



CO₂-emissiefactoren van NIKI-referentieproducten

Rapportage voor extern gebruik

CO₂-emissiefactoren van NIKI-referentieproducten

Rapportage voor extern gebruik

Dit rapport is geschreven door:
Coen van der Giesen, Koen van Dam, Kris Manna en
Diederik Jaspers

Delft, CE Delft, Juli 2025

Publicatienummer: 25.230482.101

Opdrachtgever: RVO

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

Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de
projectleider Coen van der Giesen (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 sinds 1978 werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.

Inhoud

Inleiding	4
A Ammoniak	6
B Benzeen, toluen en xyleen	19
C Etheen	48
D Low Density Poly Ethyleen (LDPE)	57
E Nafta	66
F Polyethyleen terephthalate (PET)	94
G Propyleen	103
H Polyurethaan (PUR)	113
I PolyvinylChloride (pvc)	122
J Waterstof	129

Inleiding

Deze rapportage laat de achterliggende berekeningen zien van de CO₂-emissiefactoren van 10 NIKI-referentieproducten. Deze berekeningen zijn uitgevoerd volgens de NIKI CO₂-emissiereductiemethode (versie 6-02-2025) en zijn terug te vinden op 'Lijst van NIKI-referentieproducten op site van RVO'. Een overzicht van de emissiefactoren voor deze 12 NIKI-referentieproducten vindt u in Tabel 1.

Tabel 1 – Overzicht van emissiefactoren voor NIKI-referentieproducten

NIKI-referentieproduct	Inputemissies (ton CO ₂ -eq./ton product)	Procesemissies (ton CO ₂ -eq./ton product)	Einde levensduur (ton CO ₂ -eq./ton product)	Emissiefactor (ton CO ₂ -eq./ton product)
Ammoniak	0,18	1,79	0,0	1,97
Benzeen	1,71	0,0	3,38	5,09
Etheen	1,0	0,70	3,15	4,85
LDPE	1,75	0,02	3,14	4,91
Nafta	0,72	0,08	3,15	3,95
PET	2,67	≈0	1,89	4,56
Propyleen	0,97	0,67	3,15	4,79
PUR	3,45		2,35	5,80
PVC	1,89	≈0	0,75	2,64
Tolueen	1,31	0,0	3,35	4,66
Waterstof	1,60	9,17	0,0	10,77
Xyleen	1,48	0,0	3,32	4,80

Voor de berekening is de in de NIKI-methode opgenomen bronnenhierarchy gevolgd. Hierbij is zo goed als mogelijk uitgegaan van de BREF-documenten, zonodig aangevuld met openbare bronnen, voor het opstellen van de massa- en energiebalans (MEB) van het productieproces.

Voor het uitvoeren van (een deel van) de berekeningen in deze rapportage wordt gebruik gemaakt van de ecoinvent-database (3.11-cutoff) welke enkel met een ecoinvent-licentie inzichtelijk is ([EULA new branding 08 11 2023.pdf](#)).

Rapportage voor extern gebruik

In deze rapportage is kwantitatieve informatie uit de ecoinvent-database weggelaten en vervangen door de aanduidingen “*EF*” (ecoinvent-emissiefactor) en “*ED*” (ecoinvent-datapunt). Deze aanduidingen worden ook toegepast in berekeningen waaruit kwantitatieve informatie uit de ecoinvent-database te herleiden is. Met een ecoinvent licentie is het mogelijk om via de in de rapportage aangegeven hyperlinks de achterliggende data in te zien.

A Ammoniak

Ammoniak

Deze bijlage beschrijft het proces van ammoniakproductie. Hierin wordt aangenomen dat waterstof op de locatie wordt geproduceerd middels Steam Methane Reforming, de meest gebruikte techniek binnen de EU.

Tabel A.1 geeft een overzicht van de CO₂-emissies over de levenscyclus. De massa- en energiebalans (MEB) van het productieproces is de basis van deze berekening (zie Paragraaf A.1). Op basis van de MEB worden ten eerste de directe CO₂-emissies en CO₂-emissies van afvalstromen van het productieproces berekend (zie Paragraaf A.3). De MEB is in principe opgesteld volgens de relevante BREF (Best available techniques REFERENCE document), in dit geval de *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Refining of Mineral Oil and Gas* en *BAT Reference document for the refining of mineral oil and gas* (EC, 2007a, 2015). Aanvullend raadplegen we academische literatuur op het gebied van ammoniakproductie (PBL & TNO, 2019). Op basis van de MEB worden ten eerste de directe CO₂-emissies en CO₂-emissies van afvalstromen van het productieproces berekend (zie Paragraaf A.3). Ten tweede laat de MEB zien welke inputs (materialen en energie) er nodig zijn voor het productieproces, hiermee worden de CO₂-emissies van de input berekend (zie Paragraaf A.2). Ten tweede laat de MEB zien welke inputstromen (materialen en energie) er nodig zijn voor het productieproces, hiermee worden de CO₂-emissies van de input berekend (zie Paragraaf A.2). Als laatste laat de MEB ook zien wat de koolstofinhoud van het eindproduct is, welke worden gebruikt om de CO₂-emissies bij einde levensduur te bepalen (zie Paragraaf A.4).

