

# **Interpretatie Life Cycle Analyse resultaten voor toekomstbestendige koolstofstromen (afval, biomassa en CO<sub>2</sub>) voor chemicaliën en brandstoffen**

TNO 2023 R11994 – 13 november 2023  
Interpretatie Life Cycle Analyse resultaten voor  
toekomstbestendige koolstofstromen  
(afval, biomassa en CO<sub>2</sub>) voor chemicaliën en  
brandstoffen

Auteurs	Milena Brouwer-Milovanovic Yvette Veninga
Rubricering rapport	TNO Public
Titel	TNO Public
Rapporttekst	TNO Public
Aantal pagina's	13 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	0
Opdrachtgever	Provincie Zuid-Holland (PZH)
Projectnaam	Interpretatie CCU resultaten PZH
Projectnummer	060.58193

**Alle rechten voorbehouden**

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

© 2023 TNO

# Inhoudsopgave

Inhoudsopgave .....	3
1 Inleiding.....	4
2 Resultaten .....	5
2.1 Chemicaliën .....	5
2.1.1 Ethyleen.....	5
2.1.2 Vergelijking van LCA resultaten.....	6
2.2 Brandstoffen.....	7
2.2.1 DME.....	7
2.2.2 Vergelijking van LCA resultaten.....	8
3 Conclusies.....	11
3.1 Chemicaliën .....	11
3.2 Brandstoffen.....	11
4 Aannames en referenties .....	12
4.1 Aannames .....	12
4.2 Referenties .....	12
Ondertekening.....	13

# 1 Inleiding

In januari 2022 hebben &Flux (hoofdaannemer) en TNO (subcontractor) een gezamenlijk rapport uitgebracht aan de Provincie Zuid-Holland, getiteld: **‘Effectiviteitsanalyse van Carbon Capture and Utilization (CCU) productketens’**. In dit rapport is een beleids- en handelingsperspectief voor CCU in Provincie Zuid-Holland opgesteld, aan de hand van onderzoek naar de klimaatimpact (CO<sub>2</sub>-eq. emissies) van verschillende CCU ketens en regelgeving relevant voor CCU.

In juli 2023 hebben &Flux, PtoX, CE Delft en TNO een gezamenlijk rapport uitgebracht aan de gemeente Rotterdam en de Provincie Zuid-Holland, getiteld: **‘Toekomstbestendige koolstofstromen in de Zuid-Hollandse industrie’**. In dit rapport is bekeken welke nieuwe groene koolstofketens vanuit maatschappelijk perspectief het meest gewenst zijn in termen van emissiereductie en economie.

In het laatst genoemde rapport is een selectie gemaakt van de voor de provincie Zuid-Holland meest relevante productketens. Voor deze ketens is de klimaatimpact (CO<sub>2</sub>-eq. emissies) bekeken voor verschillende duurzame grondstoffen (biomassa, afval, CO<sub>2</sub>) en/of productie routes.

De relevante productketens zijn verdeeld in twee groepen: chemicaliën en brandstoffen.

- › Chemicaliën: Methanol (MeOH), Ethanol, BTX, Nafta, Ethyleen
- › Brandstoffen: Methanol (MeOH), Kerosine, Methaan, Dimethyl ether (DME)

De klimaatimpact van de Ethyleen en Dimethyl ether ketens is berekend in het rapport van januari 2022, echter de resultaten van dit rapport zijn niet één op één te vergelijken met de resultaten van het rapport uit juli 2023. In dit rapport worden de resultaten van voorgenoemde ketens omgerekend en als aanvulling toegevoegd aan de eindresultaten van het rapport **“Toekomstbestendige koolstofstromen in de Zuid-Hollandse industrie”**, zodat een volledig beeld ontstaat van de klimaatimpact van de voor provincie Zuid Holland relevante ketens.

De klimaatimpact van de productketens is berekend met Life Cycle Assessment analyse. De methodiek van de analyse is uitgebreid beschreven in het rapport van juli 2023.

