Innovatie afvalverwerkings-technieken doorgelicht

CE Delft

Committed to the Environment

Innovatie afvalverwerkings-technieken doorgelicht

Dit rapport is geschreven door:
Erik Roos Lindgreen
Geert Bergsma
Diederik Jaspers

Delft, CE Delft, 31 oktober 2017

Publicatienummer: 17.2L47.160

Afval / Afvalverwerking / Procestechnologie / Pyrolyse / Vergassing / Kooldioxide / Emissies / Innovatie
VT: Milieuprestatie
Opdrachtgever: Gemeente Rotterdam

Alle openbare publicaties van CE Delft zijn verkrijgbaar via www.ce.nl

Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de projectleider Geert Bergsma (CE Delft)

© copyright, CE Delft, Delft

CE Delft
Committed to the Environment

CE Delft draagt met onafhankelijk onderzoek en advies bij aan een duurzame samenleving. Wij zijn toonaangevend op het gebied van energie, transport en grondstoffen. Met onze kennis van techniek, beleid en economie helpen we overheden, NGO's en bedrijven structurele veranderingen te realiseren. Al ruim 35 jaar werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.

Inhoud

	Woordenlijst	4
	Samenvatting	5
1	Inleiding	7
	1.1 Inleiding	7
	1.2 Opzet analyse	7
	1.3 Structuur rapport	7
2	Achtergrond afvalstromen	8
	2.1 Huishoudelijk afval zoveel mogelijk verwaarden	8
	2.2 Uitval uit ketens	9
3	Methodologie	11
	3.1 Scope en doel	11
	3.2 Systeemgrenzen en toerekening opslag biogeen CO_2	11
	3.3 Functionele eenheid	12
	3.4 Inventarisatie	12
	3.5 Substitutiemethode en vermeden producten	13
	3.6 CO_2-methode	13
4	LCI: W2C-technieken	14
	4.1 Selectie technieken	14
	4.2 Beschrijving technieken	15
	4.3 Vermeden productie van syngas uit aardgas	19
5	Hoofdresultaten	20
	5.1 Resultaten W2C-technieken voor papier/plastic input	20
	5.2 Resultaten W2C-technieken in vergelijking met de AEC voor plastic input	21
6	Resultaten W2C-technieken papier/plastic input	24
	6.1 Resultaat conventionele pyrolyse	24
	6.2 Resultaat geïntegreerde hydropyrolyse (Versie A, papier/plastic)	25
	6.3 Resultaat geïntegreerde hydropyrolyse (Versie B, papier/plastic).	26
	6.4 Resultaten lage temperatuur vergassing (input: papier/plastic)	28
	6.5 Resultaten vergassing door Enerkem (input: papier/plastic)	29
7	Resultaten technieken plastic input	31
	7.1 Resultaat conventionele pyrolyse	31
	7.2 Resultaat geïntegreerde hydropyrolyse (Versie A, input plastic).	32
	7.3 Resultaat geïntegreerde hydropyrolyse (Versie B, input plastic)	33
	7.4 Resultaat lage temperatuur vergassing	34

8 Conclusies 35

9 Bibliografie 36

A Gegevens AEC's 37

B Resultaten AEC's 38
B.1 Resultaten analyse AEC's papier/plastic input 38
B.2 Resultaten analyse AEC's plastic input 40

C Data W2C-technieken 41

Woordenlijst

Afkorting/term	Betekenis
AEC	Afval Energie Centrale
W2C	Waste-to-chemicals: technieken om afval om te zetten in chemische grondstoffen
ONF	Organische natte fractie
RDF	Refuse-derived fuel: een brandstof die wordt gewonnen uit afval
TRL-niveau	Technology Readiness Level: indicator voor de mate van ontwikkeling van een technologie
CO_2-eq.-emissies	Emissies van koolstofdioxide-equivalenten: geeft aan hoeveel een gegeven hoeveelheid broeikasgas bijdraagt aan de opwarming van de aarde, gebruikmakend van een equivalente concentratie CO_2
LCA	Life Cycle Assessment
LCI	Life Cycle Inventory
POX	Partiële oxidatie
BFD	Block flow diagram

Samenvatting

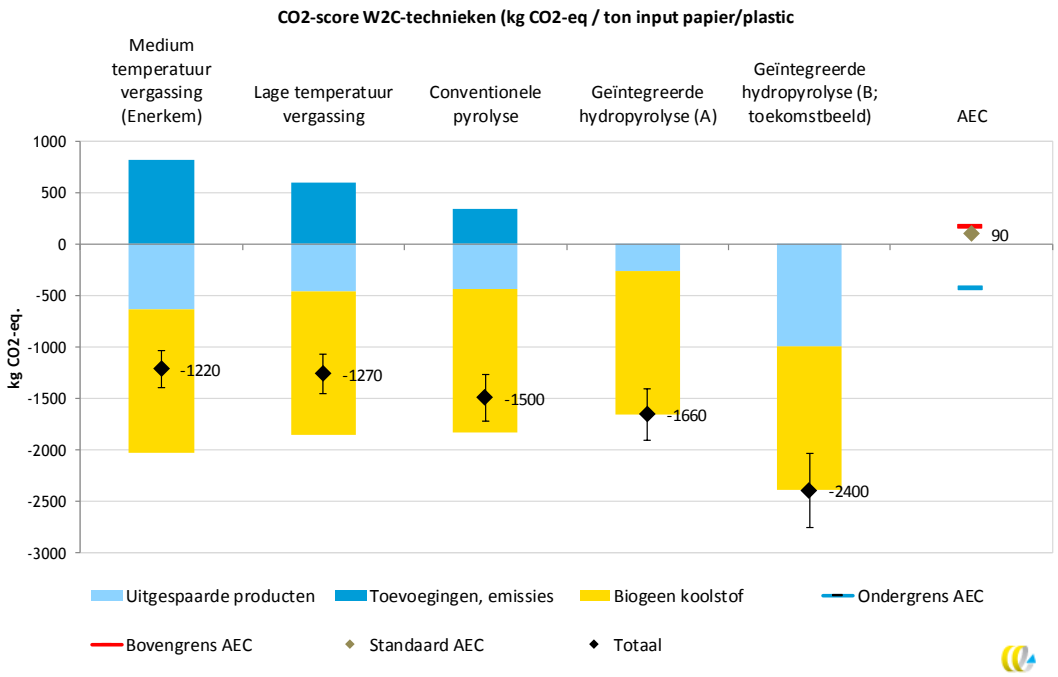
Er is een groot aantal nieuwe afvalverwerkingstechnieken in ontwikkeling of al op de markt om afval om te zetten in herbruikbare producten en (chemische) materialen, of om afval zo efficiënt mogelijk om te zetten in energie. Voor gemeenten en andere partijen die verantwoordelijk zijn voor afval-verwerking is het vaak lastig om inzicht te krijgen in de mogelijkheden en milieuprestaties van deze technieken.

Bron- en nascheiding van kunststof, papier en textiel levert via mechanische recycling in veel gemeenten steeds meer bruikbare grondstoffen. In de keten van bron- en nascheiding is er op diverse plaatsen aanzienlijke uitval van plastic fracties die mechanisch slecht te recyclen zijn of papier/plastic mixfracties die nu toch naar een Afval Energie Centrale (AEC) gaan. Dit onderzoek stelt de vraag of het zinvol is om deze uitvallen uit de mechanische recyclingketens te gebruiken om chemische grondstoffen te maken.

In dit onderzoek worden vijf technieken milieukundig in kaart gebracht en vergeleken met de huidige situatie: verbranding met energieopwekking in een AEC. Hierbij is gekeken naar de CO_2-emissie-winstscore als milieukenmerk. De selecteerde technieken zijn conventionele pyrolyse, geïntegreerde hydropyrolyse (twee varianten), lage temperatuur vergassing, en medium temperatuur vergassing (Enerkem).

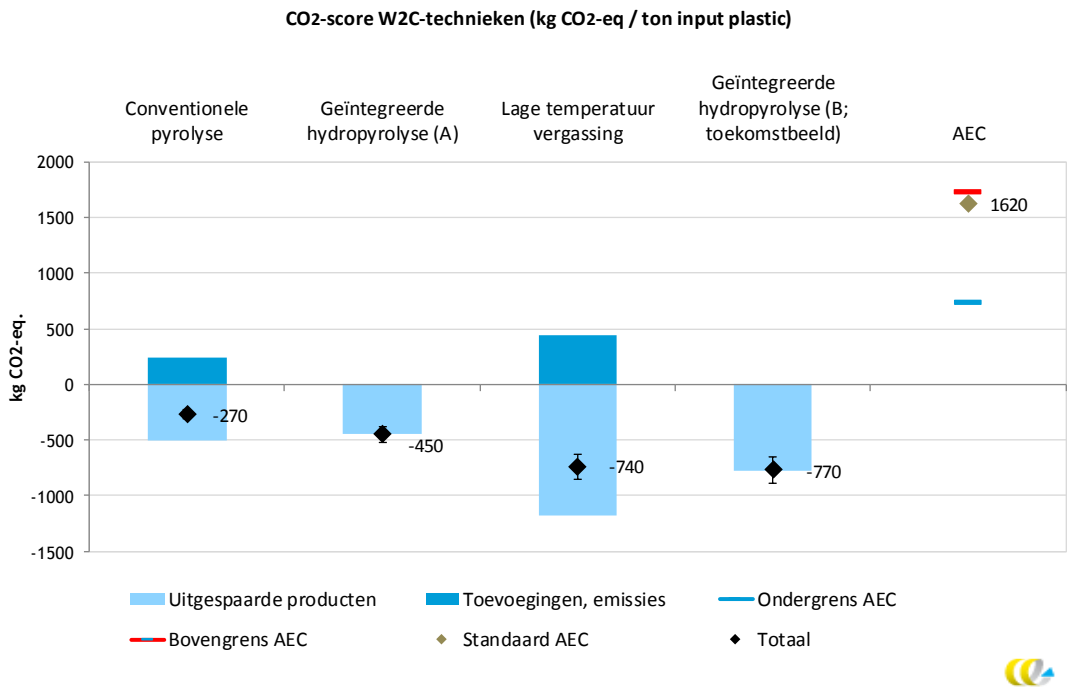
Deze technieken zijn vergeleken op basis van twee vastgestelde inputs: (A) papier sorteerverliezen met 75% papier en 25% kunststof of (B) 100% kunststof sorteerverliezen. Voor deze inputs zijn voor elke techniek de overige inputs (energie, hulpmiddelen) en de outputs (olie, gas, reststoffen) vastgesteld. Vervolgens is de substitutiemethode toegepast om een screening-LCA uit te voeren. De resultaten, uitgedrukt in kg CO_2-eq. per ton input, zijn daarna vergeleken met de milieuprestatie van een gemiddelde AEC bij dezelfde input.

Figuur 1 - CO_2-resultaten W2C-technieken (kg CO_2-eq./ton Input A: papier/plastic)



De resultaten voor input A (75% papier, 25% plastic) laten zien dat elke waste-to-chemicals-techniek (W2C-techniek) qua CO_2-emissies beter scoort dan een gemiddelde AEC (zie Figuur 1). Bij een aantal technieken zijn meer toevoegingen nodig (O_2, H_2, energie), maar dit wordt gecompenseerd door de productie van bijvoorbeeld syngas en pyrolyseolie. Versie B van de geïntegreerde hydropyrolysetechniek laat de beste milieuprestatie zien, maar is een techniek die nog niet op grote schaal uitvoerbaar is. Deze techniek moet daarom gezien worden als toekomstbeeld.

Figuur 2 - Milieuresultaat W2C-technieken (kg CO_2-eq./ton Input B: plastic)



Ook bij een input van 100% plastic scoort elke W2C-techniek beter dan de AEC. Voor medium temperatuur vergassing (Enerkem) zijn voor dit type input geen gegevens beschikbaar. De resultaten lopen uiteen van -270 tot -770 kg CO_2-eq. per ton input.

De CO_2-winst die gerapporteerd wordt voor mechanische recycling van 1 ton plastic in verschillende studies is ongeveer 1.300 tot 2.500 kg CO_2. Dit is afhankelijk van het meetpunt van recycling, en van de uitval in de keten. Een precieze vergelijking met mechanische recycling is in deze studie niet uitgevoerd omdat de geselecteerde inputstromen voor de W2C-technieken juist bestaan uit uitvallen die niet goed mechanisch gerecycled kunnen worden.

1 Inleiding

1.1 Inleiding

De gemeente Rotterdam, een aantal gemeenten in de Rotterdamse regio en de provincie Zuid-Holland trekken samen op in de transitie richting de circulaire economie. Een belangrijk onderdeel van deze transitie is het verkrijgen van energie en chemische (grondstoffen) uit huishoudelijk afval. Hiervoor is een groot aantal beschikbare technieken in ontwikkeling, of al op de markt: o.a. natte nascheiding met enzymen (REnescience van Dong), verschillende vormen van chemische recycling (o.a. PET-recycling van Ioniqa) en ook verschillende vormen van thermische waste-to-chemicals-technieken (pyrolyse, hydropyrolyse en vergassingstechnieken).

Deze technieken verschillen sterk in mate van ontwikkeling, toepasbaarheid op huisvuil en productie van energie of materialen. Over de milieuprestaties van de technieken in vergelijking met de verwerking van afval in Nederlandse Afval Energie Centrales (AEC's) is nog weinig bekend. Dit rapport presenteert een overzicht van verschillende innovatieve afvalverwerkingstechnieken en analyseert de milieuprestaties in de huidige context van afvalverwerking.

1.2 Opzet analyse

Op basis van TRL-niveau en relevantie is een selectie gemaakt van een aantal afvalverwerkings-technieken. De analyse van de milieuprestatie van de technieken is uitgevoerd op basis van twee gedefinieerde afvalinputs: (A) 1 ton 75% papier, 25% plastic, en (B) 1 ton 100% plastic. De technieken worden op basis van deze inputs onderling en met de Nederlandse AEC's vergeleken. De milieu-prestatie is nauwgedefinieerd als de uitstoot van CO_2-eq. per ton input, en is berekend in LCA-softwareprogramma SimaPro met de IPCC GWP 2013 100-a-methode. Data is verkregen uit literatuur, na communicatie met ontwikkelaars en interviews met experts.

