



LCA-resultaten plastics en methaan

Toekomstbestendige
koolstofstromen in de Zuid-
Hollandse industrie, Bijlage 2



LCA-resultaten plastics en methaan

Toekomstbestendige koolstofstromen in de Zuid-Hollandse industrie, Bijlage 2

Deze bijlage is geschreven door:
Geert Bergsma, Martijn Broeren, Nicole Imholz

Delft, CE Delft, 15 juni 2023

Opdrachtgever: Provincie Zuid-Holland

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



Inhoud

1	Methode	3
2	Resultaten	6
	2.1 Polyethyleen (PE)	6
	2.2 Polypropyleen (PP)	7
	2.3 Polyethyleentereftalaat (PET)	8
	2.4 Polymelkzuur (polylactic acid, PLA)	9
	2.5 Methaan	10
3	Literatuur	12



1 Methode

Een overzicht van de modellering voor de LCA van de verschillende routes is weergegeven in Tabel 1. Hier vermelden we per productketen de gebruikte databronnen, aannames en onzekerheden.

Tabel 1 - Modellering van de verschillende plastic en methaan routes voor zowel het huidige als hernieuwbaar scenario.

Route	Modellering (huidig en hernieuwbaar scenario)
Fossiel PE, PP, PET, PS	<p>Bron: Plastics Europe eco-profiles</p> <ul style="list-style-type: none"> – PE (Plastics Europe, 2012, 2016a) – PP(Plastics Europe, 2012, 2016b) – PET (Plastics Europe, 2013, 2017, 2012, 2016c) – PS (Plastics Europe, 2022) <p>De grondstof is ruwe aardolie.</p> <p>We gebruiken gemiddelde procesgegevens. De onzekerheid op de klimaatimpact in het huidige scenario is daarom laag.</p>
Mechanische recycling PE, PP, PET	<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. Voor PET gemiddelde genomen met gegevens uit 2020. – Grondstof is kunststof afval en heeft geen klimaatimpact ('cut-off' methode). – Verliezen tijdens sortering en recycleproces worden verbrand in een gemiddelde Nederlandse AVI. – Verliezen zijn afhankelijk van het type kunststof 3% tot 10%. – Plastic-to-plastic yields (kg gerecycled kunststof per kg kunststof afval): HDPE 97%, PP 90% en PET 96%. <p>We gebruiken gemiddelde procesgegevens. De onzekerheid op de klimaatimpact in het huidige scenario is daarom laag.</p>
Biobased PE	<ul style="list-style-type: none"> – Als grondstof gaan we uit van ethanol uit Brazilië: <ul style="list-style-type: none"> • Productie suikerriet en ethanol volgens Tsiropoulos <i>et al.</i> (2015). • Aangenomen dat teelt suikerriet en ethanolproductie plaatsvinden in Brazilië. • Transport van ethanol per schip en vrachtwagen van Brazilië naar Nederland. – Ethyleenproductie volgens Liptow en Tillman (2009). – Polymerisatie tot PE gemodelleerd zoals fossiele productie.
Biobased PLA	<ul style="list-style-type: none"> – Als grondstof gaan we uit van melkzuur uit Thailand: <ul style="list-style-type: none"> • Productie suikerriet en melkzuur in Thailand volgens Morão en de Bie (2019) en Maga <i>et al.</i> (2019). • Transport per schip en vrachtwagen van Thailand naar Nederland. – Klimaatimpact van lactide- en PLA-productie volgens Morão en de Bie (2019). Aanname dat 80% van de klimaatimpact veroorzaakt wordt door warmtegebruik op basis van proces omschreven door Vink en Davies (2015). – Yields van lactide-productie en PLA-productie (allebei 90%) volgens Maga <i>et al.</i> (2019). <p>De productie van biobased PLA is gemodelleerd op basis van literatuurgegevens. Er is daarom onzekerheid op de klimaatimpact.</p>
Oplossen PE	<ul style="list-style-type: none"> – Grondstof is kunststof afval en heeft geen klimaatimpact ('cut-off' methode). – Aangenomen dat de klimaatimpact van inzamelen en sorteren vergelijkbaar is als bij mechanische recycling van PE.