Een geanalyseerde keten bestaat uit een grondstof (biomassa, afval of CO<sub>2</sub>), het productieproces en de end-of-life fase. De klimaatimpact is berekend in CO<sub>2</sub>-equivalente emissies. Er zijn twee cases berekend:

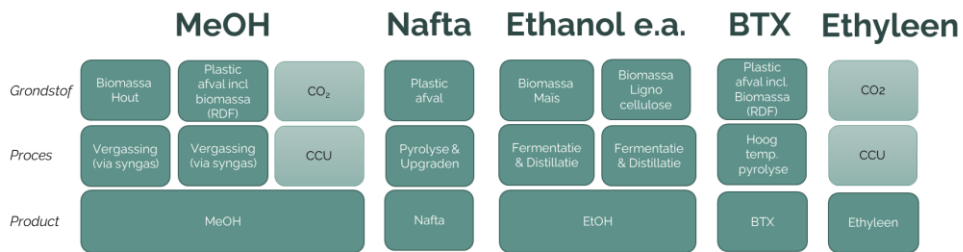
- › Huidige case (fossiel- huidige stroom mix, aardgas voor warmte, grijs waterstof, en voor end-of-life verbranding met terugwinning voor chemicaliën en emissies voor brandstoffen)
- › Toekomstige hernieuwbaar case (duurzame elektriciteit, biogene warmte, groene waterstof en voor end-of-life recycling voor chemicaliën en emissies voor brandstoffen).

De LCA analyses worden uitgevoerd op basis van een aantal referenties en aannames, die in hoofdstuk 4 beschreven zijn. De resultaten van de analyses zijn bruikbaar voor een orde grootte indruk van de ketenemissies en voor het vergelijken van verschillende scenario's binnen een keten.

# 2 Resultaten

## 2.1 Chemicaliën

Het figuur hieronder vat samen welke ketens bekeken zijn voor chemicaliën.



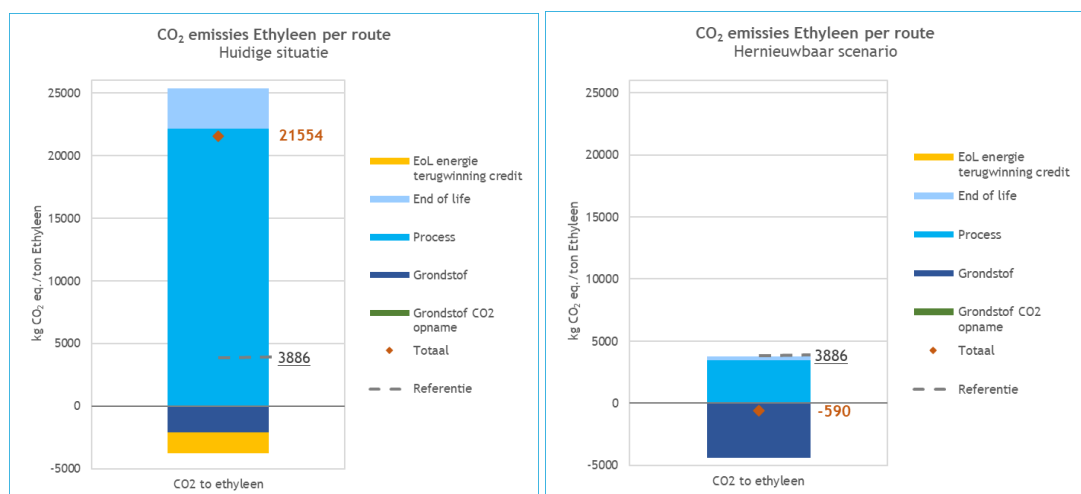
Figuur 1. Ketens waarvoor LCA berekeningen uitgevoerd zijn voor de groep chemicaliën

### 2.1.1 Ethyleen

Voor de ethyleen keten is de route bekeken, Electrochemical reduction van CO<sub>2</sub> (via Direct Air Capture) naar ethyleen (Khoo et al., 2020).

Uit de resultaten van de case “huidige situatie” blijkt dat de keten een significant hogere emissie heeft ten opzichte van de conventionele route (fossiel). Het grootste deel van de klimaatimpact wordt veroorzaakt door het elektriciteitsverbruik in het proces. De rest van de impact komt vooral door het End of Life scenario; verbranding.