1.3 Structuur rapport

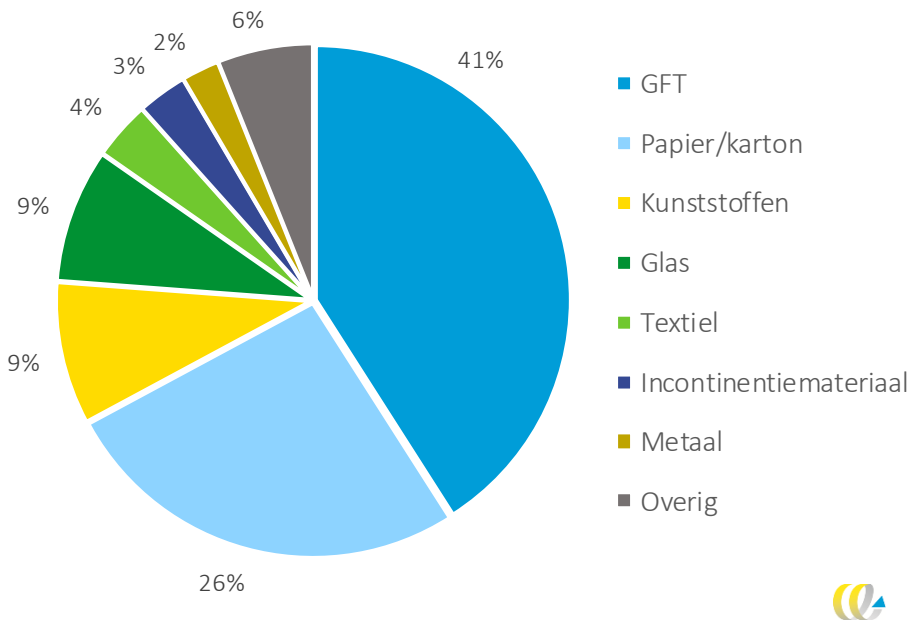
In dit hoofdstuk bespreken we kort de focus van dit onderzoek. In Hoofdstuk 2 wordt de afvalcontext van de W2C-technieken weergegeven, en presenteren we de twee afvalstromen die op deze technieken aansluiten. In Hoofdstuk 3 komt de LCA-methodologie aan bod, waarbij ook de systeemgrenzen worden beschreven. In Hoofdstuk 4 geven we een korte beschrijving van elke geselecteerde techniek. In Hoofdstuk 5 presenteren we de hoofdresultaten van de technieken ten opzichte van elkaar en ten opzichte van de AEC. In Hoofdstuk 6 zoomen we in op de resultaten per techniek voor Input A (plastic/papier), en in Hoofdstuk 7 voor Input B (plastic). Hierna volgen de conclusies en, in Bijlage A en B, de achtergrondgegevens en resultaten voor de analyse van de milieuprestatie van de AEC's. De inputgegevens van de analyse van de W2C-technieken zijn weergeven in Bijlage C.

2 Achtergrond afvalstromen

2.1 Huishoudelijk afval zoveel mogelijk verwaarden

Gemeenten in Nederland en Zuid-Holland hebben er samen met de Rijksoverheid voor gekozen om huishoudelijk afval steeds meer te proberen te verwaarden als grondstof. Het VANG-beleids-programma heeft hier doelstellingen voor en voor sommige materialen als kunststof en dranken-kartons zijn er ook vergoedingen beschikbaar. Concreet betekent dit dat alle gemeenten een mix van bron- en nascheiding toepassen waarbij zoveel mogelijk materialen mechanisch worden nagescheiden.

Figuur 3 - Verdeling fijn huishoudelijk afval in Nederland



Bron: **(CBS, 2016)**; **(Rijkswaterstaat, 2017)**.

Tabel 1 - Scheiding en recycling opties, eerste voorkeuren

Afvalstroom	Scheiding/recyclingopties	Product
GFT	Bronscheiding of nascheiding als ONF	Biogas en of compost
Papier	Bronscheiding	Gerecycled papier
Glas	Bronscheiding	Input glasfabriek
Kunststof	Bron- of nascheiding	Gerecycled kunststof
Drankenkarton	Bron- of nascheiding	Gerecycled papier
Metaal (alu/staal)	Bron- of nascheiding	Input metaalfabriek
Textiel	Bronscheiding	Hergebruik en recycling

2.2 Uitval uit ketens

Tijdens het verwerken van deze verschillende huishoudelijke afvalstromen zijn er verschillende materiaalstromen die uitvallen en niet tot product verwerkt worden maar verbrand worden in een AEC. Concreet gaat het om:

- uitval uit papierrecycling door hoog aandeel kunststof (papier/kunststofmix);
- uitval uit textielrecycling (hoog aandeel kunststoffen);
- uitval uit kunststof bronscheiding (dopjes, kleine delen);
- uitval uit kunststof nascheiding;
- mix kunststof dat als materiaal gerecycled kan worden maar weinig waarde heeft (kunststoffen).

De technieken die hier verder beschouwd worden zijn gericht op het hoogwaardiger dan een AEC verwerken van deze uitvallen uit de recyclingsector. Daarbij gaat het om de volgende afvalstromen:

- Stroom A: Een hoog aandeel kunststof;
- Stroom B: Een mix van papier en kunststof (RDF).

2.2.1 Van AEC naar grondstoffen

Voor uitval uit recyclingroutes en RDF geldt dat deze op dit moment niet gerecycled worden en dat gemeenten hier ook geen afvalfondsvergoeding voor krijgen. Een techniek die deze stromen beter kan verwerken dan een AEC en er grondstoffen uit zou kunnen maken is daarvoor interessant. Wellicht is het zelfs mogelijk om (gedeeltelijk) ook afvalfondsvergoedingen voor deze stromen te gaan krijgen als het om een hoogwaardige materiaaltoepassing gaat.

2.2.2 Van mix kunststof naar grondstoffen?

Technisch is het ook goed mogelijk om de mix kunststofstroom uit kunststof recycling aan te bieden aan chemische recyclingprocessen. Op dit moment is dit voor gemeenten echter heel onaantrekkelijk omdat dan de vergoeding van circa 700€ per ton afval van het afvalfonds vervalt. Zolang er nog geen vergoeding geldt voor chemische recycling is deze route daarmee niet interessant. In deze verkenning is deze optie daarom nog niet meegenomen.

2.2.3 Context LAP3

Op korte termijn zal er een nieuw landelijk afvalbeheerplan (LAP3) vastgesteld worden door de staatssecretaris van Infrastructuur en Milieu. LAP3 vervangt LAP2. In dit plan wordt het afval-beheerbeleid voor de periode 2017 tot en met 2023 vastgelegd, met een doorkijk tot 2029. Onderdeel van LAP3 zijn recycle- en hergebruikdoelstellingen, en een aanzet tot het maken van onderscheid tussen meer en minder hoogwaardige vormen van recycling. Dit laatste aspect is relevant voor W2C-technieken, die in deze context een nieuwe positie innemen ten opzichte van mechanische recycling en afvalverbranding.
In het LAP wordt de volgende afvalhiërarchie aangehouden (Ministerie van I&M, 2017):

A	Preventie
B	Voorbereiding voor hergebruik
C1	Recycling van het oorspronkelijke functionele materiaal in een gelijke of vergelijkbare toepassing
C2	Recycling van het oorspronkelijke functionele materiaal in een niet gelijke of vergelijkbare toepassing
C3	Chemische recycling
D	Andere nuttige toepassing, waaronder energieterugwinning
E1	Verbranden als vorm van verwijdering
E2	Storten of lozen

Ook thermische afvalverwerkingsprocessen als pyrolyse en vergassing vallen in het LAP onder 'chemische recycling'. Chemische recycling wordt in deze aangepaste hiërarchie voor het eerst genoemd in de recyclingopties. Voorlopig wordt chemische recycling voorzichtigheidshalve nog als minder hoogwaardig gezien dan recycling als materiaal. Als reden hiervoor wordt genoemd dat chemische recycling relatief veel energie zou kosten. Wel is ook beschreven in de inspraakversie van het beleidskader van LAP3 dat chemische recycling toch de voorkeur kan "krijgen boven recycling als materiaal wanneer zij voldoet aan de criteria om te spreken van voorkeursrecycling (…) of wanneer op basis van een LCA van de hiërarchie kan worden afgeweken".

2.2.4 Conclusie

Dit onderzoek richt zich op het hoogwaardiger (economisch en milieukundig) verwerken van kunststoffracties en kunststof/papierfracties die uitvallen uit de bestaande recyclingketens.

3 Methodologie

3.1 Scope en doel

Dit rapport gaat in op de vraag: wat is de milieuprestatie van een aantal innovatieve recycling-technieken die relevant zijn voor de regio Rotterdam, en hoe verhouden deze technieken zich tot de huidige afvalverwerking in een AEC?

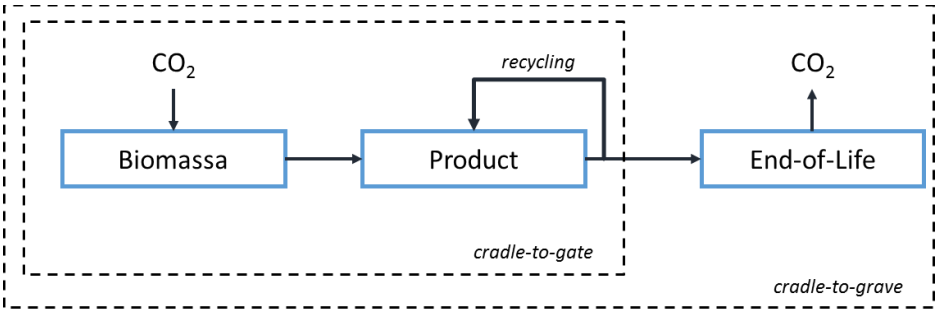
Om deze vraag te beantwoorden is een screening-LCA van een selectie van technieken uitgevoerd op basis van twee gedefinieerde inputs. Het uiteindelijke doel van deze studie is het presenteren van een overzicht van innovatieve afvalverwerkingstechnieken en hun milieuprestatie, uitgedrukt in CO_2-eq.-emissies per ton input. Dit overzicht ondersteunt de gemeenten Rotterdam en de provincie Zuid-Holland, en eventuele overige partijen, in het maken van hun keuze voor dergelijke technieken in de transitie richting een circulaire economie.

Omdat het gaat om technieken die sorteerverliezen verwerken is nascheiding in de analyse niet meegenomen. De huidige afvalverwerkingstechniek voor deze stroom is de AEC; dit is dan ook de referentietechniek waar de innovatieve technieken milieukundig mee worden vergeleken.

3.2 Systeemgrenzen en toerekening opslag biogeen CO_2

Omdat de analyse een afval-LCA betreft, is gekozen voor een cradle-to-gate ("wieg-tot-poort") aanpak. Dit betekent dat het levenseinde van de geproduceerde materialen geen onderdeel is van de systeemgrenzen (zie Figuur 4).

Figuur 4 - Cradle-to-gate vs. cradle-to-grave



In de modellering van de milieuprestaties van AEC's wordt bij de verbranding van papier de uitstoot van biogeen CO_2 niet meegeteld. Dit komt omdat deze uitstoot in de Ecoinvent-verbrandings-processen niet wordt meegenomen. Als gevolg hiervan hebben we ervoor gekozen de biogene koolstofopname (in het geval van een biogene input van papier) mee te nemen bij de milieuanalyse van W2C in de vergelijking met de AEC. Dit betekent dat vastgelegd biogeen koolstof bij zowel de technieken als bij de AEC een additioneel voordeel toegekend krijgt[1].

[1] Berekening van het deel biogeen CO_2 bij verbranding van 0,75 ton papier: het gehalte koolstof in papier is 50% op gewichtsbasis (ECN, 2017). Bij 0,75 kg papier is dit dus 0,375 kg koolstof. Dit betekent dat er 0,375*44/12 = 1,4 kg CO_2 vrijkomt bij de verbranding van 0,75 kg papier. Dit is het biogene voordeel dat toegekend wordt aan de technieken met biogene input.

3.3 Functionele eenheid

De functionele eenheid, die het mogelijk maakt de verschillende technieken eerlijk te vergelijken, is als volgt gedefinieerd:

De verwerking van 1 ton huishoudelijk afval met een samenstelling van of (A) 75% papier sorteerverliezen en 25% kunststof sorteerverliezen of (B) 100% kunststof sorteerverliezen.

De eerste input bestaat uit sorteerverliezen (rejects) met kunststof uit de papierrecycling (papier/ plastic-mix). We hebben aangenomen dat deze input een calorische waarde (LHV) heeft van +/-20 MJ/kg. Op basis hiervan is vastgesteld dat deze voor 75% uit rejects van papier bestaat, en voor 25% uit plastics. Verder wordt aangenomen dat de input droog is.

Tabel 2 - Input A: Uitval uit papierrecycling (papier/plasticmix, RDF)

Fractie	F(n)	LHV (MJ/ton fractie)	LHV (MJ/ton RDF)
Sorteerverliezen kunststoffen	25%	35.000	8.750
Sorteerverliezen papier	75%	15.000	11.250
Totaal	**100%**	**-**	**20.000**

De tweede input bestaat uit sorteerverliezen van plastic recycling. Hierbij nemen we aan dat de samenstelling van de verliezen gelijk is aan de gemiddelde plastic samenstelling in Nederland. Met deze aanname heeft deze input een calorische waarde (LHV) van 35 GJ/ton.

Tabel 3 - Input B: Uitval uit plasticrecycling. Samenstelling is gebaseerd op plastic samenstelling NL: rapportage onderzoek kunststof afdankstromen in Nederland

Fractie	F(n)	LHV (MJ/ton fractie)	LHV (MJ/ton totaal plastic rejects)
PET	13%	21.850	2.840,5
HDPE	12%	40.000	4.800
PVC	8%	8.000	640
LDPE	26%	44.000	11.440
PP	18%	40.340	72.61,2
PS	7%	42.750	29.92,5
Overig	16%	+-30.000	4800
Totaal	**100%**	**-**	**35.000**

Bron: (Berenschot; DPI Value Centre; Agentschap NL; NRK, 2011).