	<ul style="list-style-type: none"> – Klimaatimpact oplosproces is berekend op basis van vertrouwelijke procesgegevens. Het gaat hier om pilot waardoor de gegevens mogelijk niet representatief zijn voor een grotere installatie. Er is daarom onzekerheid op de klimaatimpact.
Pyrolyse PE, PP	<ul style="list-style-type: none"> – Grondstof is kunststof afval en heeft geen klimaatimpact ('cut-off' methode). – Resultaten klimaatimpact overgenomen uit LCA-studie van BASF, waarin afvalplastic via pyrolyse wordt omgezet tot nieuw PE (BASF, 2020). – Aangenomen dat resultaten voor omzetting tot PP vergelijkbaar zijn. – Aangenomen dat de inzameling en sortering van PE of PP hetzelfde zijn als bij mechanische recycling van PE of PP.
Depolymerisatie PET	<ul style="list-style-type: none"> – Grondstof is kunststof afval en heeft geen klimaatimpact ('cut-off' methode). – Resultaten klimaatimpact overgenomen uit screening LCA-studie voor 50kt-plant van Ionica (CE Delft, 2018a). – Aangenomen dat de inzameling en sortering van PET hetzelfde is als bij mechanische recycling van PET. – Het productieproces is nog in ontwikkeling. De klimaatimpact is daarom onzeker.
Depolymerisatie PLA	<ul style="list-style-type: none"> – Grondstof is kunststof afval en heeft geen klimaatimpact ('cut-off' methode). – De uitval bij inzameling en sortering gelijk genomen aan PP (conservatief). Impact van inzamelen en sorteren gemiddelde genomen van mechanische recycleroutes. – Verliezen bij sortering worden verbrand in een gemiddelde Nederlandse AVI. – Depolymerisatie is gemodelleerd zoals lactide-productie uit melkzuur bij biobased PLA (Maga et al., 2019, Morão & de Bie, 2019). – Polymerisatie is gemodelleerd zoals PLA productie zoals bij biobased PLA (Maga et al., 2019, Morão & de Bie, 2019). – Plastic-to-plastic yield is 82,8%.
Fossiel methaan	<p>Bron: klimaatimpact aardgas via (Royal HaskoningDHV, 2022)</p> <p>Omgerekend tot methaan-equivalent op basis van verbrandingswaarde (ca. 1,3 kg aardgas nodig om 1 kg methaan te vervangen).</p>
Methaan via vergisting	<p>Bron productie: Ecoinvent (Wernet et al., 2016) (Biomethane, high pressure {RoW}) market for biomethane, high pressure)</p> <p>Grondstof bestaat uit verschillende biogene afvalstromen. Deze hebben geen klimaatimpact ('cut-off' methode). Aangenomen dat warmte en elektriciteit respectievelijk 70% en 30% van de klimaatimpact veroorzaken (analyse o.b.v. Ecoinvent).</p>
Methaan via vergassing	<p>Grof model. Dit omvat eerst slibontwatering op een RWZI (Iv-Groep, 2014), gevolgd door vergassing om methaan te produceren en uiteindelijk verbranding.</p> <p>Grondstof is rioolslib. Dit heeft geen klimaatimpact ('cut-off' methode).</p> <p>Aanname vergassing:</p> <ul style="list-style-type: none"> – 65% van de energiewaarde van ontwaterd slib wordt omgezet tot methaan. – Vergassing heeft geen externe energiebron nodig. – Er is geen credit toegekend voor het vermijden van de conventionele verwerking van slib (evt. vergisten en daarna verbranden). Deze processen hebben waarschijnlijk een klimaatimpact (Royal HaskoningDHV, 2021), dus dit is een conservatieve benadering. – Er lekt geen methaan weg in de processen. <p>Met bovenstaande aannames belandt ca. 25% van de koolstof in het slib in methaan. De overige 75% wordt uitgestoten. Omdat dit kortcyclische CO₂ is wordt deze niet apart weergegeven in de resultaten.</p>
Methaan via vergassing met CCS	<p>Idem model als methaan via vergassing, met als aanvulling dat 90% van de CO₂ die bij vergassing wordt uitgestoten nu wordt afgevangen en opgeslagen (CCS).</p> <p>Impact CCS geschat op basis van (CE Delft, 2018b, Koornneef et al., 2008)</p>
Alle plasticroutes	<p>Verbranding (EOL):</p> <ul style="list-style-type: none"> – Directe CO₂-emissies berekend op basis van s/structuurformule.

	<p>– Verbranding in gemiddelde Nederlandse AVI (elektrisch rendement 15% en thermisch rendement 28% (CE Delft, 2021)).</p> <p>We gebruiken gemiddelde procesgegevens. De onzekerheid op de klimaatimpact in het huidige scenario is daarom laag.</p>
--	--



