjes. Cruciaal voor de balans is de aangehouden samenstelling voor beton en de verhouding in levensduur tussen betonnen paaltjes en kunststof paaltjes. In de tabel is een waarde gegeven (-693 kg CO₂/ton afval) voor de aanname dat een kunststofpaaltje 4 maal langer meegaat dan een betonnen paaltje en voor de aanname dat de levensduur van beide producten vergelijkbaar is (+147 kg CO₂/ton afval).



F Mogelijkheden voor duurzame energie

F.1 Stand van zaken

Begin 2000 werd bijna 1,2% van het Nederlandse energieverbruik gedekt door duurzame energiebronnen (ruim 35 PJ vermeden fossiele brandstoffen). De belangstelling voor duurzame energie is groot, er is sprake van een snel groeiend aantal initiatieven voor duurzame energieprojecten.

Door de ruimte beschikbaarheid van het goedkope aardgas en het relatief schone karakter van deze brandstof is de ontwikkeling van duurzame energie in Nederland pas laat gestart.

Tabel 34 geeft een overzicht van de stand van zaken voor de Nederlandse situatie.

Tabel 34 Ontwikkeling van duurzame energie in Nederland (bron: [25])

Duurzame energie	Realisatie van vermeden fossiele brandstoffen (PJ)					
	1990	1995	1996	1997	1998	1999
Windenergie	0,5	2,6	3,6	3,9	5,3	5,3
Zon-PV	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
Zon-thermisch	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4
Aardwarmte	-	-	-	-	-	-
Warmte/koude-opslag	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,5
Warmtepompen	p.m.	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2
Waterkracht	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,7
Bio-energie	17,5	18,7	21,5	26,0	26,4	28,1
• Afvalverbranding	6,4	5,6	7,8	11,5	1,4	12,1
• Biomassaverbranding	8,2	8,2	8,5	9,2	9,8	10,6
• Stortgas	0,6	2,0	2,1	2,0	1,9	1,8
• Overige vergisting	2,3	2,9	3,1	3,3	3,3	3,6
Totaal ³⁹	18,8	22,4	26,2	31,3	33,5	35,3

F.2 Bio-energie

Bio-energie is een verzamelnaam voor energie uit allerlei verschillende soorten biomassa en afval. Een viertal bronnen kan worden onderscheiden:

- energieteelt: populier, wilg, miscanthus (olifantsgras);
- bijproducten: gewassen (consumptie en energie);
- afvalstromen: dunningshout, slib;
- restafval, GFT: eigenlijk is dit 'energie uit afval'.

De opbrengst van bio-energie is in grote mate afhankelijk van de "natuurlijke grondstof" en van het omzettingsproces. In een kilogram hout zit behoorlijk wat energie. Bijstook in een centrale levert hoogwaardige elektriciteit. In een gewone open haard levert het energetisch gezien bijna niets op. In onderstaande tabel staat voor een aantal nu gangbare toepassingen de energie-opbrengst weergegeven.

³⁹ In totaal werd in 1999 in Nederland 337 PJ opgewekt [46]. Het aandeel duurzame energie was dus in 1999 ongeveer 10%.

Tabel 35 Energieopbrengsten van verschillende materialen en verwerkingsroutes (bron: [33])

<i>Materiaal</i>	<i>Energie inhoud (MJ/ton)</i>	<i>Verwerkingsroute</i>	<i>Energie opbrengst (MJe/ton)</i>
Hout (droog)	18000	Bijstook centrale	5940
		Houtverwerkende industrie	3600
Afval	10000	Verbranding	1656
GFT ⁴⁰ (nat)	3375	Vergisting	540
Stortgas	19000*	Vergisting	5,4**
Koolzaad (droog)	27600	Extractie	675***

* kJ/m³

** MJe/m³

*** liter biodiesel/ton

Benodigd voor productie van styreen

Voor de productie van styreen is 74,3 PJ toegevoerde energie nodig per jaar (op basis van de huidige productieomvang van 2.500 kton/jaar). Tabel 36 geeft de consequenties weer van de productie van deze energie door middel van de materialen en methoden uit Tabel 35.