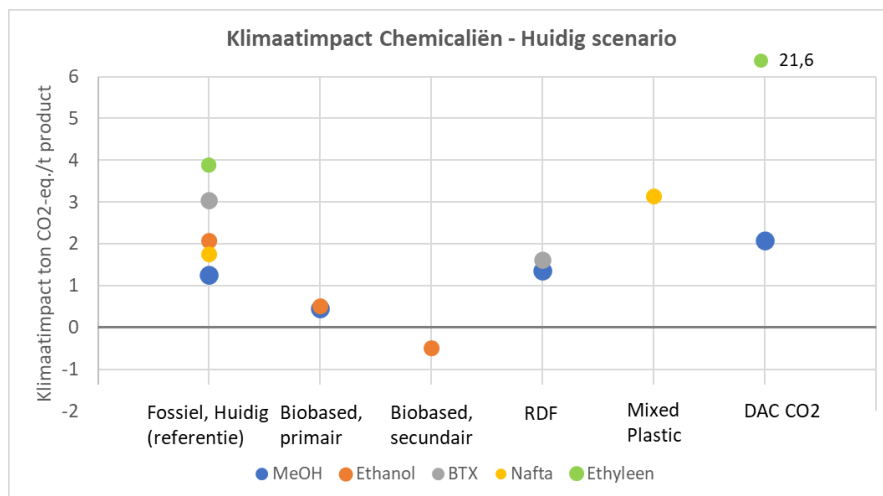
Als de EoL circulair wordt en alle energie (elektriciteit, warmte) hernieuwbaar is, zoals in het “hernieuwbaar scenario”, dan blijkt de nieuwe keten een veel lagere klimaatimpact te hebben dan de conventionele case.



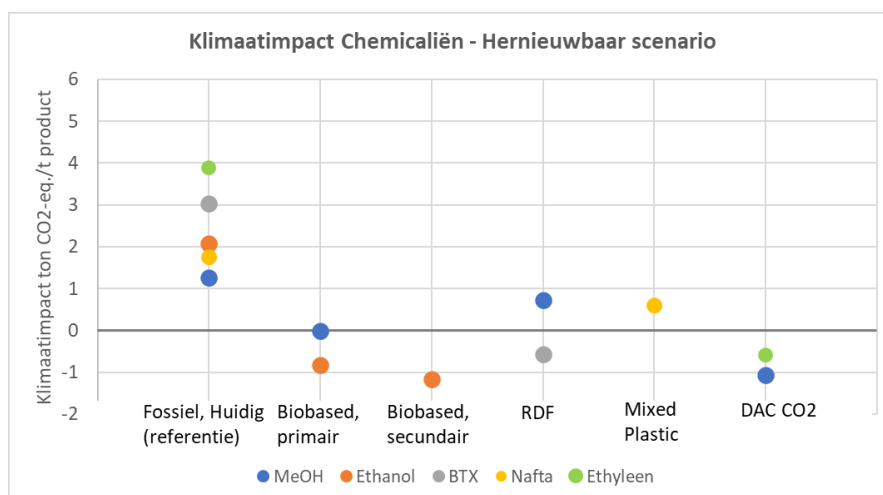
Figuur 2. LCA resultaten Ethyleen als chemische stof, huidige case en hernieuwbare case.

## 2.1.2 Vergelijking van LCA resultaten

In onderstaande figuren zijn de ketenemissies van verschillende producten weergegeven, waarbij elk product een eigen kleur heeft. Op de Y-as staat de klimaat impact (in ton CO<sub>2</sub>-eq./ ton product) en op de X-as zijn routes met verschillende grondstoffen en/of proces routes te vinden. Voor een aantal producten zijn verschillende grondstof en/of productie routes bekeken, welke als meerdere punten van dezelfde kleur in de grafiek terug te vinden zijn. De routes zijn schematisch in figuur 1 geschetst.



Figuur 3. Visualisatie chemieketens in één figuur (huidige scenario voor alle berekende opties behalve voor fossiel)



Figuur 4. Visualisatie chemieketens in één figuur (hernieuwbaar scenario voor alle berekende opties behalve voor fossiel)

Uit de berekeningen blijkt dat als er biomassa als grondstof gebruikt wordt voor methanol en (bio)ethanol, met de huidige grijze energiemix en grijze waterstof, dan is de CO<sub>2</sub>

ketenemissie lager dan de conventionele route. Als daarnaast de energie en waterstof duurzaam is, dan worden de ketenemissies neutraal of zelfs negatief.

Vooral door gebruik van secundaire biomassa uit de regio, zoals lignocellulose, worden de emissies nog verder verlaagd t.o.v. primaire biomassa. Het verbouwen van biomassa en het vervoer hiervan heeft een significante bijdrage aan de emissies, vandaar dat er goed op gelet moet worden welke biomassa gebruikt wordt en waar deze vandaan komt.

