



Methaan uit niet-biogene (afval)stromen?

Een verkenning van potentieel,
milieueffecten en beleid



CE Delft

Committed to the Environment

Methaan uit niet-biogene (afval)stromen?

Een verkenning van potentieel, milieueffecten en beleid

Dit rapport is geschreven door:
Geert Bergsma, Martijn Broeren en Marieke Nauta

Delft, CE Delft, mei 2023

Publicatienummer: 23.220502.073

Opdrachtgever: Ministerie van Economische Zaken en Klimaat

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 meer dan 40 jaar werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.



Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	8
	1.1 Methodiekaspecten	8
	1.2 Leeswijzer	9
2	Vergassing	10
3	Afvalstromen	12
4	Technieken methaan uit afval	15
	4.1 SCW Systems	15
	4.2 Synova	16
	4.3 Gidara	17
	4.4 Furec	19
	4.5 Samenvatting technieken methaan uit afval via vergassing	19
5	Beleidsanalyse vergassing plastic	21
	5.1 Inleiding beleidsanalyse vergassing niet-biotische afvalstromen	21
	5.2 Plasticrecycling is beleidsmatig de voorkeursoptie; wat betekent dit?	22
	5.3 Beschikbaarheid van plasticafval	23
	5.4 Vraag naar plasticafval uit verschillende sectoren	25
	5.5 Efficiencyvergelijking technieken op hoofdlijnen	27
6	Milieu-impact plasticafvalverwerking	32
	6.1 Methode: screening LCA	32
	6.2 Resultaten en interpretatie	34
	6.3 Andere milieueffecten en bodemas	35
	6.4 Conclusie	36
7	Kostenanalyses plasticafvalroutes	37
	7.1 Inleiding	37
	7.2 Kosten van routes	37
	7.3 Grove rangorde van kosten/baten	38
8	Extra methaanproductie in vergister met waterstof	40
	8.1 Concrete cases H ₂ in vergister van waterschap	40
	8.2 Waterstof bijvoegen bij vergassinginitiatieven	43
9	Conclusies en aanbevelingen	45
	9.1 Vergassing van niet-biogene afvalstromen naar andere technieken	45
	9.2 Waterstof als middel om groengasproductie te verhogen	46



	Referenties	48
A	Omzettingsrendementen	50
B	Maximale efficiëntie vergassing plastic	52
C	Maximale efficiëntie extra methaan door toevoeging waterstof aan vergister	54



Samenvatting

In het kader van de aankomende bijmengverplichting van groen gas in aardgas, en door de sterk gestegen kosten van aardgas door de oorlog in Oekraïne, is de vraag opgekomen of het omzetten van niet-biogene stromen in methaangas interessant zou kunnen zijn.

Vergassing naast vergisting voor biogeen afval

Een aantal initiatieven is bezig vergassinginstallaties te ontwikkelen, die met name biogeen afval om kunnen zetten in biomethaan, biowaterstof en biomethanol. Deze initiatieven kunnen financieel uit, omdat er voor deze bioproducten ondersteuning vanuit de overheid bestaat of gaat komen (bijmengverplichting groen gas, regeling energie vervoer en SDE++-subsidie).

Ook niet-biogeen afval in vergassing

De verschillende initiatieven doen ook experimenten met niet-biogeen afval. Meestal gaat het dan om een mix van biogeen afval en niet-biogeen afval. Bij niet-biogeen afval voor vergassing gaat het om allerlei, veelal gemengde, stromen, waarbij de energetische waarde/de niet-biogene koolstofinhoud grotendeels bestaat uit plastics. Voorbeelden hiervan zijn: gemengd huishoudelijk afval, pmd ingezameld bij huishoudens en RDF (een papier- en plasticfractie, afgescheiden uit afval). Op dit moment is het zo dat de overheidssteuning alleen geldt voor het biogene deel van de input uit zo'n gemengde afvalstroom.

Huidige inzet niet-biogene stromen (plastic) en circulaire doelen

Op dit moment wordt plastic nog relatief weinig gerecycled, vergeleken met andere materialen zoals glas, papier en metaal. Ongeveer 28% van al het plasticafval in Nederland werd gerecycled in 2020 en daarmee wordt ongeveer 12,5% van nieuwe plasticproducten gemaakt met recycalaat (de vraag naar recycalaat is groter dan de hoeveelheid plasticafval waar recycalaat uit gemaakt kan worden). De 72% die niet gescheiden en niet gerecycled wordt, wordt grotendeels verbrand in afvalverbrandingsinstallaties (AVI's); die hebben in Nederland een lager energierendement dan andere energie-installaties. Recycling van plastic is (zeker op de korte termijn) wel duurder dan verbranding. Een deel van het plastic wordt via RDF en SRF bijgestookt in cementovens met een hoog energierendement en een vrij goed klimaatvoordeel, omdat er kolen vervangen worden. Deze uitsortering is ooit ontwikkeld om de vraag van cementovens te bedienen. Veel vergassingsinitiatieven richten zich met name op deze RDF (vanwege het biogene deel waar ondersteuning voor komt) en zouden ook graag voor het niet-biogene deel ondersteuning ontvangen. Zij concurreren op korte termijn dus vooral met de cementoven om input (RDF kan ook naar de staalindustrie of een kolen-centrale).

Plasticrecyclingdoel 2030

Volgens de Nederlandse transitieagenda kunststoffen zou nieuw plastic in 2030 (totaal 2.400 kton) voor 40% uit recycalaat moeten bestaan, tegenover 12,5% nu (300 kton). Die toename zou grotendeels (750 kton) ingevuld moeten worden met meer mechanische recycling, maar



ook deels met chemische recycling (250 kton). CE Delft heeft eerder samen met PlasticsEurope geconstateerd dat dit theoretisch wellicht zou kunnen, maar dat dan echt al het plasticafval dat vrijkomt in Nederland naar recycling moet gaan. (Van deze chemische recycling is ook een deel vergassing van plastic, maar dan gaat het om de inzet van dit gas als grondstof in de chemie voor nieuwe plastic; in deze studie kijken we naar vergassing voor energie).

Ook als de recycle-doelen om de één of andere reden niet helemaal gehaald zouden worden in 2030, dan nog zal het aandeel plastic dat beschikbaar is voor andere technieken in 2030 een factor 2 à 3 lager liggen dan op dit moment, omdat mechanische en chemische recycling wel flink zullen toenemen. Denk aan maximaal 400 kton plasticafval in 2030 en een afname naar nul richting 2040. (Op dit moment gaat er netto ongeveer 800 kton Nederlands afvalplastic naar energieopties in de vorm van AVI's en cementovens).

In Tabel 1 is een overzicht gegeven van de vragers van plasticafval. Het gaat allereerst om een grote vraag voor mechanische recycling, maar ook chemische recycling kan een belangrijke vrager worden. De Transitieagenda Kunststoffen denkt aan 375 kton vraag vanuit chemische recycling. De veel optimistischere Roadmap Chemische Recycling mikt op 1.000 à 1.500 kton plasticafval, dat vooral via pyrolyse omgezet wordt naar nieuw plastic, en heeft dus naast al het Nederlandse plasticafval ook import nodig. Daarnaast is er potentiële vraag uit de luchtvaartsector (SAF maximaal 270 kton in 2030) en brandstoffen voor wegvervoer. Tot slot zullen de bestaande verwerkers van plasticafval (cementindustrie en AVI's) het afval ook graag houden om cement, elektriciteit en warmte te produceren.

Tabel 1 - Claims uit verschillende sectoren voor de 1.200 kton plasticafval per jaar in Nederland 2030

Sector /vrager plasticafval	Doelstelling	Materiaal claim
Plasticrecycalaat	40% recycled content in 2030 (transitieagenda)	1.200 kton als doelstelling, waarschijnlijk 800 kton in praktijk (op dit moment 300 kton)
Chemische recycling (onderdeel recycalaat, maar deels via vergassing) naar plastic	10% recycled content in Transitieagenda (250 kton output) en 555 kton output Roadmap Chemische Recycling	Transitieagenda circa 375 kton, Roadmap 1.000 à 1.500 kton, waarvan deel import
Sustainable aviation fuel (ook via vergassing)	Maximaal 5% in 2030 (32% in 2040 en 63% in 2050)	Bij 5% 270 kton plastic
Methaan al onderdeel van bijmengplicht	2 miljard Nm ³ per jaar, waarvan 0,4 bijvoorbeeld via vergassing	480 kton plasticafval (voor 0,4 miljard Nm ³)
Recycled carbon fuels (RED) in transportbrandstof	Nederland nu nog geen doelstelling, wordt beslist per lidstaat	Aanzuigende werking wellicht vanuit EU-lidstaten die dit wel gaan meetellen in RED-beleid
RDF/SRF naar cementovens	Geen doelstelling	Op dit moment circa 1.000 kton/jaar SRF-productie voor cementovens/energiecentrales met kunststof in het mengsel
AVI-verbranding	Elektriciteit produceren en bijdragen aan warmtetransitie	Verbranden op dit moment al het plastic zonder andere toepassing (cementovens en AVI's samen circa 800 kton)
Totaalvraag alle claims exclusief methaan via vergassing		Minimaal 1.975 en maximaal 3.770 kton/jaar (bij beschikbaarheid van 1.200 kton)



Energie-efficiency, CO₂-winst en kosten?

Omdat er veel meer (factor 1,5 à 3 r) vraag naar plasticafval komt in alle beleidsplannen dan er beschikbaar zal komen, is er prioritering nodig. Daarvoor hebben we een analyse van de CO₂-winst per optie gedaan, gekeken naar de mogelijke besparing van het gebruik van fossiele energie (aardgas en aardolie) en een beperkte analyse gedaan van de kostenverschillen.

Tabel 2 - Overall beoordeling verwerkingstechnieken van niet-biotisch afval(plastic) 2030

Techniek	Energetisch rendement	CO ₂ -emissiescore (lager is beter)	Kostenindicatie (+ = voordelig voor overheid, 0 = neutraal, - = aanzienlijke kosten)
Recycling mechanisch	200% gem. (100 à 300%)	-1,3 tot -2,6	0/-
Recycling chemisch korte keten (depolymerisatie)	Circa 170%	-1,5	0/-
HR AVI (evt. met CCS) [#]	118% (110%)	0,6 (-1.8)	+ (+/0)
Cementoven	100%	-0,8	0
Recycling lange keten chemisch (pyrolyse)	Circa 90%	0,7	-
Vergassing naar methaan met CCS	65 à 80%	-0,2	-
Beste drie AVI's Nederland	71%	1,4	+
AVI gemiddeld Nederland	53%	1,8	+

Deze HR - AVI is een AVI zoals recent gebouwd in Denemarken. Deze functioneert in een uitgebreid warmtenet, wat in Denemarken de belangrijkste vorm van verwarming is in grote steden. Deze optie wordt voor Nederland relevant zodra ook hier de warmtenetten echt grootschalig worden, zoals in de MRA-regio en de Haaglanden/Rijnmond-regio de bedoeling is.

Mechanische recycling en korte-keten-chemische-recycling (oplossen en depolymerisatie) zijn zowel qua energierendement en CO₂-winst het meest gunstig. Tweede voorkeursoptie uit deze analyse is de HR AVI met CCS (gemodelleerd naar een installatie die recent is gebouwd in Kopenhagen). Energiescore is goed, CO₂-score met CCS zeer goed, en kosten zijn beperkt of rendabel. Ook de cementoven waar kolen vervangen worden zonder meer-kosten, scoort relatief goed. (Als de cementsector overgaat/moet schakelen op gasvormige brandstof dan wordt de CO₂-score vergelijkbaar met vergassing).

Vergassing van plastic voor energie scoort zowel qua energie als CO₂ duidelijk minder dan de eerder genoemde opties en heeft aanzienlijke kosten. Vergassing scoort wel duidelijk beter dan de huidige AVI's op CO₂-score, met name omdat vergassing CO₂-afvang altijd zegt te gaan toepassen en AVI's daar nu alleen nog proefprojecten mee hebben.

Vergassing kan ook ingezet worden als lange-keten-chemische-recyclingroute van plastic naar plastic. Daar is in deze studie nu niet uitgebreid naar gekeken. In de Transitieagenda Kunststoffen 2030 en ook de Roadmap Chemische Recycling 2025 is meer aandacht voor pyrolyse als aanvullende lange-keten-chemische-recyclingroute dan voor vergassing. Sowieso heeft in het circulaire domein mechanische recycling en korte-keten-chemische-recycling de voorkeur.

Doorkijk naar 2040/2050 voor vergassing plastic naar methaan

Voor energie-efficiency hebben we een gekeken of de rangorde verandert als er veel meer CCS zal worden toegepast, gassen en elektriciteit naast elkaar gebruikt zullen gaan worden en het duurzame energie aandeel veel groter zal zijn.

Recycling blijft dan het beste scoren, de HR AVI met CCS is nummer twee en als derde optie komt vergassing naast lange-keten-chemische-recycling naar voren.

Case: H₂ uit duurzame elektriciteit bij vergisting of vergassing voor extra methaan

Het is mogelijk om met waterstof geproduceerd uit duurzame elektriciteit zowel bij vergisting als bij vergassing extra methaan te produceren. In Denemarken wordt hier veel van verwacht. De situatie in Nederland, waar er ook veel vraag naar waterstof uit de industrie wordt verwacht, is echter niet vergelijkbaar met die van Denemarken. Bij de waterschappen is het denkbaar dat gecombineerd met beluchten met zuurstof in plaats van met lucht, de waterstof die bij die productie vrijkomt ingezet wordt voor extra methaanproductie. In een optimistisch scenario zou dit kunnen gaan om 33 miljoen Nm³ methaan per jaar. De vraag is wel of er voldoende groene stroom beschikbaar is ter plekke. Als we veel voorzichtiger rekenen, op basis van elektriciteit die niet afgezet kan worden aan het net uit zonneparken bij waterschappen, dan komen we op een groen-gasproductie van 0.3 miljoen Nm³ groen gas per jaar. Vergeleken met de ambitie van 2 miljard Nm³ groen gas is dit een kleine hoeveelheid. Deze optie is nog sterk in ontwikkeling. Een definitief beeld voor na 2030 is daarom nog niet met zekerheid te geven.

Hoofdconclusie

Uit andere onderzoeken blijkt dat vergassing van biogene stromen (rioolslib, etc.) een energetisch interessante en belangrijke aanvulling op vergisting en groen gas en biogas oplevert.

Uit dit onderzoek naar de vraag of niet-biotisch afval hier een interessante aanvulling op is, komen de volgende hoofdconclusies:

- De vraag naar plasticafval voor verschillende toepassingen (mechanische recycling, chemische recycling, cementovens, transportbrandstof, vliegtuigbrandstof en eventueel methaan voor energietoepassing) is veel groter dan het aanbod.
- Zowel beleidsmatig als qua CO₂-reductiescore en qua energie-efficiency is recycling weer naar plastic de voorkeursoptie.
- Om de doelen voor plasticrecycling te halen in 2030 (Transitieagenda Kunststoffen) is al het plasticafval nodig voor recycling.
- Zolang recycling nog in opbouw is, is energietoepassing met een zo hoog mogelijke energie-efficiency en CO₂-score voor het afval dat nog over is, verstandig. De HR AVI met CCS (behorende bij een groot warmtenet), de cementoven (zolang nog kolen-gestookt) scoren hier het beste op. Vergassing naar methaan heeft een iets lager energierendement, vergelijkbaar met de beste drie AVI's nu in Nederland, maar scoort door CO₂-afvang qua CO₂ ook redelijk goed.

Extra methaan door het toevoegen van groene waterstof (uit groene stroom) kan in heel specifieke cases interessant zijn, vooral als een overschot aan duurzame elektriciteit op deze manier toch gebruikt kan worden.



1 Inleiding

In het kader van de aankomende bijmengverplichting van groen gas in aardgas, en door de sterk gestegen kosten van aardgas door de oorlog in Oekraïne, is de vraag opgekomen of aanvullende productie van duurzaam/hernieuwbaar methaan op basis niet-biogene stromen mogelijk en interessant zou kunnen zijn.

Bij het ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK) leven hierover de volgende vragen:

- Welke niet-biogene grondstoffen zouden kunnen worden ingezet voor de productie van methaan?
- Wat is het denkbare potentieel van methaangas (uitgedrukt in aardgasequivalenten) uit niet-biogene afvalstromen?
- Wat is de CO₂-emissiefactor van deze routes? Hoe verhoudt deze zich tot andere verwerkingsroutes van afval?
- Hoe verhoudt het eventueel omzetten van (plastic)afval in methaangas zich tot de wens om ook veel meer recycling van afval te realiseren (circulariteit/cascadering)?
- Wat is er te zeggen over de kosten van de verschillende routes?
- Hoe verhoudt het eventueel stimuleren van deze opties zich tot een risico op lock-in richting 2030 en 2050?
- Hoe sluit dit aan bij beleidskwesties als het classificeren als hernieuwbare energie, de RED II en Garanties van Oorsprong, en de afvalwetgeving zoals vastgelegd in LAP3?
- Kan methanisering van waterstof in een biogasinstallatie in bijzondere gevallen (bijvoorbeeld bij een zonnepark bij een waterzuivering met zuurstofvraag, waar waterstof gemaakt kan worden) een goede rol spelen?

De vragen zijn bedoeld om een goede inschatting te kunnen maken van de wenselijkheid van verschillende routes, en beleid daarop te baseren. Daarbij speelt de vraag of methaan uit niet-biogene grondstoffen ook (eventueel gedeeltelijk) mag meetellen in deze verplichting. In dit onderzoek kijken we daarvoor uitgebreid naar het (co-)produceren van methaan via vergassing uit plasticafval en beperkter naar het produceren van extra methaan door het toevoegen van duurzaam geproduceerde waterstof in een vergister (Hoofdstuk 8).

De vragen zijn vooral gericht op de periode tussen 2030 en 2040. Actuele beslissingen voor het stimuleren van het bouwen van installaties, leiden tot realisatie in die termijn. Wel is de vraag of deze installaties ook op de nog langere termijn (2050) goed kunnen bijdragen aan een klimaatneutrale en circulaire economie.

1.1 Methodiekaspecten

Correlatie met biotische grondstoffen

De focus in dit onderzoek ligt op niet-biotische grondstoffen. Er is een aantal initiatieven dat zich op een combinatie van biomassa en plastics richt (onder andere Synova (biomassa en plastics) en SCW-systems (rioolslib en plastics)). We zullen bij deze initiatieven de focus leggen op het niet-biogene deel van de input, maar het biogene deel wel benoemen.



AVI als referentie in Nederland

Omdat een heel groot deel van het brandbare afval in Nederland verbrand wordt met energieproductie in een AVI, zullen we die techniek als referentie hanteren. Daarbij zullen we de gemiddelde AVI als norm nemen, en ook aangeven wat de variaties tussen Nederlandse AVI's zijn.