2 Resultaten

2.1 Polyethyleen (PE)

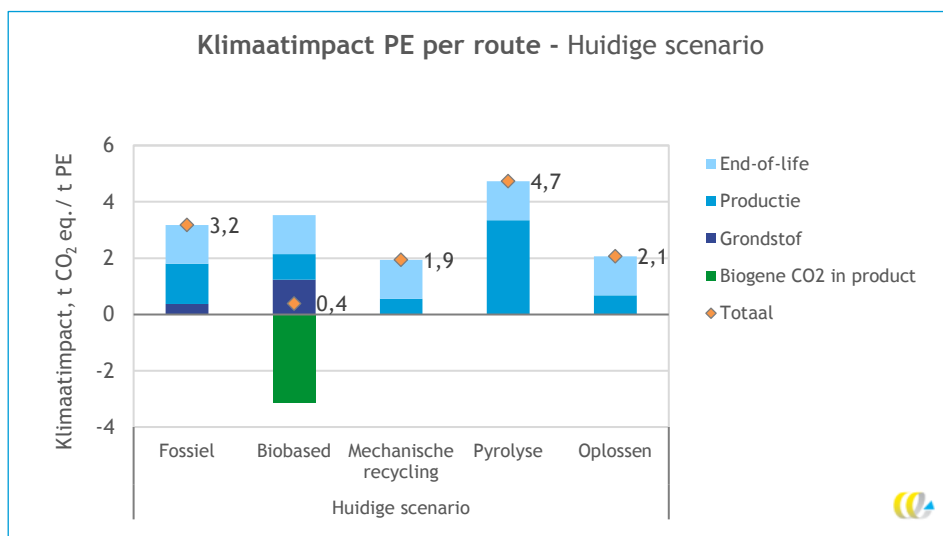
De resultaten voor PE, de meest gebruikte kunststof, zijn te zien in Figuur 1 (huidige situatie) en Figuur 2 (hernieuwbaar scenario). Ten opzichte van fossiele productie leveren mechanische recycling, biobased PE en recycling via oplossen (Obbotec) een aanzienlijk klimaatvoordeel op. De besparingen liggen in het huidige scenario tussen de ca. 35% en 90% over de hele levenscyclus. In het hernieuwbare scenario nemen deze besparingen toe tot boven de 80% voor alle drie deze routes door de schonere energiemix.

Mechanische recycling en oplossen kunnen met weinig energie afvalplastic omzetten tot recycklaat en scoren daardoor goed. Hierbij kan opgemerkt worden dat mechanische recycling ver ontwikkeld is maar met name geschikt is voor schone afvalstromen. Met betere inzameling en sortering zou nog meer materiaal mechanisch gerecycled kunnen worden. De oplosroute kan beter omgaan met vervuilingen, maar moet juist nog verder ontwikkeld en opgeschaald worden; de hier getoonde resultaten zijn dan ook gebaseerd op voorlopige data en zijn daarom onzeker.

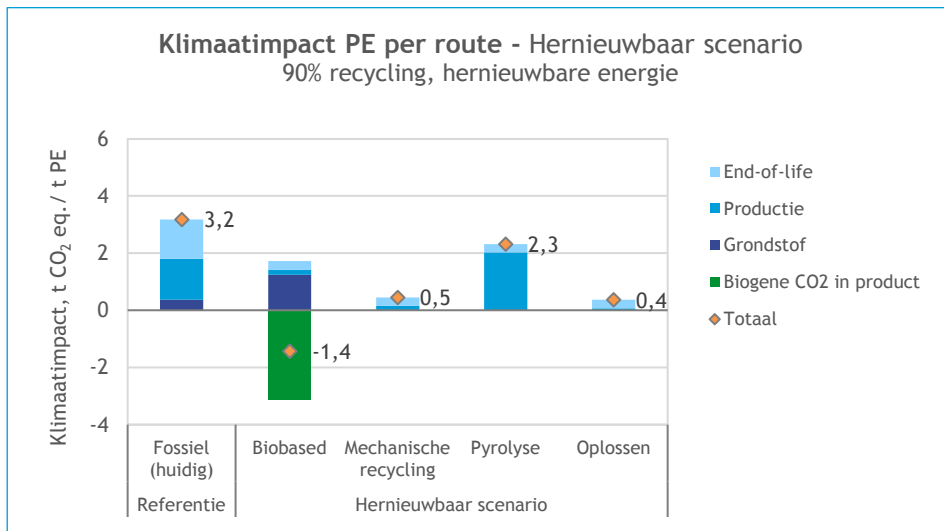
Biobased PE scoort met name goed doordat er bij de teelt van suikerriet CO₂ wordt opgenomen uit de atmosfeer. Deze CO₂ (-3,1 t CO₂ eq./t PE; groen in Figuur 1) komt weer vrij bij de verbranding bij end-of-life in het huidige scenario. Omdat hier echter ook energie wordt teruggewonnen is de netto klimaatimpact van de end-of-life kleiner dan de CO₂-opname.

Recycling via de veel langere keten van **pyrolyse** heeft op dit moment een 50% hogere klimaatimpact dan fossiel PE. In het hernieuwbare scenario neemt dit af tot een besparing van 30% dankzij het gebruik van hernieuwbare energie.

Figuur 1 - De klimaatimpact voor de verschillende productketens van PE in het huidige scenario.



Figuur 2 - De klimaatimpact van de verschillende productketens van PE in het hernieuwbaar scenario.