Productieroutes met CO<sub>2</sub> als grondstof en grijze energie en waterstof hebben geen klimaatvoordeel ten opzichte van de fossiele referentie, of heeft in het geval van ethyleen zelfs een veel grotere klimaatimpact. Als er wel voldoende duurzame energie en waterstof beschikbaar is, zullen methanol en ethyleen gemaakt van CO<sub>2</sub> uit de lucht in de toekomst een negatieve klimaat impact hebben, aangenomen dat de EoL circulair is.

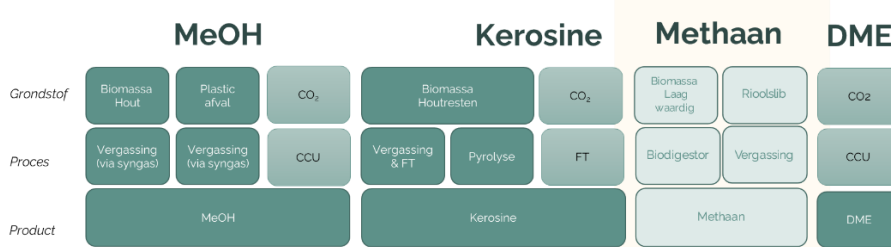
RDF vergassing tot methanol of BTX wordt vooral gunstig als EoL circulair is en de energie en waterstof duurzaam. Voor de case met de huidige energiemix en grijze waterstof is methanol vergelijkbaar met de conventionele route, BTX is al gunstiger. Echter, BTX is een klein deel van de product opbrengst en voor de andere producten moet ook een markt zijn.

Pyrolyse van mixed plastic afval tot Nafta is (zonder vermeden emissies) voor de huidige case ongunstiger dan de conventionele route. Voor de hernieuwbare case is de ketenemissie een stuk lager.

Hierbij moet wel worden aangemerkt dat de conventionele route met hernieuwbare energie ook aanzienlijk beter kan gaan scoren. In dit onderzoek is niet onderzocht of inzet van groene stroom en groene waterstof voor deze optie een efficiënte route is. Het huidige beleid is er op gericht dat plastic vanaf 2030 (wellicht 2040 als het tegenzit) vrijwel 100% afgescheiden zal worden voor recycling. Productie van Nafta uit mixed plastic heeft daarmee een bescheiden toekomst.

## 2.2 Brandstoffen

Het figuur hieronder vat samen welke ketens bekeken zijn voor brandstoffen.



Figuur 5. Ketens waarvoor LCA berekeningen uitgevoerd zijn voor de groep brandstoffen

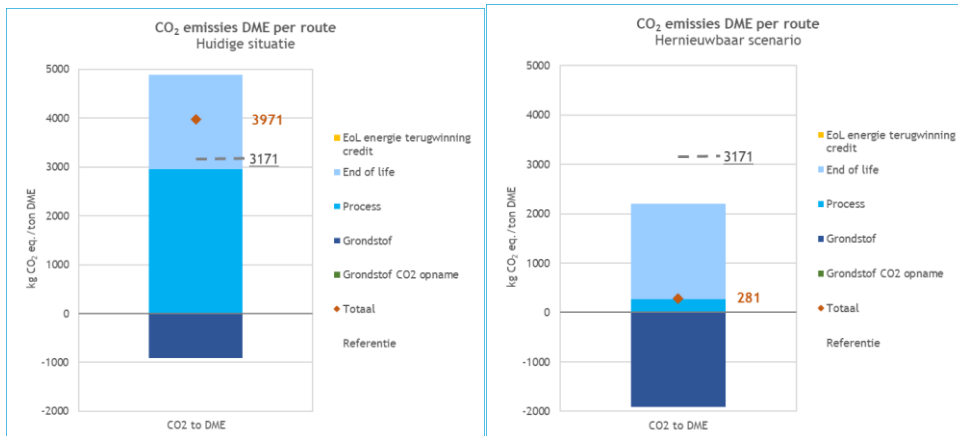
### 2.2.1 DME

Voor DME is dehydratatie van methanol (gemaakt via omzetting van DAC CO<sub>2</sub>) bekeken (Christensen & Bisinella, 2021).



