

DE INVLOED VAN KUNSTSTOFRECYCLING OP DE NEDERLANDSE CO₂-EMISSIE

D.J. GIELEN
P.A. OKKEN

Verantwoording

Dit rapport is een resultaat van het project Integraal Ketenbeheer (ECN-projectnummer 7138). Het project maakt deel uit van het ENGINE-programma 1993. ENGINE (Energy Generation in the Natural Environment) is een ECN-onderzoeksprogramma, gericht op duurzame ontwikkeling.

Abstract

As part of a project on integrated chain management, the CO₂ effect of plastics recycling was studied. Eight options for recycling and energy recovery were examined, using the present Dutch production system as reference. From this study, it was concluded that the effects of recycling are not always positive compared to energy recovery.

The CO₂ effect of the alternatives, compared to the present Dutch waste processing situation, is estimated at +0.9 to -3.1 Mton CO₂, depending on the chosen technology mix. The effect on the national CO₂ emissions is between +0.5% and -1.9%.

Keywords

WASTE MANAGEMENT
GREENHOUSE EFFECT
CO₂ EMISSION
NETHERLANDS
PLASTIC
RECYCLING
ENERGY RECOVERY
LIFE CYCLE ANALYSIS

INHOUD

LIJST MET AFKORTINGEN	5
SAMENVATTING	7
1. INLEIDING	9
2. MATERIAALEIGENSCHAPPEN EN MATERIAALSTROMEN	11
3. DE KEUZE VAN DE SYSTEEMGRENZEN	13
4. BESCHRIJVING VAN DE INZAMELINGSTECHNIEKEN	14
5. BESCHRIJVING VAN DE VOORBEWERKINGS- TECHNIEKEN	15
6. BESCHRIJVING VAN DE VERWIJDERINGS- TECHNIEKEN	17
6.1 Inleiding	17
6.2 Vergassen (BTF)	18
6.3 Pyrolyse (BTM + BTF)	19
6.4 Hydrogenering (BTF)	19
6.5 Selectief oplossen (BTP)	19
6.6 Herverwerken	20
6.7 Verbranden met WKK	20
6.8 Verbranden in AVI (zonder WKK)	20
7. DE CO ₂ -EMISSIE IN DE REFERENTIESITUATIE	23
8. BEREKENING VAN HET CO ₂ -EFFECT VAN DE ALTERNATIEVEN	25
9. CONCLUSIE	29
REFERENTIES	31

LIJST MET AFKORTINGEN

AVI	= Afval Verbrandings Installatie
BSA	= Bouw- en Sloop Afval
BTF	= Back - To - Feedstock
BTM	= Back - To - Monomer
BTP	= Back - To - Polymer
DSD	= Duales System Deutschland
GFT-afval	= Groente-, Fruit- en Tuinafval
GJ	= GigaJoule (10^9 Joule)
GWP	= Global Warming Potential
HDPE	= High Density PolyEthyleen
KWD-afval	= Kantoor-, Winkel- en Dienstenafval
LDPE	= Low Density PolyEthyleen
LHV	= Lower Heating Value = Onderste Verbrandingswaarde
PE	= PolyEthyleen
PET	= PolyEthyleenTereftalaat
PO	= PolyOlefines
PP	= PolyPropyleen
PS	= PolyStyreen
PVC	= PolyVinylChloride
WKK	= Warmte Kracht Koppeling

SAMENVATTING

In het kader van het ENGINE-project integraal ketenbeheer worden een drietal case-studies uitgevoerd. Dit rapport doet verslag van de case-studie naar het CO₂-effect van kunststofrecycling.

De vergelijking is gebaseerd op de Nederlandse situatie, het huidige produktiesysteem is als statische referentie gebruikt. Omdat de polyolefinen de grootste fractie van de kunststofafvalstroom vormen is de studie tot deze materialengroep beperkt. De procesketen en de verwerkingstechniek zijn geanalyseerd voor de volgende acht technieken:

- vergassing
- pyrolyse
- hydrogenering
- selectief oplossen
- herverwerken
- hergebruik van onderdelen en produkten
- verbranding met warmte/kracht-koppeling (WKK)
- verbranding in een afvalverbrandingsinstallatie (AVI) met elektriciteitsproductie.

Uit de analyse blijkt dat recycling niet zondermeer tot vermindering van de CO₂-emissie leidt. Het CO₂-effect varieert tussen +1,3 t/t afval voor verbranding in de AVI tot -2,6 t/t afval voor hergebruik van onderdelen en produkten. Het effect van wijzigingen in de verwijderingsstructuur van het kunststofafval kan variëren tussen een toename met 0,9 Mton CO₂ en een daling met 3,1 Mton CO₂. Het effect op de nationale CO₂-emissie dat hiermee berekend kan worden ligt tussen +0,5% en -1,9%.

1. INLEIDING

In het kader van het ENGINE-programma van ECN zijn een drietal case-studies gedaan naar de toepasbaarheid van integraal ketenbeheer en de milieugerichte produkt- en levenscyclusanalyse. Dit rapport doet verslag van de case-studie naar de milieu-effecten van kunststofrecycling. Een achttal alternatieven voor kunststofrecycling en verbranding met energiete-rugwinning zijn vergeleken, waarbij de CO₂-emissie als indicator is ge-bruikt.

Het broeikas effect vormt een risico voor mens en milieu. Daarom wordt getracht de emissies van de broeikasgassen te reduceren. CO₂ is het be-langrijkste broeikasgas, verantwoordelijk voor ongeveer de helft van het potentiële broeikas effect. De CO₂-concentratie in de atmosfeer neemt toe door de verbranding van fossiele brandstoffen (kolen, olie en gas). Bijna alle koolstofatomen worden bij gebruik van fossiele brandstoffen omgezet in CO₂. Een deel wordt echter vastgelegd in produkten als asfalt, smeerolie en kunststof. Zo dient ongeveer 4% van het mondiale olie verbruik als feed-stock voor de produktie van kunststoffen [1]. Het Nederlandse beleid is gericht op een reductie van de CO₂-emissie met 1% via het afvalstoffenbe-leid [2,3].