3.4 Inventarisatie

Om de screening-LCA uit te kunnen voeren is onder andere vastgesteld welke conventionele grondstoffen of processen er na toepassing van de afvalverwerkingstechnieken worden vervangen, en hoeveel materiaal er op basis van een vastgestelde input geproduceerd wordt door elke techniek. Dergelijke kengetallen komen uit de literatuur of zijn vastgesteld op basis van een inschatting van experts. Aan de hand van deze gegevens is de milieumodellering vervolgens opgesteld.

3.5 Substitutiemethode en vermeden producten

Een kenmerk van W2C-technieken is dat er chemische producten uit afval geproduceerd worden. Deze producten vervangen producten die anders op een andere manier, bijv. uit aardolie, geproduceerd zouden worden.

Om de milieu-impact van de inzet van dergelijke producten te bepalen is gewerkt met de LCA-substitutiemethode. Dit betekent dat gekeken is hoe bijvoorbeeld syngas, dat verder de chemische industrie ingaat, was geproduceerd als deze afvaltechniek niet zou worden toegepast. Deze productie en haar emissies worden voorkomen en deze emissies worden daarom afgetrokken (gesubstitueerd) van de emissies van het afvalverwerkingsproces.

De keuze voor het gebruik van de substitutiemethode heeft invloed op de systeemgrenzen – en de milieuscore – van de verwerking van afval. De grens ligt bij het geproduceerde syngas dat een ander product vervangt; de rest van de keten is geen onderdeel van de scope van de analyse. Hetzelfde geldt voor de elektriciteit die geproduceerd wordt in AEC's: dit vervangt 'conventioneel geproduceerde elektriciteit', waarbij het niet van toepassing is hoe of waar deze elektriciteit vervolgens wordt ingezet.

3.6 CO_2-methode

Omdat het een screening-LCA betreft is de milieuscore is gedefinieerd als de CO_2-eq.-emissies per ton gedefinieerde input. Deze analyse is uitgevoerd in SimaPro 8.4.0 met Ecoinvent 3 en de IPCC 2013 GWP 100a-methode.

4 LCI: W2C-technieken

4.1 Selectie technieken

Op basis van een literatuurverkenning is in overleg met de gemeente Rotterdam een voorlopige selectie gemaakt van een aantal afvalverwerkingstechnieken. Hierbij zijn de volgende categorieën aangehouden: thermochemische recycling, chemische recycling en, als referentietechniek, verbranding met energieterugwinning in de AEC. Vanuit deze eerste selectie zijn vervolgens op basis van het TRL-niveau, relevantie voor de regio Rotterdam en de beschikbaarheid van gegevens een aantal technieken uitgekozen om te modelleren. Als referentietechniek is de verbranding in een AEC aangehouden.

Tabel 4 - Inventarisatie afvaltechnieken. De gearceerde technieken zijn geselecteerd voor de analyse

Categorie	Techniek	Input	Output	TRL
Thermochemische recycling	Liquefactie (Cellupalm)	- Biomassa, papier	- Cellulose (in volgende stap naar biobased kunststof; optie: reststroom via hydropyrolyse naar bio-olie)	6
	Radiolyse (ENERPY)	- Biomassa - Autobanden - Organisch afval	- Koolstof (char) - (Bio)olie - Gas	5
	Pyrolyse (1e en 2de generatie)	- Oorspronkelijk: residu-olie. - Plastics: hoofdcategorieën PE, PP (PUR, PS iets minder geschikt) - Lastig: PET, nylon, PVC - Biomassa (A, B, C hout, GFT, slib, zaagsel, pellets) - Evt.: gemengde afvals-tromen (RDF, non-recycable papier en plastic, catering-afval, residustromen uit recycling)	- Bij plastic: lampolie, kerosine - Bij biomassa: 'pyro-olie' (laagcalorisch, zuur, instabiel) - Syngas	5-7
	Geïntegreerde hydropyrolyse (3de generatie)	- Plastics: hoofdcategorieën PE, PP, PUR, PS. - Lastiger: PET, nylon, PVC, maar geschikt voor groter aandeel dan conventionele pyrolyse. - Biomassa (A, B, C hout, GFT, slib, zaagsel, pellets) - Gemengde afvalstromen (RDF, non-recycable papier en plastic, cateringafval, residustromen uit recycling)	- Pyrolyseolie van hogere kwaliteit: hogere calorische waarde, neutrale pH, laag zwavelgehalte. Toepassingen: drop-in fuel (EN-95, best case), feedstock voor MGO - Syngas	5-7

Categorie	Techniek	Input	Output	TRL
	Lage temperatuur-vergassing: 700-900°C	- Plastics - Biomassa (A, B, C-hout, GFT, slib, zaagsel, pellets). - Kan gevoelig zijn voor fluctuaties in samenstelling en vochtgehalte. Hoge zuurstofgehaltes kunnen van invloed zijn op samenstelling output. Mogelijk teervorming bij biomassahoudende stroom.	- Syngas (niet direct geschikt voor W2C-toepassingen; wel voor energie-toepassingen)	5-7
	Medium temperatuur-vergassing: 900-1.600°C (Enerkem).	- Biomassa (A, B, C-hout, GFT, slib, zaagsel, pellets) - Minder gevoelig voor fluctuaties in samenstelling - Ook geschikt voor gemengde afvalstromen	- Syngas (lage hoeveelheid roet, laag koolwaterstof gehalte, geen tar; geschikt voor W2C-toepassingen na H_2-correctie)	5-7
Chemische recycling	Depolymerisatie met magnetische vloeistof (Ioniqa)	PET-afval (meerder kleuren)	Virgin PET (ontkleurd)	10.000 ton productiefaciliteit staat gepland
Referentie technieken	AEC	Gemengde afvalstromen	Elektriciteit en warmte	8-9
	Cementoven (als vervanging van kolen)	Gemengde afvalstromen	Warmte	8-9
	Mechanische recycling	Plastics, textiel, papier	Plastics, textiel, papier	7-8

4.2 Beschrijving technieken

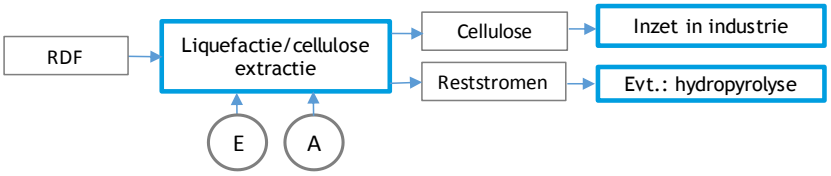
4.2.1 Liquefactie/cellulose-extractie

Liquefactie of cellulose-extractie is een extractieproces dat onder druk cellulosepulp produceert uit cellulose-houdende afvalstromen zoals papier. Dit gebeurt onder toevoeging van onder andere organisch zuur en stoom. De cellulose die geproduceerd wordt is hoogwaardig en kan worden ingezet in de textielindustrie.

Een voordeel van dit proces is dat er geen drogingsstap nodig is, omdat het een nat proces is. Dit biedt vooral voordelen voor inputs die lastig te drogen zijn, zoals luiers.

Deze techniek is uiteindelijk niet meegenomen in de selectie omdat er onvoldoende kwantitatieve informatie over de in- en outputs van de techniek beschikbaar was. Ook is de input anders dan de eerder gedefinieerde Inputs A en B. Een eerste beeld is dat het uitsparen van cellulose een milieuvoordeel oplevert, maar dat de toevoeging van additieven zoals natronloog en stoom dit voordeel mogelijk verkleinen. Dit is afhankelijk van de gebruikte hoeveelheden additieven en procesindeling (recycling afvalstromen, etc.).

Figuur 5 - Procesdiagram liquefactie/cellulose-extractie

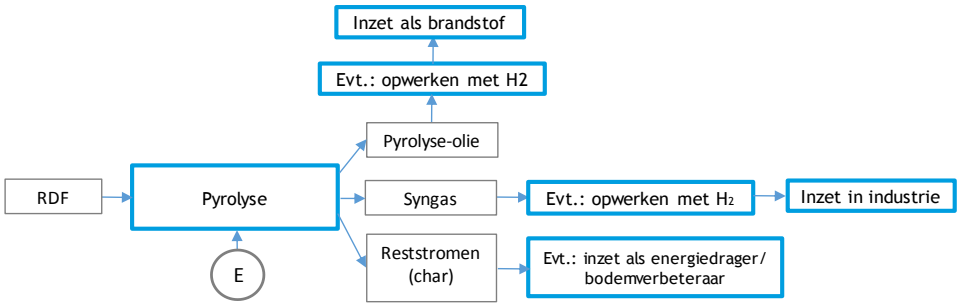


4.2.2 Pyrolyse

Bij pyrolyse wordt de input zonder zuurstof verwarmd (~400-600°C) en omgezet naar verschillende producten. De brandstof wordt bij alle vormen van pyrolyse afgebroken tot lange molecuulketens van verschillende lengtes, met een focus op C16-vloeistoffen.

Bij pyrolyse worden brandstof (olie), syngas, zouten en metalen, organische zuren en koolstof/char geproduceerd. De verhouding en kwaliteit dan deze producten hangt af van de specifieke techniek en kwaliteit van de input. De kwaliteit van de output is zoals bij elke thermische recyclingtechniek sterk afhankelijk van de input. Biomassa leidt tot een laagwaardige zure brandstof met een lage calorische waarde, terwijl er bij een input van plastic (PE, PP, PUR, PS) een brandstof van betere kwaliteit wordt geproduceerd.

Figuur 6 - Procesdiagram conventionele pyrolyse



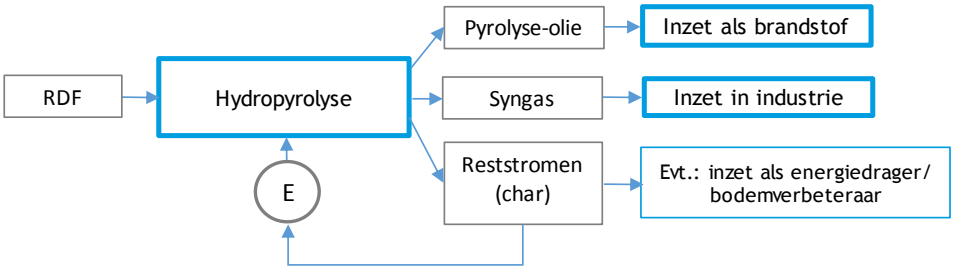
4.2.3 Geïntegreerde hydropyrolyse (3de generatie)

Hydropyrolyse is een meer geavanceerde vorm van pyrolyse, waarbij een brandstof van hogere kwaliteit wordt geproduceerd. Ook is deze techniek beter geschikt voor een minder homogene input, en minder gevoelig voor geoxygeneerde plastics.

Door het gebruik van waterstof bij hydropyrolyse wordt het ongewenste zuurstof uit de output verwijderd, waardoor de brandstof van hogere kwaliteit is. Soms worden bij dit opwerkingsproces ook andere katalysatoren gebruikt. Het gebruik van waterstof zorgt voor een hogere energie-input, waardoor de energie-efficiëntie gelimiteerd is.

Er wordt bij hydropyrolyse voornamelijk char (koolstof), syngas en olie geproduceerd. De verhouding tussen deze drie producten is sterk afhankelijk van de input en de specifieke gehanteerde technologie. Bij geïntegreerde 3de generatie hydropyrolyse wordt de char of het syngas ingezet als energiedrager in het proces zelf, waardoor er geen externe energie toegevoegd hoeft te worden.
In een andere versie van dit proces wordt het geproduceerde char in een tweede reactor vergast tot syngas, waardoor het proces een hoge thermische efficiëntie heeft.

Figuur 7 - Procesdiagram geïntegreerde hydropyrolyse

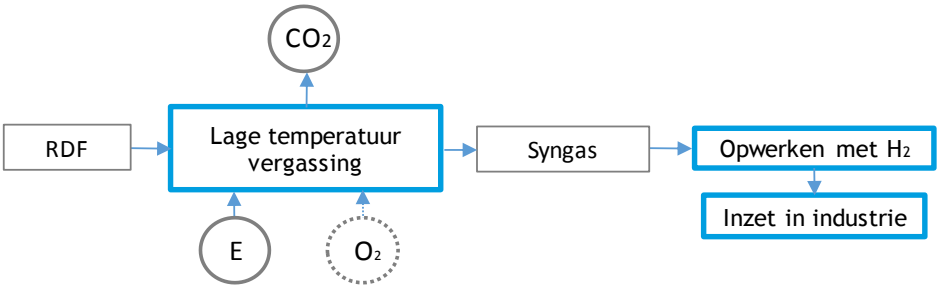


4.2.4 Lage temperatuur vergassing

Vergassing is het verwarmen van brandstof met toevoer van zuurstof. De brandstof wordt bij vergassing afgebroken tot de kleinste moleculaire bouwstenen: H_2 en CO. Dit is synthetisch gas, ook wel syngas genoemd. Uit lage temperatuur vergassing van de vastgestelde inputs komt relatief lage kwaliteit syngas. Voor de opwerking van lage kwaliteit syngas naar hoge kwaliteit syngas is een bewerkingsstap nodig waarbij extra waterstof toegevoegd wordt. Uit hoge kwaliteit syngas kunnen synthetische koolwaterstoffen gemaakt worden, of het gas kan op andere manieren worden ingezet.