Ook indirecte effecten meenemen

Omdat het bij afval vaak gaat om een verschuiving van de ene techniek naar een andere techniek, is het belangrijk om ook de indirecte effecten van een verschuiving mee te nemen. Zo zal het verschuiven van afval uit een AVI naar vergassing tot methaan op het eerste gezicht meer methaan (bruto) opleveren, maar zal de AVI tegelijk ook minder elektriciteit en warmte produceren. Dit zal deels opgevuld moeten worden met elektriciteit en warmte dat geproduceerd is met aardgas. De netto maatschappelijk opbrengst is de bruto opbrengst min de hoeveelheid methaan die nodig is om het wegvallen van de AVI te compenseren. Daarbij kijken we zowel naar de situatie nu en tot 2030 (elektriciteit wordt gemaakt uit aardgas en is daarom ook meer waard dan aardgas) en naar een toekomst waar zeer waarschijnlijk methaan juist gemaakt wordt uit elektriciteit en de waardevolgorde om kan keren (2040-2050).

Hoofdlijn belangrijker dan detail

Dit rapport is bedoeld om een goede indruk te geven hoe nuttig het is om als overheid in te zetten op het produceren van methaan uit niet-biogene (afval)stromen. Daarvoor hebben we CO₂- en kostendata verzameld en vergelijkingen gedaan met andere technieken. Voor sommige technieken zijn er weinig data beschikbaar, zijn de data nog vrij onzeker of is er variatie naar soorten afval, etc. Als dit speelt dan rapporteren we in ranges, of geven we de onzekerheid aan.

1.2 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 wordt de techniek van vergassing besproken.

In Hoofdstuk 3 bespreken we de afvalstromen en hun alternatieve aanwending.

In Hoofdstuk 4 bespreken we concrete initiatieven in Nederland om waterstof, methaan of methanol via vergassing uit afval te maken.

In Hoofdstuk 5 doen we de beleidsanalyse die gaat over wat beleidsmatig de gewenste route is voor niet-biotisch afval, de vraag uit verschillende sectoren en bespreken we verschillen in energie-efficiency van de routes.

In Hoofdstuk 6 kijken we naar de verschillen in klimaatemissies.

In Hoofdstuk 7 analyseren we op hoofdlijnen de kostenverschillen.

In Hoofdstuk 8 kijken we naar de optie om in nichesituaties duurzaam geproduceerde waterstof te gebruiken bij vergisting of vergassing om meer methaan te produceren.

In Hoofdstuk 9 staan de conclusies. Deze komen ook terug in de samenvatting.

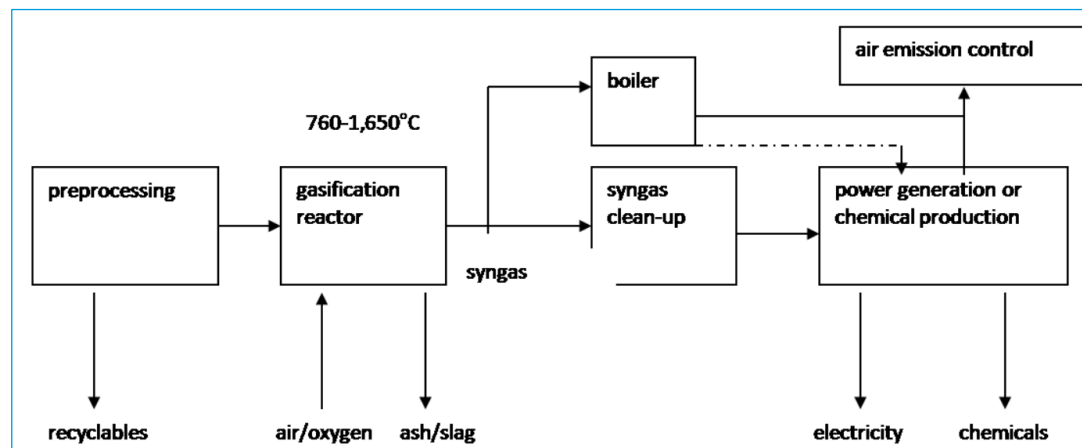
2 Vergassing

Vergassing is een industrieel proces, waarbij een feedstock (over het algemeen onder hoge temperatuur en druk) in aanwezigheid van een oxidant (bijvoorbeeld zuurstof of water) deels wordt verbrand. Een belangrijk kenmerk is dat er geen volledige verbranding plaatsvindt. Meestal is het doel van vergassing om syngas te produceren. Syngas is een mix van voornamelijk waterstof (H_2) en koolstofmonoxide (CO). Daarnaast bevat het soms koolstofdioxide (CO_2), methaan (CH_4), stikstof (N_2) en kleine koolwaterstoffen (zoals etheen, C_2H_4). De samenstelling van het syngas hangt af van de feedstock die is gebruikt en het gebruikte proces. Afhankelijk van de samenstelling, kan het syngas gebruikt worden als bron om waterstof te maken, of als bron voor de productie van andere chemische stoffen (VALORIZA, 2022).

Vergassing onderscheidt zich van pyrolyse en van verbranding doordat bij pyrolyse geen zuurstof of ander oxiderend middel aanwezig is, en bij verbranding een overschot (of in elk geval genoeg voor volledige verbranding). In die zin zou je vergassing dus tussen deze twee andere technieken kunnen plaatsen.

De hoeveelheid oxidant, en daarmee de mate van verbranding, is dus bepalend voor of een proces als vergassing aangemerkt kan worden. Om het gewenste product te verkrijgen, kan daarnaast gevarieerd worden met de feedstock, temperatuur, druk, residentietijd (een langere tijd geeft meer waterstof) en de opstelling. Zo ontstaan er bij hoge temperatuur andere moleculen dan bij lage temperatuur (ECN, 2015). Zo geldt voor zowel biomassa als plastics dat een hogere temperatuur over het algemeen gepaard gaat met meer waterstofproductie en minder methaanproductie (J.M. Bermudez, 2016) (Universtity of Leeds, 2016).

Figuur 1 - Algemeen techniekschema vergassing



Bron: (CTCN).

Bij het proces van vergassing ontstaat methaan, maar zullen ook altijd andere gassen ontstaan, zoals H_2 , CO en CO_2 . De productie van methaan kan vergroot worden door deze gassen na de vergassingsstap nog met elkaar te laten reageren tot methaan, via de zogenaamde Sabatierreactie. Hierbij reageert waterstof met CO dan wel CO_2 tot methaan en water in een exotherm proces.

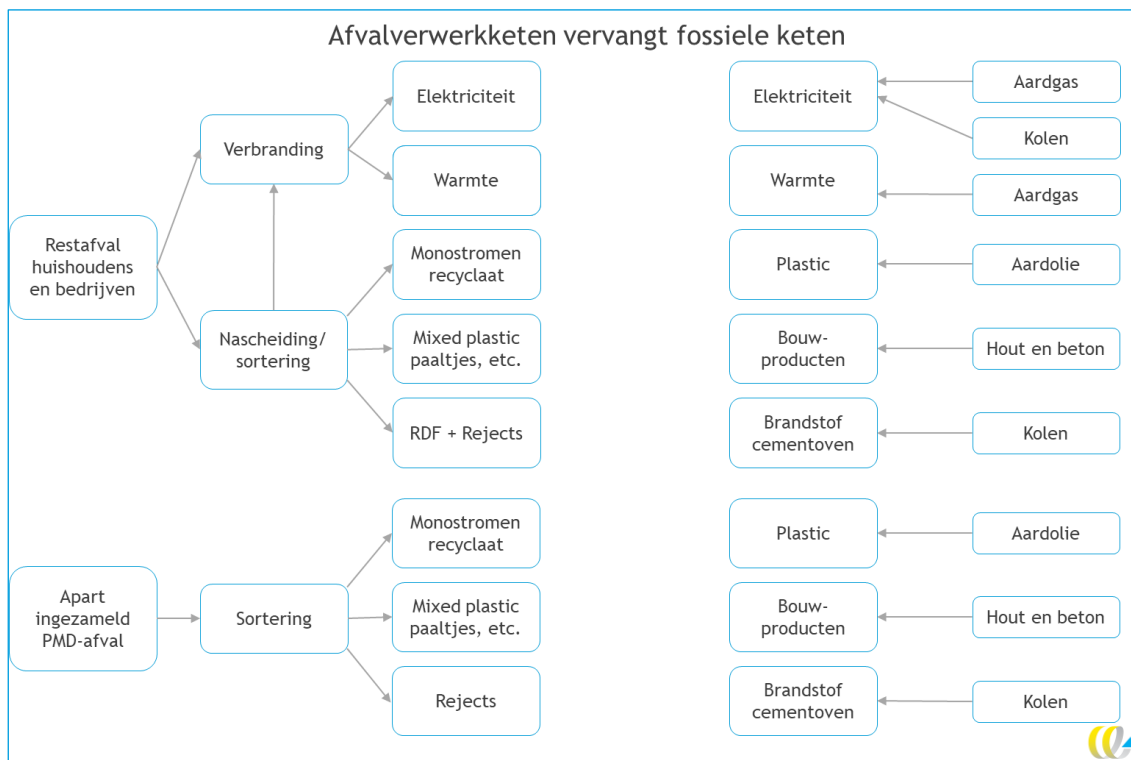
Als het juist de bedoeling is om waterstof te produceren dan wordt de vergassing zo ingesteld dat er vooral waterstof en CO (syngas) geproduceerd worden en wordt daarna uit dit syngas met het stoomreformingproces waterstof en CO₂ geproduceerd.



3 Afvalstromen

Bij de analyse van vergassing en haar alternatieven richten we ons specifiek op drie soorten afval. Daarbij gaat het eigenlijk vooral om het plasticdeel in in huishoudelijk restafval en daarop gelijkende bedrijfsafval en apart ingezameld PMD (plastic metaal en drankenkarton afval). In Figuur 2 zijn links deze stromen geplaatst en daarnaast de manieren hoe deze verwerkt worden en welke producten dit oplevert. Om deze producten zowel energetisch als qua CO₂ impact te waarderen is rechts daarvan geschetst hoe met welke marginale productie uit fossiele ketens dit vergeleken kan worden. (Deze ketens aan de rechterkant worden vervangen door de linker ketens.)

Figuur 2 - De restafval- en plastic-recyclingketen



1. Integraal huishoudelijk restafval

Huishoudelijk afval wordt deels bij huishoudens gescheiden voor recycling, deels nagescheiden bij de afvalverwerking, en voor een groot deel verbrand in afvalverbrandingsovens die elektriciteit en warmte produceren. Verder wordt er ook uit huishoudelijk afval RDF geproduceerd, dat ingezet wordt als brandstof voor cementovens (kan ook naar staalfabriek of kolencentrale).¹

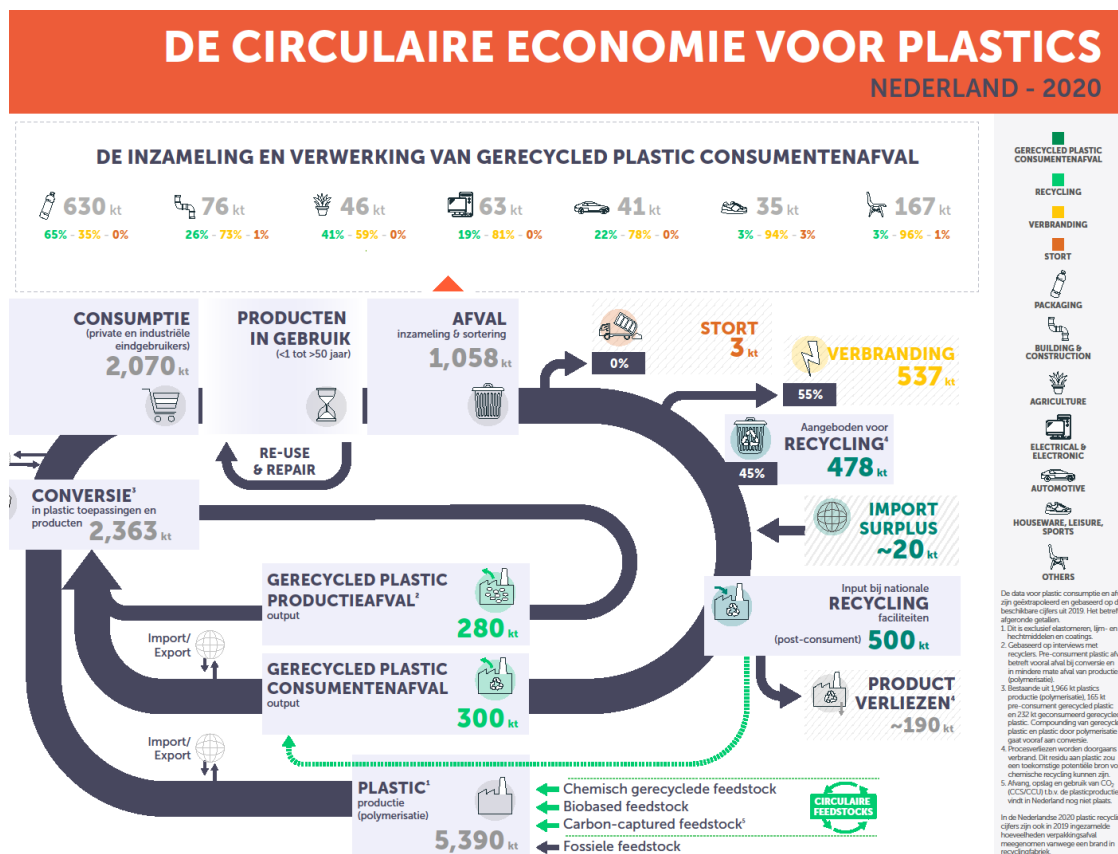
¹ NB: Ongeveer de helft van het huishoudelijk afval (gerekend naar energie-inhoud) is biotisch, dus bij het gebruik van puur huishoudelijk afval om methaangas te produceren, is er sprake van een mix van biotische en niet-biotische grondstoffen.

Ongeveer 4 Mton huishoudelijk restafval (10 MJ/kg) wordt in Nederland verbrand in speciaal daarvoor gebouwde afvalverbrandingsinstallaties (AVI's), die uit het afval elektriciteit en warmte produceren. Ongeveer de helft van de verbrandingswaarde van dit afval komt uit plasticafval (1,2 Mton) dat voor circa 28% gerecycled wordt, maar voor een zeer groot deel via het restafval in de verbranding terechtkomt.

2. Plasticafval (integraal en focus op DKR-350 mixed plastic)

Al het plasticafval bestaat voor ongeveer de helft uit afvalverpakkingen. Voor verpakkingen is er een uitgebreid systeem voor inzameling, sortering en recycling. Voor veel ander plasticafval is dit nog niet het geval, maar wordt dit opgezet. Bij de sortering van plasticverpakkingen uit de bron- en nascheiding ('plastic heroes') ontstaan er verschillende stromen (aangeduid met een DKR-code). Met name interessant is de 'DKR-350 mixed plastic'-stroom, die nu voornamelijk wordt ingezet als materiaal voor dikwandige bouwproducten (paaltjes, buitenmeubilair, etc.).

Figuur 3 - De circulaire economie van plastic 2020 in Nederland



Bron: Plastic Europe NL.

In totaal is er in Nederland een gebruik van 2.070 kton plastic per jaar in producten op consumptiebasis (we produceren ongeveer 5 Mton plastic per jaar). Ongeveer 600 kton daarvan is verpakkingen. Die komen vrij snel weer vrij als afval en worden voor ongeveer de helft gerecycled (300 kton). Omdat een deel van het plastic toegepast wordt in producten die lang in gebruik zijn (huizen, auto's) en deze toepassing relatief nieuw is, is de hoeveelheid afval die vrijkomt per jaar met 1.058 kton in 2020 duidelijk



lager dan de hoeveelheid die geconsumeerd wordt. Van de niet-verpakkingen wordt maar een klein deel van het plastic apart ingezameld en gerecycled. We schatten in dat deze 1.058 kton richting 2030 gaat groeien richting 1.200 kton (zie Paragraaf 6.3).

3. Reststromen uit chemie en industrie

Een deel van het bedrijfsafval lijkt sterk op huishoudelijk afval. Dat nemen we mee in die stroom. De overige afvalstromen uit de industrie zijn over het algemeen een stuk kleiner dan de afvalstromen die hiervoor besproken zijn. Alleen bouw- en sloopafval is een stroom die heel groot is, maar die wordt niet gezien als interessant voor vergasingsprojecten.

4. Rubber/oude autobanden?

De hoeveelheid rubberafval is een orde kleiner dan de hoeveelheid plasticafval (88 kton per jaar (CE Delft, 2021a)). Het gaat hierbij voornamelijk om autobanden. Hiervoor is een recyclingsysteem ontwikkeld en daarnaast wordt een deel van de banden die niet gerecycled kunnen worden, verwerkt in cementovens.

4 Technieken methaan uit afval

In het volgende overzicht bespreken we aantal voorbeelden van vergassingsinitiatieven die zich (onder meer) richten op het verwerken van niet-biogene stromen. Het is geen compleet overzicht, maar geeft een goede indruk van de opties. (Dat sommige technieken of bedrijven niet genoemd worden betekent niet dat die minder interessant zijn.)

De informatie in de tabellen is aangeleverd door de genoemde initiatieven.

4.1 SCW Systems

SCW Systems maakt gebruik van superkritische watervergassing en richt zich vooral op natte biomassa-afvalstromen als rioolslib. Plasticafval meeverwerken is een optie.

Tabel 3 - SCW Systems

Naam techniek/ontwikkelaar	CleanUp Gas (SCW Systems)
Bron	www.scwsystems.com/het-proces-van-superkritische-watervergassing en een interview met SCW Systems
Omschrijving proces	<ul style="list-style-type: none"> – Input: allerlei afvalstromen, zoals crude glycerol, rioolslib, vinasse, gft-afval, agrarische reststromen. – Proces: opslag en voorbehandeling → superkritische watervergassing → waterstof en CO₂ reageren tot nog meer methaan → gasbehandeling en opwerking. – Output: methaan, waterstof en CO₂ (syngas), waarmee verschillende eindproducten gemaakt kunnen worden. Bij de 20 MW-demonstratie-installatie in Alkmaar wordt het syngas opgewerkt naar hoogcalorisch groen gas. – Temperatuur: > 375 °C. – Druk: > 221 bar.
TRL	Status: ingebruikname eerste industriële demonstratie-installatie in Alkmaar.
Schaal (verwacht)	Demonstratie-installatie Alkmaar → ~20 MW capaciteit.
Feedstock	Allerlei afvalstromen, zoals crude glycerol, rioolslib, vinasse, gft-afval, agrarische reststromen. Flexibiliteit in stromen.
Methaanopbrengst	
Energetisch rendement	Voor plastic is het omzettingsrendement van plastic naar methaan naar schatting tenminste 80%. Deze waarde is zo gunstig door efficiënt hergebruik van warmte en de superkritische toestand in de vergasser en het feit dat de installatie een hoger rendement kan halen met meer hoogcalorische input, omdat de benodigde energie voor het proces vrijwel constant is. Voor laagcalorisch rioolslib is het rendement lager en circa 70%.
CO ₂ -voetafdruk	CO ₂ die vrijkomt wordt afgevangen voor CCS en/of CCU (met CO ₂ -CLEANUP-technologie).
Kosteninschatting	Dit is vertrouwelijk informatie. Er is een SDE-subsidie over een periode van 12 jaar toegezegd, ter hoogte van € 85 miljoen voor de demonstratie-installatie (gebaseerd op 15 miljoen m ³ hoogcalorisch groen gas per jaar).