Door de omzetting van fossiele energiedragers in kunststoffen treedt een vastlegging van fossiele koolstof op. Na gebruik komen de kunststoffen in het afvalstadium terecht. Storten, verbranding en recycling zijn opties tot verwijdering van afvalstoffen. Bij verbranding komt de fossiele koolstof echter alsnog vrij in de vorm van CO₂. Bij volledige recycling blijft de fos-siele koolstof in de produktcyclus. Indirect kunnen echter toch CO₂-emis-sies optreden. Recyclingprocessen kosten immers ook energie, die meestal wordt opgewekt door verbranding van fossiele brandstoffen. Het hele afval-verwijderingssysteem is momenteel aan grote veranderingen onderhevig. Deze veranderingen zullen ook invloed hebben op de CO₂-emissie, maar de omvang en aard van deze veranderingen is nog onduidelijk. Deze proble-matiek was aanleiding tot een meer diepgaande analyse van de effecten van opties voor afvalverwijdering op de CO₂-emissie. In deze studie zal de CO₂-emissie voor een aantal opties tot verwijdering van kunststofafval wor-den vergeleken.

Verskillende ontwikkelingen leiden samen tot veranderingen in de afval-verwijdering. GFT-afval (Groente-, Fruit- en Tuinafval) wordt in steeds sterkere mate apart ingezameld, waardoor het watergehalte van het reste-rende afval sterk afneemt en de verbrandingseigenschappen veranderen. Omdat de resterende stortcapaciteit voor afval snel afneemt staat verbran-ding momenteel nogal in de belangstelling. In Nederland en ook in de om-ringende landen zijn convenanten afgesloten tussen overheid en industrie of zijn wetten uitgevaardigd, die in de komende jaren tot een sterke toename van recyclingactiviteiten zullen leiden. Ook kunststofafval valt onder dit beleid. Produktgericht beleid en terugnameregelingen zullen ook een bijdra-ge gaan leveren aan de terugdringing van de kunststofafvalberg.

Er is een sterke toename van het onderzoek naar oplossingen voor het kunststofafvalprobleem, veroorzaakt door factoren als stijgende storttarieven en toenemend milieubeleid. Met name in Duitsland vormt de wetgeving en de financiering vanuit het Duale System Deutschland (DSD) een sterke stimulans voor innovatief onderzoek, waar de meeste fabrikanten en gebruikers(organisaties) bij betrokken zijn. Maar ook in Nederland wordt door kunststoffabrikanten, afvalverwerkers en branche-organisaties gewerkt aan (technische) oplossingen, onder andere in het kader van het verpakkingsconvenant.

Deze studie heeft een verkennend karakter, omdat het onderzoek naar de beste verwijderingsstructuur nog lang niet is afgerond. Bijna dagelijks worden nieuwe oplossingen gepresenteerd, maar de bruikbaarheid van deze technieken is vaak onduidelijk. Met dit rapport wordt gepoogd een bijdrage te leveren aan de discussie over de toekomstige verwijderingsstructuur voor kunststofafval, waarbij de nadruk ligt op de systeemanalytische aspecten.

2. MATERIAALEIGENSCHAPPEN EN MATERIAALSTROMEN

Kunststoffen kunnen verdeeld worden in thermoplasten en thermoharders. Thermoplasten smelten bij verhitting, thermoharders niet. Door hun smeltgedrag kunnen thermoplasten eenvoudiger gerecycled worden. Deze analyse beperkt zich verder tot de thermoplasten. Deze vormen immers veruit de belangrijkste groep (tabel 1).

Tabel 1 *De Nederlandse kunststofconsumptie in 1988 [4]*

	kton/jr
Polyolefinen	550
Polyvinylchloride	215
Polystyreen	130
Overige thermoplasten en -harders	225
Totaal	1120

Binnen de groep van thermoplasten kan een groot aantal kunststoffen worden onderscheiden. Achter de indeling in PE, PP, PS etc. gaan nog een groot aantal verschillende kunststoffen schuil. De chemische samenstelling, de volgorde van de opbouwende eenheden en de ketenlengte vormen de belangrijkste kenmerken. Kunststoffen bevatten in het algemeen ook een groot aantal toevoegingen als stabilisatoren, weekmakers, kleurstoffen en vulstoffen. Deze zijn mede bepalend voor de materiaaleigenschappen. Hoogwaardige recycling is alleen mogelijk indien de kunststoffen op zoveel mogelijk kenmerken gescheiden worden.

Uit CO₂-optiek spelen vooral de vulstoffen en weekmakers een belangrijke rol. Deze worden in grote hoeveelheden toegevoegd en hebben daarom een grote invloed op de verbrandingswaarde en de CO₂-emissie bij verbranding. Het gewichtspercentage vulstoffen en weekmakers kan bij PVC-vloerbedekking oplopen tot wel 75%.

In tabel 2 is de onderste verbrandingswaarde en de specifieke CO₂-emissie bij de verbranding van de belangrijkste thermoplasten weergegeven. Het betreft hierbij zuivere kunststoffen. Weekmakers en vulstoffen, zoals klei en kalk, kunnen deze kentallen belangrijk beïnvloeden. Bij polyolefinen is het aandeel additieven in het algemeen gering. Bij deze groep van kunststoffen kan de correctie voor vulstoffen en weekmakers buiten beschouwing worden gelaten. De verdere analyse beperkt zich daarom tot de polyolefinen (PE, PP etc.).

Tabel 2 *Overzicht van de onderste verbrandingswaarden (LHV) en specifieke CO₂-emissies bij verbranding*

Materiaal	LHV [GJ/t]	CO ₂ [t/t]
PE	43,3	3,14
PP	44	3,14
PS	40	3,35
PET	31,4	2,29
PVC	18	1,42

Naast de chemische samenstelling van de kunststoffen is van belang in welke afvalstroom ze voorkomen. Eenzelfde materiaal uit huishoudelijk afval moet op een andere manier verwerkt worden dan hetzelfde materiaal uit industrieel afval. In tabel 3 is een overzicht gegeven van de belangrijkste afvalstromen. De kunststofafvalstroom is momenteel kleiner dan de kunststofconsumptie (vgl. tabel 1 en tabel 3) door het gebruik van kunststoffen in duurzame gebruiksvoorwerpen.

Tabel 3 *Herkomst van de belangrijkste kunststofafvalstromen in 1990 [10]*

	kton/jr
Reinigingsdiensten	20
Ziekenhuisafval	30
Autowrakken	30
BSA ¹	35
Grof huisvuil	60
Industrie	165
KWD ²	180
Huisvuil	370
Totaal	890

¹ BSA = Bouw- en Sloopafval.