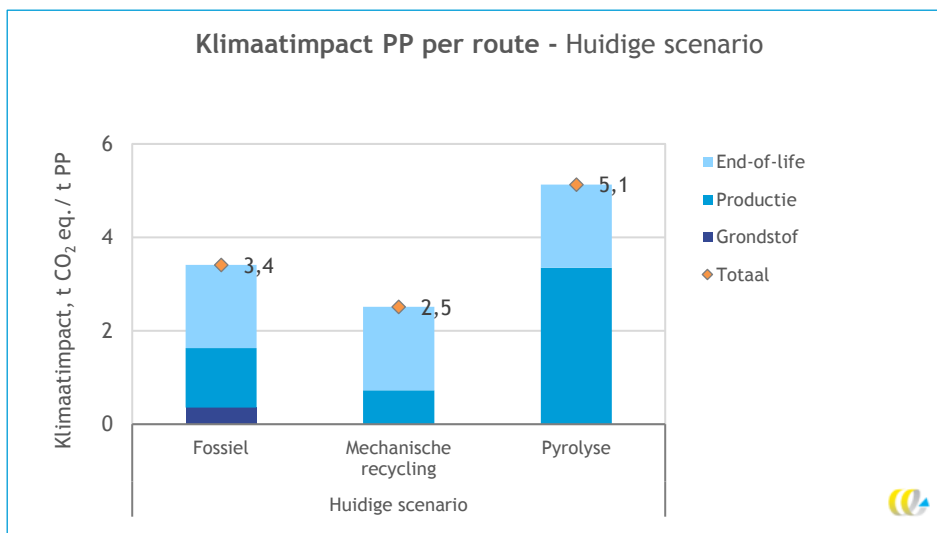


2.2 Polypropyleen (PP)

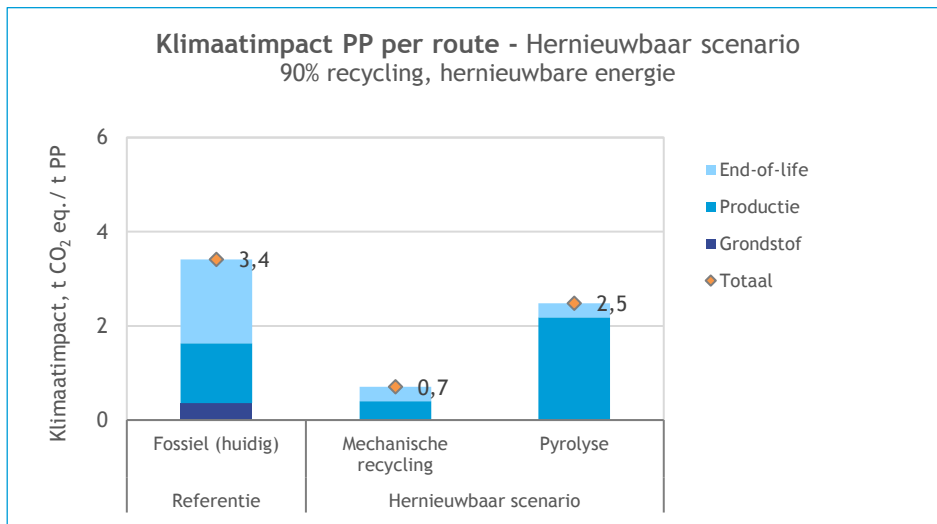
De cradle-to-grave klimaatimpact van verschillende PP-routes is weergegeven in Figuur 3 (huidige situatie) en Figuur 4 (hernieuwbaar scenario). De resultaten zijn vergelijkbaar met die voor PE. Bij PP zorgt **mechanische recycling** in de huidige situatie voor een ca. 25% lagere klimaatimpact dan fossiele productie over de hele levenscyclus. In het hernieuwbare scenario heeft mechanisch gerecycled PP een 80% lagere klimaatimpact dan huidig fossiel PP.

PP geproduceerd via **pyrolyse** heeft in de huidige situatie een hogere klimaatimpact dan fossiel PP. In een toekomstig scenario met duurzame energie waarin plastics bijna volledig circulair zijn (Figuur 4) levert pyrolyse een reductie van ca. 30% ten opzichte van de huidige fossiele keten.

Figuur 3 - De klimaatimpact van de verschillende productketens van PP in het huidige scenario.



Figuur 4 - De klimaatimpact van de verschillende productketens van PP in het hernieuwbaar scenario.