4.2 Synova

Synova richt zich het meest op chemische recycling van plastic, maar afzet van methaan of waterstof is ook een optie. De input zijn vooral biotische afvalstromen maar plasticafval is ook een optie.

Tabel 4 - Synova

Naam techniek/ontwikkelaar	
Bron	www.synovatech.com/the-self-powered-circular-recycling-plant
Omschrijving proces	<ul style="list-style-type: none"> – Input voor deze analyse van plasticafval; Proces: <ul style="list-style-type: none"> • Verhitten van de feedstock tot 750-850 °C om productgas te krijgen met een hoog gehalte aan methaan (met biomassa als feedstock) en olefines (met plastics als feedstock). Technologiernaam: MILENA. • Eerste reiniging van het gas van grote koolwaterstoffen (teer, poly-aromatische koolwaterstoffen) en deeltjes vindt plaats in OLGA. De energie in de teer wordt gebruikt in de MILENA. • Verdere reiniging is afhankelijk van het einddoel en kan de volgende onderdelen bevatten: <ul style="list-style-type: none"> ◦ watercondensatie en verwijderen van wateroplosbare componenten zoals HCl en NH₃; ◦ zwavelverwijdering; ◦ katalytische conversie. – Output: afhankelijk van gekozen eindproces is het product groen gas (methaan uit biomassa of SRF) of olefines (C₂, C₃, C₄ uit plasticafval) of BTX (benzeen, toluen, xyleen uit plasticafval) of styreen (uit polystyreen-rijkafval). Als co-product wordt in enkele gevallen zuiver CO₂ geproduceerd.
TRL	6-8 (afhankelijk van de toepassing).
Schaal (verwacht)	Circa 7 t/h inputcapaciteit voor een enkele MILENA. Verdere opschaling vindt plaats door parallelle MILENA's. OLGA en andere downstream-units bestaan uit één trein achter meerdere MILENA's.
Feedstock	Biomassa, plasticafval en combinaties, SRF (Solid Recovered Fuel) is een mengsel van biomassa en plasticafval.
Methaanopbrengst	36-44% kg C groengas/kg C in biomassa of SRF.
Energetisch rendement	65-70% in MJ groengas/MJ biomassa of SRF.
CO ₂ -voetafdruk	3,3-16,7 kg CO ₂ /GJ groengas gemaakt uit biomassa (studie (CE Delft, 2022a) voor diverse scenario's).
Kosteninschatting	Is vertrouwelijke informatie.
Overige informatie	Synova Tech licenseert de technologieën MILENA en OLGA die zijn ontwikkeld samen met TNO en andere technologiepartners.

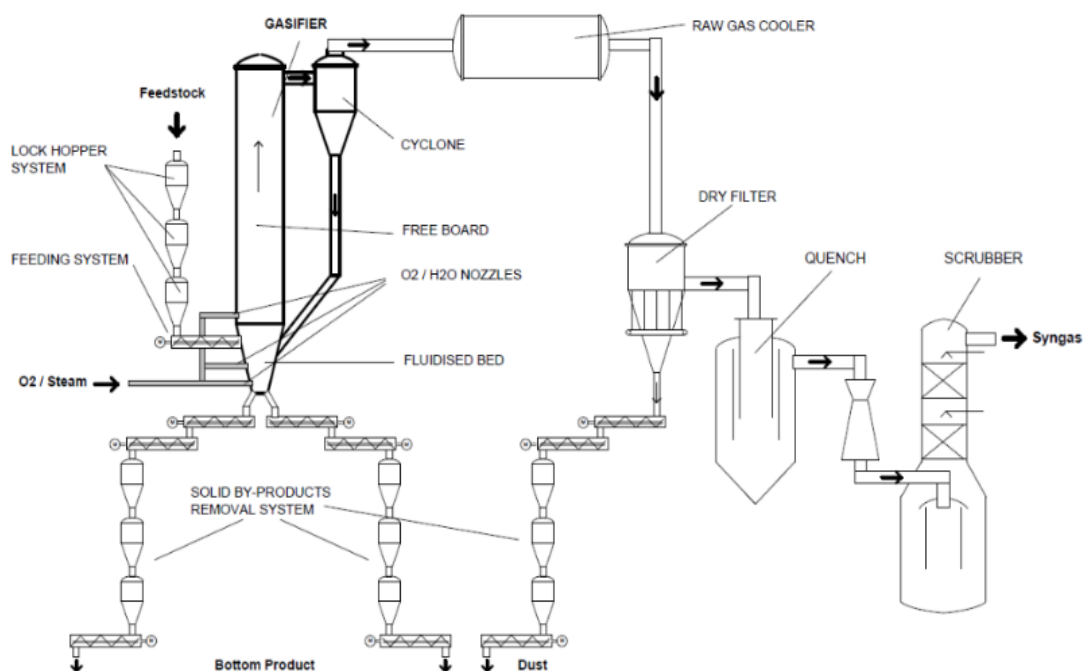
4.3 Gidara

Gidara wil zowel in Amsterdam als in Rotterdam een installatie realiseren, die op basis van RDF/SRF methanol produceert. Afzet van methaan of waterstof is ook mogelijk.

Tabel 5 - Gidara

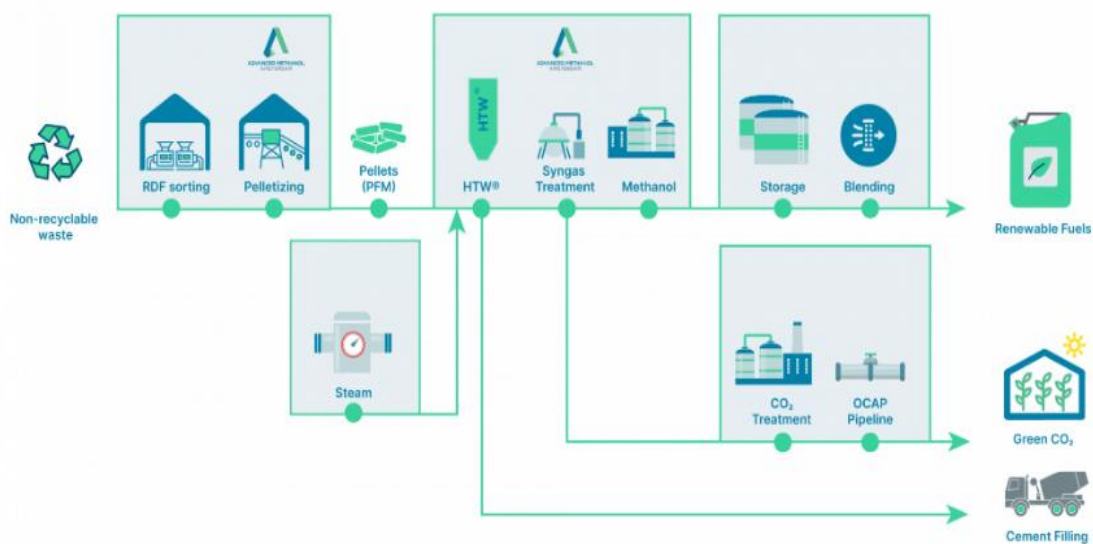
Naam techniek/ontwikkelaar	HTW (High Temperature Winkler) Technology, GIDARA Energy
Bron	Gidara Energy; www.gidara-energy.com en interview met Gidara
Omschrijving proces	<ul style="list-style-type: none"> – Input: houtachtig afval, rioolslib, papier, RDF/SRF, landbouwresten, niet-recycleerbaar plastic, restafval, hout uit bouw- en sloopafval. – Proces: voorbehandeling van feedstock → HTW (bubbling fluidised-bed reactor) met ofwel lucht, stoom of zuurstof → syngaszuivering. – Output: schoon syngas, wat vervolgens kan worden omgezet tot scheepvaartbrandstoffen, methanol, biodiesel, MTBE, SAF, groene waterstof, plastics, dimethyl ether, MTO, formaldehyde, bio-ureum, azijnzuur, bio-naphta, bio-ammoniak, elektriciteit/ICGG, SNG, bio-waxen/smeermiddelen, benzine/ LPG. – Temperatuur: afhankelijk van grondstof en condities 800-1.100 °C. – Druk: afhankelijk van condities en toepassing: tussen 0 en 30 bar. (Zie Figuur 4)
TRL	TRL 9. De HTW-technologie is al bewezen in bijvoorbeeld de fabrieken in Berrenrath (methanolproductie) en Oulu (Ammoniakproductie). Eerste productiefaciliteit van GIDARA is gepland in Amsterdam → Advanced Methanol Amsterdam (AMA). Deze faciliteit is volgens planning operationeel vanaf 2024. Daarnaast staan een testfaciliteit, kenniscentrum en pilot plant gepland voor eind 2023/begin 2024 in de Haven van Rotterdam. Productie van methanol zal waarschijnlijk in 2025 beginnen.
Schaal (verwacht)	Voor AMA en AMR 200 kton/jaar niet-recycleerbaar afval per fabriek. De thermische input van de vergasser is ontworpen op 110 MW.
Feedstock	Voor AMA en AMR zal een mix van houtafval (B-hout) en RDF gebruikt worden. Het proces heeft op commerciële en demonstratieschaal ook succesvol geopereerd op niet-recyclebare plastics, rioolslib, papierafval, agri-residu, huishoudelijk afval en bouw- en sloopafval.
Opbrengst	87,5 kton/jaar methanol.
Energetisch rendement	De koolstofconversie in de vergasser kan 95% bereiken. Het energetische rendement is afhankelijk van de downstream-applicaties. De verwachting is dat een energetisch rendement van meer dan 60% wordt behaald.
CO ₂ -voetafdruk	De methanol zal gebruikt worden voor toepassing als biobrandstof. Voor de calculatie wordt daarom gebruikgemaakt van de methodologie in de richtlijn hernieuwbare energie (RED II). Op basis hiervan kan GIDARA een CO ₂ -reductie tot 135% behalen ten opzichte van de 'fossil fuel comparator' van 94 g CO ₂ -eq./MJ.
Kosteninschatting	Op basis van initiële inschattingen zijn de kosten van de core (kern) van de AMA-fabriek € 250 M.
Overige informatie	AMA: Doel is 87.500 ton methanol per jaar met afval gelijk aan dat van 290.000 huishoudens. Faciliteit AMA, zie Figuur 5. Het AMR-project is een kopie van het project in Amsterdam. Voor Zowel AMA als AMR zal CO ₂ worden afgevangen en verstuurd worden naar de glastuinbouw waardoor ook die sector minder afhankelijk wordt van aardgas.

Figuur 4 - Omschrijving proces Gidara



Figuur 5 - AMA Value chain

The AMA Value chain



4.4 Furec

Furec ontwikkelt een heel grote installatie om uit RED/SRF vooral waterstof te gaan maken in Limburg:

www.climate.ec.europa.eu/system/files/2022-12/if_pf_2022_furec_en.pdf

www.benelux.rwe.com/projecten/furec

Tabel 6 - Furec

Naam techniek/ontwikkelaar	FUREC (Fuse Reuse Recycle) (van RWE)
Bron	www.climate.ec.europa.eu/system/files/2022-12/if_pf_2022_furec_en.pdf en www.benelux.rwe.com/projecten/furec
Omschrijving proces	<ul style="list-style-type: none">– Input: huishoudelijk afval uit Limburg → non-recycleerbaar MSW & sewage slugde.– Proces: recycleerbaar materiaal wordt uit het afval gehaald en alles wordt gedroogd → restfractie wordt geperst tot korrels (SRF), welke worden samengevoegd met sewage slugde → productie waterstof (entrained flow gasification).– Output: waterstof.– Temperatuur: -– Druk: -
TRL	Installaties worden gepland op verschillende locaties. Doel is om de definitieve investeringsbeslissing in 2023 te nemen en om 1 mei 2028 operationeel te worden.
Schaal (verwacht)	700 kton per jaar in één unit.
Feedstock	Het afval bestaat voor meer dan de helft uit biogeen materiaal → 50% van geproduceerde waterstof kan beschouwd worden als groen.
Methaanopbrengst	54.000 ton waterstof/jaar (op basis van 400 kton afval).
Energetisch rendement	Wordt nog niet gerapporteerd. Gezien de grote schaal, waarschijnlijk boven de 70%.
CO ₂ -voetafdruk	Op dit moment wordt aardgas gebruikt om grijze waterstof te produceren. Doel is om met de groen geproduceerde waterstof het aardgasverbruik te verlagen met 214 miljoen kuub (jaarlijks). 1 ton afval levert 60 kilo waterstof op, dat 340 m ³ aardgas vervangt en 413 kilo CO ₂ -uitstoot voorkomt. In totaal wordt 3,61 Mton CO ₂ -equivalenten voorkomen.
Kosteninschatting	Innovation fund grant: € 108 miljoen. Estimated CAPEX: € 685 miljoen.
Overige informatie	De geproduceerde waterstof wordt gebruikt op het Chemelot-terrein en vervangt grijze waterstof voor de productie van ammonia.

4.5 Samenvatting technieken methaan uit afval via vergassing

De huidige initiatieven richten zich vooral op biotische afvalstromen en daarnaast op RDF / SRF, dat een mix is van plastic en papier, gemaakt uit huishoudelijk restafval. Het plan is om als producten methaan, waterstof of methanol, of een mix hiervan te gaan produceren. Het energierendement met plasticafval als input² varieert waarschijnlijk tussen de 65 en 80%. Alle initiatieven vangen hun emissies van CO₂-afval voor afzet aan CCU of CCS. Voor omzetting uit biomassa is het rendement wat lager, namelijk 55 à 70%.

² Energierendement is hier gedefinieerd als het netto lagere fossiele energiegebruik in de hele keten, door het initiatief gedeeld door de stookwaarde van het te verwerken afval.



In Tabel 7 staan de kenmerken van bovengenoemde partijen samengevat. Daarnaast zijn er verschillende studies die ingaan op de efficiëntie van biomassa vergassing, waarvan de efficiënties ook zijn toegevoegd (CE Delft, 2019a) (BTG, 2021).

Tabel 7 - Samenvatting energierendementen vergassingstechnieken volgens aanbieders

Techniek aanbieder/onderzoek	Afvalstroom	Rendement methaan	Rendement naar methanol of waterstof
SCW Systems	Rioolslib/gft Plasticafval	Circa 70% Circa 80%	
Synova	SRF/RDF	65-70%	
Gidara	Houtafval en RDF		Meer dan 60% naar methanol
Furec	RDF/rioolslib		Meer dan 70% naar waterstof
Studie CE Delft, 2019 ³	Houtafval	70%	
Biomass gasification for the production of methane (P.Nanou, 2012)	Hout via vergassing naar methaan	55-66%	
Openbaar eindrapport vergassing (BTG, 2021) ⁴	Verschillende soorten biomassa	60-80%	
Bio methane from wood (Meijden et al., 2011)	Vergassing van biomassa naar methaan	55-68%	

³ Onduidelijk is welke definitie gehanteerd is voor energetische efficiëntie (voornamelijk of eventuele extra energetische input is meegenomen).

⁴ Onduidelijk is welke definitie gehanteerd is voor energetische efficiëntie (voornamelijk of eventuele extra energetische input is meegenomen).

5 Beleidsanalyse vergassing plastic

Bij niet-biogene afval naar vergassing gaat het met name om plasticafval. De hoofdbeleidslijn hiervoor is de circulaire economie en recycling. Daarnaast zijn er meer energie-opties die ook kijken naar plasticafval als input. In dit beleidshoofdstuk kijken we naar de vraag hoe vergassing (naar methaan) zich beleidsmatig verhoudt tot andere opties.

5.1 Inleiding beleidsanalyse vergassing niet-biotische afvalstromen

De meeste vergassingstechnieken richten zich op biotische stromen (SCW Systems en rioolslib) of op RDF/SRF (plastic/papiermix) dat uit restafval afgescheiden wordt (Gidara en Furec). Soms wordt er ook gekeken naar specifieke plasticafvalstromen.

Voor de beleidsanalyse over vergassing van niet-biogene afvalstromen speelt het volgende:

1. Past vergassing binnen de beleidsdoelen die er op dit moment zijn voor niet-biogene afvalstromen?
2. Is vergassing energetisch en klimaattechnisch een betere optie dan de huidige verwerking van de niet-biogene afvalstroom in 2030 en later?

Plasticafval meest bepalend voor niet-biogene input vergassing

Bij alle initiatieven is de input een mix van verschillende biotische afvalstromen en plasticafval in verschillende vormen. Andere niet-biogene afvalstromen als metalen, steen en glas zijn niet interessant voor vergassers. Voor de vraag die hier voorligt over niet-biogene afvalstromen is daarom met name interessant hoe plasticafvalvergassing past binnen beleidsdoelen en hoe dit energietechnisch en klimaattechnisch scoort ten opzichte van alternatieven.

Het gaat daarbij om plastic in restafval dat via vormen van nascheiding met machines uit het afval wordt gehaald of om mixed plasticafval, gemaakt uit apart ingezameld plasticafval (zie Figuur 6).

Plasticafval wordt deels ingezameld via restafval van huishoudens en bedrijven en deels apart via PMD. Hiervoor zijn drie routes:

1. Deels gaat deze direct naar de verbranding, wat elektriciteit en warmte oplevert.
2. Deels wordt deze vlak voor de AVI nagescheiden in plasticrecycklaat, mixed plastic dat hout en beton vervangt.
3. Deels wordt deze uitgesorteerd in RDF+, dat nu naar de cementovens gaat.

Daarnaast is er plasticafval dat apart wordt ingezameld (bij verpakkingen meestal samen met metalen verpakkingen en drankenkarton). Ook hier sorteert men monostromen en mixed stromen uit en blijven rejets over. Tot voor kort was deze mixed stroom nog ongeveer de helft van het uitgesorteerde materiaal. De trend is echter dat deze stroom (vaak 'DRK350' genoemd) sterk zal afnemen, omdat monostromen meer geld opleveren in de markt.