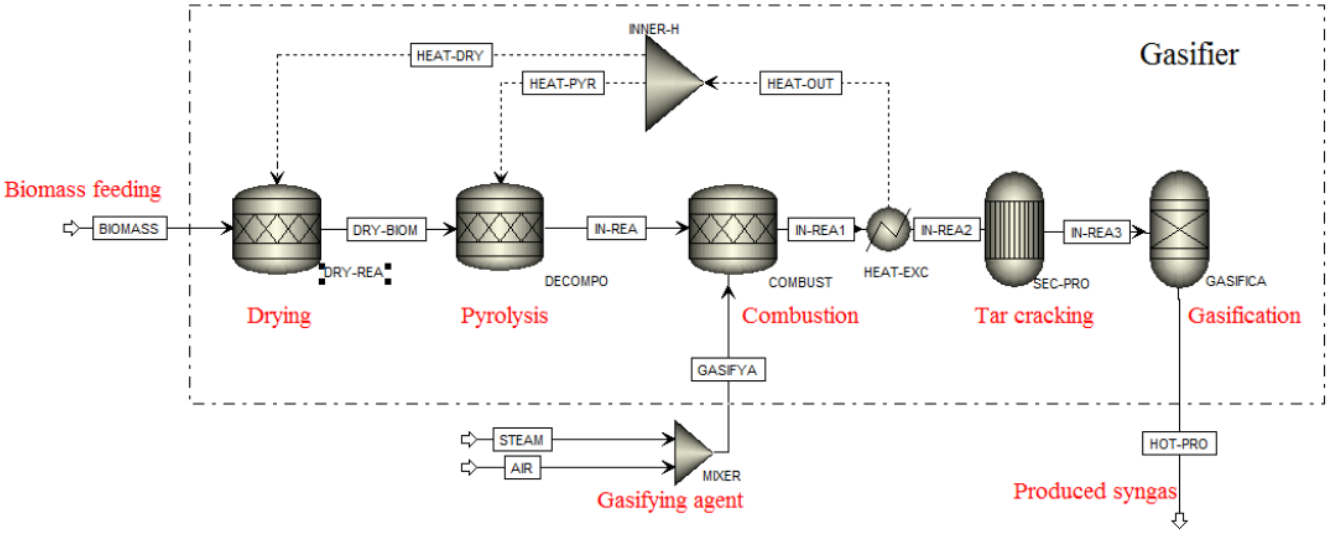
Er bestaan zeer veel verschillende varianten van vergassing, gebaseerd op andere reactor-configuraties, temperaturen, en of er lucht (luchtgeblazen vergassing) of zuurstof wordt toegevoegd. De temperaturen liggen bij lage temperatuur vergassing over het algemeen tussen de 700-900°C.

Figuur 8 - Procesdiagram lage temperatuur vergassing



Voor elke W2C-techniek geldt dat de gepresenteerde figuren een vereenvoudigde 'black box'-weergave van het daadwerkelijke proces laten zijn. Zoals in Figuur 9 is weergeven is vergassing in de praktijk een cascade van verschillende technieken, waarin ook pyrolyse terugkomt.

Figuur 9 - Processtappen vergassing



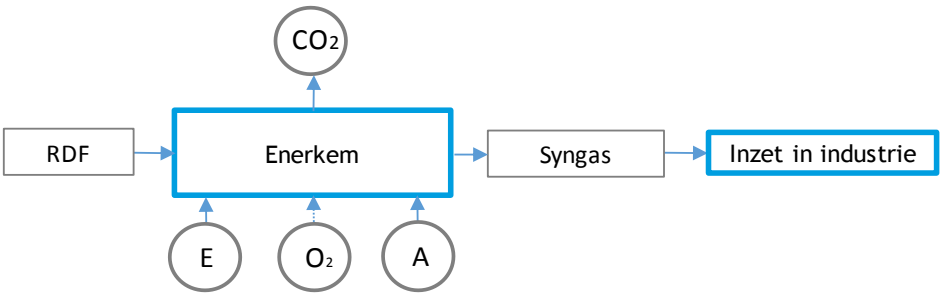
Bron: (Wu, et al., 2014).

4.2.5 Medium- en hoge temperatuur vergassing (Enerkem)

Conventionele medium- en hoge temperatuur vergassing produceert een syngas van hogere kwaliteit dan bij lagere temperatuur vergassing. Verder is het proces vergelijkbaar opgebouwd als het proces van lage temperatuur vergassing.

Ook van medium- en hoge temperatuur vergassing bestaan zeer veel varianten: o.a. entrained flow-vergassing, plasmavergassing, en rotary kiln-vergassing. De temperatuur loopt doorgaans op tot tussen 900 en 1.650°C. Bij plasmavergassing kan dit oplopen tot meer dan 5.000°C. Producten zijn syngas, en soms roet en char. Medium- en hoge temperatuur vergassing is wat minder gevoelig voor de samenstelling van de input dan lage temperatuur vergassing, en wordt al toegepast in grootschalige afvalverwerkingstoepassingen.

Figuur 10 - Processtappen medium temperatuur vergassing (Enerkem)



4.3 Vermeden productie van syngas uit aardgas

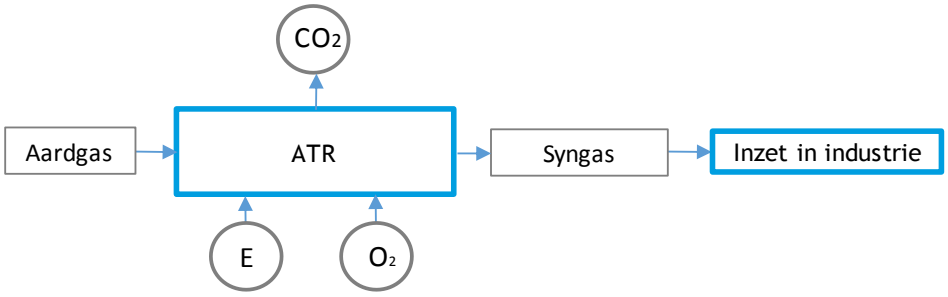
Bij een aantal W2C-technieken wordt syngas geproduceerd. Dat is een brandstofgas dat bestaat uit een mix van H_2, CO en vaak een restdeel CO_2.

Het produceren van syngas van hoge kwaliteit uit huishoudelijk afval vervangt syngas van hoge kwaliteit dat anders via een andere route geproduceerd zou worden. De route die hier gekozen is, en die dus vervangen wordt, is de productie van syngas uit aardgas door middel van 'autothermal reforming' (ATR). Dit is een veelgebruikte methode voor de productie van syngas.

Autothermal reforming is een combinatie van partiële oxidatie (POX) en steam methane reforming. Bij POX reageren aardgas en pure zuurstof met elkaar waarbij syngas ontstaat met een hoge concentratie H_2. Bij steam methane reforming worden aardgas en stoom onder een hoge temperatuur door buizen geleid met een bepaalde katalysator. Ook hierbij wordt syngas geproduceerd met een hoge concentratie H_2. Bij autothermal reforming vinden beide processen plaats in één reactor, waarbij syngas wordt geproduceerd met een H_2/CO-ratio van 2:1. Dit maakt de output specifiek geschikt voor het maken van chemicaliën als methanol, ammoniak en Fischer-Tropsch-vloeistoffen.

Omdat dit proces niet beschikbaar is in de Ecoinvent-database, hebben we hiervan een eigen vereenvoudigde modellering opgezet.

Figuur 11 - Processchema het maken van syngas uit aardgas d.m.v. autothermal reforming (ATR)



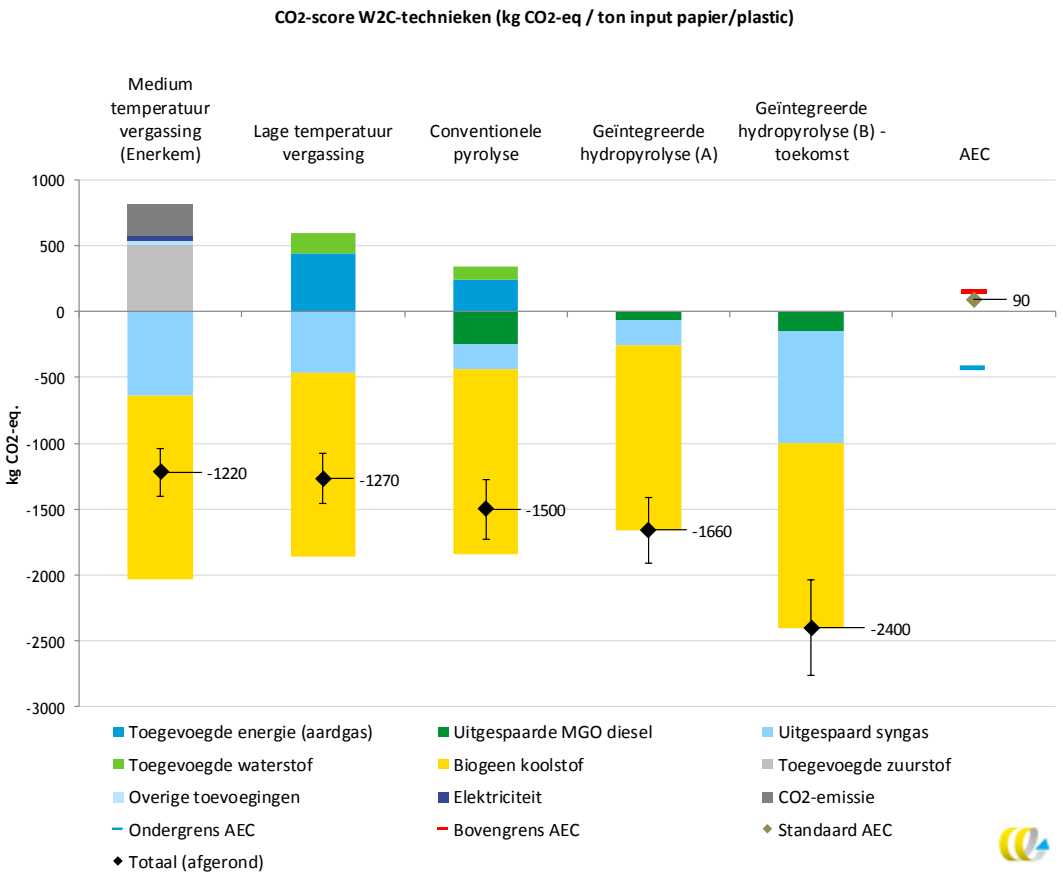
5 Hoofdresultaten

5.1 Resultaten W2C-technieken voor papier/plastic input

De milieuresultaten van de geanalyseerde technieken laten zien dat er een duidelijk milieuvoordeel is ten opzichte van de verwerking van de gedefinieerde input papier/plastic in de AEC.
De niet-afgeronde hoofdresultaten zijn samengevat in Tabel 5.

De CO_2-eq.-score voor een standaard AEC is rechts weergeven in Figuur 12. De bovengrens is 154 kg CO_2-eq. per ton input, de ondergrens (de best presterende AEC) is -434 kg CO_2-eq. per ton input.
De standaard AEC heeft bij deze input een CO_2-eq.-score van 86 kg per ton input.

Figuur 12 - Resultaat W2C-technieken en AEC bij Input A (75% papier, 25% plastic)



Alle resultaten zijn weergegeven met een foutmarge van 15%, gebaseerd op mogelijke onzekerheden in de inputdata.

Medium temperatuur vergassing (Enerkem) en lage temperatuur vergassing presteren min of meer gelijk. Bij medium temperatuur vergassing wordt in dit geval zuurstof toegevoegd aan het proces;

dit heeft een duidelijke milieu-impact, maar wordt grotendeels gecompenseerd door de grote hoeveelheid syngas die wordt geproduceerd.

Conventionele pyrolyse en geïntegreerde hydropyrolyse (Versie A) laten ook een vergelijkbaar resultaat zien. Conventionele pyrolyse heeft in dit geval een externe warmtebron nodig, die voor extra uitstoot zorgt. Daar staat tegenover dat deze techniek meer pyrolyseolie produceert per ton input dan de tweede generatie pyrolysevariant.

De resultaten voor de geïntegreerde hydropyrolyse (Versie B) variant geven een toekomstbeeld (2030) weer: dit is een techniek die in ontwikkeling is en nog niet op grote schaal toegepast wordt. Het milieuresultaat is zeer goed door het hoge volume geproduceerd syngas en het autotherme karakter van het proces.

Voor de resultaten van medium temperatuur vergassing (Enerkem) is gedetailleerde inputdata gebruikt op basis van een aangeleverd block flowdiagram (BFD). De analyse van de overige technieken is vaak gebaseerd op informatie die minder gedetailleerd is. Dit zou in het nadeel kunnen werken van de vergassingstechniek.