Voor de huidige case heeft de atmosferische CO<sub>2</sub> omzetting iets hogere emissies ten opzichte van de conventionele route (fossiel). De EoL emissies en de proces (vooral waterstof) emissies bepalen voor het grootste deel de totale emissies van de biomassa ketens.

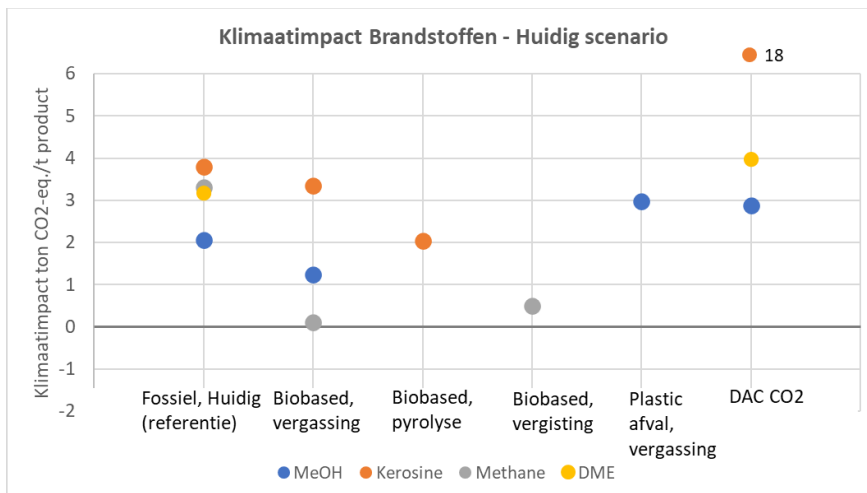
De CO<sub>2</sub> omzettingroute is voor de hernieuwbare case erg verbeterd, doordat de opname van CO<sub>2</sub> gelijk is aan de uitstoot en alleen emissies uit het proces overblijven. Deze zijn redelijk laag door het gebruik van hernieuwbare energie, waterstof en warmte. Ook in dit geval geldt dat er veel hernieuwbare energie nodig is voor de CO<sub>2</sub> omzetting, die in voldoende mate beschikbaar moet zijn.



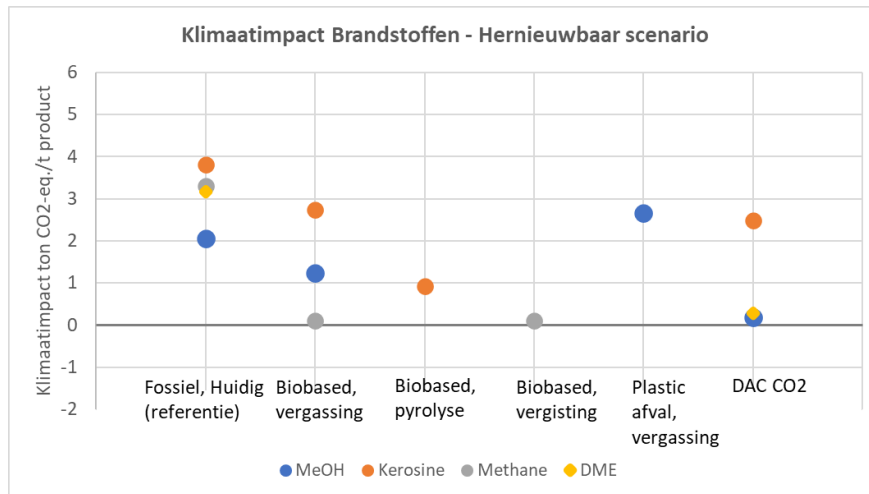
Figuur 6. LCA resultaten DME als brandstof, huidige case en hernieuwbare case

## 2.2.2 Vergelijking van LCA resultaten

In onderstaande figuren zijn de ketenemissies van verschillende producten weergegeven, waarbij elk product een eigen kleur heeft. Op de Y-as staat de klimaat impact (in ton CO<sub>2</sub>-eq./ ton product) en op de X-as zijn routes met verschillende grondstoffen en/of proces terug te vinden. Voor een aantal producten zijn verschillende grondstof en/of productie routes bekeken, welke als meerdere punten van dezelfde kleur in de grafiek terug te vinden zijn. De routes zijn schematisch in figuur 5 geschetst.