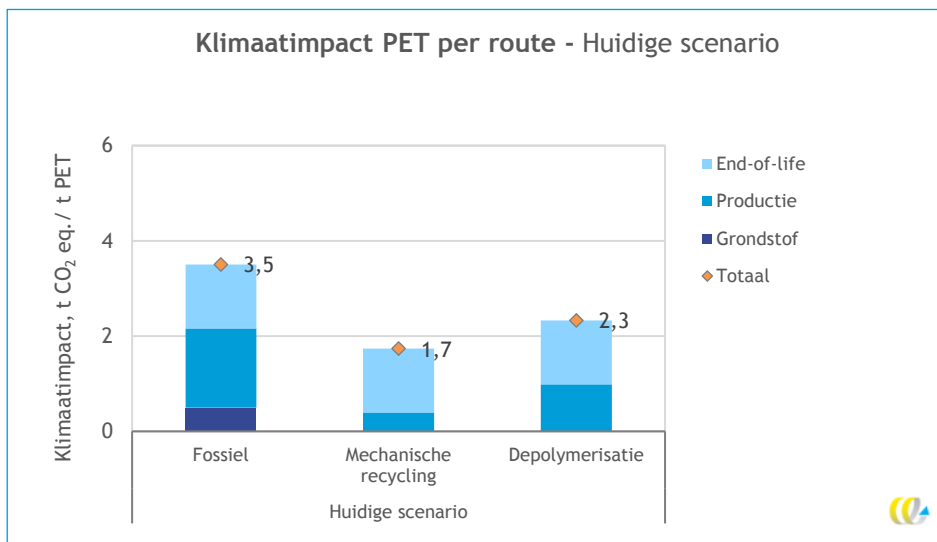


2.3 Polyethyleentereftalaat (PET)

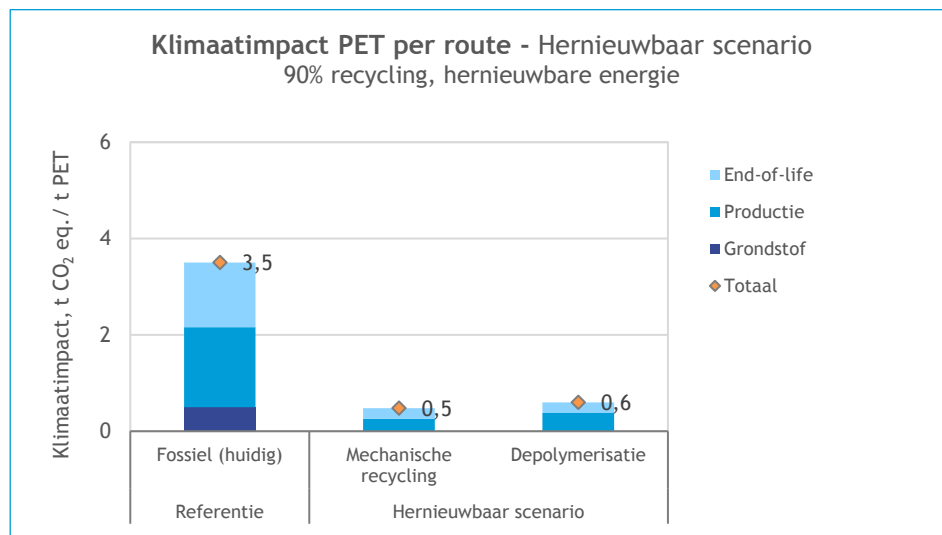
De resultaten voor PET zijn te zien in Figuur 5 (huidige situatie) en Figuur 6 (hernieuwbaar scenario). Zowel **mechanische recycling** als **depolymerisatie**, een vorm van korte keten chemische recycling, hebben in de huidige situatie een lagere klimaatimpact dan de fossiele route. De reducties zijn respectievelijk ca. 50% en 35% zonder rekening te houden met vermeden verbranding.

In het hernieuwbare scenario nemen deze reducties toe tot ca. 85% ten opzichte van fossiel PET (huidige situatie). Naast het verduurzamen van de energievoorziening van de recyclingprocessen zelf komt dit door de aanname dat 90% van het plastic gerecycled wordt, wat de klimaatimpact van de end-of-life aanzienlijk verlaagt.

Figuur 5 - De klimaatimpact van de verschillende productketens van PET in het huidige scenario.



Figuur 6 - De klimaatimpact van de verschillende productketens van PET in het hernieuwbaar scenario.