Tabel 5 - Hoofdresultaten W2C-technieken voor input A (75% papier, 25% plastic). Resultaten zijn uitgedrukt in kg CO_2-eq./ton input

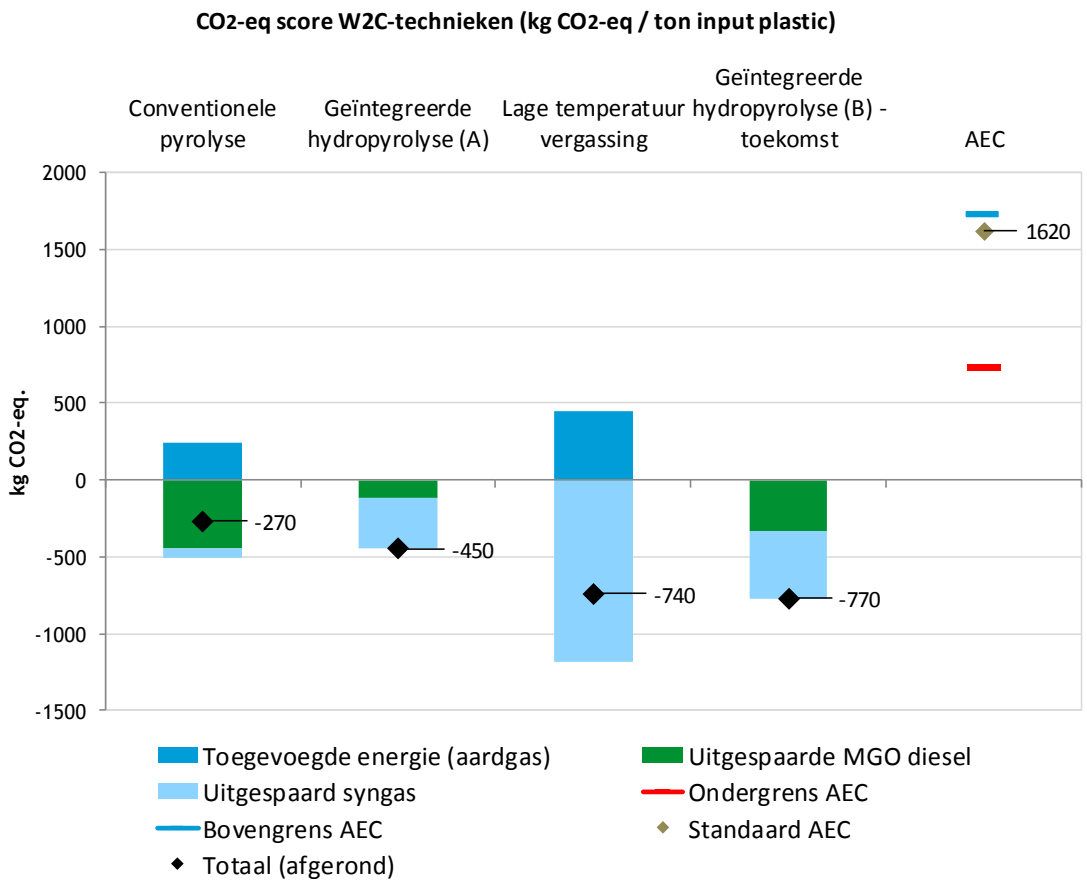
	Medium temperatuur vergassing (Enerkem)	Lage temperatuur vergassing	Conventionele pyrolyse	Geïntegreerde hydropyrolyse (Versie A)	Geïntegreerde hydropyrolyse (Versie B) - toekomstbeeld
Toegevoegde energie (aardgas)	8	446	241	-	-
Uitgespaarde MGO diesel	-	-	-247	-67	-145
Uitgespaard syngas	-634	-460	-192	-189	-854
Toegevoegde waterstof	-	148	99	-	-
Toegevoegde zuurstof	500	-	-	-	-
Overige toevoegingen (water, natriumhydroxide)	24	-	-	-	-
Elektriciteit	44	-	-	-	-
Additionele CO_2-emissie	239	-	-	-	-
Biogeen koolstof	-1.400	-1.400	-1.400	-1.400	-1.400
Totaal	**-1.218**	**-1.267**	**-1.500**	**-1.656**	**-2.399**

5.2 Resultaten W2C-technieken in vergelijking met de AEC voor plastic input

Ook voor de input van 1 ton 100% plastic laten alle W2C-technieken een duidelijk milieuvoordeel zien ten opzichte van de verwerking van de input in de AEC. Omdat de input anders is scoren de technieken onderling ook verschillend. De hoofdresultaten zijn samengevat in Tabel 6.

De CO_2-eq.-score voor een standaard AEC is rechts weergeven in de onderstaande figuur. De bovengrens is 1720 kg CO_2-eq. per ton input, de ondergrens (de best presterende AEC) is 726 kg CO_2-eq. per ton input. De standaard AEC heeft bij deze input een CO_2-eq.-score van 1617 kg per ton input. Omdat de input bestaat uit 100% plastic en geen biogeen deel heeft ligt de CO_2-eq.-score voor zowel de W2C-technieken als voor de AEC hoger.

Figuur 13 - Resultaat W2C-technieken en AEC bij Input B (100% plastic)



Conventionele pyrolyse en geïntegreerde hydropyrolyse (Versie A) laten een vergelijkbaar milieu-resultaat zien. In het geval van conventionele pyrolyse wordt meer pyrolyseolie van hoge kwaliteit geproduceerd, terwijl er in het geïntegreerde hydropyrolyseproces (A) meer syngas gemaakt wordt.

Ook lage temperatuur vergassing en Versie B van geïntegreerde hydropyrolyse hebben een CO_2-eq.-score die sterk gelijk is. Er ontstaat bij de vergassing van 100% plastic veel syngas, maar er is ook externe energie nodig. Het hydropyrolyseproces is daarentegen autotherm en produceert naast syngas ook een grote hoeveelheid pyrolyseolie van hoge kwaliteit.

Voor de Enerkem-techniek zijn op dit moment nog geen gegevens beschikbaar voor de input van 100% plastic. Wel is bekend dat de techniek niet ontworpen is om deze input optimaal te kunnen verwerken. Om deze redenen is medium temperatuur vergassing niet getoetst op milieuperformance bij een input van 100% plastic.

Tabel 6 - Hoofdresultaten W2C-technieken voor input B (75% papier, 25% plastic). Resultaten zijn uitgedrukt in kg CO_2-eq./ton input

	Conventionele pyrolyse	Geïntegreerde hydropyrolyse (Versie A)	Lage temperatuur vergassing	Geïntegreerde hydropyrolyse (Versie B)
Toegevoegde energie (aardgas)	241	-	446	-
Uitgespaarde MGO diesel	-449	-117	-	-331
Uitgespaard syngas	-59	-331	-1184	-443
Totaal	**-267**	**-449**	**-738**	**-774**

6 Resultaten W2C-technieken papier/plastic input

6.1 Resultaat conventionele pyrolyse

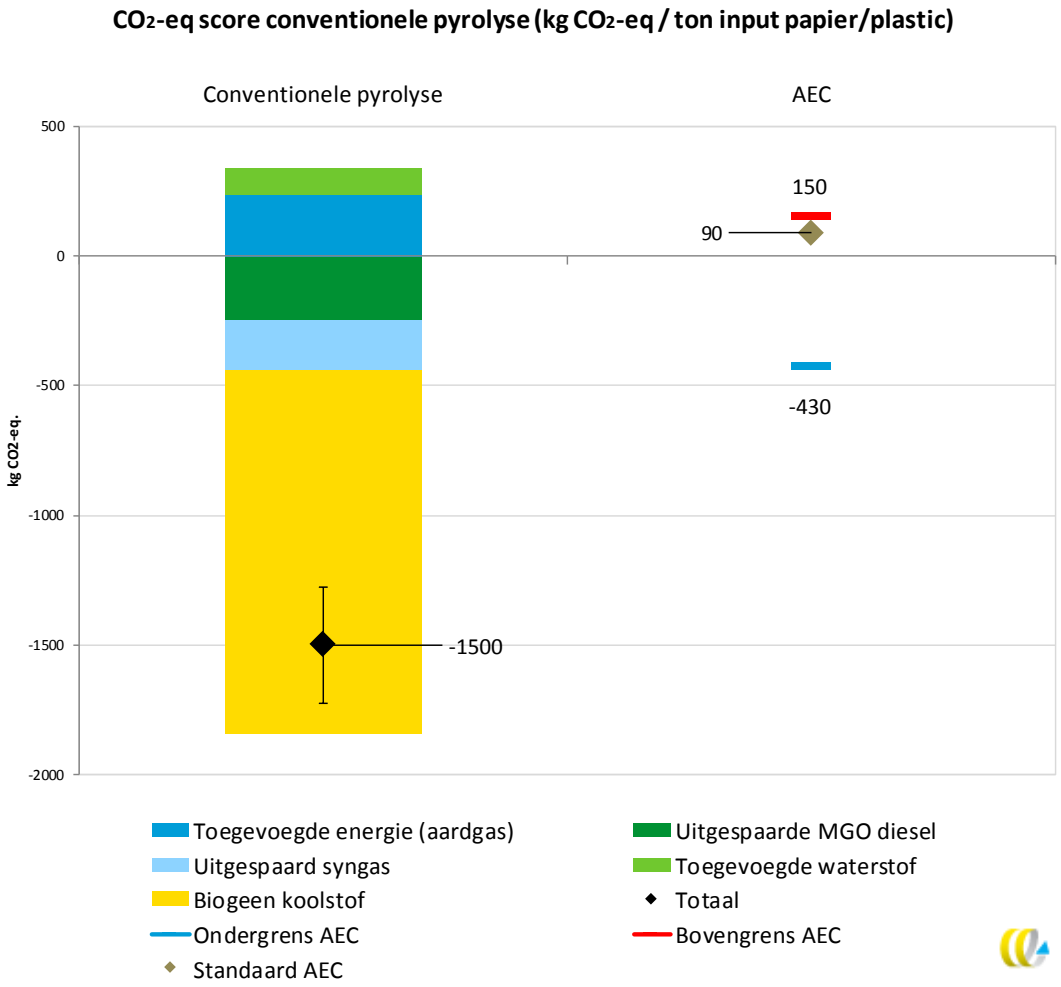
De CO_2-analyse van conventionele (eerste generatie) pyrolyse heeft een resultaat van -1.500 kg CO_2-eq. per ton input papier/plastic. Er wordt uit het papieren deel van de input 0,225 ton pyrolyseolie en 0,3 ton syngas geproduceerd. Ook het plastic deel van de input zorgt voor de productie van pyrolyseolie. Deze producten zorgen samen voor een vermeden milieu-impact van ongeveer 440 kg CO_2-eq. per ton input.

De toegevoegde energie wisselt per techniek sterk maar is in dit geval vastgelegd op 15% van de energie-input, en is 3 GJ per ton input. Deze energie veroorzaakt de voornaamste CO_2-eq.- impact. Een andere impact wordt gevormd door de opwerking van de pyrolyseolie tot Marine Gas Oil (MGO). Dit gebeurt met een kleine hoeveelheid H_2, en draagt niet veel bij aan het totaal.

Tabel 7 - Resultaat conventionele pyrolyse bij een input van 1 ton papier/plastic

	Kg CO_2-eq/ton input papier/plastic
Toegevoegde energie (aardgas)	241
Uitgespaarde MGO diesel	-247
Uitgespaard syngas	-192
Toegevoegde waterstof (H_2)	98
Biogeen koolstof	-1.400
Totaal	**-1.500**

Figuur 14 - Resultaat conventionele pyrolyse bij een input van 1 ton papier/plastic



6.2 Resultaat geïntegreerde hydropyrolyse (Versie A, papier/plastic)

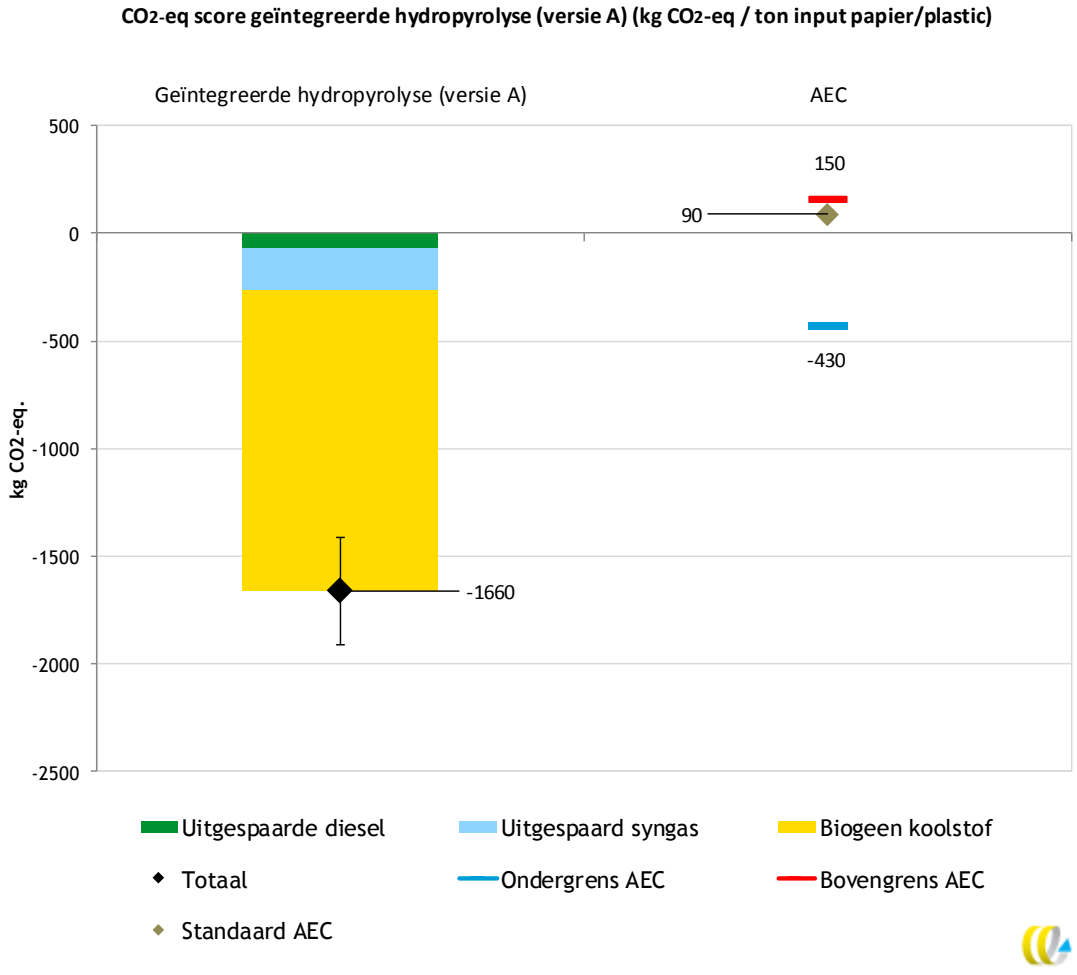
Versie A van het geïntegreerde hydropyrolyseproces scoort beter dan conventionele pyrolyse doordat er geen toegevoegde warmte nodig is. Het proces wordt namelijk verhit door de verbranding van een deel van het geproduceerde koolstof (char).

Verder wordt er een redelijk kleine hoeveelheid pyrolyseolie geproduceerd (79 liter uit 0,75 ton papier, 61 liter uit 0,25 ton plastic), maar dit is wel olie van hoge kwaliteit. Het opwaarderen van dit product is daardoor niet nodig. De vermeden productie van syngas uit aardgas levert een groter milieuvoordeel op, van 189 kg CO_2-eq. per ton input.