Figuur 7. Visualisatie brandstofketens in één figuur (huidige scenario voor alle berekende opties behalve voor fossiel)



Figuur 8. Visualisatie brandstofketens in één figuur (hernieuwbaar scenario voor alle berekende opties behalve voor fossiel)

Biomassa als grondstof voor brandstof is voor de huidige case al gunstiger voor CO<sub>2</sub> emissies dan de conventionele route. Kerosine heeft ten opzichte van methanol een hogere CO<sub>2</sub> ketenemissie (in ton CO<sub>2</sub>-eq./ton product) voor biomassa vergassing, zowel voor de huidige als de toekomstige case.

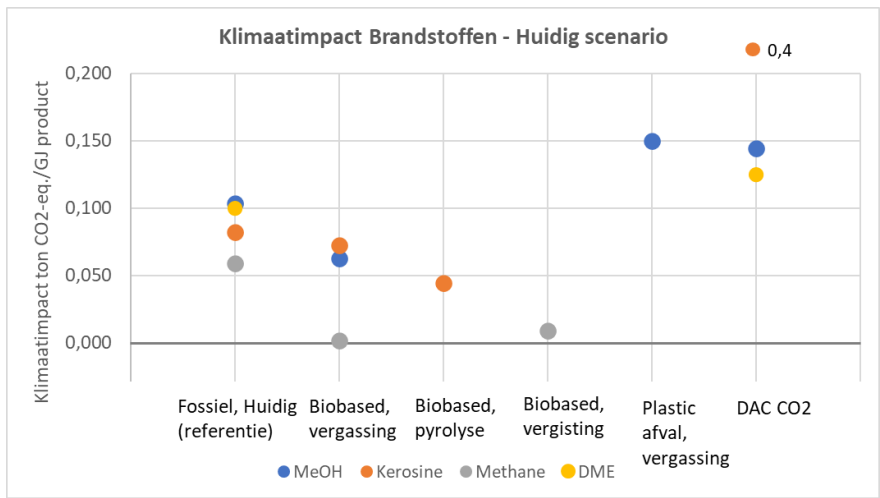
Als in de toekomst energie en waterstof verduurzaamd zijn, heeft de keten met CO<sub>2</sub> als grondstof de meeste potentie om de klimaatimpact te verlagen. Daarbij zijn methanol en DME het meest gunstig.

Echter, het kost grote hoeveelheden duurzame energie en waterstof om via deze routes te produceren en die moeten wel beschikbaar zijn. Vandaar dat het voor deze ketens van belang is om te kijken op welke schaal en op welke locatie dit ingezet kan gaan worden in het Rotterdamse gebied.

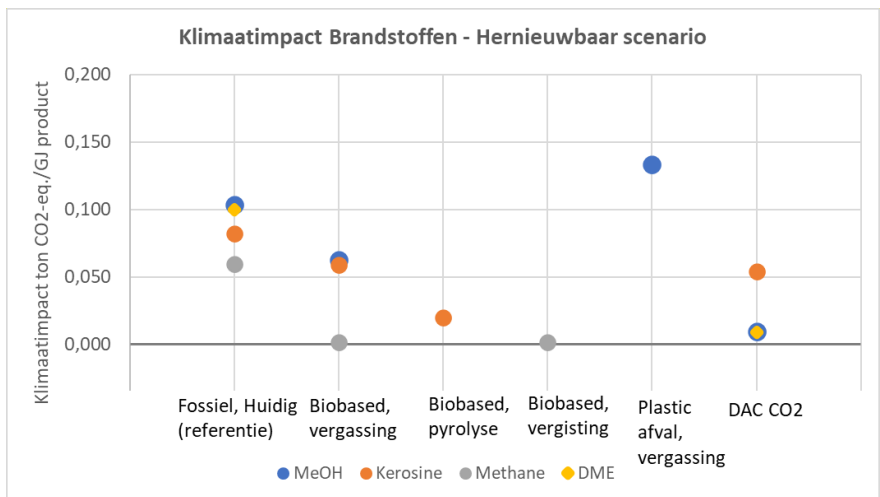
Waterstof kan ook rechtstreeks als brandstof gebruikt worden, wat omzettingenergie naar methanol of DME kan uitsparen. Echter, methanol en DME zijn als vloeistof makkelijker te hanteren in de bestaande infra structuur (opslag, vervoer via leidingen, gebruik voor scheepvaart, etc.). Afhankelijk van de toepassing zal bekeken moeten worden of waterstof rechtstreeks of de andere brandstoffen de goede keuze zijn.