² KWD = Kantoor-, Winkel- en Dienstenafval.

De belangrijkste afvalstromen waarin polyolefinen voorkomen zijn huisvuil, kantoor-, winkel- en dienstenafval (KWD) en industrieafval. Binnen deze afvalstromen kan weer een aantal subgroepen onderscheiden worden. Het gebruik van deze afvalstromen zou in een zgn. cascade geoptimaliseerd kunnen worden, een dergelijke analyse valt echter buiten het gezichtsveld van deze studie.

3. DE KEUZE VAN DE SYSTEEMGRENZEN

CO₂ komt vrij in alle fasen van de levenscyclus van materialen en producten. Bij polyolefinen kan onderscheid worden gemaakt tussen:

1. de winning en het transport van de ruwe olie
2. raffinage van de olie
3. produktie van etheen/propeen
4. polymerisatie
5. toevoeging additieven/stabilizers/vulstoffen etc.
6. produktie van halffabrikaten
7. produktie van eindprodukten
8. gebruik
9. afvalmanagement:
 - inzamelen
 - scheiden onderdelen/materialen
 - storten/verbranden/recyclen.

De gebruiksfase en het afvalmanagement kunnen niet los van elkaar worden gezien. Kunststoffen uit huisvuil vormen een andere afvalstroom dan schoon procesafval. De mate waarin additieven aan de kunststoffen worden toegevoegd is afhankelijk van de gevraagde materiaaleigenschappen, die op hun beurt worden bepaald door de eisen die gesteld worden aan de produkteigenschappen. Anderzijds bepalen de karakteristieken van het recyclingproces, welke materialen via een bepaalde route kunnen worden verwerkt en welke voorbereidings- en inzamelingstechnieken moeten worden toegepast. Een globale vergelijking kan alleen gebaseerd zijn op gemiddelde waarden. Een specifieke afvalstroom vereist echter een meer gedetailleerde analyse.

De toepassing van recyclingmaterialen kan ook niet zonder meer gelijk worden gesteld aan de toepassing van primaire kunststoffen. De materiaaleigenschappen zijn immers anders. Indien bijvoorbeeld de sterkte van het materiaal verschilt of indien de warmtegeleiding anders is, en indien deze eigenschappen van invloed zijn op het energieverbruik in de gebruiksfase (bijvoorbeeld bij auto's en isolatiematerialen) mogen beide types materialen niet zondermeer op massabasis worden vergeleken. De toepassing van recyclingmateriaal vereist dan een zorgvuldige afweging, waarbij de hele levenscyclus moet worden geanalyseerd.

4. BESCHRIJVING VAN DE INZAMELINGS- TECHNIEKEN

De inzamelingsstructuur van kunststoffen is van belang voor het energieverbruik in de afvalverwijdering. De inzameling zal in het algemeen per vrachtwagen plaatsvinden. De transportafstand voor het afval kan sterk variëren. Het energieverbruik voor het transport wordt bepaald door de afstand, het type vrachtwagen, de snelheid waarmee deze vrachtwagen rijdt. Vaak wordt het energieverbruik uitgedrukt per gewichtseenheid afval, het te transporteren volume vormt echter een betere maat [5]. Omdat het specifieke gewicht van kunststofafval laag is, speelt dit verschil een belangrijke rol.

Indien het afval op een lokale vuilstort wordt gedeponed blijft de transportafstand beperkt tot een tiental kilometers. Indien echter wordt gekozen voor grootschalige verwerkingsinstallaties op nationale of Europese schaal, kan de gemiddelde transportafstand tot enkele honderden of duizenden kilometers oplopen. In dat geval komen energiezuinigere transportmiddelen als trein en schip in aanmerking, en verdient het aanbeveling het afval zo mogelijk te comprimeren. In tabel 4 is een overzicht gegeven van het energieverbruik voor verschillende transportmiddelen.

Tabel 4 *Primair energieverbruik voor het transport van kunststofafval [5]*

Transportmiddel	Afvalstroom	MJ/t.km
Vuilmiswagen	kunststof 0,1-1 t/m ³	5 - 100
Trekker 80% geladen	kunststof 0,1-1 t/m ³	1 - 3
Trein (W-Europa) ¹	gemiddelde voor alle afval	1,6
Binnenvaart	gemiddelde voor alle afval	0,13-0,45

¹ Gewogen gemiddelde elektrisch/diesel.

Uit tabel 4 kan worden afgeleid dat transport belangrijk is voor ongecomprimeerd afval dat per vrachtwagen over grote afstanden (honderden kilometers) wordt getransporteerd. De inzamelings- en sorteringsstructuur moet zodanig worden opgezet, dat dit transport wordt vermeden. De keuze voor trein en binnenvaart bij grote transportafstanden ligt voor de hand. Bij een dergelijke inzamelingsstructuur kunnen ook grotere installaties van afval worden voorzien zonder hoog energieverbruik (en dus zonder grote CO₂-emissie).

Uit tabel 2 blijkt dat de onderste verbrandingswaarde voor polyolefinen 43-44 GJ per ton bedraagt. Het transport vergt in een optimaal transportsysteem bij transport binnen West-Europa slechts enkele GJ primaire energie per ton afval. Door de hoge energie-inhoud van het afval mag het transport en de bijbehorende CO₂-emissie verwaarloosd worden.

5. BESCHRIJVING VAN DE VOORBEWERKINGSTECHNIEKEN

De voorbereiding van de kunststoffen omvat het shredderen, wassen, scheiden en drogen van het afval. De volgorde van deze processen kan verschillen, en de optimale combinatie van technieken is afhankelijk van een heel scala aan factoren. Het is daarom niet mogelijk, één kental te gebruiken voor alle afvalstromen en voor alle kunststofmaterialen. In tabel 5 is een overzicht gegeven van het elektriciteitsverbruik voor de belangrijkste technieken.

Tabel 5 *Elektriciteitsverbruik voor enkele voorbereidingstechnieken [6]*

	GJ _e /t
1 Voorverkleinen	0,02 -0,07
2 Fijnmalen	0,4 -0,7
3 Thermisch verdichten	0,14 -0,65 ¹
4 Wassen (hoofdwass)	0,02 -0,05
5 Drogen (mechanisch)	0,01 -0,04
6 Drogen (thermisch)	0,02 -0,23 ¹
7 Homogeniseren (kneders)	0,72 -3,6
8 Extruderen	0,4 -2,5

¹ Fossiel energiegebruik.