Tabel 8 - Resultaat geïntegreerde hydropyrolyse (Versie A) bij een input van 1 ton papier/plastic

	Kg CO_2-eq/ton input papier/plastic
Toegevoegde energie (aardgas)	0
Uitgespaarde MGO diesel	-67
Uitgespaard syngas	-189
Biogeen koolstof	-1.400
Totaal	**-1.656**

Figuur 15 - Resultaat geïntegreerde hydropyrolyse (Versie A) bij een input van 1 ton papier/plastic



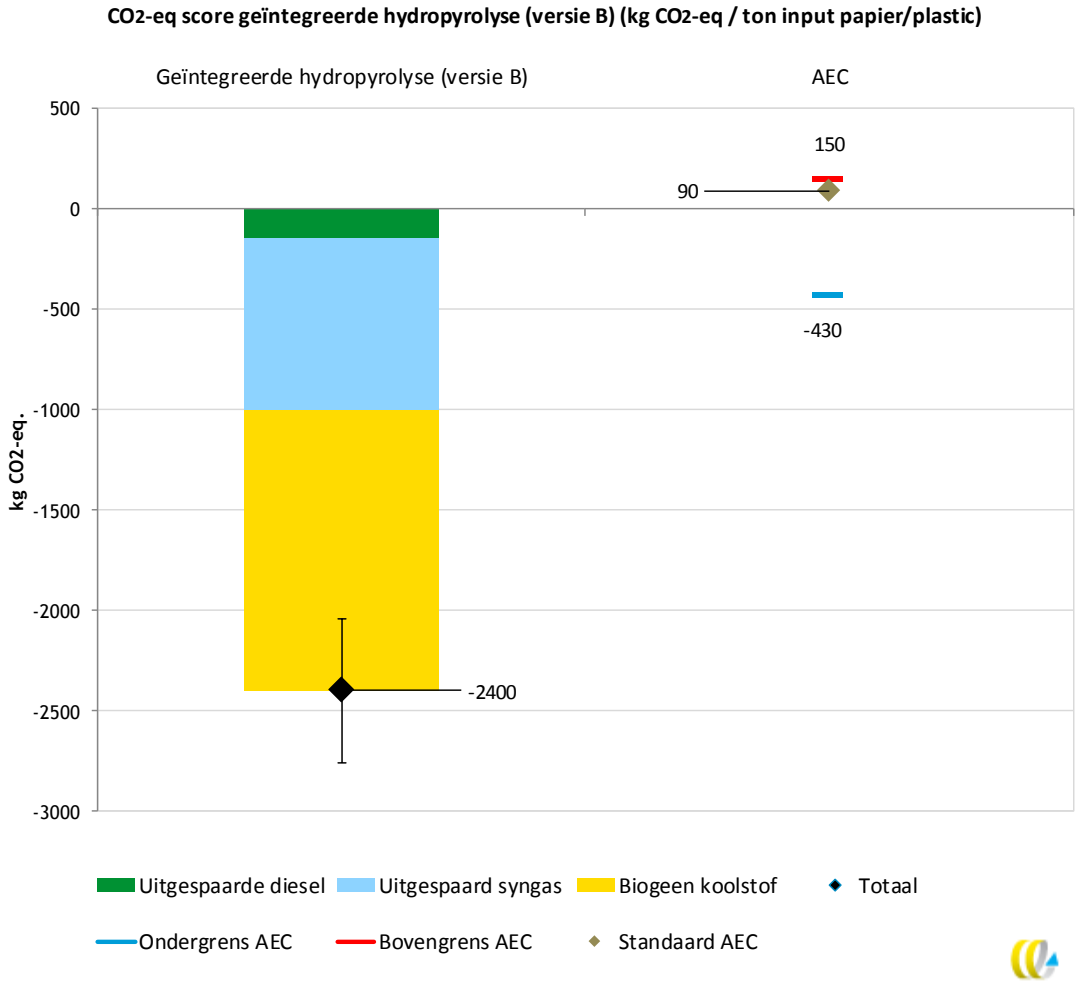
6.3 Resultaat geïntegreerde hydropyrolyse (Versie B, papier/plastic).

Versie B van het geïntegreerde hydropyrolyseproces produceert redelijk veel pyrolyseolie (130 liter uit 0,75 ton papier en 173 liter uit 0,25 ton plastic) en een grote hoeveelheid syngas (1.322 m^3 uit 0,75 ton papier en 197 m^3 uit 0.25 ton plastic). Het is een autotherm proces, dus er is geen externe warmtebron nodig. Om deze redenen is het milieuresultaat van deze techniek zeer positief.
Een kanttekening bij deze techniek is dat dit vooral een toekomstbeeld (2030 of later) schetst. Deze derde generatie hydropyrolysetechniek is nog niet full-scale gerealiseerd.

Tabel 9 - Resultaat geïntegreerde hydropyrolyse (Versie B) bij een input van 1 ton papier/plastic

	Kg CO_2-eq./ton input papier/plastic
Toegevoegde energie (aardgas)	0
Uitgespaarde MGO diesel	-145
Uitgespaard syngas	-854
Biogeen koolstof	-1.400
Totaal	**-2.399**

Figuur 16 - Resultaat geïntegreerde hydropyrolyse (Versie B) bij een input van 1 ton papier/plastic



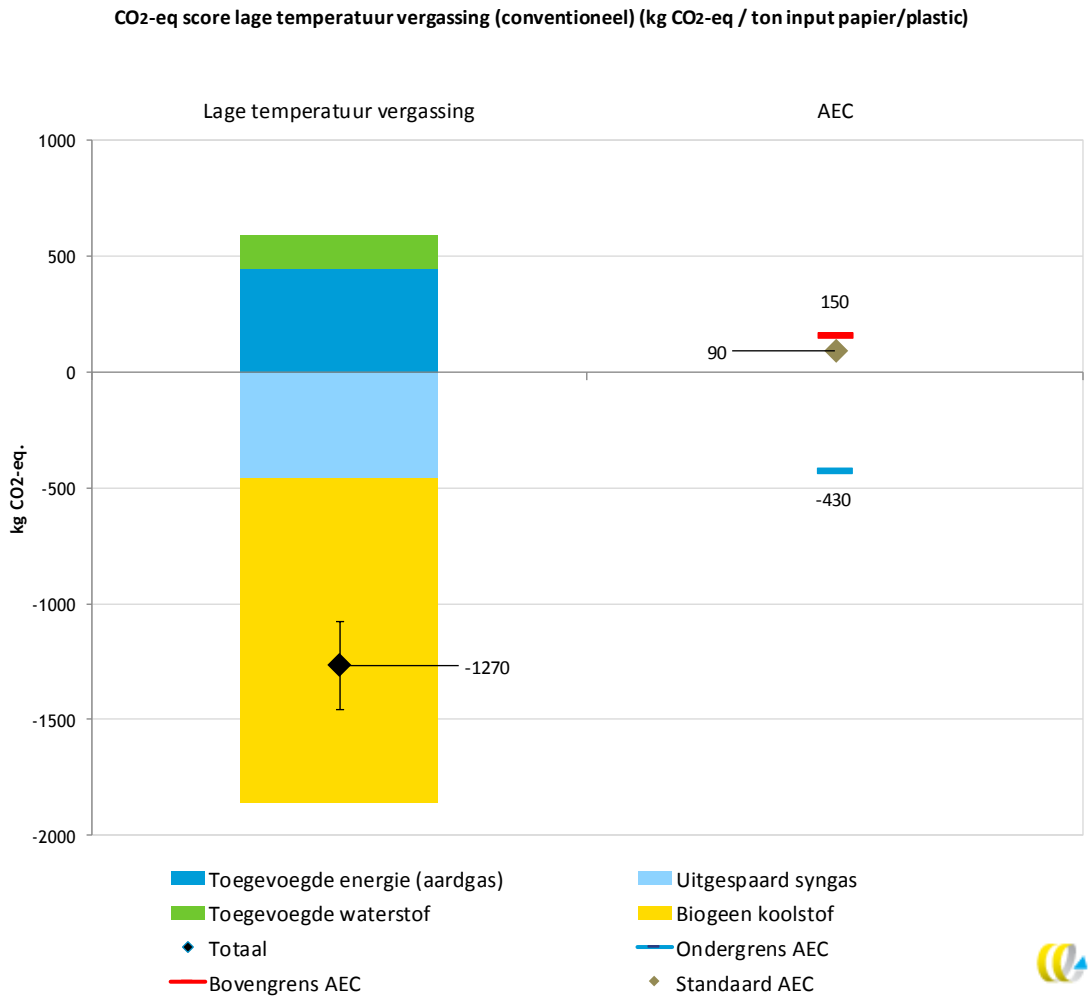
6.4 Resultaten lage temperatuur vergassing (input: papier/plastic)

Lage temperatuur vergassing van papier/plastic produceert syngas. Het syngas uit papier wordt met een kleine hoeveelheid waterstof opgewerkt wordt tot syngas+. Het syngas dat uit het plastic deel van de input wordt gemaakt is van hoge kwaliteit. Er is redelijk veel toegevoegde energie nodig: 150 m^3 aardgas per ton input. Dit veroorzaakt de grootste milieu-impact van deze techniek.

Tabel 10 - Resultaat lage temperatuur vergassing bij input van 1 ton papier/plastic

	Kg CO_2-eq/ton input papier/plastic
Toegevoegde energie (aardgas)	446
Toegevoegde waterstof	148
Uitgespaard syngas	-460
Biogeen koolstof	-1.400
Totaal	**-1.267**

Figuur 17 - Resultaat lage temperatuur vergassing bij een input van 1 ton papier/plastic



6.5 Resultaten vergassing door Enerkem (input: papier/plastic)

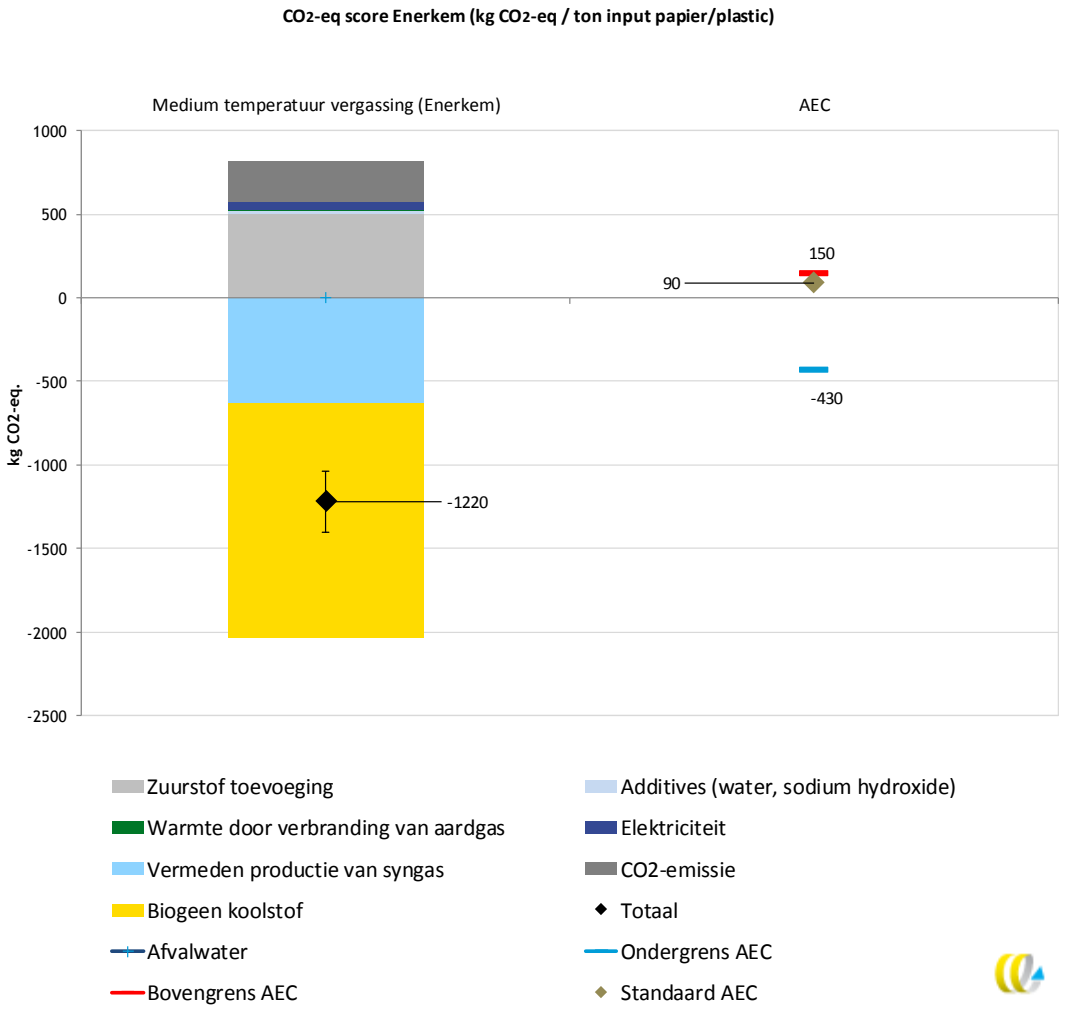
Voor Enerkem is een gedetailleerd block flowschema gebruikt waardoor de belangrijkste inputs en outputs en hun hoeveelheden bekend zijn. Dit is vertrouwelijke informatie.

De grootste milieu-impact wordt veroorzaakt door het toevoegen van zuurstof. Ook de CO_2-emissies van het proces vormen, als deze niet worden afgevangen en elders worden ingezet, een onderdeel van de milieudruk. Er wordt een hoeveelheid syngas geproduceerd waarvan nu wordt uitgegaan dat deze uiteindelijk van dezelfde kwaliteit is als syngas dat geproduceerd wordt door middel van auto-thermal reforming. Andere toevoegingen aan het proces zorgen niet voor een significante milieu-impact.

Tabel 11 - Resultaat vergassing door Enerkem (input: papier/plastic)

	Kg CO_2-eq/ton input papier/plastic
Toegevoegde energie (aardgas)	8
Uitgespaard syngas	-634
Toegevoegde zuurstof	500
Overige toevoegingen (water, natriumhydroxide)	24
Elektriciteit	44
Additionele CO_2-emissie	239
Biogeen koolstof	-1.400
Totaal	**-1.218**

Figuur 18 - Resultaat medium temperatuur vergassing (Enerkem) bij een input van 1 ton papier/plastic



7 Resultaten technieken plastic input

7.1 Resultaat conventionele pyrolyse

In de modellering van conventionele pyrolyse wordt 0,75 ton pyrolyseolie van hoge kwaliteit geproduceerd uit 1 ton plastic input. Ook wordt er syngas van hoge kwaliteit gemaakt. Net als bij de variant met als input papier/plastic vormt het toevoegen van energie door de verbranding van aardgas een milieu-impact. De biogene koolstof premium is niet aan de orde omdat er geen biogeen materiaal in de input aanwezig is.