2.4 Polymelkzuur (polylactic acid, PLA)

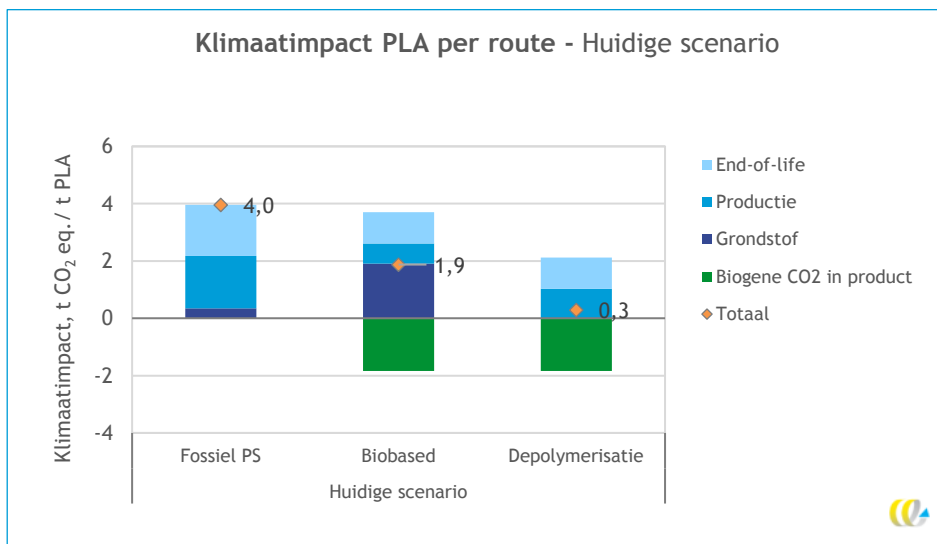
PLA is een nieuwe biobased kunststof die gemaakt kan worden uit suikers. PLA kan in sommige toepassingen polystyreen (PS) vervangen omdat de eigenschappen vergelijkbaar zijn, maar wordt ook vergeleken met PE, PP en PET (CE Delft, 2023). In Figuur 7 (huidige scenario) en Figuur 8 (hernieuwbaar scenario) zijn de klimaatimpact van primaire productie van PLA en PLA gerecycled via depolymerisatie weergegeven.

In het huidige scenario heeft primaire productie van **biobased PLA** per kg een 50% lagere klimaatimpact dan fossiel PS over de hele levenscyclus. Hierbij is rekening gehouden met de opname van CO₂ uit de atmosfeer, die bij de einde levensduur weer vrijkomt. Als we aannemen dat de productie plaatsvindt met duurzame energie en PLA grotendeels gerecycled wordt (hernieuwbaar scenario), wordt de klimaatimpact zelfs negatief door de CO₂-opname.

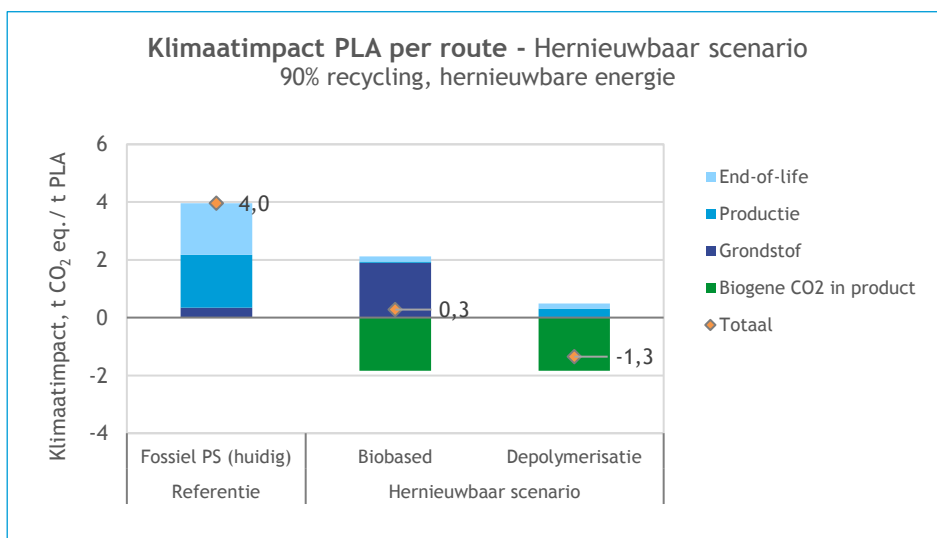
Recycling van PLA via **depolymerisatie** is in principe goed mogelijk. Op het moment heeft PLA echter een klein marktaandeel, waardoor het niet uitgesorteerd wordt voor recycling (CE Delft, 2019). De resultaten voor depolymerisatie in Figuur 7 en Figuur 8 zijn gebaseerd op inschattingen van Fraunhofer (Maga et al., 2019). Omdat er minder productiestappen nodig zijn bij depolymerisatie is de klimaatimpact van gerecycled PLA lager dan die van primair PLA. De reductie is ca. 90% in het huidige scenario. Net als bij primair PLA wordt in het hernieuwbare scenario de klimaatimpact van gerecycled negatief door de CO₂-opname, duurzame energie en het hoger gehalte aan recycling.

Hoewel PLA vooral vergeleken wordt met PS, kan het in sommige toepassingen ook andere kunststoffen vervangen. De klimaatimpact van PS van 4,0 t CO₂ eq./t over de hele levenscyclus ligt hoger dan die van bijv. PE (3,2 t CO₂ eq./t), PP (3,4 t CO₂ eq./t) en PET (3,5 t CO₂ eq./t). Wanneer PLA deze kunststoffen zou vervangen is het voordeel voor het klimaat dus iets lager dan bij het vervangen van PS. Daarnaast merken we hierbij op dat niet in alle toepassingen 1 kg fossiel kunststof door 1 kg PLA vervangen zou worden; soms kan meer of minder plastic nodig zijn om gelijkwaardige producteigenschappen te realiseren. In bestaande LCA-studies voor PLA zien we gewichtsvariaties van maximaal 35% (CE Delft, 2023). Dit zorgt voor extra onzekerheid in de hier gepresenteerde getallen.