Tabel 36 Hoeveelheden materialen die nodig zijn voor de productie van styreen

<i>Materiaal</i>	<i>Energie opbrengst (MJe/ton)</i>	<i>Benodigd aantal ton (Mton)</i>
Hout (droog)	5940	12,5
	3600	20,6
Afval	1656	44,9
GFT (nat)	540	138
Stortgas	5,4**	13760*
Koolzaad (droog)	675***	-

* m³

** MJe/m³

*** liter biodiesel/ton

F.3 Windenergie

De elektriciteitsopbrengst hangt sterk af van de hoeveelheid wind op een locatie. Een klein verschil in windsnelheid veroorzaakt een groot verschil in de opbrengst. Om te voorkomen dat windturbines elkaars opbrengst beïnvloeden moeten deze op een bepaalde minimale afstand van elkaar staan: gemiddeld zesmaal de rotordiameter.

De elektriciteitsopbrengst hangt af van de grootte en het type van de turbine. Bij lage windsnelheden levert de turbine nog geen vermogen. Vanaf windkracht 2 (3 m/s) begint de turbine te draaien en ongeveer bij windkracht 6 (12-13 m/s) wordt het maximale vermogen van de turbine geleverd. Bij windsnelheden boven de 25 m/s (windkracht 10) wordt de turbine stilgezet om overbelasting te voorkomen.

Op een goede locatie levert een gemiddelde windturbine jaarlijks een elektriciteitsopbrengst van zeker 850 kWh per m² rotoroppervlak.

⁴⁰ GFT = Groente-, Fruit- en Tuinafval.



Benodigd voor de productie van styreen

Een moderne turbine van 600 kW die in een kuststreek staat, levert een vermogen van 1.900.000 kWh per jaar als de gemiddelde windsnelheid op ashoogte 7 m/s is [34]. Omgerekend is dit 0,00684 PJ.

Voor de hoeveelheid toegevoerde energie die nodig is voor de productie van styreen, 74,3 PJ, zouden dus bijna 11.000 van dit soort windturbines moeten worden geplaatst.

F.4 Zonne-energie

Zon-PV is sinds begin jaren negentig volop in ontwikkeling. In 1999 werd ruim 3.100 kilowatt-piek bijgeplaatst. Het totaal in Nederland geplaatste vermogen van autonomen en netgekoppelde systemen werd hiermee per 1 januari 2000 ongeveer 9.600 kilowatt-piek. De hoeveelheid zon-elektriciteit die hiermee kan worden geleverd is ca. 6.000.000 kilowatt-uur.

Het *gemiddelde vermogen* van een zonne-energiesysteem is altijd veel kleiner dan het *piekvermogen* dat bij volle zon wordt geleverd. Op zijn best is de verhouding ongeveer 23% (in zonnige woestijngebieden), voor Nederland is de verhouding ongeveer 10%. Met andere woorden: een systeem met een piekvermogen van 3000 Wp (een dak van een woning vol panelen) levert bij een gunstige oriëntatie een gemiddeld vermogen van 300 W. Omdat een jaar 8760 uren heeft, komt dat overeen met ruim 2600 kWh (300 W x 8760 uur = 0,3 kW x 8760 uur is 2600 kWh). Dit komt overeen met 0,00936 PJ/jaar [36].

Benodigd voor de productie van styreen

Voor de benodigde 74,3 PJ per jaar aan toegevoerde energie zijn $(74,3/0,00936)$ = bijna 8.000 daken vol zonnepanelen nodig.

F.5 Waterkracht

De elektriciteitsproductie van een waterkrachtcentrale is sterk afhankelijk van het hoogteverschil en van de hoeveelheid water die de centrale passeert. Nederlandse rivieren worden als regenrivieren beschouwd, omdat ze voor het grootste deel afhankelijk zijn van de hoeveelheid neerslag. De gemiddelde opbrengst van een 10 MW-waterkrachtcentrale bedraagt in Nederland ongeveer 27 GWh [35]. Omgerekend is dit 0,0972 PJ.

Benodigd voor de productie van styreen

Om de benodigde 74,3 PJ te produceren zijn ruim 760 van dit soort centrales nodig.