Tabel 12 - Resultaat conventionele pyrolyse bij een input van 1 ton plastic

	Kg CO_2-eq./ton input plastic
Toegevoegde energie (aardgas)	241
Uitgespaarde MGO diesel	-449
Uitgespaard syngas	-59
Toegevoegde waterstof	54
Totaal	**-267**

Figuur 19 - Resultaten conventionele pyrolyse bij een input van 1 ton plastic

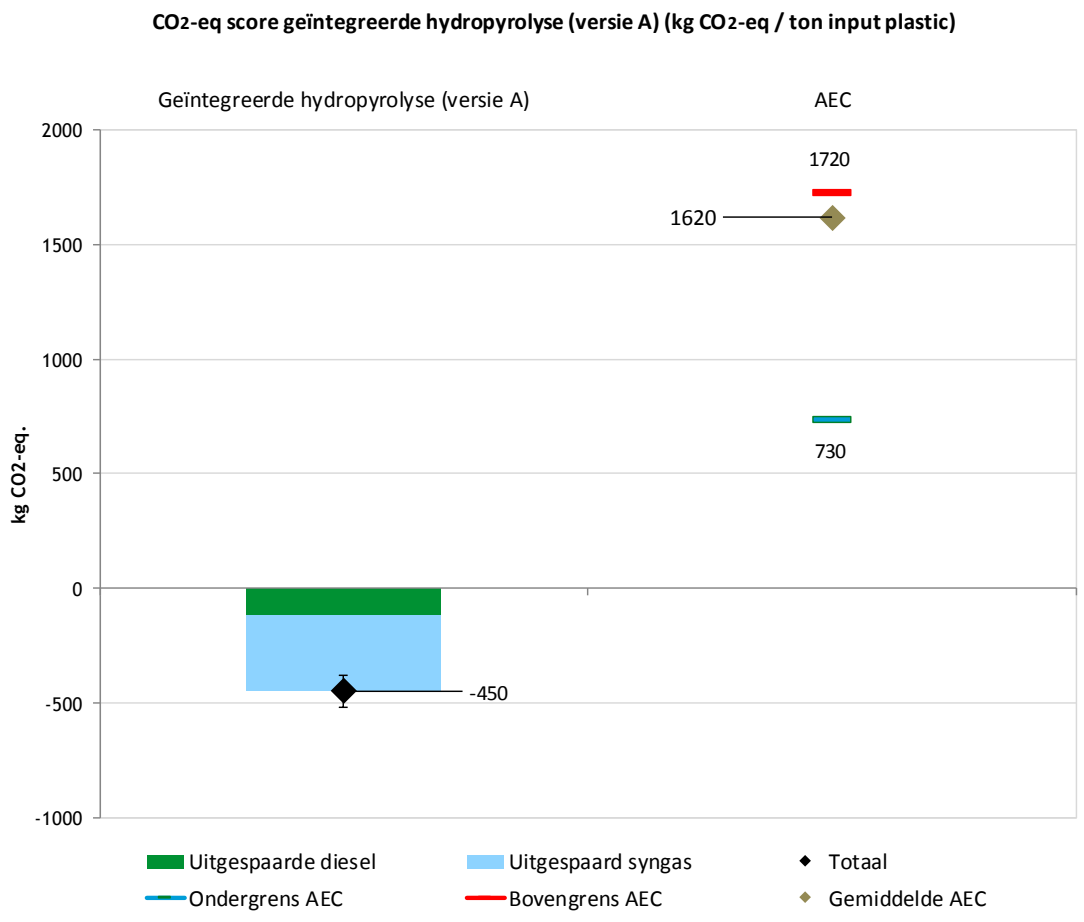
7.2 Resultaat geïntegreerde hydropyrolyse (Versie A, input plastic).

Versie A van het geïntegreerde hydropyrolyseproces produceert uit een input van 1 ton plastic rejects pyrolyseolie (245 L) en syngas (589 m^3) van hoge kwaliteit. Zoals eerder genoemd heeft dit proces geen externe warmtebron nodig, waardoor de CO_2-winst positiever uitvalt dan die van conventionele pyrolyse.

Tabel 13 - Resultaat geïntegreerde hydropyrolyse (Versie A) bij 1 ton plastic input

	Kg CO_2-eq./ton input plastic
Toegevoegde energie (aardgas)	0
Uitgespaarde MGO diesel	-117
Uitgespaard syngas	-331
Totaal	**-449**

Figuur 20 - Resultaat geïntegreerde hydropyrolyse (Versie A) bij 1 ton plastic input



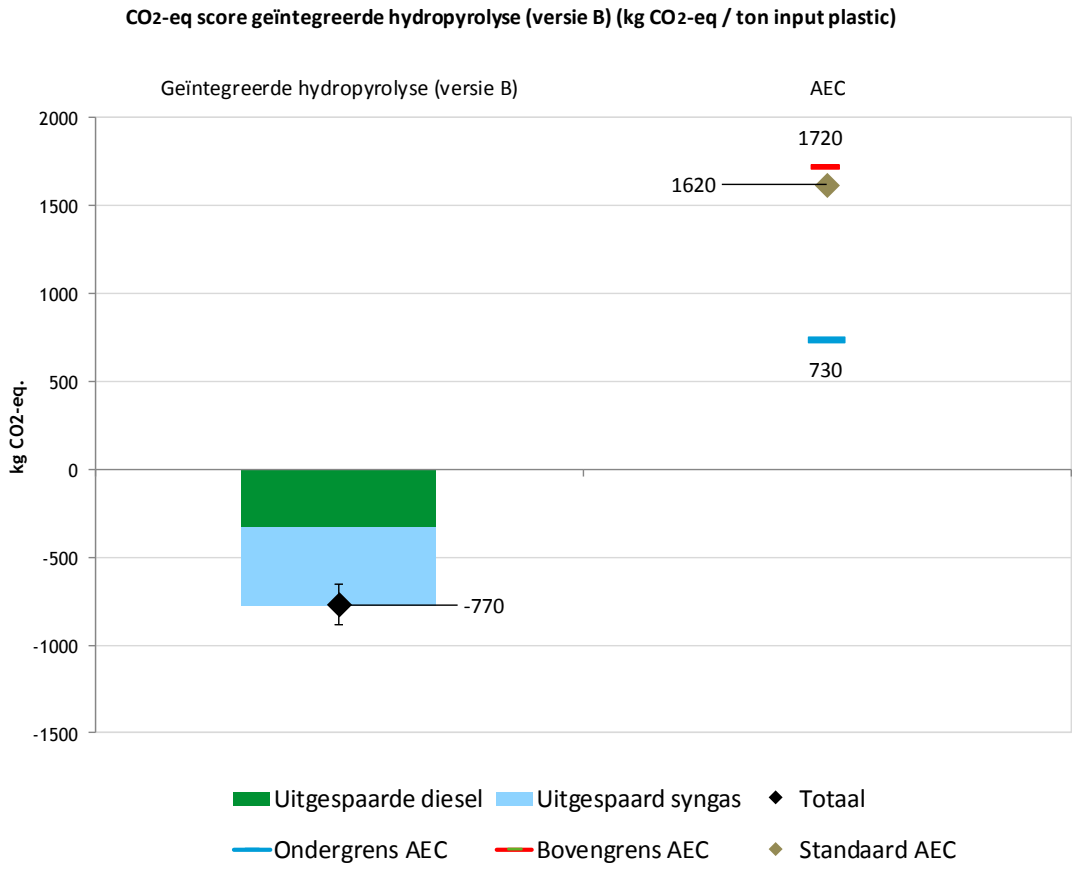
7.3 Resultaat geïntegreerde hydropyrolyse (Versie B, input plastic)

Ook de geïntegreerde hydropyrolysetechniek (Versie B) produceert outputs van hoge kwaliteit. Er wordt uit 1 ton plastic 691 liter olie geproduceerd en 788 m^3 syngas.

Tabel 14 - Resultaat geïntegreerde hydropyrolyse (Versie B) bij de input van 1 ton plastic

	Kg CO_2-eq/ton input plastic
Toegevoegde energie (aardgas)	0
Uitgespaarde MGO diesel	-331
Uitgespaard syngas	-443
Totaal	**-774**

Figuur 21 - Resultaat geïntegreerde hydropyrolyse (Versie B) bij de input van 1 ton plastic



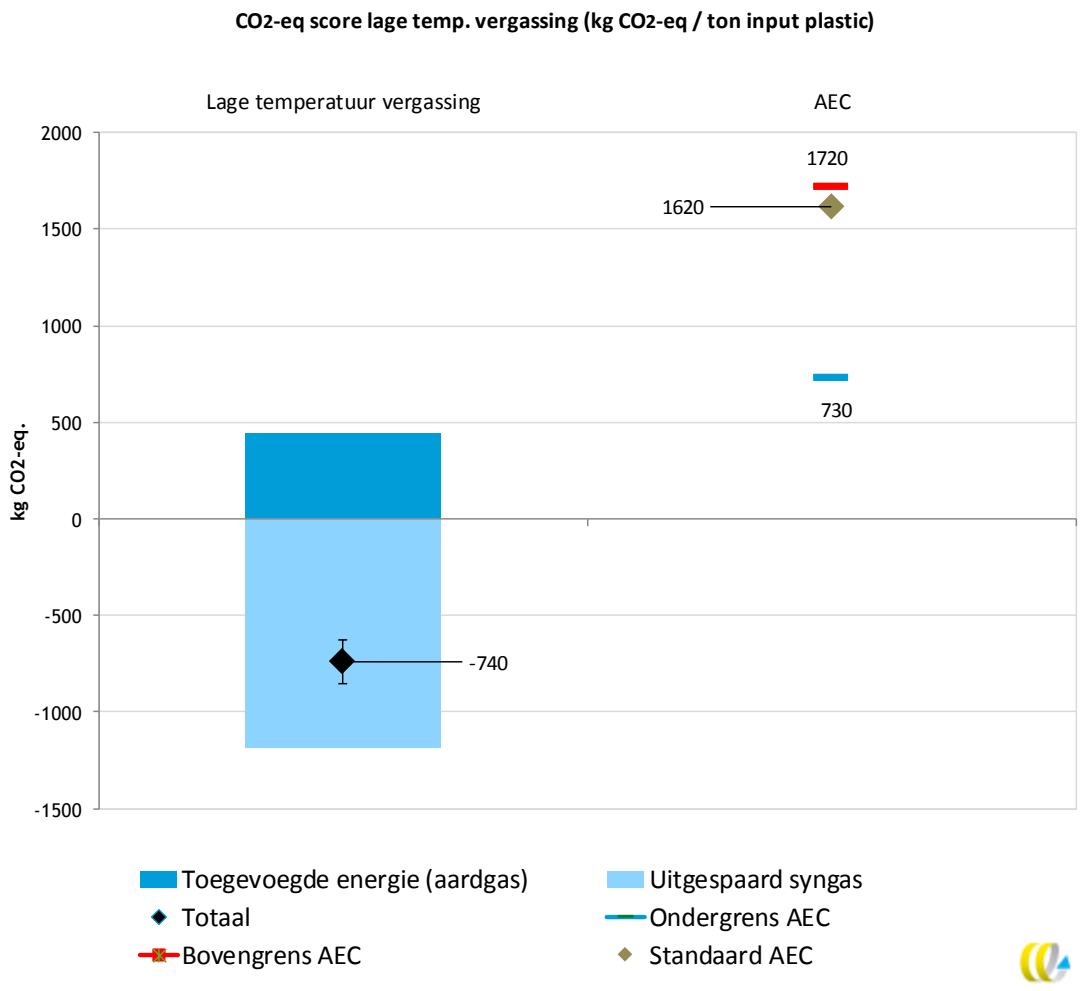
7.4 Resultaat lage temperatuur vergassing

Lage temperatuur vergassing produceert een grotere hoeveelheid syngas bij een input van plastic dan bij een input van papier: 2.000 kg/ton input voor plastic versus 370 kg/ton input voor papier. Hierdoor is de milieuscore bij een input van plastic positiever, ook al wordt er nog steeds aardgas gebruikt als externe energietoevoer. Ook wordt er geen waterstof gebruikt om de kwaliteit van het eindproduct te verbeteren.

Tabel 15 - Resultaat lage temperatuur vergassing bij 1 ton plastic input

	Kg CO_2-eq/ton input plastic
Toegevoegde energie (aardgas)	446
Uitgespaard syngas	-1.184
Totaal	**-738**

Figuur 22 - Resultaat lage temperatuur vergassing bij 1 ton plastic input



8 Conclusies

Dit rapport presenteert een eerste overzicht van de milieuscore van verschillende W2C-technieken in vergelijking met een AEC. Er zijn vijf technieken gemodelleerd op basis van twee inputs (papier/plastic en 100% plastic), waarbij is gekeken naar de uiteindelijke CO_2-eq.-winst.

Elke techniek lijkt beter te scoren dan de standaard Nederlandse AEC. Vergassings- en conventionele pyrolysetechnieken liggen qua milieuscore dicht bij elkaar, hoewel dit wel afhangt van de gekozen input. Hydropyrolysetechnieken, die in de toekomst ook grootschalig zouden worden kunnen toegepast, lijken voorlopig de meeste CO_2-winst te behalen. De medium temperatuur vergassings-techniek (Enerkem) is gemodelleerd op basis van gedetailleerde gegevens, en scoort ondanks de toevoeging van zuurstof ook beter dan de AEC.

Uiteindelijk zijn de achterliggende aannamen cruciaal voor de uitkomst van dergelijke milieuanalyses. Dit is een screening-LCA, waarbij de technieken op basis van hun belangrijkste in- en outputs zijn vergeleken. Aangezien er weinig vergelijkende studies ter verificatie beschikbaar zijn moeten de resultaten met enige voorzichtigheid geïnterpreteerd worden.