Figuur 7 - De klimaatimpact van de verschillende productketens van PLA in het huidige scenario.



Figuur 8 - De klimaatimpact van de verschillende productketens van PLA in het hernieuwbaar scenario.



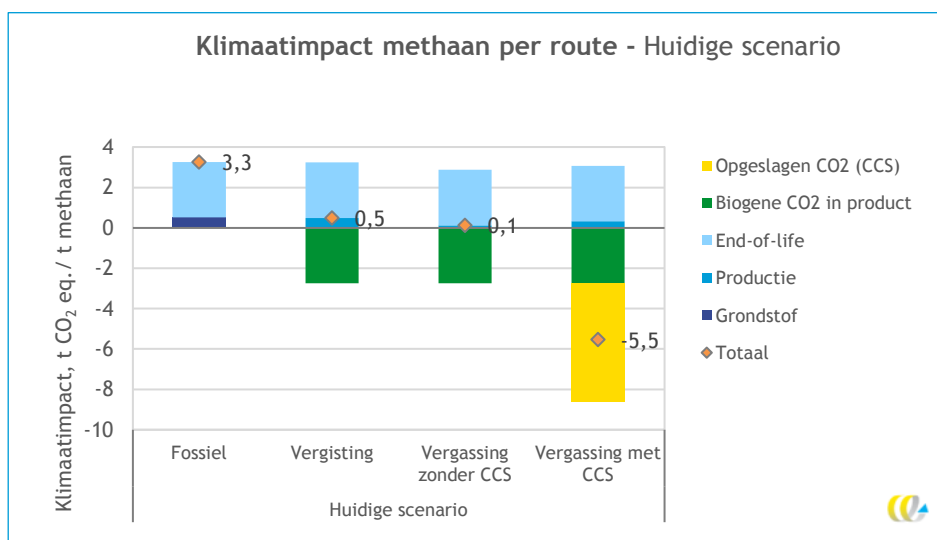
2.5 Methaan

De klimaatimpact van verschillende methaanroutes is weergegeven in Figuur 9 (huidige scenario) en Figuur 10 (hernieuwbaar scenario). **Fossiel** aardgas heeft een klimaatimpact van ca. 3,3 t CO₂ eq./t methaan (berekend op basis van gelijke energie-inhoud). Deze impact vindt met name plaats bij de verbranding bij de gebruiker van methaan (scope 3). Een beperkt deel speelt bij winning en transport.

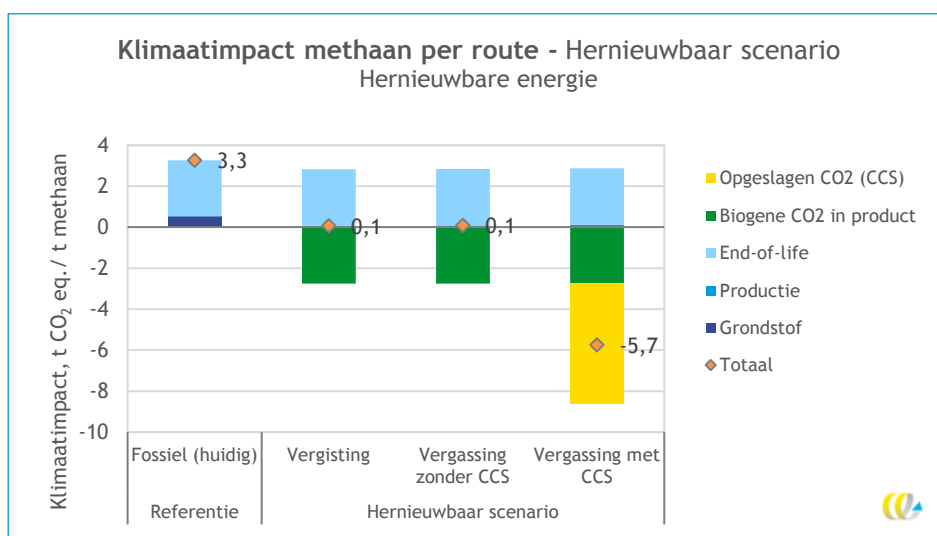
Methaan geproduceerd via **vergisting** van biomassa heeft een klimaatimpact van ca. 0,5 t CO₂ eq./t in het huidige scenario. Deze reductie van ca. 85% ontstaat doordat er geen fossiele koolstof wordt uitgestoten; de CO₂ die wordt uitgestoten bij verbranding is gelijk aan de CO₂-opname in de biomassa. In het hernieuwbare scenario daalt de klimaatimpact tot ruim 95% door het gebruik van duurzame energie.