In Figuur 6 zijn links de afvalstromen met plastic erin geplaatst en daarnaast de manieren hoe deze verwerkt worden en welke producten dit oplevert. Om deze producten zowel energetisch als qua CO₂-impact te waarderen, is rechts daarvan geschetst hoe met welke

marginale productie uit fossiele ketens dit vergeleken kan worden. (Deze ketens aan de rechterkant worden vervangen door de ketens aan de linkerkant.)

Figuur 6 - De restafval- en plasticrecyclingketen



5.2 Plasticrecycling is beleidsmatig de voorkeursoptie; wat betekent dit?

Beleidsmatig heeft recycling van plastic de voorkeur boven energietoepassing (Rijksbrede Programma Circulaire Economie en Transitieagenda Kunststoffen, LAP3, Ladder van Lansink, etc.). We kijken daarom eerst hoe het staat met recycling van plastic nu en wat de doelen voor plasticrecycling zijn.

In 2020 werd ongeveer 28% van het plasticafval gerecycled en 12,5% van het plastic dat in nieuwe producten wordt gebruikt, was recycklaat (Zie Figuur 3 van Plastic Europe NL). Het verschil tussen deze twee percentages komt doordat er steeds meer plastic toegepast wordt in producten als huizen en auto's, waar het plastic pas over 15 à 100 jaar als afval zal vrijkomen. Daarnaast wordt er nog ongeveer 1% biobased plastic gebruikt. Van de 1.200 kton plasticafval dat jaarlijks vrijkomt in gescheiden en gemengde stromen in Nederland in 2030, wordt dus maar een beperkt deel gerecycled (nu circa 300 kton). Er lijkt daarmee dus op dit moment ruimte om circa 900 kton plasticafval mee te nemen in de vergassinginitiatieven (dit zou circa 0,75 miljard Nm³ methaan opleveren (gerekend met 70% rendement). Verschillende initiatieven presenteren op basis hiervan samen met andere biotische stromen ook een potentieel van enkele miljarden Nm³ methaan op basis van vergassing.

Doel Transitieagenda 2030 plasticrecycling: 40% nieuw plastic op basis van recyclelaat en dan is al het plasticafval nodig

Alhoewel de recycling van plastic nu nog beperkt is, is het beleidsmatig de bedoeling dat dit percentage zeer snel zal stijgen. Zowel Nederland als andere Europese overheden hebben als doel om de recycling van plastic snel sterk te laten toenemen. De Nederlandse Transitieagenda Kunststoffen mikt op 40% gebruik van recyclelaat in Nederland voor alle toepassing van kunststoffen in 2030 (Ministerie van I&W en Ministerie van EZK, 2018). De 250 kton recycling uit 2018 zou moeten toenemen tot 750 kton mechanische recycling en 250 kton chemische recycling in 2030 (totaal 1.000 kton recyclelaat). Omdat elke vorm van recycling ook uitval heeft (met name een deel van de chemische recycling), is deze 40% alleen mogelijk als al het plasticafval netjes apart wordt ingezameld en alleen met efficiënte technieken wordt omgezet. Puur theoretisch is deze 40% net haalbaar. In de praktijk is eerder 25 à 30% te verwachten (CE Delft, 2022d).

Beleidsmatig is er dus de wens om zoveel mogelijk plasticafval te recyclen en vrijwel niks over te laten voor alternatieve toepassingen. In de praktijk zit er echter waarschijnlijk nog een gat tussen deze beleidswens en de hoeveelheid plastic die daadwerkelijk gerecycled gaat worden in 2030, omdat het lastig zal zijn deze transitie zo snel te laten verlopen. Voor de langere termijn (2040-2050) is echter wel de verwachting dat er vrijwel geen plasticafval beschikbaar zal komen voor andere doelen dan recycling.

5.3 Beschikbaarheid van plasticafval

Er zijn verschillende studies gedaan naar de beschikbaarheid van plasticafval voor verschillende toepassingen.

Belangrijke bron van data is Plastics Europe NL. Op basis van een analyse uit 2022 (zie Figuur 7) meldt Plastics Europe NL over 2020 dat het in Nederland gaat om de productie van 2.363 kton plastic in producten. Daarvan wordt in Nederland 2.070 kton geconsumeerd. Tegelijk ontstaat er in Nederland 1.058 kton plasticafval (verschil verklaart men door grote vraag in long-life-producten als auto's, buisleidingen en huizen). Van die 1.058 gaat 537 direct naar verbranding en 478 naar recycling. Daar valt echter nog circa 190 kton uit, waardoor er 300 kton teruggaat als recyclelaat. Dat is van de hoeveelheid afval $300 / 1.058 = 28\%$, en van de hoeveelheid productie $300 / 2.363 = 12,5\%$.

Tabel 8 - Plasticconsumptie en afval in Nederland

Jaar	Plasticconsumptie	Plasticafval	Recycling	Recycling % deel consumptie	Recycling % deel afval
2020	2.070 kton	1.058 kton	300	12,5%	28%
2030	Circa 2.400 kton	Circa 1.200 kton	Plan is 750 mechanisch en 250 chemisch	41%	83%

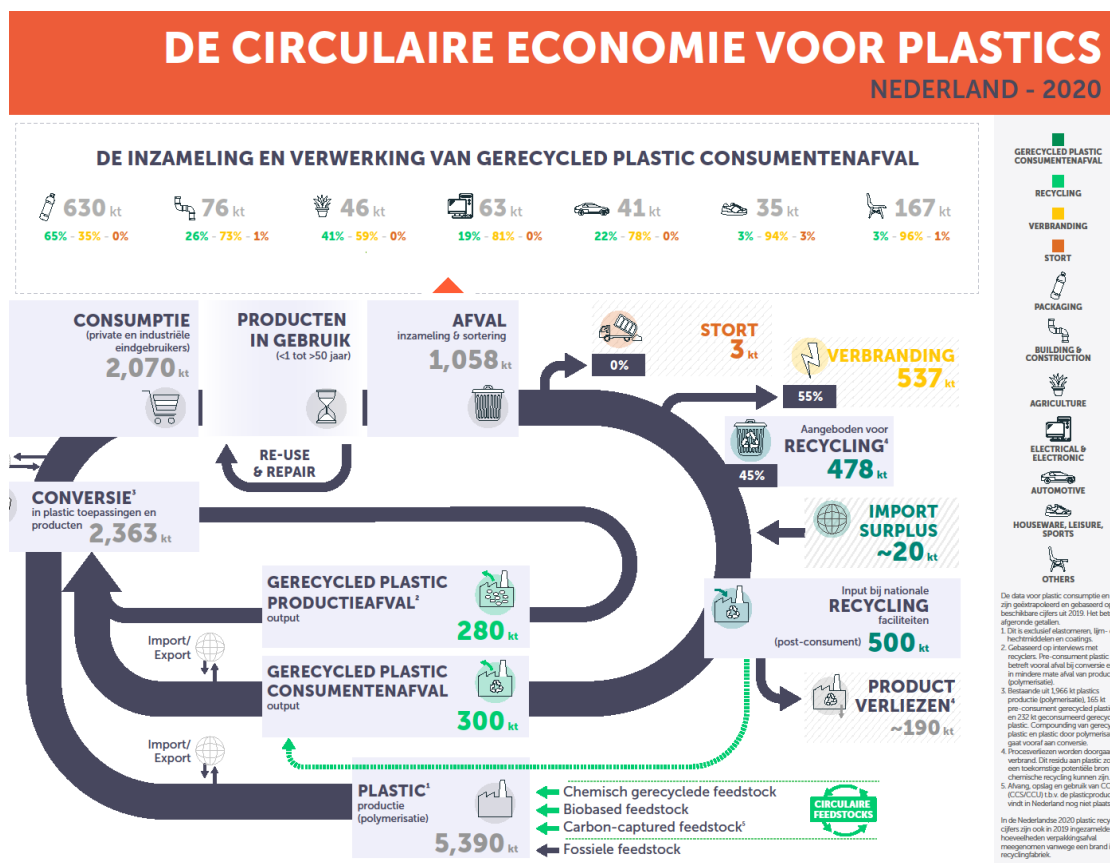
Bron: Plastic Europe NL, zie Figuur 7.

In deze studie focussen we ons op 2030, omdat fabrieken die op dit moment gepland worden dan volop kunnen draaien. Eerder voerde CE Delft in 2021 in opdracht van Plastics Europe NL een studie uit (CE Delft, 2021a) die uitging van bovenstaande cijfers in voorlopige versie. Daar is toen ook gekeken naar de verwachting voor 2030. Daarbij werd er uitgegaan van 1.994 kton consumptie, 937 kton afval, wat resulteerde in 1.121 kton



plasticafval naar prognose in 2030 (184 kton totaal of 15 kton per jaar meer). In 2020 blijkt de hoeveelheid afval nu 1.058 kton te zijn. Als we over 10 jaar nu van dezelfde toename van 15 kton per jaar uitgaan, komen we op een inschatting van circa 1.200 kton plasticafval in Nederland in 2030.

Figuur 7 - De circulaire economie van plastic 2020 in Nederland



Bron: Plastic Europe NL.

Tabel 9 - Plasticbeschikbaarheidsstudies

Titel	Auteurs	Jaar	Boodschap	Referentie
De circulaire economie voor plastics 2020 NL	Plastic Europe NL	2022	2020 cijfers voor Nederland: plasticconsumptie 2.070 kton, afval 1.058 kton, 300 kton recycklaat.	Plastic Europe NL, zie Figuur 7
Circulaire kunststofketen in 2050	Rebel, i.o.v. min. I&W	Dec. 2021	In 2050 geen fossiel plastic meer. Alles uitsorteren voor recycling en aanvullen met biobased.	(Rebel, 2021)
Roadmap Chemische Recycling	Rebel, i.o.v. versnellings-tafel chemische recycling	Aug. 2020	Wens om 10% plasticproductie in Nederland (555 kton) op basis van chemische recycling te doen. Dit vergt 1.000 à 1.500 kton input. Sourcing uit Nederland, België, Duitsland en het Verenigd Koninkrijk; veel import.	(Rebel Group & VNO-NCW MKB, 2020)



Titel	Auteurs		Boodschap	Referentie
Verplicht aandeel recycalaat en/of biobased plastic in de EU	CE Delft i.o.v. min. I&W	Maart 2022	De Circular Plastic Alliance mikt op 18% recycalaat in 2030. Dit is wellicht op te hogen naar 25 à 30% recycalaat, maar meer zal echt van biobased moeten komen.	(CE Delft, 2022d)
Mixed Waste Sorting to meet the EU's targets	Reloop en Zero Waste Europe	Feb. 2023	Pleit voor veel meer recycling en vooral meer nascheiding van restafval voor AVI's: hoogste inschatting voor 2030 is 66% recycling.	(Eunomia, 2023)

Naast deze bestaande studies zal er dit jaar door de VNCI, VA, Plastics Europe NL en de versnellingstafel nog een precies overzicht gepubliceerd worden van alle afvalstromen en waar die geschikt voor zijn (studie loopt nu).

Alle studies hebben als conclusie dat het heel erg moeilijk wordt om het in Nederland geformuleerde doel van al het plasticafval naar recycling en 40% recycalaat in plastic te realiseren in 2030. Reloop in opdracht van Zero Waste Europe denkt aan maximaal 66% recycling wat zou neerkomen op 26% recycalaat. (CE Delft, 2022d) komt ook ongeveer tot dat resultaat. Rebel is voor 2040/2050 optimistischer en gaat dan uit van alle plastics recycelen.

Voor de andere sectoren die mogelijk belang hebben bij plasticafval (gas, brandstof, cementoven, verbranding) zou dit resulteren in minimaal een halvering van de hoeveelheid kunststof in restafval, RDF en andere plasticstromen in 2030 en het verdwijnen van deze stroom in 2040/2050 voor een andere toepassing dan recycling.

Concreet zou er via verschillende routes van de 1.200 kton plasticafval in 2030 ongeveer twee derde naar recycling gaan (800 kton) en 400 kton verdeeld moeten worden over de andere vragers van plasticafval.

Bij deze inschattingen gaan we ervan uit dat het grootste deel van de recycling mechanische recycling zal zijn. Als dit vervangen wordt door lange-keten-chemische-recycling dan treedt er meer verlies op. (De plastic-to-plastic-factor daarvan is ongeveer de helft van die van mechanische recycling.)

Import?

Ook in andere EU-landen zijn er flinke doelstellingen voor recycling van plastic. Wij gaan er in deze analyse daarom van uit dat netto weinig importmateriaal beschikbaar zal zijn om het tekort aan plasticafval aan te vullen.

5.4 Vraag naar plasticafval uit verschillende sectoren

Hierboven hebben we geanalyseerd dat er theoretisch 0 kton en praktisch waarschijnlijk 400 kton plasticafval beschikbaar is voor niet-recyclingtechnieken in 2030. In 2040 à 2050 zal dit afgenomen zijn tot ongeveer nul.

Op dit moment wordt plasticafval verdeeld over de volgende sectoren:

- afvalverbranding van gemengd huishoudelijk afval;
- RDF/uitsortering met name voor toepassing in cementovens;
- mechanische recycling van met name verpakkingen afvalplastic.

In 2030 komt daar een aantal sectoren bij, die ook aanspraak doen op plasticafval, soms gecombineerd met ook biotische afvalstromen:

- vergassing naar sustainable aviation fuel (SAF);
- vergassing naar methaan (deel ook naar transport onder RED), waterstof of methanol (deel ook naar transport onder RED);
- pyrolyse naar nafta naar transportbrandstof (recycled carbon fuel RED);
- chemische recycling van afvalstromen (ook deels vergassing en pyrolyse).

In Tabel 10 is de vraag naar plasticafval samengevat voor 2030. De recyclingsector is de grootste vrager met 800 à 1.200 kton vraag. Daarvan is een deel (circa 375 kton) bedoeld voor chemische recycling dat deels via vergassing zal gaan.

Voor chemische recycling is er echter ook een veel ambitieuzer plan genaamd de ‘Roadmap Chemische Recycling’, dat aangeeft 1.000 à 1.500 kton plasticafval nodig te hebben om 555 kton chemisch recyclaat te produceren (Rebel Group & VNO-NCW MKB, 2020). In dit plan is ook veel import van plasticafval voorzien.

De tweede vraag komt uit de vliegtuigbrandstofsector. De 5%-SAF-doelstelling vergt, als deze helemaal wordt ingevuld met plasticafval (biogeen mag ook), ongeveer 270 kton plastic. Als deze SAF-doelstelling vooral ingevuld wordt met biokerosine en er maar 1% wordt ingevuld met brandstof uit plastic dan gaat het om 54 kton.

Voor methaan uit plastic is geen beleidsdoel. Om gevoel te krijgen voor de hoeveelheden, rekenen we hier met 20% bovenop het beoogde doel voor biogas van 2 Miljard Nm³. Een methaandoel van 0,4 miljard Nm³ uit vergassing vergt ongeveer 480 kton plasticafval. Daarnaast is er nog de SRF-sector die circa 1.000 kton produceert voor onder ander cementovens, waar ook enkelen honderden kton plasticafval in zit.

Tabel 10 - Claims uit verschillende sectoren voor de 1.200 kton plasticafval per jaar in Nederland in 2030

Sector/vrager plasticafval	Doelstelling	Materiaal claim
Plastic recyclaat	40% recycled content 2030 (Transitieagenda)	Circa 1.200 kton als doelstelling, waarschijnlijk 800 kton in praktijk (op dit moment 300 kton).
Chemische recycling (onderdeel recyclaat, maar deels via vergassing)	10% recycled content in Transitieagenda (250 kton output) en 555 kton output Roadmap Chemische Recycling	Transitieagenda circa 375 kton (half korteketenrecycling en half langeketenrecycling). Roadmap 1.000 à 1.500 kton, waarvan deel import.
Sustainable aviation fuel (ook veelal geproduceerd via vergassing)	<ul style="list-style-type: none"> – 2% totaal in 2025⁵ – 5% in 2030 – 10% genoemd door voorlopers (32% in 2040 en 63% in 2050) 	<ul style="list-style-type: none"> – Bij 1% via plasticafval 54 kton – Bij 2% 128 kton – Bij 5% 270 kton plastic en – 10% 540 kton
Methaan binnen de bijmengverplichting voor de gebouwde omgeving	2 miljard Nm ³ per jaar, waarvan 1,6 via biogas en 0,4	480 kton plasticafval (voor 0,4 Nm ³) ⁶

⁵ Totaal is de inschatting van de vraag voor Nederlandse luchthavens in 2025 3,4 miljard kg kerosine (CE Delft, 2022c). Met een stookwaarde van 46,5 MJ/kg is dit 158 miljoen GJ. 1% daarvan is 1,6 miljoen GJ staat bij een efficiency van 70% gelijk aan 2,3 GJ plasticafval.

⁶ 1.200 kton plasticafval met een stookwaarde van circa 42 M/kg vertegenwoordigt ongeveer 50,4 miljoen GJ energie per jaar. 0,4 miljard Nm³ laagcalorisch gas (35 MJ/Nm³ bovenwaarde) komt overeen met 14 miljoen



Sector/vrager plasticafval	Doelstelling	Materiaal claim
	wellicht via vergassing van niet-biogene stromen	
Recycled carbon fuels (RED)	Nederland nu nog geen doelstelling, wordt beslist per lidstaat	Aanzuigende werking wellicht vanuit EU-lidstaten die dit wel gaan meetellen in RED-beleid.
RDF/SRF naar cementovens	Geen doelstelling	Op dit moment circa 1.000 kton/jaar SRF-productie voor cementovens/energiecentrales met kunststof in het mengsel (de provincie Zuid-Holland meldt dat 40% van de markt afgedekt wordt in hun provincie; spreekt over 390 kton (Zuid-Holland, 2022) (cementovens en AVI's samen circa 800 kton).
AVI-verbranding	Elektriciteit produceren en bijdragen aan warmtetransitie	Verbranden op dit moment al het plastic zonder andere toepassing.
Totaalvraag alle claims exclusief methaan via vergassing		Minimaal 1.975 en maximaal 3.370 kton/jaar ⁷ .

Conclusie vraag diverse sectoren

Als we van 1.200 kton plasticafval in Nederland 800 kton reserveren voor recycling dan is er uit diverse sectoren meer vraag dan dat er nog te verdelen is. De vliegtuigbrandstofsector vraagt maximaal 270 kton, de cementovens en aanverwanten enkele honderden kton materiaal en ook AVI's zullen graag warmte blijven leveren in verband met de warmtetransitie. De totale vraag lijkt ongeveer twee maal zo hoog als het aanbod van plasticafval.

RDF en SRF

Refuse Derived Fuel is een heterogeen mengsel van niet-meer-recyclebare materialen en wordt gebruikt voor elektriciteitsopwekking en warmteproductie. De laatste jaren is er een trend om het aandeel kunststoffen te verminderen en meer biogeen aandeel in RDF te krijgen om CO₂-uitstoot bij verbranding te verminderen.