9 Bibliografie

Berenschot; DPI Value Centre; Agentschap NL; NRK, 2011. *Rapportage onderzoek kunststof afdanksteromen in Nederland,* sl: DPI-VC.
CBS, 2016. *Gemeentelijke afvalstoffen; hoeveelheden 1993-2015*.* [Online]
Available at: http://statline.cbs.nl/StatWeb/publication/?DM=SLNL&PA=7467
CE Delft, 2010. *Inzameling vandrankenkartons - milieu- en kostenanalyse van recyclingopties,* Delft: CE Delft.
CE_Delft/TNO, 2017. *Milieu effect bron en nascheiding van drankenkartons,* Delft: CE Delft.
ECN, 2017. *Phyllis2.* [Online]
Available at: https://www.ecn.nl/phyllis2/
Ministerie van I&M, 2017. *Landelijk Afvalbeheerplan 2017-2029: Slimmer omgaan met grondstoffen (inspraakversie),* Den Haag: Ministerie van Infrastructuur en Milieu (I&M).
Rijkswaterstaat, 2017. *Samenstelling van het huishoudelijk restafval, sorteeranalyses 2016,* Utrecht: Rijkswaterstaat.
TNO ; CE Delft, 2015. *Milieueffectanalyse van de raamovereenkomst verpakkingen,* Utrecht: TNO ; CE Delft.
Wu, T., Yang, W. & Blasiak, W., 2014. Energy and Exergy Analysis of High Temperature Agent Gasification of Biomass. *Energies,* pp. 2107-2022.

A Gegevens AEC's

Alle Nederlandse AEC's voldoen aan de vereisten voor de R1-status en zijn dus installaties voor nuttige toepassing. Ze produceren elektriciteit en warmte, die vervolgens elders (huishoudens, industrie) kunnen worden ingezet. Wel hebben alle AEC's andere elektrische en thermische rendementen. Voor een vergelijking met andere afvalwerkingstechnieken is het daarom belangrijk welke keuze hierin gemaakt wordt.

Om een correcte vergelijking op te stellen hebben we een aantal scenario's gedefinieerd, waarin de AEC's verschillende rendementen hebben. Deze zijn hieronder kort samengevat. Vervolgens is de CO_2-score berekend aan de hand van de twee inputs zoals beschreven in Paragraaf 3.3.

Tabel 16 - Gebruikte scenario's voor de rendementen van Nederlandse AEC's

Scenario	Uitleg	Elektrisch rendement	Thermisch rendement	Bron
Standaard	Gemiddelde waarden zoals eerder gebruikt door CE Delft	16%	19%	Rapport huishoudelijke resten in de voedselketen (2015), blz. 72.
AVR	Waarden van AVR	12%	55%	AVR
Best case thermisch	Hoogste thermische rendement + (laag) bijbehorend elektrisch rendement	5%	68%	Rapport huishoudelijke resten in de voedselketen (2015), blz. 72.
Best case elektrisch	Hoogste elektrische rendement + (laag) bijbehorend thermisch rendement	26%	2%	Rapport huishoudelijke resten in de voedselketen (2015), blz. 72.

B Resultaten AEC's

B.1 Resultaten analyse AEC's papier/plastic input

Hier presenteren we de resultaten van de milieuanalyse van Nederlandse AEC's in de vier eerder gedefinieerde scenario's. Deze onderstaande resultaten gelden voor de input van 75% papier en 25% plastic.

Tabel 17 - Resultaten analyse AEC's (kg CO_2-eq./ton input papier/plastic)

Scenario	GWP (kg CO_2-eq./ton input papier/plastic)	GWP (kg CO_2-eq/ton input plastic)
Standaard	86	1.617
AVR	-387	826
Best case thermisch	-434	726
Best case elektrisch	154	1.720

Tabel 18 - Resultaten analyse AEC's- details (kg CO_2-eq./ton input papier/plastic)

	AVR - GWP (kg CO_2-eq./ton input papier/plastic)	Best case elektrisch - GWP (kg CO_2-eq./ton input papier/plastic)	Best case - GWP (kg CO_2-eq./ton input papier/plastic) thermisch	Standaard - GWP (kg CO_2-eq./ton input papier/plastic)
Elektriciteit (papier)	-130	-281	-54	-173
Elektriciteit (plastic)	-100	-217	-24	-134
Warmte (papier)	-487	-18	-602	-168
Warmte (plastic)	-353	-13	-437	-122
Verbrandingsemissies (papier)	23	23	23	23
Verbrandingsemissies (plastic)	660	660	660	660
Totaal	**-387**	**154**	**-434**	**86**

Figuur 23 - Resultaten analyse AEC's (kg CO_2-eq./ton input papier/plastic)

Deze resultaten laten zien dat de milieuscore van de Nederlandse AEC's ongeveer tussen de -434 en 154 kg CO_2-eq. per ton gedefinieerde input ligt. Voor een standaard AEC wordt, in de vergelijking met de W2C-techieken, een score van 86 aangehouden. Een belangrijke kanttekening is dat, zoals eerder opgemerkt, het biogene deel van de CO_2-emissies volgens de Ecoinvent-verbrandingsprocessen niet wordt meegeteld. Hiervoor is in de vergelijking met W2C-technieken een correctie gemaakt door een biogene CO_2-winst op te tellen bij elke milieuscore.

De elektrische- en thermische rendementen die gebruikt zijn komen uit 2014. Huidige Nederlandse AEC's zouden hierdoor een elektrisch- en thermisch rendement kunnen behalen dat iets hoger ligt, waardoor de CO_2-score ook iets voordeliger uit zou kunnen komen.

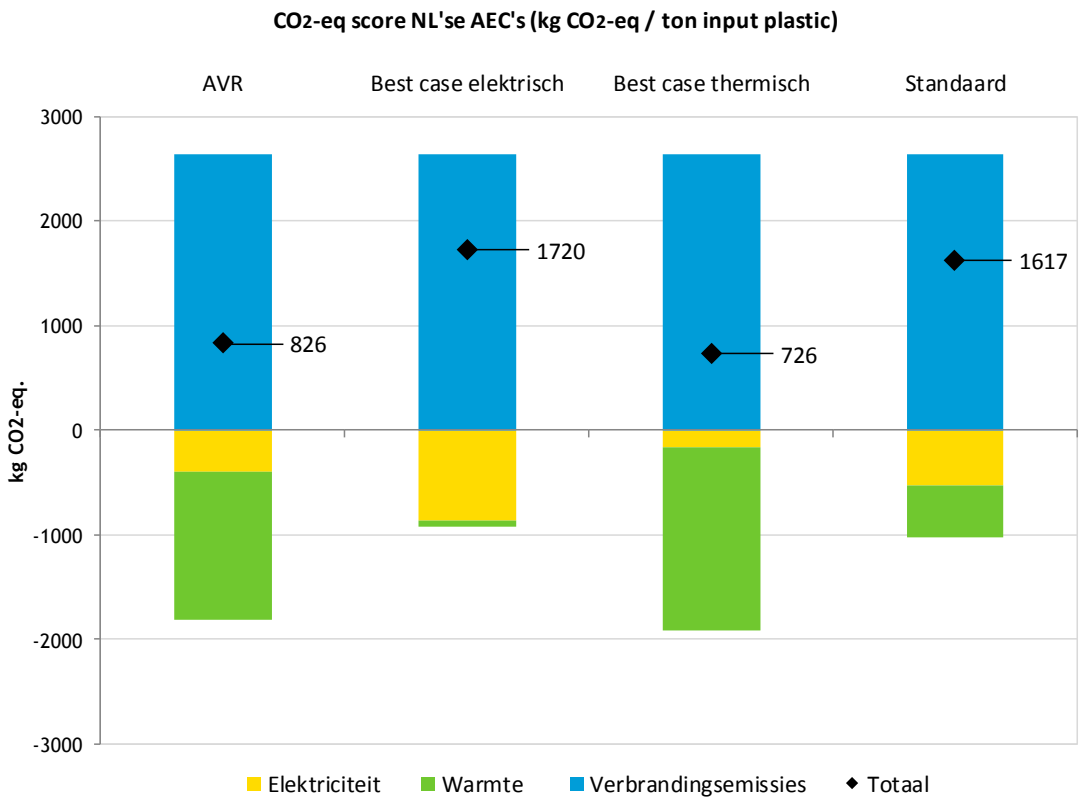
B.2 Resultaten analyse AEC's plastic input

Tabel 19 - Resultaat CO_2-eq./ton input papier/plastic AEC's

	AVR - GWP (kg CO_2-eq./ton input papier/plastic)	Best case elektrisch - GWP (kg CO_2-eq/ton input papier/plastic)	Best case - GWP (kg CO_2-eq./ton input papier/plastic) thermisch	Standaard - GWP (kg CO_2-eq./ton input papier/plastic)
Elektriciteit (plastic)	-401	-869	-167	-535
Warmte (plastic)	-1.413	-51	-1.746	-488
Verbrandingsemissies (plastic)	2.639	2.639	2.639	2.639
Totaal	**826**	**1.720**	**726**	**1.617**

Deze resultaten laten zien dat de milieuscore van de Nederlandse AEC's bij een input van 100% plastic ongeveer tussen de 726 en 1.617 kg CO_2-eq. per ton input ligt. Voor een standaard AEC wordt, in de vergelijking met de W2C-techieken, een score van 1.617 aangehouden. Biogeen CO_2 speelt geen rol, omdat dat de input geen biogeen deel bevat.

Figuur 24 - Resultaat NL'se AEC's (kg CO_2-eq./ton input plastic)



C Data W2C-technieken

Tabel 20 - Inventarisatie conventionele pyrolyse

Parameter	Waarde	Bron	Opmerking/onderbouwing
Productie olie bij 1 ton papier input	300 kg	Berekening CE Delft	-
Productie olie bij 1 ton plastic input	750 kg	Berekening CE Delft	-
Productie syngas bij 1 ton papier input	400 kg	Berekening CE Delft	-
Productie syngas bij 1 ton plastic input	100 kg	Berekening CE Delft	-
Upgrading olie tot MGO (ton H_2 per ton input papier)	0,025-0,041 ton	Berekening CE Delft	Olie uit papier is van slechte kwaliteit. Wordt met H_2 geüpgraded tot MGO-kwaliteit. Dit is voor het deel olie uit plastic niet nodig.
Upgrading syngas tot syngas+ (ton H_2 per ton input)	0,013-0,028 ton	Berekening CE Delft	Syngas uit papier is van slechte kwaliteit. Wordt met H_2 geüpgraded tot syngas+ kwaliteit (zelfde kwaliteit als syngas uit aardgas). Dit is voor het deel syngas uit plastic niet nodig.
Toegevoegde energie (verbranding van aardgas)	3 GJ	Berekening CE Delft	Wisselt sterk: soms wordt 100% van de eigen syngasproductie opgestookt. In deze modellering is dat niet zo, en is extern aardgas 10-20%. Neem gemiddelde: 15%. De energie-input is 20 GJ. 20*0,15 = 3 GJ/ton input.

Tabel 21 - Inventarisatie geïntegreerde hydropyrolyse (Versie A)

Parameter	Waarde	Bron	Opmerking/onderbouwing
Productie olie bij 1 ton papier input	105 L	Berekening CE Delft/ contact met ontwikkelaar	-
Productie olie bij 1 ton plastic input	245 L	Berekening CE Delft/ contact met ontwikkelaar	-
Productie syngas bij 1 ton papier input	252 Nm^3	Berekening CE Delft/ contact met ontwikkelaar	-
Productie syngas bij 1 ton plastic input	589 Nm^3	Berekening CE Delft/ contact met ontwikkelaar	-
Toegevoegde energie (verbranding van aardgas)	0 GJ	Berekening CE Delft/ contact met ontwikkelaar	Dit proces verhit zichtzelf vanuit een deel char. Hierdoor is geen externe warmtebron nodig.

Tabel 22 - Inventarisatie geïntegreerde hydropyrolyse (Versie B)

Parameter	Waarde	Bron	Opmerking/onderbouwing
Productie olie bij 1 ton papier input	174 L	Berekening CE Delft/ contact met ontwikkelaar	-
Productie olie bij 1 ton plastic input	691 L	Berekening CE Delft/ contact met ontwikkelaar	-
Productie syngas bij 1 ton papier input	1.763 Nm^3	Berekening CE Delft/ contact met ontwikkelaar	-
Productie syngas bij 1 ton plastic input	788 Nm^3	Berekening CE Delft/ contact met ontwikkelaar	-
Toegevoegde energie (verbranding van aardgas)	0 GJ	Berekening CE Delft/contact met ontwikkelaar	Dit proces is autotherm. Daarom: geen energietoevoer.

Tabel 23 - Inventarisatie lage temperatuur vergassing

Parameter	Waarde	Bron	Opmerking/onderbouwing
Productie syngas bij 1 ton papier input	370 kg	Berekening CE Delft/ contact met ontwikkelaar	-
Productie syngas bij 1 ton plastic input	2.000 kg	Berekening CE Delft/ contact met ontwikkelaar	-
Upgrading syngas tot syngas+ (kg H_2 per ton input papier)	90 kg	Berekening CE Delft/ contact met ontwikkelaar	-
Upgrading syngas tot syngas+ (kg H_2 per ton input plastic)	0	Berekening CE Delft/ contact met ontwikkelaar	-
Toevoegen O_2	0	Berekening CE Delft/ contact met ontwikkelaar	Ga ervanuit dat het vergassingsproces luchtgeblazen is; geen O_2 toevoeging.
Toegevoegde energie (verbranding van aardgas)	5,55 GJ	Berekening CE Delft/ contact met ontwikkelaar	150 Nm^3/ton input. Calorische waarde gas = 37 MJ/m^3. Energie nodig voor 1 ton input: 150 * 37 = 5.550 MJ

De geïnventariseerde data voor medium temperatuur vergassing door Enerkem is vertrouwelijk door CE Delft ontvangen, gecontroleerd, en vervolgens verwerkt. Op verzoek kan bij Enerkem inzage worden verkregen.