De noodzakelijke voorbereiding is afhankelijk van de verwerkingstechniek. In tabel 6 is een inschatting gemaakt van de noodzakelijke voorbereidingen per verwerkingstechniek. Op grond van deze schatting is de noodzakelijke energie voor de voorbereiding berekend.

Tabel 6 *Vorbewerkingstechnieken uit tabel 5 voor verschillende verwerkingstechnieken en gemiddelde elektriciteitsinzet*

Verwerkingstechniek	Vorbewerkingstechniek (zie tabel 5)	GJ _e /t
A1 Vergassen	1	0,05
A2 Pyrolyse	1	0,05
A3 Hydrogenering	1+2	0,6
A4 Selectief oplossen	1+4+6	0,1 (+0,1 ¹)
A5 Herverwerken	1+7+8	2
A6 Hergebruik onderdelen	-	-
A7 Verbranden met WKK	1	0,05
A8 Verbranden in een AVI	-	-

¹ Fossiel energiegebruik.

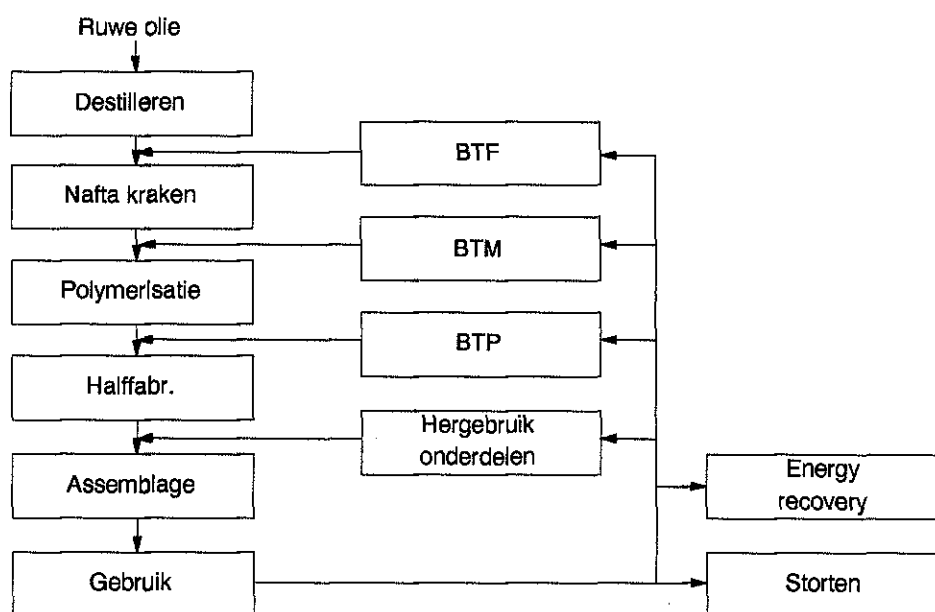
6. BESCHRIJVING VAN DE VERWIJDERINGS- TECHNIEKEN

6.1 Inleiding

De laatste tijd zijn een groot aantal technieken in ontwikkeling voor de recycling van kunststoffen. Globaal kan onderscheid worden gemaakt tussen:

1. Back-to-polymer technieken (BTP)
2. Back-to-monomer technieken (BTM)
3. Back-to-feedstock technieken (BTF)
4. Energy recovery

In figuur 1 is een schematisch overzicht gegeven van de situering van deze technieken in het produktiesysteem. Het verschil berust op het produkt dat ontstaat. Globaal kan gesteld worden dat de robuustheid ('het omnivore karakter') van de technieken van 1 naar 4 steeds verder toeneemt, maar dat de waarde van de produkten steeds verder afneemt. Het onderscheid tussen de vier groepen technieken is niet scherp; vaak ontstaat een heel scala aan produkten, op grond waarvan het proces in meerdere categorieën kan worden ingedeeld.



Figuur 1 *Plaats van de kunststofafvalverwijderingstechnieken in het produktiesysteem*

Een aantal van deze processen zullen nu apart worden besproken. Hierbij is gekozen voor een zo breed mogelijk scala aan technieken:

1. vergassen
2. pyrolyse
3. hydrogenering
4. selectief oplossen
5. herverwerken
6. verbranden met WKK
7. verbranden in een AVI.

Naast deze alternatieven wordt ook hergebruik van onderdelen onderzocht, maar voor deze optie is geen gedetailleerde bespreking opgenomen.

6.2 Vergassen (BTF)

Kunststoffen kunnen omgezet worden in synthesesgas (een mengsel van koolmonoxide en waterstof). Er bestaan meerdere alternatieven voor de vergassing van kunststoffen. Globaal kan onderscheid worden gemaakt tussen kleinschalige en grootschalige vergassing. Bij kleinschalige installaties wordt lucht als oxidant gebruikt, omdat zuurstofproductie te duur is [7]. Het produkt is een laagcalorisch gas, dat alleen ter plaatse gebruikt kan worden. Het grootschalige vergassingssysteem lijkt in dit verband veelbelovender. In deze installaties dient zuurstof als oxidant te worden toegepast.

Indien voor de oxidatie zuivere zuurstof wordt gebruikt zijn een aantal procesroutes bruikbaar. Het gereinigde gas (52vol.% CO, 47% H₂, <1%CH₄) kan op verschillende manieren verder verwerkt worden [8,9]:

1. gebruik als feedstock voor het Oxo-proces
2. cryogene scheiding CO en H₂
3. shift-reactie en H₂-productie
4. shift-reactie en methanolproductie.

Alleen de waterstofproductie wordt verder onderzocht. Deze route heeft als voordeel dat het om een bewezen techniek gaat (kunstmest, methanol), terwijl de installatie ook zeer geschikt is voor de afvang van CO₂.