Solid Recovered Fuel is een homogeen mengsel van niet meer te recyclen hoogcalorische afvalstoffen. Het kunststofaandeel in dit materiaal is hoog. SRF wordt wereldwijd in de cementindustrie ingezet als vervanger van fossiele brandstoffen.

5.5 Efficiencyvergelijking technieken op hoofdlijnen

De verschillende technieken om afval te verwerken kunnen we vergelijken op hun CO₂-balans door de hele economie of op de efficiency om fossiele energie-input in de economie te vervangen. Energie-efficiency is hier de hoeveelheid fossiele energie netto minder gebruik gedeeld door stookwaarde plasticafval dat dient als input. Daarbij gebruiken we ketenanalyseperspectief. Als bijvoorbeeld plastic wordt geproduceerd dan houden we er

GJ. Als die met 70% rendement gehaald wordt uit plasticafval dan gaat het dus om 20 miljoen GJ. Daarvoor is dus een input nodig van $20 / 0,7 = 28,6 \times 1.200 = 480$ kton plasticafval.

⁷ Minimaal 800 (mechanische recycling) + 375 (chemische recycling) + 800 (huidige AVI's en cementovens) = 1.975 tot maximaal 1.200 (mechanische recycling) + 1.500 (chemische recycling) + 270 (SAF) + 800 (huidige AVI's en cementovens) = 3.370.



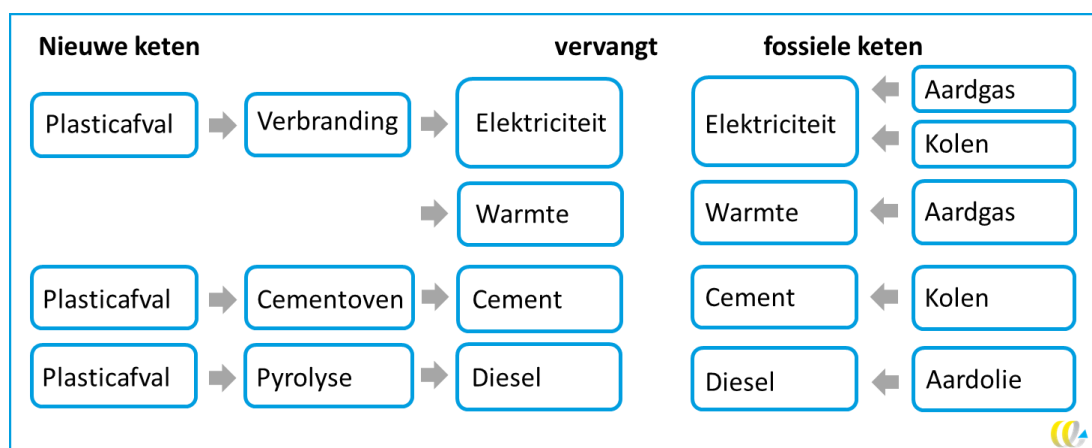
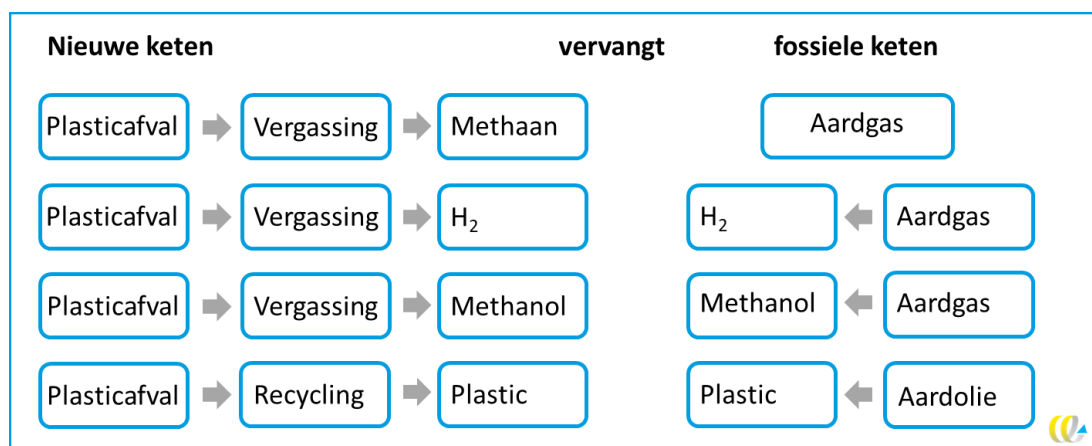
rekening mee dat er 2 kg aardolie nodig is (deels als input in het product en deels als energie voor de conversie) om 1 kg plastic te produceren, en voorkomen we dus bij 1 kg plastic het verbruik van 2 kg aardolie.

Plastic-to-plastic-factor

Pyrolyse wordt vaak als interessante techniek genoemd voor het omzetten van plastic naar brandstof (via nafta) of weer plastic. Nadeel van pyrolyse is echter dat ongeveer de helft van het materiaal verloren gaat. In een onderzoek in samenwerking met vijf grote chemiebedrijven kwam de plastic-tot-plastic-factor van pyrolyse uit op ongeveer 49%. Bij mechanische recycling, oplossen en depolymerisatie ligt deze plasticfactor boven de 95%. Voor het maken van recycleaat via pyrolyse is dus ongeveer twee maal zoveel plasticafval nodig. (CE Delft, 2022b)

In Tabel 8 is gepresenteerd wat de verschillende ketens zijn en wat zij vervangen:

Figuur 8 - Ketens op basis van plasticafval en wat zij vervangen aan fossiele ketens



Vanuit de literatuur is (nog) weinig bekend over de efficiëntie van plasticvergassing naar methaan. Vergassing van biomassa is al een veel gebruikelijkere techniek, waarover veel te



vinden is en vanuit literatuur een efficiëntie heeft van 55 tot 70% (Meijden et al., 2011) (P.Nanou, 2012). Van de techniekaanbieders (zie Hoofdstuk 4) hebben we begrepen dat vanwege de hogere stookwaarde de efficiency van vergassing van plastic naar methaan iets efficiënter kan zijn. Hieruit komt een range van 65% naar maximaal 80%.

Tabel 11 - Doorwerking minder gebruik fossiele energie bij afvalopties 2030 (efficiency-factoren zie Bijlage A)

Afvalstof	Techniek		Berekening of aanvulling
Plasticafval	Recycling mechanisch	100 à 300% (gemiddeld 200%)	Zie Bijlage A
(Energiewaarde 100%)	Recycling chemisch korte keten (depolymerisatie)	Circa 170%	(CE Delft, 2018a)
	HR AVI	118% [#]	71 + (28 / 0,6)
	Cementoven	100%	Hoger CO ₂ -voordeel, want kolen worden vervangen
	HR AVI met CCS	110% [#]	85% + (14 / 0,6)
	Recycling mechanisch dikwandig mixed plastic	Circa 100%	Vervangt mix van beton, hout en plastic (CE Delft, 2011)
	Recycling lange keten chemisch (pyrolyse)	Circa 90%	(BASF, 2020)
	Vergassing naar methaan met CCS	65 à 80%	Zie Paragraaf 0
	Beste drie AVI's NL	71%	53 + (11 / 0,6)
AVI gemiddelde	53%	28 + (15 / 0,6)	
Biomassa	Vergassing naar methaan	55-70%	

Deze HR AVI is een AVI zoals recent is gebouwd in Denemarken. Deze functioneert in een uitgebreid warmtewet, wat in Denemarken de belangrijkste vorm van verwarming is in grote steden. Deze optie wordt voor Nederland relevant zodra ook hier de warmtewetten echt grootschalig worden, zoals in de MRA-regio en de Haaglanden/Rijnmond-regio de bedoeling is.

Bovenstaande analyse is uitgevoerd voor 2023-2030, waarbij we ervan uit kunnen gaan dat de marginale energiemix in Nederland bestaat uit een mix van vooral aardgas en beetje kolen. (Dit gaat over de vraag welke energiebron zal variëren als er meer of minder energie wordt gevraagd of wordt geproduceerd.) Voor de meeste chemische producten en energieproducten geldt nu nog dat aardgas, aardolie en soms kolen de marginale bron zijn.

Vervuiling van afvalstromen

Alle technieken om afval te verwerken hebben inputrestricties. Alleen AVI's zijn echte alleseters. Mechanische recycling heeft over het algemeen meer restricties dan chemische recycling en vergassing, maar sorteertechnieken van afval worden steeds beter, waardoor de hoeveelheid plasticafval waar mechanische recyclers niets mee kunnen, elkaar afneemt. Vergassing is over het algemeen minder kritisch qua input dan pyrolyse (geen zuurstof als input, dus geen PET en biomassa) maar ook bij vergassing is altijd een voorsortering van afval nodig.

Doorkijk lange termijn 2040-2050

Op de lange termijn is het denkbaar dat voor een aantal producten geen fossiele energie meer gebruikt zal gaan worden. Dan is het zelfs een optie dat gasvormige brandstoffen uit elektriciteit gemaakt gaan worden in plaats van omgekeerd, zoals nu het geval is. Of dat elektriciteit en gasvormige brandstoffen als gelijkwaardige bronnen naast elkaar bestaan. Op dit moment is elektriciteit zowel economisch als energetisch meer waard dan het gas methaan. In Tabel 12 is de energie-efficiencyvolgorde bepaald voor het geval dat elektriciteit en gasvormige brandstoffen gelijkwaardig naast elkaar bestaan. De efficiënties van de technieken zijn hierbij constant gehouden, maar de bonus die elektriciteit nu krijgt (1 / 0,6) omdat het nu uit aardgas gemaakt wordt, vervalt dan.

Tabel 12 - Doorwerking minder gebruik fossiele energie bij afvalopties 2040-2050 met elektriciteit en gasvormige brandstoffen energetisch en economisch gelijkwaardig

Afvalstof	Techniek		Berekening of aanvulling
(Energiewaarde 100%)	Recycling mechanisch	200 à 300%	Zie Bijlage A
	Recycling chemisch korte keten (depolymerisatie)	> 170%	(CE Delft, 2018a)
	HR AVI	100%	
	HR AVI met CCS	99%	
	Cementoven	100%	
	Recycling lange keten chemisch (pyrolyse)	Circa 90%	(BASF, 2020)
	Vergassing naar methaan met CCS	65 à 80%	Zie Paragraaf 0
	Beste drie AVI's NL	> 64%	53 + 11
	AVI gemiddeld	> 43%	28 + 15
Biomassa	Vergassing naar methaan	55-70%	

De volgorde in Tabel 12 wijkt maar beperkt af van die van Tabel 11. Recycling in allerlei vormen plus de cementoven blijven als beste scores qua energie-efficiëntie. Wel passeert vergassing de huidige AVI's, maar de HR AVI, wat in 2040-2050 waarschijnlijk ook in Nederland de norm zal zijn voor verbranding (dat is het nu al in Kopenhagen), blijft duidelijk beter scoren.

Conclusie efficiencyvolgorde fossiel vervangen

Als we met een niet-biogene brandbare afvalstroom zoveel mogelijk fossiele energie willen vervangen dan hebben mechanische recycling (100 à 300%; gemiddeld 200%) en korte-keten-chemische-recycling (170%) duidelijk de voorkeur. Het niet hoeven maken van plastic uit aardgas en olie is de meest efficiënte manier om plasticafval in te zetten.

Tweede optie is het toepassen van plastic in een moderne hogerrendement-AVI, zoals recent is gebouwd in Kopenhagen. Met een warmterendement van 71% en elektrisch rendement van 28% scoort deze optie met 118% als tweede. Nieuwbouw of grondige ombouw van bestaande AVI's op die manier is dus ook een te overwegen optie. Of desnoods export van afval naar Scandinavië, waar de meeste AVI's hogere rendementen hebben. Transport van afval per schip heeft emissies die relatief laag zijn, vergeleken met het voordeel van een hoger rendement (CE Delft, 2010).



Derde categorie zijn de cementoven (100% energie-efficiency maar een goede GHG-score, want kolen worden vervangen), mixed plasticrecycling naar dikwandige producten en langere-keten-chemische-recycling (pyrolyse).

Vierde categorie is vergassing naar methaan, wat vergelijkbaar is met de huidige drie beste AVI's in Nederland, die allemaal rond 70% scoren.

Op de lange termijn - als gasvormige brandstoffen wellicht zowel qua economische als energetische waarde gelijk worden aan elektriciteit - verandert de voorkeursvolgorde maar beperkt. Vergassing naar methaan blijft energetisch maar net iets beter dan de huidige beste drie AVI's. Recycling in allerlei vormen blijft beter scoren.

In het volgende hoofdstuk wordt op hoofdlijnen gekeken naar de CO₂-emissiescore.



6 Milieu-impact plasticafvalverwerking

Uit de eerdere analyse blijkt dat er steeds meer vraag komt naar met name plasticafval voor zowel mechanische recycling, chemische recycling, recycled carbon fuels (transport-brandstof) en vliegtuigbrandstof (SAF). Er is niet genoeg plasticafval beschikbaar als alle claims en doelen gerealiseerd zouden moeten worden. Vanuit milieuperspectief ligt het dus voor de hand om het schaarse plasticafval naar die verwerkingsroutes te sturen waar het meeste klimaatvoordeel gerealiseerd wordt.

In deze analyse bekijken we de klimaatimpact van de verwerking van 1 kg plastic via verschillende routes.

6.1 Methode: screening LCA

Het doel van deze analyse is om op hoofdlijnen de klimaatimpact van afvalverwerkingsroutes voor plastic te vergelijken door middel van een *screening* van een levenscyclusanalyse (LCA). We gebruiken hiervoor een functionele eenheid van *de verwerking van 1 kg afgedankt plastic*, wat inhoudt dat we vanuit afvalperspectief naar de routes kijken⁸.

We vergelijken de volgende 10 routes:

1. Verbranding in Nederlandse AVI's.
2. Verbranding in een AVI met een hoog rendement (HR AVI).
3. Verbranding in een AVI met een hoog rendement en CO₂-afvang (CCS).
4. Verbranding in een cementoven, waarbij steenkool vervangen wordt.
5. Mechanische recycling.
6. Pyrolyse (voor Polyethyleen (PE)/Polypropyleen (PP)).
7. Depolymerisatie (voor PET (Polyethyleentereftalaat)).
8. Vergassing naar methanol met CCS.
9. Vergassing naar methaan met CCS.
10. Vergassing naar waterstof met CCS.

De routes leveren verschillende (bij)producten op, zoals energie of materialen. We houden hier rekening mee door ervan uit te gaan dat de producten verkocht worden en zo conventionele productie van dezelfde hoeveelheid/kwaliteit aan energie of materialen vermijden (substitutie). We nemen verder aan dat de processen in Nederland/Europa plaatsvinden met de huidige technologie.

De analyse is bedoeld als verkenning is niet representatief voor alle mogelijke verwerkingsroutes. Er worden verschillende bronnen gebruikt, we bekijken technologieën die verschillende ontwikkelingsniveaus hebben, en er worden aannames gedaan waar harde data ontbreken. Om (een deel van) deze onzekerheden weer te geven, worden de resultaten weergegeven met bandbreedtes. De bandbreedtes zijn bepaald door de modellen door te

⁸ In andere analyses van met name recycling wordt ook wel vanuit het 'productperspectief' gekeken, bijvoorbeeld met een functionele eenheid als *de productie van 1 kg (gerecycled) plastic*. Dit maakt vergelijkingen met virgin-productie van plastics mogelijk, terwijl in het afvalperspectief juist vergelijkingen met afvalverbranding mogelijk zijn.

rekenen, met PE, PP en PET als input (tenzij anders vermeld), en door bijvoorbeeld AVI-rendementen te variëren.

In Tabel 13 worden meer details over de LCA-modellen weergegeven. De modellen zijn opgebouwd in de SimaPro LCA-software met behulp van de Ecoinvent LCA-database en bestaande modellen uit eerdere projecten van CE Delft.