In de grafieken hieronder is de klimaatimpact berekend per energie inhoud (figuur 8 en 9), wat voor brandstoffen een beter vergelijk oplevert. De klimaatimpact van kerosine en methanol ligt dicht bij elkaar, zowel voor de huidige als de toekomstige case, waarbij in de toekomstige case weinig verschil te zien is. Het gebruik van plastic afval als grondstof voor het methanolproces is vanuit de klimaatimpact gezien ongunstig. Er zijn veel betere alternatieve grondstoffen, zoals biomassa voor het huidige scenario en CO<sub>2</sub> als gunstige grondstof voor het toekomstige scenario.

Voor het hernieuwbare scenario blijkt methaan gemaakt uit biobased vergassing of vergisting het gunstigst, gevolgd door methanol en DME gemaakt uit CO<sub>2</sub> uit de lucht. Kerosine gemaakt uit CO<sub>2</sub> heeft in het hernieuwbare scenario een iets betere klimaatimpact dan de fossiele referentie, maar blijft achter bij methanol en DME. De beste grondstof voor duurzaam produceren van kerosine is secundaire biomassa.



Figuur 9. Visualisatie brandstofketens in één figuur (huidige scenario voor alle berekende opties behalve voor fossiel); per GJ product



Figuur 10. Visualisatie brandstofketens in één figuur (hernieuwbaar scenario voor alle berekende opties behalve voor fossiel); per GJ product

## 3 Conclusies

### 3.1 Chemicaliën

- › Methanol heeft de laagste klimaatimpact als dit gemaakt wordt met groene energie en waterstof uit de grondstof CO<sub>2</sub> uit de lucht. Methanol maken uit RDF levert het minste klimaatvoordeel op ten opzichte van de andere routes (Biobased en CO<sub>2</sub>), zowel voor de huidige als de toekomstige case.
- › Nafta gemaakt uit mixed plastic afval heeft met de huidige energiemix geen lagere klimaatimpact dan de fossiele referentie, maar in de toekomstige duurzame case is de impact wel significant lager (rond 80% reductie).
- › Biobased methanol/ethanol heeft voor de huidige case al een lagere klimaatimpact dan de fossiele referentie. Voor de toekomstige duurzame case met recycling, zal deze keten CO<sub>2</sub> op gaan slaan.
- › BTX gemaakt uit RDF, met duurzame energie en recycling, kan in de toekomst CO<sub>2</sub> in de keten opslaan. Voor de huidige case is de klimaatimpact groter dan de fossiele referentie.
- › Ethyleen productie kost veel energie en heeft daardoor in de huidige situatie een heel grote klimaat impact. Echter, voor de toekomstige duurzame case met recycling en groene energie zal de keten CO<sub>2</sub> kunnen opslaan.

### 3.2 Brandstoffen

Voor de conclusies van de klimaatimpact van de brandstoffen, is gebruik gemaakt van de emissies per GJ in plaats van per ton product. Aangezien brandstoffen gebruikt worden om energie te leveren, is dit een betere vergelijking dan per ton product.

Algemeen geldt dat brandstoffen geen negatieve klimaat impact hebben, in sommige gevallen wel een heel lage klimaat impact.

- › Methanol heeft de laagste klimaatimpact als dit gemaakt wordt met groene energie en waterstof uit de grondstof CO<sub>2</sub> uit de lucht.
- › Methanol maken uit plastic afval levert het minste klimaatvoordeel op ten opzichte van de andere routes (Biobased en CO<sub>2</sub>), zowel voor de huidige als de toekomstige case.
- › Kerosine gemaakt uit biomassa heeft in de huidige case al een gunstiger klimaat impact dan de fossiele referentie.
- › Kerosine gemaakt uit biomassa via vergassing of CO<sub>2</sub> uit de lucht via CCU heeft voor de toekomstige case een gunstiger klimaatimpact dan de fossiele referentie, maar de meest klimaat gunstige route is kerosine maken uit biomassa, via pyrolyse.
- › Methaan gemaakt via rioolslib vergassing of laagwaardige biomassa in een biovergister heeft in de huidige case al een heel lage klimaat impact en dat blijft ook zo voor de toekomstige case. Methaan, op deze wijze gemaakt, heeft verreweg de laagste klimaatimpact ten opzichte van de andere brandstoffen.
- › DME, gemaakt uit CO<sub>2</sub> uit de lucht heeft voor de huidige case een iets hogere klimaat impact, echter voor de toekomstige case is de klimaatimpact net zo laag als voor methanol. Alleen methaan heeft nog een lagere klimaatimpact.