De synthesesgasproductie uit kunststofafval is tamelijk ongevoelig voor de samenstelling van de afvalstoffen. De kunststoffen worden verkleind (<80 mm) en vervolgens in een fluid-bed reactor omgezet. In de reactor heerst een temperatuur van 700 tot 800 °C. Voor de oxidatie wordt zuivere zuurstof toegevoerd. Het gasmengsel dat de reactor verlaat bestaat uit CO, H₂, CO₂, CH₄ en stoom. Tevens bevat dit gas sporen HCl, HF en H₂S. Deze dienen eerst te worden verwijderd. Daarom worden de gassen eerst door een filter geleid (verwijdering van de vaste deeltjes). Vervolgens worden de gassen door een scrubber geleid om de zuren te verwijderen (wassen met NaOH) en door een absorptiekolom voor de afvang van H₂S. De gasstroom wordt vervolgens gebruikt voor de produktie van stoom van 44 bar en 400 °C. De temperatuur van de gasstroom daalt hierdoor naar 400 °C. Via de injectie van stoom wordt met het koolmonoxide vervolgens een zgn. shift-reactie uitgevoerd (omzetting van CO en stoom in CO₂ en waterstof) [8]. Vervolgens wordt kooldioxide afgevangen en wordt het resterende koolmonoxide en kooldioxide omgezet in methaan [9,10].

6.3 Pyrolyse (BTM + BTF)

Bij een pyrolyse-reactie worden de materialen onder uitsluiting van zuurstof bij hoge temperatuur omgezet in gasvormige, vloeibare en vaste organische produkten. De produktsamenstelling is afhankelijk van de samenstelling van het kunststofafval en van de procescondities [10]. Met name de proces temperatuur speelt een bepalende rol [11,12]. Omdat de pyrolysetechniek nog volop in ontwikkeling is, zijn geen nauwkeurige cijfers over de produktsamenstelling en de efficiency beschikbaar. Nader onderzoek zal uitsluitel moeten geven over de bruikbaarheid van deze techniek in de praktijk. Voor polyolefinen wordt in deze analyse voorlopig uitgegaan van een produktsamenstelling met 25% monomeer, 25% olie die als vervanging kan dienen voor nafta en 25% vast produkt, waarvan wordt aangenomen dat het vergelijkbaar is met bitumen. De resterende 25% dient als energiebron voor de pyrolyse en voor de scheiding van de gasfractie [11].

6.4 Hydrogenering (BTF)

Momenteel wordt vooral in Duitsland veel aandacht besteedt aan de hydrogenering van kunststoffen als oplossing van het kunststofafvalprobleem. Deze techniek houdt in dat onder hoge druk en bij een hoge temperatuur waterstof aan een mengsel van kunststoffen wordt toegevoegd. De kunststoffen reageren met de waterstof, waarbij een olieachtig produkt ontstaat.

De omzetting van kolen en leisteen in motorbrandstoffen berust op ditzelfde principe (zgn. Bergius-Pier procédé). Deze technieken zijn al meer dan vijftig jaar bekend en op grote schaal toegepast. De toepassing op kunststofafval is nieuw, maar niet fundamenteel anders.

In Duitsland bouwt VEBA momenteel een hydrogeneringsinstallatie voor kunststofafval. De reactie vindt plaats bij hoge druk (2,5 MPa) en hoge temperatuur (400-450 °C). Het afval mag tot 10% PVC bevatten. De energie-efficiency van de installatie bedraagt 90% (10% wordt omgezet in CO₂) [13]. Het produkt kan voor 90% uit vloeibare brandstoffen en voor 10% uit cokes bestaan. De vloeibare brandstof is vanwege de verontreinigingen niet zondermeer geschikt als motorbrandstof, maar kan wel als feedstock gebruikt worden voor raffinaderijen. Deze grondstof is tenminste vergelijkbaar met nafta [14].

6.5 Selectief oplossen (BTP)

Dit proces is geschikt om een mengsel van kunststofafval in de samenstellende componenten te scheiden. De kunststoffen worden bij verhoogde druk en temperatuur in een organisch oplosmiddel opgelost. Bij verlaging van druk en temperatuur worden de kunststoffen gescheiden teruggewonnen. Het proces is getest voor mengsels uit LDPE, HDPE, PP, PVC, PVC en PET. Met xyleen of tetrahydrofuran als oplosmiddel kunnen alle fracties met een zuiverheid >99% teruggewonnen worden [12]. Een gedetailleerdere scheiding binnen deze materiaalgroepen is echter niet mogelijk.

Gezien de verhoogde temperatuur tijdens het oplossen en gezien de gebruiksgeschiedenis is de kwaliteit van het recyclingmateriaal vermoedelijk lager dan die van het primaire materiaal. Ook is weinig bekend over het verbruik aan oplosmiddel. De oplosmiddelverliezen zullen echter uit het oogpunt van giftigheid en efficiency zo laag mogelijk dienen te zijn. Nader onderzoek is nodig om de technische haalbaarheid in de praktijk te onderzoeken.

6.6 Herverwerken

De verwerking van gescheiden thermoplasten is technisch gezien niet moeilijk. Via extrusie of via spuitgieten wordt het afval tot nieuwe kunststofproducten verwerkt.

De bruikbaarheid van het secundaire materiaal wordt bepaald door de zuiverheid van het afvalmateriaal. De gebruiksmogelijkheden zijn in elk geval beperkt (bijv. niet geschikt voor levensmiddelenverpakkingen). Door de thermische behandeling treedt ook een degradatie van het materiaal op. Kleur, vulstoffen, verontreinigingen en problemen bij de scheiding maken deze route weinig aantrekkelijk voor huisvuil. Voor het meer uniforme KWD- en industrie-afval is deze route eerder bruikbaar.

6.7 Verbranden met WKK

Kunststofafval kan in verband met het smeltgedrag niet in gewone roosterovens verbrand worden. Verbranding van afval met hoog kunststofgehalte is alleen mogelijk in speciale ovens, waarbij vooral vloeistofbed installaties en draaitrommelovens voordelen bieden (o.a. [7]). Ook vergassing is een optie (zie ook alternatief 1). Koppeling van dergelijke verbrandingsovens aan WKK-installaties is mogelijk. Over het rendement van dergelijke installaties is nog relatief weinig bekend, omdat de ontwerpcriteria in het recente verleden vooral op afvalverwijdering gericht waren en energierugwinning als bijzaak werd beschouwd [7]. Hoewel een deel van de geproduceerde elektriciteit door de installatie zelf verbruikt wordt (rookgasreiniging, transportsystemen), moet een hoger rendement gehaald kunnen worden dan bij een conventionele AVI, omdat het watergehalte van het afval beduidend lager is (de verdampingsenthalpie van water is 3,2 GJ/t), en omdat het gehalte aan inerte materialen lager is [19]. In deze studie is uitgegaan van een rendement van 30% elektrisch en 35% thermisch, een conservatieve schatting op basis van het rendement van conventionele centrales die fossiele brandstoffen stoken.