Tabel 13 - Details screening LCA afvalverwerking

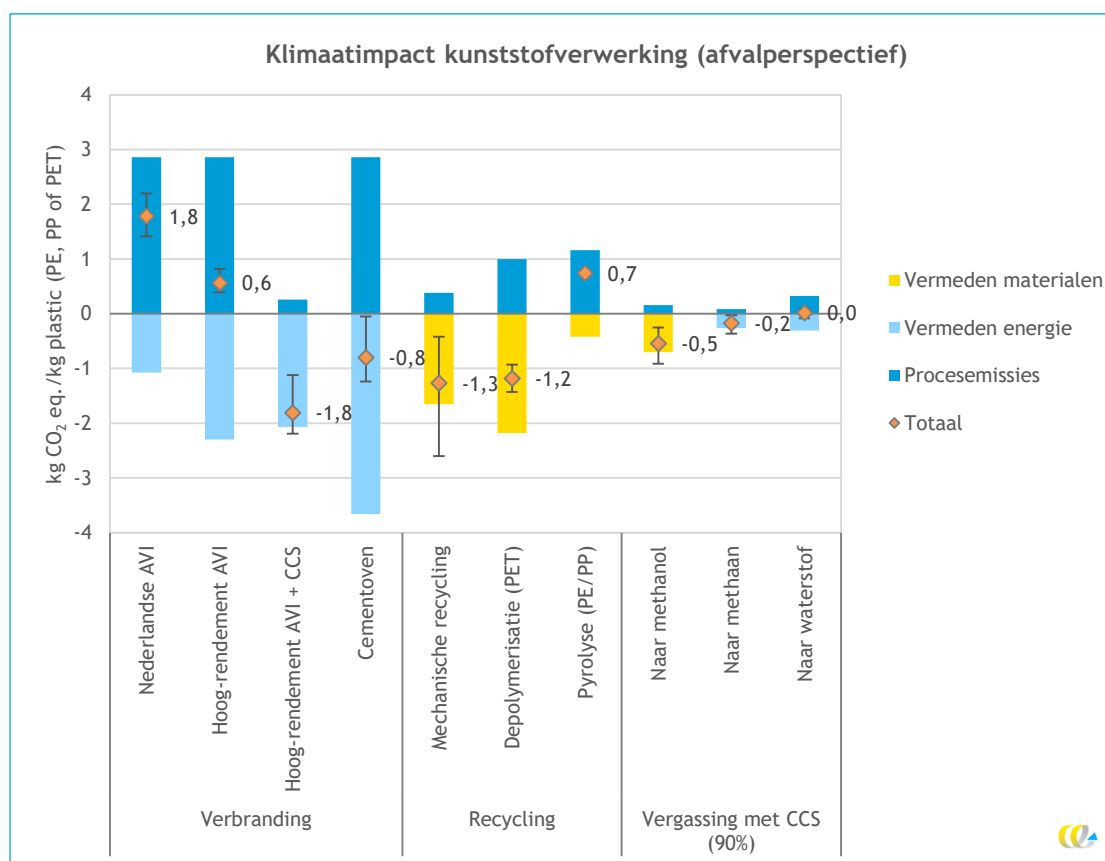
Verwerkingstechniek		Modellering
Verbranding	Nederlandse AVI	<ul style="list-style-type: none"> – Volledige omzetting van koolstof in plastic tot CO₂. – Elektriciteit- en warmterugwinning bepaald op basis van lagere verbrandingswaarde van feedstock en lage, gemiddelde en hoge Nederlandse AVI-rendementen zoals gemeld door Rijkswaterstaat (CE Delft, 2019b).
	HR AVI	<ul style="list-style-type: none"> – Volledige omzetting van koolstof in plastic tot CO₂. – Elektriciteit- en warmterugwinning bepaald op basis van lagere verbrandingswaarde, met 28% elektrisch en 71% warmterendement zoals bij de HR AVI in Kopenhagen (CE Delft, 2019c).
	HR AVI met CCS	<ul style="list-style-type: none"> – Volledige omzetting van koolstof in plastic tot CO₂, waarbij we aannemen dat 93% kan worden afgevangen (V. Bisinella, 2022). – Elektriciteitsverbruik van compressie en injectie van CO₂ geschat op basis van (CE Delft, 2018b). Aanname dat er bij compressie 0,03% van de afgevangen CO₂ alsnog wordt uitgestoten. – Door CO₂-afvang daalt het elektriciteitsrendement tot 14%, terwijl het warmterendement 85% bedraagt (V. Bisinella, 2022).
	Cementoven	<ul style="list-style-type: none"> – Volledige omzetting van koolstof in plastic tot CO₂. – Aanname dat verbranding van steenkool wordt vermeden door de inzet van plastic, met een gelijke lagere verbrandingswaarde.
Recycling	Mechanische recycling	<ul style="list-style-type: none"> – Resultaten uit interne modellen CE Delft, voor bron- en nagescheiden HDPE, PP en PET. Gegevens verzameld in 2015 voor Nederlandse situatie. Als best case is een scenario doorgerekend waarin PET-flessen voor 100% (zonder uitval) worden gerecycled. In de praktijk kan dit beperkt (10 a 20%) afwijken. – Inclusief vermeden fossiele productie PE, PP of PET.
	Pyrolyse (PE/PP)	<ul style="list-style-type: none"> – Resultaten klimaatimpact overgenomen uit LCA-studie van BASF, waarin afvalplastic via pyrolyse wordt omgezet tot nieuw PE (BASF, 2020). – Inclusief vermeden fossiele productie PE.
	Depolymerisatie (PET)	<ul style="list-style-type: none"> – Resultaten klimaatimpact overgenomen uit screening LCA-studie voor 50kt-plant van Ioniqa (CE Delft, 2018a). – Inclusief vermeden fossiele productie PET (op basis van de nieuwste informatie van PlasticsEurope; in de studie voor Ioniqa wordt een groter voordeel toegekend doordat andere bronnen gebruikt zijn).
Vergassing met CCS	Vergassing naar methanol	<ul style="list-style-type: none"> – Aanname dat tussen 60 en 80% van plastic input wordt omgezet tot methanol, methaan of waterstof (op energiebasis).
	Vergassing naar methaan	<ul style="list-style-type: none"> – Geproduceerde methanol, methaan of waterstof vervangt fossiel methanol, fossiel aardgas of fossiele (grijze) waterstof.
	Vergassing voor waterstofproductie	<ul style="list-style-type: none"> – Voor de resterende koolstof (die niet wordt omgezet naar methanol, methaan of waterstof) is aangenomen dat 90% wordt afgevangen, en de rest wordt uitgestoten. – Elektriciteitsverbruik van compressie en injectie van CO₂ geschat op basis van (CE Delft, 2018b). Aanname dat er bij compressie 0,03% van de afgevangen CO₂ alsnog wordt uitgestoten. – Aanname dat er verder geen energie of hulpmiddelen verbruikt worden bij vergassing.

6.2 Resultaten en interpretatie

Figuur 9 geeft de resultaten van de analyse weer, uitgedrukt in kg CO₂-equivalent (eq.) per kg plastic. Per verwerkingstechnologie zijn verschillende cases doorgerekend, bijvoorbeeld met PE, PP of PET als input of verschillende AVI-rendementen. De balken en het totaal in Figuur 9 geven het gemiddelde van deze verschillende cases weer. De onzekerheidsbalk op het totaal laten de hoogste en laagste waarden van de doorgerekende scenario's zien (zie details in Tabel 13). De resultaten zijn ook samengevat in Tabel 14.

Negatieve waarden geven aan dat de directe klimaatimpact van de technologieën (bijvoorbeeld directe CO₂-emissies, gebruik van energie of hulpmaterialen) kleiner is dan het voordeel dat de producten opleveren. Een positieve waarde geeft aan dat er klimaatemissies naar de lucht zijn. Dit is bijvoorbeeld het geval voor het verbranden van plastics in een cementoven, omdat we aannemen dat hiermee dezelfde energiehoeveelheid aan steenkool wordt vervangen. Doordat de productie en verbranding van steenkool per MJ energie meer broeikasgassen uitstoot dan het verbranden van PE, PP of PET, is het resultaat negatief.

Figuur 9 - Indicatie klimaatimpact van verwerking plasticafval via verschillende technieken (afvalperspectief) (balken boven de x-as geven emissies weer, balken onder de x-as geven emissie weer van materialen die voorkomen worden. De stip is de netto emissie totaal en de zwarte streep geeft onzekerheden weer.)



De belangrijkste conclusies uit Figuur 9 zijn:

- Alle onderzochte technologieën voor de verwerking van afvalplastics hebben een lagere klimaatimpact hebben dan verbranding in de (huidige) Nederlandse AVI's. De klimaatimpact van AVI-verbranding kan echter nog aanzienlijk verminderd worden

door meer energie terug te winnen (hoog-rendement AVI). Als er daarnaast ook nog eens 93% van de broeikasgassen kan worden afgevangen en permanent kan worden opgeslagen (HR AVI + CCS) dan wordt verbranding in deze doorrekening één van de beste opties. Een belangrijke factor bij deze resultaten is dat de energierugwinning bij AVI's is doorgerekend met de huidige energiemix; elektriciteit vervangt een grotendeels fossiele mix en warmte vervangt aardgas. In de toekomst zullen deze 'credits' afnemen als de energiemix duurzamer wordt.

- De resultaten voor de onderzochte recyclingtechnologieën lopen uiteen. Mechanische recycling scoort over het algemeen zeer goed. Dit komt doordat het omsmelten van plastic relatief weinig energie kost en het wel de productie van virgin plastics vermijdt. De grote bandbreedte wordt met name veroorzaakt door verschillen in hoeveel plastics uitvallen en naar verbranding of laagwaardige recycling gaan.
- Depolymerisatie van PET is een voorbeeld van chemische recycling met een 'korte keten'; het plastic wordt niet helemaal afgebroken, waardoor het ook met een beperkte hoeveelheid energie weer kan worden opgewerkt tot nieuwe producten.
- Pyrolyse scoort minder goed, met name omdat in deze keten (zowel bij de pyrolysestap zelf als in het verdere proces) ongeveer de helft van de plastic input gebruikt wordt als interne energiebron. Dit zorgt voor CO₂-emissies en verlaagt de opbrengst van nieuw kunststof.
- Voor vergassing zijn vereenvoudigde scenario's doorgerekend, waarin een input van PE, PP of PET voor 60 tot 80% (op energiebasis) wordt omgezet in methanol, methaan of waterstof. Hierbij wordt 90% van de resterende koolstof afgevangen als CO₂ en wordt aangenomen dat deze permanent wordt opgeslagen via CCS. De klimaatimpacts van deze routes liggen tussen de 0 en -0,5 kg CO₂-eq./kg. Dit is lager dan AVI-verbranding zonder CCS, maar hoger dan de betere recyclingroutes.

Tabel 14 - Indicatie klimaatimpact van verwerking plasticafval via verschillende technieken (afvalperspectief)

Technologie		Klimaatimpact kg CO ₂ -eq./kg plastic	Reductie t.o.v. NL AVI kg CO ₂ -eq./kg plastic
Verbranding	Nederlandse AVI	1,4 tot 2,2	
	HR AVI	0,4 tot 0,8	0,6 tot 1,8
	HR AVI met CCS	-2,2 tot -1,1	2,5 tot 4,4
	Cementoven	-1,2 tot -0,1	1,5 tot 3,4
Recycling	Mechanische recycling	-2,6 tot -0,4	1,8 tot 4,8
	Depolymerisatie (PET)	-1,8 tot -1,3	2,3 tot 3,6
	Pyrolyse (PE/PP)	0,7 ^a	0,7 tot 1,5
Vergassing met CCS (90%)	Naar methanol	-0,9 tot -0,3	1,7 tot 3,1
	Naar methaan	-0,4 tot 0,0	1,4 tot 2,6
	Naar waterstof	-0,1 tot 0,1	1,3 tot 2,3

Voor pyrolyse zijn er geen meerdere scenario's doorgerekend, omdat de resultaten zijn overgenomen uit de gedetailleerde studie van BASF (BASF, 2020).

6.3 Andere milieueffecten en bodemas

Een belangrijk argument bij de discussie over afvalverbranding is ook het ontstaan van bodemas dat verwerkt moet worden. Gemiddeld levert 1 kg restafval ongeveer 200 gram bodemas op. Het niet-biogene plasticafval waar het hier over gaat draagt hier echter vrijwel niet aan bij. De meeste plastics zijn koolwaterstoffen die volledig verbranden tot water en CO₂. Afhankelijk van de precieze rookgasreiniging kan er wel een NO_x-emissie naar de lucht ontstaan. Deze speelt echter bij de chemische industrie ook en is met rookgas-reinigingstechnieken zeer sterk te verlagen.



Als het afval pvc bevat dan kan er bij verbranding zoutzuur ontstaan, dat neerslaat in de vliegias dat gestort moet worden. Vergassing is echter geen optie voor pvc, want dit is hier ook niet bruikbaar als input. Pvc (uit verpakkingen, uitgefaseerd, maar nog volop in buizen) moet ook bij voorkeur gerecycled worden.

6.4 Conclusie

Een aantal denkbare ontwikkelingen zijn reeds opgenomen als opties in Figuur 9:

- CO₂-afvang zal waarschijnlijk gemeengoed worden in energie en chemie.
- Ook bij cementproductie zal CO₂-afvang waarschijnlijk worden toegepast, zeker in Europa⁹.
- Het rendement van zowel de afvalroutes maar ook van de fossiele routes worden beter.

Grofweg zullen de totaalresultaten in Figuur 9 waarschijnlijk richting de nul bewegen. De directe emissies van de technieken zullen beperkt worden (vooral door CCS, als dat niet al werd toegepast). Tegelijkertijd nemen de voordelen van vermeden energie en materialen ook af, doordat fossiele ketens zullen verduurzamen en ook CO₂-afvang zullen toepassen.

- Waarschijnlijk zal recycling wel de meest gunstige optie blijven qua klimaatimpact.

⁹ www.bewerken.online/innovaties/heidelberg-materials-wil-unieke-hybride-koolstofafvanginstallatie-bouwen-in-haar-belgische-cementfabriek-in-antoing



7 Kostenanalyses plasticafvalroutes

7.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zullen we de kosten van verschillende opties vergelijken. Daarbij speelt wel mee dat veel initiatiefnemers wel data willen delen over energie-efficiency en CO₂, maar niet over kosten, wegens concurrentiegevoeligheid.

7.2 Kosten van routes

Nascheidings- en sorteringsinstallaties voor AVI's

Op dit moment zijn er elf AVI's in Nederland en geen plannen om dit aantal uit te breiden. Beleidsmatig is er juist de wens om dit aantal af te bouwen. Dit maakt dat het toevoegen van voorscheiding voor een AVI nu in Nederland als meerkosten worden gerekend. Droge nascheiding zoals in Nederland veel gebeurt, kost ongeveer € 40 miljoen voor een capaciteit van 300 kton afval (CE Delft, 2019c). Als deze kosten toegerekend worden naar de kunststoffen en drankenkartons die afgescheiden worden, dan zijn deze kosten van dezelfde orde als die voor bronscheiding door consumenten. In het buitenland, waar nog veel gestort wordt en het aantal AVI's nog wel uitgebreid wordt, maakt een dergelijk voor-sortering een AVI juist goedkoper per kton input. In Nederland speelt dat nu echter niet.

Recycling

De ketenkosten voor het recyclen van plastic verschillen sterk. Een deel van de plastic-recycling is op dit moment al rendabel. Een deel is niet rendabel maar gebeurt toch, omdat via producentenverantwoordelijkheid bedrijven verplicht zijn recycling van plastic mogelijk te maken. Per ton recycleat gaat het hierbij om kosten van rond de € 875 per ton recycleat (CE Delft, 2022d).

In (CE Delft, 2022d) is ook uitgebreid gekeken naar de kosteninschatting voor andere sectoren. De kosten van nu niet-rendabele meerkosten van meer kunststof recycling bedragen door de EU heen gemiddeld € 670 per ton recycleat. Daarbij moet worden aangemerkt dat een deel hiervan rendabel is en een deel duurder.

HR AVI

In CE Delft, 2019c is gekeken naar de kosten van een HR AVI. De Amager Bakke AVI in Kopenhagen kostte ongeveer € 550 miljoen voor 400 kton capaciteit afval per jaar. Dat komt neer op € 1.375.000 per kiloton verwerkingscapaciteit. (Een conventionele AVI kost ongeveer € 1 miljoen per kton verwerkingscapaciteit (CE Delft, 2019c).) Deze installatie is gebouwd in stedelijk gebied, met veel aandacht voor architectuur en inpassing in de omgeving, wat waarschijnlijk deels deze relatief hoge kosten verklaard. In CE Delft, 2019c is berekend dat met de energieprijzen van 2019 de meerkosten van dezes HR AVI ten opzichte van een standaard AVI in 12,5 jaar zouden worden terugverdiend. Met energieprijzen die nu ongeveer twee maal zo hoog zijn, zou deze terugverdientijd kunnen halveren.

Deze HR AVI is een AVI zoals recent is gebouwd in Denemarken. Deze functioneert in een uitgebreid warmtenet, wat in Denemarken de belangrijkste vorm van verwarming is in grote steden. Deze optie wordt voor Nederland relevant zodra ook hier de warmtenetten echt grootschalig worden, bijvoorbeeld in de MRA-regio en de Haaglanden/Rijnmond-regio de bedoeling is.

Vergassing

Furec heeft voor haar grootschalige vergassingsinitiatief van de EU € 108 miljoen subsidie toegezegd gekregen¹⁰. De capaciteit op input wordt ongeveer 700 kton restafval. Dit wordt eerst voorbehandeld. Een deel gaat naar recycling van deelstromen en een deel naar een vergassinginstallatie. In totaal is de investering € 600 miljoen. Er wordt 54 kton waterstof geproduceerd. Gerekend op basis van afvalinput is de investering dus 0,85 miljoen per kton verwerkingscapaciteit (600/700). Dit is vergeleken met een nieuwe AVI (1 mln/kton) eigenlijk niet heel kostbaar. Alleen is er in Nederland geen vraag naar extra verwerkingscapaciteit, vandaar dat uit de markt dit nu niet rendabel is en dat er subsidie nodig is om dit mogelijk te maken. Als we de € 108 miljoen subsidie vergelijken met de 700 kton verwerkingscapaciteit dan gaat het hier om 0,14 miljoen per kton investering onrendabele top.

Gidara meldt een investering van € 250 miljoen voor een vergassingsfabriek die 200 kton afval kan verwerken. Deze kleinere unit is daarmee met 1,25 miljoen investering per kton verwerkingscapaciteit maar beperkt duurder dan de grotere installatie van Furec.

Er wordt 54 kton waterstof geproduceerd per jaar op basis van 400 kton afval. Als de subsidie van € 108 miljoen wordt uitgesmeerd over tien jaar productie van waterstof, dan gaat het hier om € 0,2 subsidie per kg waterstof. Toegerekend naar afval gaat het om een subsidie van € 27 per ton afval. Dit is aan subsidie ongeveer hetzelfde bedrag dat andere bedrijven betalen aan belasting als zij hetzelfde afval verbranden (€ 33,58) om elektriciteit en warmte te maken met een vergelijkbaar energierendement. (De kale prijs van het verbranden van afval varieert, afhankelijk van het contract, rond de € 100/ton.)

7.3 Grove rangorde van kosten/baten

Op basis van de beschikbare kosteninformatie is het niet mogelijk om in dit onderzoek een heel precies kostenoverzicht te maken. Wel is er een rangorde op te stellen:

1. Meest gunstig (met name voor overheden)

Op dit moment heft de rijksoverheid een heffing € 33,58 per ton op afval dat verbrand wordt in een AVI. Dit tarief is niet afhankelijk van het energierendement. De beste drie AVI's of een nieuwe zoals recent gebouwd in Kopenhagen, zijn daarmee voor de overheid het meest gunstig. Ze zijn namelijk commercieel te bouwen, met daarbij een belastingopbrengst. Daarnaast hebben veel gemeenten aandelen in het bezit van afvalverbrandingsinstallaties.

2. Neutraal

Op dit moment is de RDF/SRF-markt, waarbij deels plasticafval naar cementovens gaat, een commerciële markt zonder subsidie of extra heffingen (alleen ETS). Wel is deze optie Europees gezien gunstig vanuit klimaatbeleid. Indirect scheelt dit uitgaven voor overheden.

¹⁰ www.climate.ec.europa.eu/system/files/2022-12/if_pf_2022_furec_en.pdf



3. Aanmerkelijke kosten

Zowel meer recycling van plastic als ook het toepassen van plastic voor vliegtuigbrandstof, automobiel brandstof, methaan of waterstof kunnen op dit moment commercieel niet uit. Via subsidie, heffingen of verplichtingen worden deze kosten direct of indirect neergelegd bij de belastingbetaler of consument.



8 Extra methaanproductie in vergister met waterstof

Als het gaat om de bijmengplicht van groen gas in het aardgasnet, komt naast de vraag over vergassing van niet-biogene afval (zie vorige hoofdstukken) ook af en toe de vraag naar voren of er stimulansen moeten komen voor het toepassen van waterstof dat gemaakt is uit duurzame elektriciteit in een vergister om extra methaan te produceren. Dit hoofdstuk gaat allereerst op deze vraag in, in Paragraaf 8.1, op basis van een concreet voorbeeld.

In Paragraaf 8.2 behandelen we de vraag hoe het toevoegen van waterstof in een vergasser bij syngas behandeld zou moeten worden.