Voor **vergassing** van rioolslib is een grof model opgesteld voor productie van methaan met en zonder CO₂-afvang en opslag (CCS; *carbon capture and storage*). Zonder CCS zorgt deze technologie al voor een reductie van 95%; dit komt wederom door de biogene CO₂ in de geproduceerde methaan. Daarnaast is aangenomen dat het proces geen externe energie nodig heeft omdat 65% van de energiewaarde van het slib wordt omgezet in methaan en de overgebleven 35% wordt gebruikt als energiebron. Hierbij komt alleen biogene CO₂ vrij (niet weergegeven in Figuur 9). Deze CO₂ kan echter ook worden afgevangen in de route **vergassing met CCS**. Dit kost extra energie (meegenomen bij 'productie' in Figuur 9) maar levert vooral een groot voordeel op door de opgeslagen CO₂. Hierdoor komt de netto klimaatimpact zeer laag uit. Doordat vergassing zonder CCS geen externe energie nodig heeft, verandert de klimaatimpact niet in het hernieuwbare scenario met duurzame energie.

Figuur 9 - De klimaatimpact van de verschillende productketens van methaan in het huidige scenario.



Figuur 10 - De klimaatimpact van de verschillende productketens van methaan in het hernieuwbaar scenario.



3 Literatuur

- **BASF**, 2020. *ChemCycling: Environmental Evaluation by Life Cycle Assessment (LCA)*, Ludwigshafen: BASF
- **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**, 2019. *Verkenning uitsorteren en recyclen van bioplastische PLA*, Delft: CE Delft
- **CE Delft**, 2021. *Klimaatimpact van afvalverwerkingsroutes in Nederland: CO2-kentallen voor recyclen en verbranden voor 13 afvalstromen*, Delft: CE Delft
- **CE Delft**, 2023. *Sustainability of biobased plastics - Analysis focusing on CO2 for policies*, Delft: CE Delft
- **Iv-Groep**, 2014. *Ketenanalyse energieopwekking slibverwerking*: Iv-Groep b.v.
- **Koornneef, J., Keulen, T. v., Faaij, A. & Turkenburg, W.**, 2008. Life cycle assessment of a pulverized coal power plant with post-combustion capture, transport and storage of CO2. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2, 448-467.
- **Liptow, C. & Tillman, A.-M.**, 2009. *Comparative life cycle assessment of polyethylene based on sugarcane and crude oil*, Göteborg, Zweden: Chalmers University of Technology
- **Maga, D., Hiebel, M. & Thonemann, N.**, 2019. Life cycle assessment of recycling options for polylactic acid. *Resources, Conservation & Recycling*, 86-89.
- **Morão, A. & de Bie, F.**, 2019. Life Cycle Impact Assessment of Polylactic Acid (PLA) Produced from Sugarcane in Thailand. *Journal of Polymers and the Environment*, 27, 2523-2539.
- **Plastics Europe**, 2012. *Ethylene, Propylene, Butadiene, Pyrolysis Gasoline, Ethylene Oxide (EO), Ethylene Glycols (MEG, DEG, TEG)*, Brussels:
- **Plastics Europe**, 2013. *Benzene, Toluene, and Xylenes (Aromatics, BTX)*, Brussels:
- **Plastics Europe**, 2016a. *High-density Polyethylene (HDPE), Low-density Polyethylene (LDPE), Linear Low-density Polyethylene (LLDPE)*, Brussels:
- **Plastics Europe**, 2016b. *Polypropylene (PP)*, Brussels:
- **Plastics Europe**, 2016c. *Purified Terephthalic Acid (PTA)*, Brussels:
- **Plastics Europe**, 2017. *Polyethylene Terephthalate (PET) (Bottle Grade)*:
- **Plastics Europe**, 2022. *Eco-profile of General-Purpose Polystyrene (GPPS) and High-Impact Polystyrene (HIPS)*, Brussels:
- **Royal HaskoningDHV**, 2021. *Duurzaamheid van productie van biogas op rwzi's*, Amersfoort: Royal Haskoning DHV
- **Royal HaskoningDHV**, 2022. *Broeikasgasemissies Aardgasketens*:
- **Tsiropoulos, I., Faay, A. P. C., Lundquist, L., Schenker, U., Briois, J. F. & Patel, M. K.**, 2015. Life cycle impact assessment of bio-based plastics from sugarcane ethanol. *Journal of Cleaner Production*, 90, 114-127.
- **Vink, E. T. H. & Davies, S.**, 2015. Life Cycle Inventory and Impact Assessment Data for 2014 Ingeo Polyactide Production. *Industrial biotechnology*, 11, 167 - 180.
- **Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E. & Weidema, B.**, 2016. The Ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21, 1218-1230.