6.8 Verbranden in AVI (zonder WKK)

Momenteel wordt ongeveer 50% van alle huisvuil verbrand in afvalverbrandingsinstallaties (AVI's). De afvalsamenstelling is momenteel aan sterke veranderingen onderhevig door de sterke toename van de gescheiden inzameling van GFT-afval. Hierdoor neemt de verbrandingswaarde van het afval toe tot ongeveer 10 GJ/t in het jaar 2000. Deze trend zal naar ver-

wachting doorzetten, waardoor ook het gemiddelde rendement van de AVI's toeneemt. Een deel van de installaties kan zowel warmte als elektriciteit leveren. De afzet van restwarmte zal in de toekomst echter een steeds groter logistiek probleem vormen. Gezien de weerstand vanuit de bevolking tegen afvalverbranding zullen nieuwe installaties waarschijnlijk niet in dichtbevolkte gebieden worden gebouwd. Warmteafzet wordt daarom niet meegenomen in de berekening. Het netto elektrische rendement van de huidige installaties wordt geschat op 20% [18]. In deze studie is verder gerekend met een rendement van 22%, een waarde die voor moderne AVI's geldt [19].

7. DE CO₂-EMISSIE IN DE REFERENTIE-SITUATIE

Als referentiesituatie is het huidige produktiesysteem gebruikt. Het betreft dus een statische referentie; wellicht treedt ook een autonome verandering op van de specifieke CO₂-emissie van dit systeem. Met deze veranderingen is in deze eerste analyse nog geen rekening gehouden.

Materialen en energiedragers worden vaak via verschillende routes gemaakt. Koppelproduktie en onduidelijkheden m.b.t. systeemgrenzen bemoeilijken een eenduidige toerekening, de nationale systeemgrenzen leiden tot nog grotere onzekerheden. De impact van een activiteit op de referentie is daarom niet zondermeer te voorspellen. Een studie naar deze veranderingen vereist een gedetailleerde modellering van het hele produktiesysteem, en de internationale aspecten, wat buiten het bereik van deze analyse valt. Voor de beschrijving van de referentie is daarom telkens een techniek gekozen op grond van de meest waarschijnlijke substitutie. Bij elektriciteitsproduktie is telkens uitgegaan van een deel van de zgn. 'basislast'. Onder basislast wordt dat deel van de elektriciteitsproduktie verstaan, dat voldoet aan de vraag vanuit machines en apparaten die continu draaien. Deze elektriciteit wordt op technische en financiële gronden op andere wijze geproduceerd dan de middenlast en de pieklast. Basislast wordt (voor de Nederlandse situatie) geproduceerd m.b.v. kolen, kerncentrales en stadsverwarming. Een deel van de basislast wordt geïmporteerd uit Duitsland (contractueel vastgelegd); deze is afkomstig uit kolencentrales. De nucleaire stroomleveringen uit Frankrijk hebben op dit ogenblik een sterk wisselend vermogen en wordt daarom niet tot de basislast gerekend. Vanaf 1997 wordt ook een aanzienlijk deel van de basislast uit Franse kerncentrales geïmporteerd (700 MW). Daardoor zal de specifieke CO₂-emissie van de referentie weer veranderen.

Echter niet alle basislasteenheden kunnen zomaar worden bijgesteld. Zo kan de hoogovengascentrale, die ook basislast levert, niet bijgesteld worden, omdat de levering van hoogovengas een exogeen gegeven is. Ook de nucleaire basislast is ongeschikt om bij te regelen. Daarom wordt uitgegaan van een samenstelling van het regelbare deel van de basislast met 2/3 kolengestookte eenheden en 1/3 gasgestookte eenheden. Voor de gasgestookte eenheden is uitgegaan van stadsverwarmingseenheden (dit geldt eigenlijk niet voor de Eemscentrale, een gasgestookte eenheid zonder warmteproduktie die ook basislast levert).

Het verschil tussen gemiddelde en basislast heeft grote invloed op de specifieke CO₂-emissie van de referentie, en dus op elektriciteitsproducerende en -vrage recyclingtechnieken. In tabel 7 is een overzicht gegeven van de specifieke CO₂-emissie bij de verbranding van fossiele energiedragers, voor zover relevant voor deze studie. Tabel 8 geeft een overzicht van de emissies bij de elektriciteitsproduktie. De basislast is opgebouwd uit een aantal van dit types centrales, en de specifieke CO₂-emissie kan met behulp van deze cijfers worden berekend. In tabel 9 is een overzicht gegeven van de inzet van primaire energiedragers en de specifieke CO₂-emissie bij de produktie van secundaire energiedragers, inclusief de gemiddelde waar-

de voor de basislast. In tabel 10 is tenslotte een overzicht gegeven van de inzet van energiedragers in de produktieketen van PE.

Tabel 7 *Specifieke CO₂-emissie van brandstoffen (CH₄-emissies bij winning en transport omgerekend naar CO₂-equivalenten, GWP = 26) [15]*

	Direct [kg CO ₂ /GJ _{th}]	Indirect ² [kg CO ₂ /GJ _{th}]	Totaal [kg CO ₂ /GJ _{th}]
Kolen	94	11,0	105,0
Ruwe olie	73	5,2	78,2
Aardgas ¹	56	1,6	57,6
Nucleaire brandstof	0	3,0	3,0

¹ Deze indirecte emissies gelden specifiek voor Nederlandse grootverbruikers.

² Zowel indirecte CO₂-emissies als emissies van andere broeikasgassen.

Tabel 8 *Analyse van de produktie van de elektriciteit [15,20]*

	Nucleair [GJ _{th} /GJ _{el}]	Kolen [GJ _{th} /GJ _{el}]	Gas [GJ _{th} /GJ _{el}]	CO ₂ [kg/GJ _{el}]
Kolen		2,5		263
Nucleair	3,0	9		
Stadsverwarming			1,20	69

Tabel 9 *Analyse van de produktie van de secundaire energiedragers [15,20]*

	Olie [GJ _{th} /GJ _{el}]	Kolen [GJ _{th} /GJ _{el}]	Gas [GJ _{th} /GJ _{el}]	CO ₂ [kg/GJ]
Elektr. (basislast) ¹		1,67	0,40	198
Stoom			1,1	63
H ₂			1,33	77
Bitumen	1,05			163 ²

¹ Samenstelling 2/3 kolen en 1/3 gas (stadsverwarming).