8.1 Concrete cases H₂ in vergister van waterschap

Typisch wordt in een vergister naast methaan ook CO₂ geproduceerd. Indien waterstof groen geproduceerd is, kan bij een vergister de geproduceerde CO₂ hiermee omgezet worden naar groen gas. Of dit een gewenste toepassing is, is afhankelijk van de vraag naar groene waterstof dan wel groen gas, evenals de beschikbare lokale energie-infrastructuur.

In Denemarken zijn de ogen bijvoorbeeld meer gericht op groen gas dan op groene waterstof, wat bijvoorbeeld tot uitdrukking komt in een doelstelling van 70% groen gas in 2030. Dit in combinatie met een grote hoeveelheid hernieuwbaar opgewekte elektriciteit en daarmee relatief veel overschotten, zorgt ervoor dat productie van groen gas op basis van groene waterstof een aantrekkelijke optie is in dit land (Food & Bio Cluster Denmark, 2020).

In Nederland wordt juist flink ingezet op waterstof om de (chemische) industrie te vergroenen, en is dit dus naast groen gas ook een realistisch eindproduct. Wel zijn er bepaalde niches waar de productie van groen gas met behulp van groene waterstof mogelijk interessant is. Hiertoe behoren de waterschappen, en mogelijk niches binnen de industrie. In dit hoofdstuk beperken we ons tot het uitwerken van de niche van de waterschappen en zullen we ingaan op de hoeveelheden waar het mogelijk over gaat.

De case kan als volgt worden uitgelegd. Een waterschap maakt zelf groene elektriciteit met bijvoorbeeld zon-pv, en zet deze in een (kleine) elektrolyser om in waterstof en zuurstof. Dit doen zij omdat de zuurstof die hierbij ontstaat gebruikt wordt in hun eigen zuiveringsproces. Het waterstof is dan een restproduct. Dat kan zo decentraal en klein zijn dat het niet rendabel is om dat op de markt te verwaarden. Als ze de waterstof toevoegen aan het gasmengsel dat uit de vergister komt, reageert het met de biogene CO₂ uit de vergister (die anders de lucht in gaat), en dit zorgt voor maximalisatie van de methaanproductie.

8.1.1 Maximale efficiëntie methaanproductie

Men kan een inschatting maken van de efficiëntie van de extra methaanproductie door toevoeging van waterstof (geproduceerd middels elektrolyse) bij een vergister. Hierbij zijn de energie-inhoud van de geproduceerde methaan en de verschillende inputs aan energie relevant. We kunnen hierbij uitgaan van theoretische kennis gecombineerd met cijfers uit de praktijk. Er zijn namelijk al initiatieven op het gebied van extra methaanproductie door toevoeging van waterstof bij vergisters.



Biogasclean is een Deens bedrijf dat in meer dan 40 landen actief is op het gebied van leveren van biologische ontzwavelingssystemen en vergisters. Om de in de vergister ontstane CO₂ bruikbaar te maken, experimenteert Biogasclean met het toevoegen van waterstof aan deze stroom om de CO₂ om te zetten naar methaan en op die manier de methaanproductie te maximaliseren (Biogasclean, 2022). Ze hebben een demoplant onder constructie, waarbij waterstof geproduceerd via elektrolyse wordt ingevoerd om te reageren met het biogene CO₂.

Vanuit de vergister komt volgens Biogasclean, een gas dat voor het grootste deel bestaat uit methaan (60%), gevolgd door CO₂ (40%) en een zeer klein deel H₂S. De CO₂ kan bijna volledig omgezet worden naar methaan. Om een schatting te maken van de maximale efficiëntie gaan we uit van 95% methaan in de uiteindelijke gasmix. Daarnaast gaan we uit van een PEM-elektrolyser met een efficiëntie van 80%. Hiermee komen we op een maximale efficiëntie van 65%. De onderbouwing hiervan middels een berekening staat toegelicht in Bijlage C. Ervan uitgaande dat de elektrolyser van Biogasclean op volle toeren draait, en er verder geen externe energiebron wordt gebruikt, is de efficiëntie van dit proces ongeveer 60% (op basis van een productie van 381 Nm³/uur).

Op dit moment is een efficiëntie van 60-65% landelijke gezien ongunstig, omdat elders juist elektriciteit gemaakt wordt met een vergelijkbaar rendement uit methaan (aardgas). (Bij een rendement in de toekomst van 80% speelt dit minder.) De elektriciteit voor iets anders inzetten is daarmee altijd gunstiger qua energie-efficiency en CO₂-voordeelscore. Als dat lokaal niet kan, is gebruik voor methaanproductie eventueel een terugvaloptie.

Als de elektriciteit ook afgezet kan worden voor andere toepassingen, is het inzetten voor waterstof en methaanproductie voor de nationale duurzame-energieboekhouding niet gunstig. De RED Delegated Act vereist in een dergelijk geval dat indien dit biogas gerapporteerd wordt als groene stroom, dat de duurzame elektriciteit waar deze uit gemaakt wordt niet meer wordt gemeld als duurzame energie. Er mag hierdoor voor deze groene stroom 35-40% minder gerapporteerd worden als deze zou tellen als groen gas.

8.1.2 Potentie extra methaanproductie vergisters bij waterschappen

Voor de waterschappen hebben we, op basis van bestaande studies, de case wat nader uitgewerkt om een inschatting te kunnen maken van over welke hoeveelheden we het hebben. Daarbij kunnen we zowel starten met een hoeveelheid zuurstof (en waterstof) die lokaal gebruikt kan worden voor beluchting (Case A) of met de hoeveelheid groene stroom die niet het elektriciteitsnet op kan worden gestuurd (Case B).

Case A: als startpunt zuurstof- en waterstofproductie voor beluchting

In het zuiveringsproces van rioolwater maken de waterschappen gebruik van beluchting. Bacteriën zorgen ervoor dat afvalstoffen worden afgebroken en hiervoor hebben zij zuurstof nodig. Hoewel de beluchting over het algemeen met lucht gebeurt, is de zuurstof het relevante molecuul dat in het rioolwater gebracht moet worden. Uit onderzoek van het STOWA blijkt dat beluchting met pure zuurstof inderdaad mogelijk is en ook voordelen kan hebben (STOWA, 2022).

Uit het onderzoek van STOWA volgen de onderstaande bevindingen:

- Een gemiddelde rioolwaterzuivering bedient zo'n 60.000 inwoners (CBS, 2021). Een relatief grote rioolwaterzuivering, met een grootte van 100.000 i.e. (inwoners equivalenten) heeft een gemiddelde zuurstofbehoefte van 568 kg/uur van het rioolslib.

- De zuurstof wordt met een bepaald inbrengrendement naar het rioolslib geleid. Uitgaande van een inbrengrendement van 28%, dient er een elektrolyser gebruikt te worden die 2027 kg/uur produceert. Bij gebruik van de volle capaciteit van de elektrolyser en een efficiëntie van 80%, is er een capaciteit van 10,5 MW nodig.
- Bij productie van 2027 kg/uur zuurstof wordt 253 kg/uur waterstof geproduceerd, aangezien bij het splitsen van water zuurstof en waterstof in een vaste molverhouding van 2:1 ontstaan.
- De waterstof kan gebruikt worden voor extra groengasproductie. De elektrolyser zal overgedimensioneerd zijn hiervoor: de beschouwde rioolwaterzuivering produceert zo'n 1,6 miljoen Nm³ biogas per jaar en zal zo'n 2,6 miljoen Nm³ waterstof nodig hebben om de geproduceerde CO₂ om te zetten in methaan. Dit komt overeen met een gemiddelde van 21 kg/uur .

Potentieel kan er een significante hoeveelheid extra methaan geproduceerd worden door toevoeging van waterstof bij waterschappen. Echter, hoe gunstig deze optie is in termen van kosten en energiegebruik zou nader onderzocht moeten worden. Daarnaast is het zeer de vraag hoe haalbaar het is om lokaal voldoende groene stroom te hebben om de vraag naar groene waterstof te dekken. Dit bekijken we in Case B.

Case B: als startpunt een hoeveelheid groene stroom die niet het net op kan

Een ander startpunt voor een redenering is om te kijken hoeveel waterstof ook daadwerkelijk groen geproduceerd kan worden. Het is lastig om in zijn algemeenheid hier iets over te zeggen, omdat de mogelijkheden tot lokale hernieuwbare energieproductie zullen verschillen met de beschouwde rioolwaterzuiveringsinstallatie. Wel kunnen we ingaan op de verschillende mogelijkheden, waarbij we ons beperken tot gebruik van een lokaal zonnepark, eventueel in combinatie met stroom van het net. Er zijn verscheidene waterschappen met plannen voor de plaatsing van zonnepanelen, variërend van zo'n 1.000 tot 20.000 panelen per waterschap, waarbij ook het aantal rioolwaterzuiveringsinstallaties varieert (Waterschap Vallei en Veluwe) (Waterschap Aa en Maas) (Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden, 2023).

Waterstof volledig met groene stroom produceren is niet kostenefficiënt. Een zonnepark heeft een capaciteitsfactor van zo'n 10%, wat inhoudt dat het een groot deel van het jaar niet op zijn volledige capaciteit elektriciteit produceert. Een zonnepark overdimensioneren zou kunnen, maar om de elektrolyser volledig hierop te laten draaien, zou het park behoorlijk overgedimensioneerd moeten worden, doordat de beschikbaarheid van zonne-energie behoorlijk fluctueert. Het is zeer de vraag of dit haalbaar is voor een rioolwaterzuiveringsinstallatie in termen van kosten, evenals ruimtegebruik, naast het feit dat het niet efficiënt is.

Een andere optie is om het zonnepark ongeveer een gelijke capaciteit te laten hebben als de elektrolyser. In dat geval kan dus zo'n 10% van de gebruikte elektriciteit als groen gekenmerkt worden.

Een laatste optie is om de geproduceerde elektriciteit in principe aan het net af te geven, en enkel het deel dat boven de aansluitcapaciteit valt naar de elektrolyser te sturen. Binnen de SDE++-subsidie geldt een beperking op de aansluitcapaciteit, namelijk 50% van de opwekcapaciteit. De momenten dat deze capaciteit overschreden wordt, zouden gebruikt kunnen worden voor de elektrolyser. Echter, dit gaat maar om zo'n 8% van de in totaal geproduceerde elektriciteit van het zonnepark. Als men uitgaat van een zonnepark met

20.00 zonnepanelen en een vermogen van 370 Wp, gaat dit om 500 MWh elektriciteit per jaar. Daarmee kan met een elektrolyser efficiëntie van 80% ongeveer 1,5 kilo groene waterstof, ofwel 5 Nm³ groen gas, per uur geproduceerd worden¹¹ (STOWA, 2021).

Conclusie

De totale potentie van extra methaanproductie door toevoeging van waterstof bij een vergister is lastig in te schatten, omdat deze afhankelijk is van lokale omstandigheden. Wel kunnen we het idee iets meer tot de verbeelding laten spreken door een arbitrair percentage, zeg 25%, te nemen, van alle rioolwaterzuiveringsinstallaties in Nederland. Bij het uitgangspunt van Case A en een gemiddelde grootte van een rioolwaterzuiveringsinstallatie, gaat het om 33 miljoen Nm³ methaan per jaar¹². Dit is een significante hoeveelheid, echter de vraag blijft in dit geval welk deel groen geproduceerd zal zijn. Bij het uitgangspunt van Case B, waarbij 25% van de rioolwaterzuiveringsinstallaties elk 2.000 zonnepanelen heeft en deze capaciteit volledig gebruikt, komt men uit op een totaal van 0,4 miljoen Nm³ groengasproductie per jaar¹³. Vergeleken met de ambitie van 2 miljard Nm³ groen gas is dit een kleine hoeveelheid, laat staan als de zonneparken niet volledig gebruikt worden voor de productie van groene waterstof (STOWA, 2021).

Wat bij bovenstaande dient opgemerkt te worden is dat naast het gebruik van groene stroom van een zonnepark, in de toekomst mogelijk ook een deel van gebruikte grijze stroom gekenmerkt kan worden als groen bij de productie van waterstof. De regelgeving hieromtrent wordt op dit moment nog uitgewerkt (EC, 2023).

Deze optie is nog sterk in ontwikkeling. Een definitief beeld voor na 2030 is daarom nog niet met zekerheid te geven.

8.2 Waterstof bijvoegen bij vergassinginitiatieven

Ook bij vergassingsinitiatieven is het een optie dat men in het proces groene waterstof gemaakt uit groene stroom gaat toevoegen om de verhouding H₂ en CO in het syngas te corrigeren. Initiatieven melden dat op korte termijn waarschijnlijk niet willen gaan doen, vooral wegens de kosten.

Ook hier speelt een energieverlies bij de omzetting van elektriciteit naar waterstof (80%) en een verlies van waterstof naar methaan (circa 90%). Netto dus circa 72%. Ook hier speelt dat dit rendementsverlies ongunstig is voor de nationale duurzame energieboekhouding als in plaats van de stroom het gas als duurzaam zou worden aangemerkt.

8.2.1 Verdere toelichting waterstof bij vergassing

Net als bij vergisting, kan ook bij (plastic)vergassing naderhand waterstof worden toegevoegd om methaanproductie te maximaliseren. Typisch zal bij vergassing de (mol)verhouding van waterstof op koolstof namelijk te laag zijn om methaanproductie te maximaliseren. Dit heeft enerzijds te maken met de evenwichtstoestand, anderzijds met

¹¹ Berekening: $(500 * 1.000) \text{ [kWh]} * 0,8 \text{ [-]} * 3,6 \text{ [MJ/kWh]} / 120 \text{ [MJ/kg waterstof]} / 8.760 \text{ [uur/jaar]} * (65/240) \text{ [m}^3 \text{ methaan/m}^3 \text{ waterstof]} / 0,071 \text{ [g waterstof/L]}$.

¹² Berekening: $(65 / 240) \text{ [m}^3 \text{ methaan/m}^3 \text{ waterstof]} * (21 / 0.071) \text{ [m}^3 \text{ waterstof]} * 8.760 \text{ [uur/jaar]} * 315 * 0,25 \text{ [aantal RWZI's]} * (60 / 100) \text{ [schaalfactor grootte RWZI]}$.

¹³ Berekening: $(500 / 10 * 1.000) \text{ [kWh]} * 3,6 \text{ [MJ/kWh]} * 0,8 \text{ [-]} / 120 \text{ [MJ/kg waterstof]} / 0,071 \text{ [g waterstof/L]} * (65 / 240) \text{ [m}^3 \text{ methaan/m}^3 \text{ waterstof]} * 315 * 0,25 \text{ [aantal RWZI's]}$.



het feit dat in plastics typisch veel dubbele bindingen voorkomen. Deze dubbele bindingen zorgen ervoor dat in de plasticmoleculen de molverhouding van waterstof op koolstof ongeveer 2-op-1 is. De molverhouding van waterstof op koolstof in methaan is 4-op-1. Het toevoegen van waterstof aan het ontstane syngas bij vergassing kan er simpelweg voor zorgen dat er meer waterstofatomen beschikbaar komen om methaan te vormen.

De efficiëntie van dit proces is onderdeel van de berekening zoals toegelicht in Bijlage B. Onder de aannames aangenomen in deze berekening, komen we op een maximale efficiëntie van 89% voor de extra methaanproductie bij vergassing middels gebruik van groene waterstof. De hogere efficiëntie bij vergassing vergeleken met vergisting heeft er voornamelijk mee te maken dat de voornaamste reactie bij dit proces een gunstigere verhouding van waterstof ten opzichte van methaan kent (3 mol waterstof reageren tot 1 mol methaan, terwijl hier na vergisting 4 molen waterstof voor nodig zijn).



9 Conclusies en aanbevelingen

De studie gaat over twee onderwerpen die we hier ook apart behandelen. Allereerst is er de vraag of vergassing van niet-biogene afvalstromen (= plasticafval) een goede optie is in vergelijking met de alternatieven. Daar gaat Paragraaf 9.1 over. Paragraaf 0 handelt over het gebruiken van groene waterstof om de opbrengst van biogasinstallaties te verhogen.

9.1 Vergassing van niet-biogene afvalstromen naar andere technieken

Als we de verschillende verwerkingstechnieken en hun score op energetische rendement door de hele economie, CO₂-emissiescore en kosten beoordelen, dan krijgen we Tabel 15 als resultaat.

Recycling heeft een zeer goed energetische en CO₂-score, maar heeft als nadeel dat er meerkosten zijn. Deze worden voor een groot deel via producentenverantwoordelijkheid neergelegd bij de producent en de consument van producten. Een Hoog Rendement-AVI zoals recent geplaatst in Kopenhagen, scoort net iets minder op energetisch rendement, maar kan met CCS vergelijkbaar scoren op klimaat. De kosten van deze optie zijn lager.

De cementoven zonder CO₂-afvang scoort door het vervangen van kolen hierna vrij goed. Deze route heeft geen subsidie nodig. (Als de cementsector overgaat/moet schakelen op gasvormige brandstoffen dan wordt de CO₂-score van deze route vergelijkbaar met vergassing).

Vergassing naar methaan heeft energierendement dat meer beperkt beter is dan de drie beste Nederlandse AVI's en heeft in plaats van een belastingopbrengst (€ 33 per ton afval) subsidie nodig (circa € 27 per ton afval). Wel is door de geïntegreerde CO₂-afvang de CO₂-score duidelijk beter. Vergassing naar methanol heeft een iets gunstigere score qua klimaateffect dan vergassing naar methaan.

Tabel 15 - Overall beoordeling verwerkingstechnieken van niet-biotisch afval(plastic) 2030

Techniek	Energetisch rendement	CO ₂ -emissiescore (lager is beter)	Kostenindicatie (+=voordelig, 0 is neutraal -- = aanzienlijke kosten)
Recycling mechanisch	200% gem. (100 à 300%)	-1,3 tot -2,6	0/-
Recycling chemisch korte keten (depolymerisatie)	Circa 170%	-1,5	0/-
HR AVI	118%	0,6	+
HR AVI met CCS	110%	-1,8	+ / 0
Cementoven	100%	-0,8	0
Recycling lange keten chemisch (pyrolyse)	Circa 90%	0,7	-
Vergassing naar methaan met CCS	65 à 80%	-0,2	-
Beste drie AVI's NL	71%	1,4	+
AVI gemiddeld	53%	1,8	+

Als de vraag is of vergassing naar methaan van niet-biogeen (= plastic) afval een nuttige toevoeging is aan de huidige opties dan lijkt het antwoord ontkennend. Recycling scoort op het verminderen van de afhankelijkheid van fossiele energie beter en heeft ook een betere CO₂-emissiereductie. Een deel van recycling heeft alleen wel meerkosten, net als vergassing. Een deel is rendabel. Als er vooral naar kosten gekeken wordt dan is een hoogrendement-AVI een interessante optie. Zeker met CCS is de klimaatscore goed, de energie-efficiency goed (recycling wel beter) en kosten beperkt.