# 4 Aannames en referenties

## 4.1 Aannames

Ketenstap	Aanname Huidige situatie	Aanname Hernieuwbaar scenario
Koolstofbron	Koolstof wordt als CO <sub>2</sub> afgevangen door middel van carbon capture (met MEA) bij een energiecentrale. CO <sub>2</sub> uit Direct Air Capture (DAC) is gezien als CO <sub>2</sub> opname van de lucht. De proces aannames zijn op basis van oplosmiddel (en warmte) en reactie van calcium en water.	In de toekomst is de energie/warmte/waterstof hernieuwbaar.
Energie- en materiaal-vraag bij afvang CO <sub>2</sub>	De energiebehoefte bedraagt 4.000 MJ en 166 kWh per ton CO <sub>2</sub> . Er is 2.863 L water nodig en minimale hoeveelheden MEA en active carbon (AC). Er wordt gerekend met een infrastructuur-footprint volgens literatuur. <sup>1</sup>	
Waterstof	Grijs waterstof (uit elektrolyse met groene energie) met CO <sub>2</sub> -footprint van 11,5 kg CO <sub>2</sub> /kg. <sup>2</sup>	Groene waterstof (uit elektrolyse met groene energie) met CO <sub>2</sub> -footprint van 1,2 kg CO <sub>2</sub> /kg. <sup>3</sup>
Elektriciteit	Huidige mix met CO <sub>2</sub> -footprint van 0,556 kg CO <sub>2</sub> /kWh.	Een toekomstige mix met CO <sub>2</sub> -footprint van 0,08 kg CO <sub>2</sub> /kWh.
Warmte	Warmte komt van secundair biogeen materiaal (biogene afvalstroom) met een CO <sub>2</sub> -footprint van 0,060kg CO <sub>2</sub> /MJ.	Warmte komt van secundair biogeen materiaal (biogene afvalstroom) met een CO <sub>2</sub> -footprint van 0,002 kg CO <sub>2</sub> /MJ.
End of life	Brandstoffen en voedingsproducten: end of life is directe emissie naar atmosfeer. Plastics en chemicaliën: materialen gaan naar een afvalverbrandingsinstallatie, waar energie wordt teruggewonnen met gemiddeld rendement (warmte en elektriciteit).	Brandstoffen en voedingsproducten: end of life is directe emissie naar atmosfeer. Plastics en chemicaliën: Maximale recycling (90%).

## 4.2 Referenties

- Effectiviteitsanalyse van Carbon Capture and Utilization (CCU) productketens, &Flux en TNO, Januari 2022.  
Toekomstbestendige koolstofstromen in de Zuid-Hollandse industrie, &Flux, CE Delft, Power 2 X, TNO, Juli 2023.

<sup>1</sup> Van der Giesen, C., Meinrenken, C.J., Kleijn, R., Sprecher, B., Lackner, K.S. and Kramer, G.J., 2017. A life cycle assessment case study of coal-fired electricity generation with humidity swing direct air capture of CO<sub>2</sub> versus MEA-based postcombustion capture. *Environmental Science & Technology*, 51(2), pp.1024-1034.

<sup>2</sup> Salhuyeh et al., 2017

<sup>3</sup> [https://north-sea-energy.eu/static/1a8004c68fb16f7ed588ef2d10ea51bf/9.-FINAL-NSE3\\_D4.1-Report-on-life-cycle-comparison-of-environmental-performance-of-grey-blue-green-hydrogen-pathways.pdf](https://north-sea-energy.eu/static/1a8004c68fb16f7ed588ef2d10ea51bf/9.-FINAL-NSE3_D4.1-Report-on-life-cycle-comparison-of-environmental-performance-of-grey-blue-green-hydrogen-pathways.pdf)

# Ondertekening

TNO › Energy & Materials Transition › Utrecht, 13 november 2023

Gerard van der Laan  
Research Manager

Yvette Veninga  
Project Manager

Energy & Materials Transition

Princetonlaan 6  
3584 CB Utrecht  
[www.tno.nl](http://www.tno.nl)

**TNO** innovation  
for life