² kg/ton.

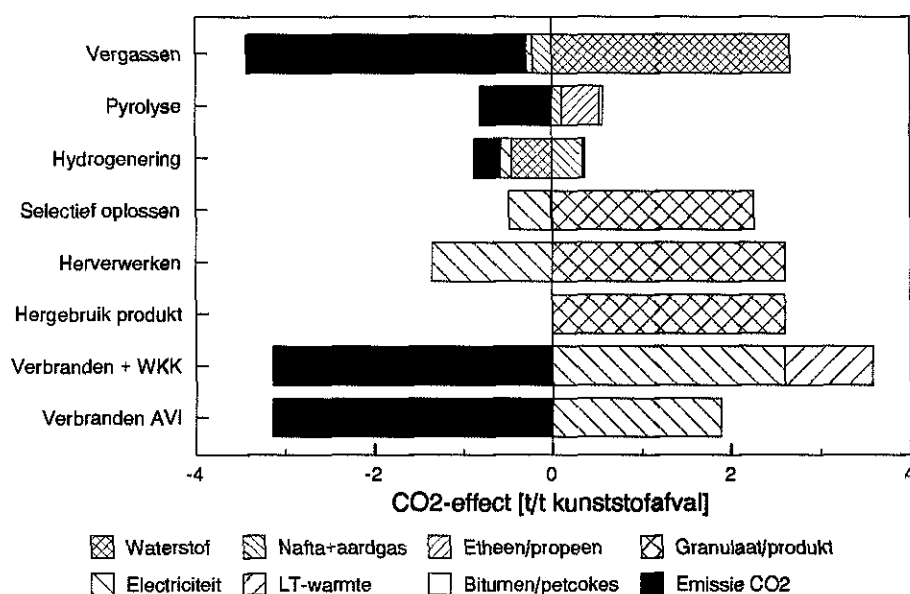
Tabel 10 *Analyse van de PE-produktieketen [16][17]*

	Olie [GJ/t]	Elektriciteit [GJ _{el} /t]	Stoom [GJ/t]	FS ¹ [t CO ₂ /t]	CO ₂ [t/t]
Nafta	45,5	0	0,1	3,14	0,42
Etheen	62,2	1,0	-3,7	3,14	1,69
Polyetheen (granulaat)	62,2	3,8	-3,35	3,14	2,26
Polyetheen (halfprod.)	62,2	5,5	-3,35	3,14	2,60

¹ CO₂, vastgelegd als feedstock.

8. BEREKENING VAN HET CO₂-EFFECT VAN DE ALTERNATIEVEN

In tabel 11 is een overzicht gegeven van de materiaal- en energiebalans van de verwerkingstechnieken. Somming van dit energieverbruik en het energieverbruik voor de voorbereiding uit tabel 6 geeft het totale energieverbruik. Op grond van deze balansen en op grond van de CO₂-emissiecoëfficiënten die in de vorige paragraaf zijn bepaald kan de specifieke CO₂-emissie bij wijziging van de verwijdering van kunststofafval worden berekend. Deze is weergegeven in tabel 12. Uit tabel 12 blijkt dat er grote verschillen zijn tussen de alternatieven. Het CO₂-effect kan variëren van +1,3 tot -2,6 ton CO₂ per ton polyolefinen-afval ten opzichte van de situatie, waarin al dit afval gestort wordt. In figuur 2 is de opsplitsing van het CO₂-effect naar de verschillende inputs en outputs weergegeven.



Figuur 2 Opsplitsing van het CO₂-effect van de alternatieven naar emissies (links) en vermeden emissies (rechts)

Ongeveer 310 kton kunststofafval wordt momenteel al verbrand in afvalverbrandingsinstallaties met energierugwinning, met een gemiddeld rendement van 20%. In de alternatieve verwijderingssituaties moet deze elektriciteit met basislast worden geproduceerd, het verschil tussen beide situaties is $43 \times 0,31 \times 0,20 \times 0,198 - 0,31 \times 3,14 = -0,45$ Mton CO₂. Indien de vergelijking, die voor polyolefinen is opgesteld voor alle kunststofafval zou gelden (ongeveer 1000 kton), kan het effect op de CO₂-balans ten opzichte van de huidige afvalverwijdering dus tussen +0,9 en -3,1 Mton variëren. De grootste reductie treedt op indien de onderdelen worden hergebruikt, een voor de hand liggende conclusie. Recycling via BTP-technieken (selectief oplossen en herverwerken) heeft vervolgens de voorkeur.

De afweging tussen BTM (vergassen, pyrolyse), BTF (hydrogenering) en verbranding is sterk afhankelijk van de verdere ontwikkeling met betrekking tot het rendement van de specifieke techniek. Verbranding in combi-

natie met warmte/kracht opwekking heeft een daling van de CO₂-emissie tot gevolg, maar de verbranding in een AVI leidt vanwege het lage rendement tot een stijging van de emissies. Dit geldt overigens specifiek voor de huidige situatie m.b.t. de elektriciteitsopwekking in basislast met voornamelijk kolencentrales. Opvallend is dat de CO₂-emissie toeneemt bij alle chemische recyclingtechnieken. Recycling scoort dus op het punt van CO₂ niet altijd beter dan verbranden. Dit resultaat wijkt af van eerdere studies, waarin is uitgegaan van een CO₂-reductie door deze technieken [3,21]. Wellicht is dit verschil terug te voeren op verschillen in de basisaannames. Onzekerheden hierin zijn dan ook nog groot. Daarnaast speelt de toekomstige ontwikkeling van de referentiesituatie (conventionele elektriciteit-, waterstof- en kunststofproductie) een cruciale rol; veranderingen hierin bepalen immers de 'vermeden' CO₂-emissie.