Vergassing als chemische recycling techniek

Vergassing kan ook ingezet worden als lange-keten-chemische-recyclingroute van plastic naar plastic. Daar is in deze studie nu niet uitgebreid naar gekeken. In de Transitieagenda Kunststoffen 2030 en ook de Roadmap Chemische Recycling 2025 is meer aandacht voor pyrolyse als aanvullende lange-keten-chemische-recyclingroute dan voor vergassing. Sowieso heeft in het circulaire domein mechanische recycling en korte-keten-chemische-recycling de voorkeur.

Doorkijk naar 2040/2050 vergassing plastic naar methaan

Voor energie-efficiency hebben we een gekeken of de rangorde veranderd als er veel meer CCS zal worden toegepast, gassen en elektriciteit naast elkaar gebruikt zullen gaan worden en het duurzame energie aandeel veel groter zal zijn (zie Paragraaf 5.5). Recycling blijft dan het beste scoren, de HR AVI met CCS is nummer en twee en als derde optie komt vergassing naast lange-keten-chemische-recycling naar voren.

Voor de CO₂-reductiefactoren zullen alle getallen waarschijnlijk dichterbij de komen te liggen. Vermijden van fossiele ketens gaat minder opleveren, want die zullen efficiënter zijn en CCS toepassen. Ook het vermijden van emissies uit verbranding zal minder opleveren vanwege het toepassen van CCS. Recycling zal zich ook verder ontwikkelen en zal waarschijnlijk het gunstigst blijven.

9.2 Waterstof als middel om groengasproductie te verhogen

Het is mogelijk om met waterstof geproduceerd uit duurzame elektriciteit zowel bij vergisting als bij vergassing extra methaan te produceren. In Denemarken wordt hier veel van verwacht. De situatie in Nederland, waar er ook veel vraag naar waterstof uit de industrie wordt verwacht, is echter niet vergelijkbaar met die van Denemarken. Bij de waterschappen is het denkbaar dat gecombineerd met beluchten met zuurstof in plaats van met lucht, de waterstof die bij die productie vrijkomt ingezet wordt voor extra methaanproductie. In een optimistisch scenario zou dit kunnen gaan om 33 miljoen Nm³ methaan per jaar. De vraag is wel of er voldoende groene stroom beschikbaar is ter plekke. Als we veel voorzigtiger rekenen op basis van elektriciteit die niet afgezet kan worden aan het net uit zonneparken bij waterschappen, dan komen we op een groengasproductie van 0.3 miljoen Nm³ groen gas per jaar. Vergeleken met de ambitie van 2 miljard Nm³ groen gas is dit een kleine hoeveelheid.

Op grote schaal waterstof bijmengen om meer methaan te gaan produceren ligt in Nederland minder voor de hand. Nadeel hiervan ook is dat hierbij 28 à 40% van de energie verloren gaat in de conversie. Dit maakt ook dat in de nationale duurzame-energieboekhouding de hoeveelheid duurzame energie die gerapporteerd mag worden met



28 à 40% afneemt als deze energie gerapporteerd wordt als duurzaam gas (de rapportage rond de duurzaamheid van elektriciteit moet dan ingetrokken worden).



Referenties

- Argonne, 2019. *Updates of Hydrogen Production from SMR Process in GREET® 2019*, Lemont (US): Argonne.
- BASF, 2020. *ChemCycling: Environmental Evaluation by Life Cycle Assessment (LCA)*, Ludwigshafen: BASF.
- Biogasclean, 2022. *Biological desulfurization and methanation of biogas and CO₂*.
- BTG, 2021. *BTG openbaar eindrapport vergassing 11 maart 2021*, Rijksdienst voor Ondernemend Nederland, <https://www.topsectorenergie.nl/sites/default/files/uploads/TKI%20Gas/BTG-openbaar-eindrapport-vergassing-11-maart-2021.pdf>.
- CBS, 2021. *Inwoners per rioolwaterzuiveringsinstallatie, 1-1-2021*, <https://www.cbs.nl/nl-nl/maatwerk/2021/06/inwoners-per-rioolwaterzuiveringsinstallatie-1-1-2021#:~:text=De%20waterschappen%20zijn%20in%20Nederland,is%20er%20C3%A9%3%A9n%20private%20rioolwaterzuiveringsinstallatie>.
- CE Delft, 2011. *LCA: recycling van kunststof verpakkingsafval uit huishoudens*, Delft: CE Delft.
- CE Delft, 2018a. *Samenvatting LCA Ioniqa - Screening carbon footprintanalyse*, Delft: CE Delft.
- CE Delft, 2018b. *Screening LCA for CCU routes connected to CO₂ Smart Grid*, Delft: CE Delft.
- CE Delft, 2019a. *CO₂-balansen groengasketens: Vergisting en vergassing*, Delft: CE Delft.
- CE Delft, 2019b. *Methodiek duurzaam aanbesteden afval. Opgesplitst in basismethodiek en een gedetailleerde methodiek Versie 1.1*, Delft: CE Delft.
- CE Delft, 2019c. *Verwerkingsscenario's Vlaams huishoudelijk afval en gelijkaardig bedrijfsafval 2020-2030*, Delft: CE Delft.
- CE Delft, 2021a. *CO₂-reductie met circulaire kunststoffen in Nederland - Scenario-analyse voor 2030 en diverse praktijkcases*, Delft: CE Delft.
- CE Delft, 2021b. *Methodiek duurzaam aanbesteden afval, update 2021*, Delft.
- CE Delft, 2022a. *Bijmengverplichting groen gas. Ontwerpties en effectenanalyse*, Delft: CE Delft.
- CE Delft, 2022b. *Monitoring chemical recycling. How to include chemical recycling in plastic recycling monitoring?*
- CE Delft, 2022c. *Updated impacts of a CO₂ ceiling for Dutch aviation*, Delft.
- CE Delft, 2022d. *Verplicht aandeel recycelaat of biobased in plastic in de Europese Unie*, Delft: CE Delft.
- CTCN, U., *Gasification of waste*, <https://www.ctc-n.org/technologies/gasification-waste>.
- Delft, C., 2010. *Beter één AVI met een hoog rendement dan één dichtbij, Hoeveel transport van afval is nuttig voor een hoger energierendement?*
- EC, 2023. *COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) .../... of 10.2.2023 supplementing Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council by establishing a Union methodology setting out detailed rules for the production of renewable liquid and gaseous transport fuels of non-biological origin*, Brussels: European Commission (EC).
- ECN, 2015. *Chemische recycling*, Petten: ECN.
- Eunomia, 2023. *Mixed Waste Sorting to meet the EU's Circular Economy Objectives: Reloop and Zero Waste Europe*.
- Food & Bio Cluster Denmark, 2020. *Biogas production*.
- Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden, 2023. *Waterschap realiseert zonnepark bij zuivering Leidsche Rijn*, <https://www.hdsr.nl/buurt/utrecht/waterschap-realiseert-zonnepark/>.



- J., G., Y., W., Y., P., D., H., G., X., F., G. & GF., S., 2012. A thermodynamic analysis of methanation reactions of carbon oxides for the production of synthetic natural gas.
- J.M. Bermudez, B. F., 2016. Production of bio-syngas and bio-hydrogen via gasification. *Handbook of Biofuels Production*.
- Meijden, C. M., Rabou, L. P. L. M., Drift, A., Vreugdenhil, B. J. & Smit, R., 2011. *Large scale production of biomethane from wood, conference paper presented at the International Gas Union Research Conference IGRC, Seoul (South Korea), 19-21 October 2011*, Petten: ECN.
- Ministerie van I&W & Ministerie van EZK, 2018. *Transitieagenda circulaire economie: Kunststoffen*, Den Haag: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, Ministerie van Economische Zaken en Klimaat.
- P.Nanou, 2012. *BIOMASS GASIFICATION FOR THE PRODUCTION OF METHANE*: University of Twente.
- Rebel, 2021. *Circulaire kunststofketen in 2050*.
- Rebel Group & VNO-NCW MKB, 2020. *Roadmap Chemische Recycling Kunststof 2030 Nederland*: Nederland Circulair; , VNO-NCW MKB.
- Saebea, D., Ruengrit, P., Arpornwichanop, A. & Patcharavorachot, Y., 2019. Gasification of plastic waste for synthesis gas production.
- STOWA, 2021. *Toepassing van biologische methanisering op rioolwaterzuiveringen*.
- STOWA, 2022. *Benutting zuivere zuurstof uit duurzame waterstofproductie in RWZI's met fijne-bellenbeluchtingsystemen*.
- University of Leeds, 2016. *Catalytic supercritical water gasification of plastics with supported RuO₂: A potential solution to hydrocarbons-water pollution problem*.
- V. Bisinella, J. N., C. Riber, T. Hulgaard, T.H. Christensen,, 2022. Environmental assessment of amending the Amager Bakke incineration plant in Copenhagen with carbon capture and storage. *Waste Management & Research*, 40, 79-95.
- VALORIZA. 2022. *Waste Gasification Technologies: A Brief Overview*.
- Waterschap Aa en Maas, *Zonneweides op alle rioolwaterzuiveringen*, https://www.aaenmaas.nl/in-jouw-buurt/projectenkaart/zonneweides-alle-rioolwaterzuiveringen/#PagCls_40365.
- Waterschap Vallei en Veluwe, *Waterschap plaatst ruim 20.000 zonnepanelen*, <https://www.vallei-veluwe.nl/toptaken/bij-mij-in-de-buurt/in-uitvoering/zonnepanelen/>.
- Zuid-Holland, 2022. *Circulaire Actieagenda Zuid-Holland*.



A Omzettingsrendementen

Omdat het in deze studie veel gaat om het energetisch omzetten van het ene materiaal naar het andere, volgt hier een lijst met omzettingsrendementen. (NB: dit zijn gemiddelden en individuele afwijkingen zijn mogelijk.)

Tabel 16 - Voor energie-efficiency gebruikte omzettingsrendementen

Omzetting	Techniek	Energierendement	Bron
Methaan naar waterstof	Stoomreforming	Circa 75% (70 tot 80%)	Wikipedia https://nl.wikipedia.org/wiki/Waterstofproductie
Biomassa naar methaan	Vergassing	55-70%	Div. bronnen zie Par. 0
RDF/SRF naar methaan	Vergassing	65-80%	Div. bronnen zie Par. 0
Elektriciteit en warmte uit verbrandingsafval AVI gemiddeld NL	Verbranden huishoudelijk afval, NL gemiddelde beste drie AVI's	20% elektr. en 23% warmte 15% elektr. en 28% warmte 11% elektr. en 53% warmte	Methodiek duurzaam aanbesteden afval update 2021 (CE Delft, 2021b)
HR AVI++ Amager Bakke Copenhagen	Verbranden huishoudelijk afval DK	28% elektriciteit en 71% warmte	(CE Delft, 2019c)
HR AVI++ met CCS	Verbranden en daarna CCS	14% elektriciteit en 85% warmte	(V. Bisinella, 2022)
Elektriciteit uit aardgas	Gascentrale	60% (hoogste)	
Hr-ketel warmte uit aardgas bij huishoudens		Circa 100%	
Plastic uit aardolie		Netto ca.33% a 50%	Plastic Europe NL
Recycling van PET via depolymerisatie	Ioniqa depolymerisatie	Circa 170%	(CE Delft, 2018a)

Energierendement recyclingopties

Voor recycling is het minder gebruikelijk te spreken over een energie-efficiency, maar de Cumulative Energy Demand indicator die veel gebruikt wordt in LCA's, maakt dit toch mogelijk.

Energie-efficiency recycling = netto minder energiegebruik in de hele economie / stookwaarde plastic

De netto besparing op energiegebruik is de hoeveelheid energie die bespaard wordt doordat er geen nieuw plastic gemaakt hoeft te worden min de energiebehoefte voor recycling.

Er zijn echter vele mechanische recyclingketens. Om een goede indruk te krijgen van de range van de energie-efficiency van mechanische recycling hebben we een achttal cases uit de database van CE Delft uitgedraaid in Tabel 17. De waarden variëren tussen de 100% voor een HDPE-case, waarbij er vrij veel uitval is naar mixed plastic, tot maximaal bijna 300% voor de beste vormen van PET-recycling.

Tabel 17 - Energie-efficiency mechanische recycling van plasticetens uit CE Delft-database

Model	CED (fossiel) MJ/kg	LHV MJ/kg	- CED/LHV*100%
Verwerking PET-flessen ingezameld via bronscheiding 2015	-68,20	23	297%
Verwerking HDPE ingezameld via bronscheiding 2015	-42,26	42	101%
Verwerking PET-flessen ingezameld via bronscheiding 2015	-44,08	23	192%
Verwerking PP ingezameld via bronscheiding 2015	-53,38	43	124%
Verwerking PP via nascheider 2015	-47,69	43	111%
Verwerking PET via nascheider 2015	-51,48	23	224%
Verwerking van HDPE via nascheider 2015	-47,54	23	207%

B Maximale efficiëntie vergassing plastic

- Het vergassen van plastic voor de productie van methaan is een relatief nieuwe techniek. Er is wel wat literatuur over te vinden, maar om een theoretische inschatting van de efficiëntie te doen is hoeveelheid literatuur wat schaars. Een optie is om ofwel een volledige LCA (levenscyclusanalyse) te doen, ofwel om grof een inschatting te doen van de (maximale) efficiëntie op basis van wat relatief simpele sommetjes. De eerste optie is niet begroot in dit project; het tweede hebben we wel gedaan en wordt hier nader toegelicht (Saebea et al., 2019) (Argonne, 2019) (J. et al., 2012).
- We hebben een inschatting van de maximale efficiëntie gedaan, door de voornaamste stappen in het proces mee te nemen. Daarbij baseren we ons op (Saebea et al., 2019), en vullen we beschikbare kennis van deze bron aan met theoretische kennis van de verschillende deelprocessen. We gaan er daarnaast van uit dat methaanproductie wordt geoptimaliseerd door het toevoegen van extra waterstof, welke ofwel via SMR (Steam Methane Reforming) ofwel via elektrolyse wordt geproduceerd. Ten slotte kan de warmte die ontstaat tijdens methanisatie teruggewonnen worden (norm bij nieuwere installaties), maar dit hoeft niet het geval te zijn (wat bij veel conventionele installaties het geval is).
- In Tabel 18 staan de verschillende benodigde stromen van energie en de opbrengst in de vorm van de energie-inhoud van de geproduceerde methaan. De maximale efficiënties staan vervolgens ook benoemd. Dit zijn met nadruk maximale efficiënties; sommige (relatief weinig energievergende) deelprocessen zijn niet meegenomen, zoals het op druk en temperatuur brengen van de methanisatiereactor, en gascleaning processen.

Tabel 18 - Energiegebruik en efficiëntie methaanproductie via plasticvergassing

Procesonderdeel (MJ)	Steam Methane Reforming	Elektrolyse
Methaan stoomproductie	496	496
Methaan verwarming vergasser	1.800	1.800
Elektriciteit waterstofproductie	28	2.426
Methaan waterstofproductie	387	-
Warmteproductie bij methanisatie	-1.264	-1.264
Elektriciteit koelwaterproductie	312	312
Energie-inhoud plastic	4.147	4.147
Energie-inhoud geproduceerde methaan	5.376	5.376
Efficiëntie zonder hergebruik warmte methaanproductie	60%	45%
Efficiëntie bij hergebruik warmte methaanproductie	88%	63%

De belangrijkste aannames die gebruikt zijn, zijn als volgt:

- de vergasser wordt verwarmd met methaan;
- een Carbon Gas Efficiency (CGE) van 90%;

- de (kleine hoeveelheid) CO_2 die ontstaat bij vergassing wordt allemaal omgezet naar CO en kan vervolgens methaniseren;
- CO en H_2 reageren met elkaar in de verhouding 1:3;
- evenwicht van methanisatie ligt volledig naar rechts.



C Maximale efficiëntie extra methaan door toevoeging waterstof aan vergister

Om iets te kunnen zeggen over de toegevoegde waarde van extra methaanproductie door het toevoegen van groene waterstof, hebben we een inschatting gemaakt van de maximaal haalbare efficiëntie van dit proces. Hieronder staat toegelicht welke aannames hierbij zijn gemaakt en vervolgens hoe de maximale efficiëntie berekend is (Biogasclean, 2022).

Aannames:

- gebruik van een PEM-elektrolyser met een efficiëntie van 80% (HHV);
- output molverhouding methaan:CO₂ = 95:5;
- in outputreactor is de volgende reactie in evenwicht: $4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$;
- geen extra warmte-input methanisatiereactor, gezien de methanisatiereactie een exotherme reactie is.

Berekening:

- Uitgaande van een elektrolyser met een vermogen van 7 MW die op vol vermogen gebruikt wordt, produceer je in een uur $25,2 \text{ [GJ/uur]} * (1/3,6) \text{ [MWh/GJ]} * 0,8 \text{ []} = 5,6 \text{ MWh}$ waterstof. Dit staat gelijk aan 142 kg waterstof, op basis van 39,39 kWh/kg HHV.
- Er wordt dus $142 \text{ [kg]} * (1/2) * \text{[kmol/kg]} = 71 \text{ kmol}$ waterstof geproduceerd. Hiervan reageert bijna alles tot methaan. Wat er overblijft aan waterstof kunnen we definiëren als $x \text{ mol}$ waterstof, en aan methaan ontstaat er $(71-x)/4 \text{ mol}$. Daarnaast komen waterstof en methaan in het outputgas voor in de molverhouding 20:95¹⁴. Met deze kennis kan men berekenen de hoeveelheid overgebleven waterstof $71/20 \text{ kmol}$ is en de hoeveelheid geproduceerde methaan 16,9 kmol.
- $16,9 \text{ kmol}$ methaan staat gelijk aan $16,9 \text{ kmol} * 16 \text{ [kg/kmol methaan]} = 270 \text{ kg}$. Onder normale (25 graden, 1 bar) is de dichtheid van methaan ongeveer $0,66 \text{ kg/m}^3$, wat inhoudt dat er in een uur 408 Nm^3 methaan geproduceerd wordt.
- Met de energie-inhoud (HHV) van methaan kom je daarmee op $408 \text{ [Nm}^3\text{]} * 39,8 \text{ [MJ/m}^3\text{ methaan]} * (1/1.000) \text{ [GJ/MJ]} = 16,3 \text{ GJ}$ methaan.
- Daarmee kom je tot een efficiëntie van $16,3 / 25,2 = 65\%$.

¹⁴ Dit volgt uit de informatie van Biogasclean. Zij rapporteren dat de output bestaat uit > 95% methaan en < 5% CO₂. Als je uitgaat van 95% methaan en 5% CO₂, kom je bij atmosferische druk en de reactievergelijking $4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ in evenwicht op een molverhouding van H₂:CH₄ van $4*5:95 = 20:95$.