Tabel 11 *Input-output-balansen van de verschillende verwerkingstechnieken*

	Eenheid	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
<i>In:</i>									
PO-afval	[t]	1	1	1	1	1	-	1	1
PO-onderdelen	[t]	-	-	-	-	-	1	-	-
Elektriciteit ¹	[GJ/t]	0,3	-	-	2,3	4,8	-	-	-
Aardgas	[GJ/t]	3,8	-	-	-	-	-	-	-
Waterstof	[GJ/t]	-	-	6	-	-	-	-	-
<i>Uit:</i>									
Nafta	[t/t]	-	0,25	0,8	-	-	-	-	-
Etheen/propeen	[t/t]	-	0,25	-	-	-	-	-	-
PO-granulaat	[t/t]	-	-	-	1	-	-	-	-
PO-onderdelen	[t/t]	-	-	-	-	1	1	-	-
Bitumen/petcoques	[t/t]	-	0,25	0,1	-	-	-	-	-
Waterstof	[GJ/t]	34,8	-	-	-	-	-	-	-
Elektriciteit	[GJ/t]	-	-	-	-	-	-	13,2	9,5
LT-warmte	[GJ/t]	-	-	-	-	-	-	15,4	-
CO ₂	[t/t]	3,14	0,8	0,3	-	-	-	3,14	3,14

¹ 1/3 aardgas, 2/3 kolen (zie tekst).

- A1 = Vergassen met H₂ productie
- A2 = Pyrolyse
- A3 = Hydrogenering
- A4 = Selectief oplossen
- A5 = Herverwerken
- A6 = Hergebruik onderdelen
- A7 = Verbranden met WKK
- A8 = Verbranden in een AVI

De belangrijkste onzekerheden en keuzes in deze analyse betreffen de volgende aspecten.

Onzekere punten m.b.t. de afweging:

1. Hoe groot is de in Nederland te verwerken hoeveelheid kunststofafval?
2. Hoe ontwikkelt zich de samenstelling van het te verwerken kunststofafval

(kunststoffen onderling, samenstelling kunststof (additieven etc.)?)

3. In hoeverre is cascading van hoogwaardige naar laagwaardige materiaal-toepassingen nodig/mogelijk?

Onzekere punten m.b.t. de referentie:

1. Hoe wordt in de toekomst elektriciteit in basislast geproduceerd, en is het correct om tegen basislast af te wegen?
2. Hoe ontwikkelt zich de waterstofproductie in de energiesysteem?
3. Vindt integratie in de raffinaderijen of andere grote industriële complexen plaats, of is sprake van losstaande afvalverwerkingsinstallaties?
4. Is verwerking in het buitenland uit CO₂-optiek wellicht voordeliger?

Onzekere punten m.b.t. de technieken:

1. Welke kwaliteit hebben de produkten/in hoeverre is substitutie van primaire produkten mogelijk/in hoeverre bestaat voor deze produkten een afzetmarkt?
2. Welke energie-efficiency behalen de verwijderingsinstallaties?
3. Behoort warmte/kracht koppeling tot de mogelijkheden?
4. Welke schaal hebben de verwerkingsinstallaties?
5. Is CO₂-afvang mogelijk bij vergassen?

De berekeningen in dit rapport zijn uitgevoerd met een spreadsheet om gevoeligheidsanalyses mogelijk te maken.

9. CONCLUSIE

Veranderingen in de verwijderingsstructuur van het kunststofafval kunnen een significante invloed hebben op de CO₂-emissie. Het effect kan variëren tussen een lichte stijging met 0,9 Mton en een afname met maximaal 3,1 Mton. Het effect op de nationale CO₂-emissie ligt daarmee tussen +0.5% en -1.9%. Back-to-polymer technieken en produkthergebruik hebben beduidend grotere positieve effecten dan chemische recyclingtechnieken of verbranding. Verbranding met warmte/kracht koppeling in speciale installaties heeft een groter positief effect op de CO₂-balans dan de chemische recyclingtechnieken. Uit broeikasoptiek is recycling dus niet altijd beter dan verbranden. Deze conclusie moet wel genuanceerd worden; met name de definitie van de referentie heeft grote invloed op de beoordeling. Bijvoorbeeld door CO₂-reductiebeleid in de elektriciteitssector kan de referentie wijzigen, waardoor energierugwinning minder CO₂-effect zou hebben. Daarnaast geldt dat de recyclingtechnieken in een stadium verkeren waarin de kentallen nog dermate onzeker zijn dat geen definitieve beoordeling mogelijk is. Tenslotte beperkt deze analyse zich tot één effect: de CO₂-emissie. Voor het beleid spelen echter ook andere milieu-effecten, economische, juridische en sociale overwegingen een rol.

Tabel 12 *Relatieve CO₂-emissie van de alternatieven t.o.v. de referentie*

Alternatieven	t/t
A1 Vergassen met H ₂ produktie	0,8
A2 Pyrolyse	0,2
A3 Hydrogenering	0,5
A4 Selectief oplossen	-1,8
A5 Herverwerken	-1,3
A6 Hergebruik onderdelen	-2,6
A7 Verbranden met WKK	-0,4
A8 Verbranden in een AVI	1,3

- [15] J.R. Ybema, P.A. Okken: *Integrated energy chains and greenhouse gas reduction*. (in voorbereiding) Petten, 1993.
- [16] I. Boustead: *Polyethylene and polypropylene. Eco-profiles of the European plastics industry*, report no.3. Brussel, PWMI, 1993.
- [17] R.J.J. van Heijningen, J.F.M. de Castro, E. Worrell: *Energiekentallen in relatie tot preventie en hergebruik van afvalstromen*. NOH rapp.no. 9210, 1992.
- [18] Tauw Infra Consult: *MER Ontwerp Tienjarenprogramma Afval 1992-2002*. Studie in opdracht van het Afval Overleg Orgaan. Deventer, AOO 92-02, 1992.
- [19] A.E. Pfeiffer: *Afval, een energiebron van toenemende betekenis*. Presentatie tijdens het NSC-congres 'Thermische verwerkingstechnieken van afvalstoffen', 9/10/1992, Wageningen.
- [20] P.A. Okken: *CO₂-emissies bij verschillende alternatieven van elektriciteitsopwekking en -besparing in Nederland*. Petten, ESC-WR-89-11, 1989.
- [21] L. Struik: *Van kunststofafval weer olie maken is zo vreemd nog niet*. Polytechnisch tijdschrift pp. 40-42, december 1992.