Tabel A.1 - De levenscyclusemissies van ammoniak

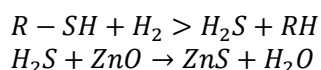
Levenscyclusfase	CO ₂ -emissies (ton CO ₂ -eq. per ton ammoniak)	
Inputstromen	0,18	Paragraaf A.2
Proces	1,79	Paragraaf A.3
Einde levensduur	0	Paragraaf A.4
Totaal	1,97	

Eventuele verschillen met bronnen zoals CO2emissiefactoren.nl zijn te verklaren door verschil in methodiek en scope (we nemen bijvoorbeeld waterstoftransport en compressie niet mee en nemen aan dat de input van aardgas volledig bestaat uit methaan). Verder hebben we geconstateerd dat er belangrijke invloed is van de mate van plantintegratie op het methaangebruik en CO₂-emissie (zie Paragraaf A.1).

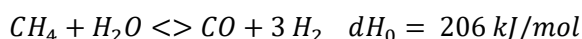
A.1 Massa- en energiebalans

Ammoniakproductie gebeurt vrijwel altijd middels het Haber-Bosch-proces, waarbij stikstof en waterstof onder hoge druk en temperatuur worden samengebracht en reageren tot ammoniak. Voorafgaand aan deze reactie zijn nog een aantal andere stappen nodig, waaronder stappen voor de productie van waterstof uit methaan. In totaal zijn er zo'n acht of negen stappen, enigszins afhankelijk van de specifieke fabriek. Voor deze studie gaan we uit van acht stappen in totaal, in lijn met de BAT-documentatie (EC, 2007a). Deze stappen worden hierna toegelicht in een procesdiagram, zie Figuur A.1.

Ontzwaveling: Eén van de twee voornaamste inputstromen voor de productie van ammoniak is aardgas met als voornaamste bestanddeel methaan. Methaan is echter, normaal gesproken, niet in pure vorm aanwezig, en aardgas bevat onder andere ook zwavelverbindingen. Dit zwavel is schadelijk voor een katalysator later in het proces en wordt daarom verwijderd. Dit gebeurt met behulp van waterstof en zinkoxide (ZnO). Deze waterstof is afkomstig uit purge gas van de ammoniaksynthesereactor (plant-integratie). Er wordt zinksulfide (ZnS) geproduceerd die na belading afgevoerd wordt. Het gaat om de volgende reacties:



Primaire reformer: De voornaamste omzetting van methaan naar waterstof vindt plaats in de primaire reformer. Stoom wordt extern geproduceerd en over het algemeen in een steam-to-carbon (S/C) molverhouding van 3:1 toegevoegd. Op deze manier verloopt de reactie in de gewenste richting en wordt het gros van de methaan omgezet via de endotherme steam reforming-reactie:

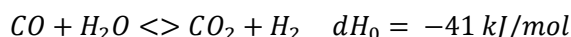


met dH₀ de enthalpieverandering onder standaardcondities.

De temperatuur in de reactor ligt zo rond de 400-600 °C. De toegevoegde warmte verlaat de reactor deels via warm rookgas dat gebruikt wordt om de inkomende methaan te verwarmen en om stoom te produceren.

Secundaire reformer: In de primaire reformer heeft nog niet alle methaan gereageerd en daarom wordt er een secundaire reformer toegepast. Hierin wordt vrijwel alle resterende methaan via dezelfde reactie als in de primaire reformer omgezet in waterstof. Anders dan in de primaire reformer wordt de warmte geproduceerd in de reformer zelf. Dit is mogelijk doordat lucht (met de later benodigde stikstof) in deze processtap wordt toegevoegd en dus methaan intern verbrandt wordt. Voordelen hiervan zijn dat de reactie adiabatisch kan verlopen (geen warmte-uitwisseling met de omgeving), hoge temperaturen worden hiermee bereikt en de methaan maximaal wordt omgezet. Vóór de volgende processtap wordt de gevormde warmte weer verwijderd middels een warmtewisselaar.

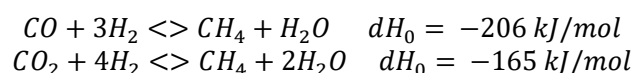
Shift converter: Naast waterstof wordt er in de primaire en secundaire reformer ook koolstofmonoxide (CO) geproduceerd. Het grootste deel hiervan wordt in de shift convertor omgezet in koolstofdioxide (CO₂) en extra waterstof. De gevormde CO₂ wordt relatief makkelijk verwijderd in een latere stap. Dit is een exotherme reactie en wordt over het algemeen in twee stappen (met respectievelijk hogere en lagere temperatuur) gedaan: op deze manier wordt de CO maximaal verwijderd. De reactie wordt ook wel de watergas-shift-reactie genoemd en ziet er als volgt uit:



Na de shift converter is er nog een overmaat stoom aanwezig die wordt verwijderd voordat het procesgas naar de CO₂-verwijderaar gaat, omdat de stoom kan zorgen voor verdunning van het CO₂-oplosmiddel dat daarvoor gebruikt wordt en omdat de stoom het evenwicht negatief beïnvloedt.

CO₂-verwijderaar: In deze stap wordt de CO₂ verwijderd, waarmee bijna alle aan het systeem toegevoegde koolstof (in de vorm van methaan) het proces weer verlaat. Er kan zowel van een chemisch als fysisch absorptiemiddel gebruik gemaakt worden. Voor deze processtap is energie nodig in de vorm van warmte en elektriciteit. De CO₂ wordt in sommige gevallen deels weer gebruikt als grondstof voor bijvoorbeeld de productie van ureum, maar wordt in de scope van deze studie gezien als emissie.

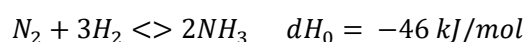
Methanisatie reactor: Nadat het gros van de CO₂ verwijderd is zijn er in het procesgas nog kleine hoeveelheden CO en CO₂ aanwezig, welke in de ammoniasynthesereactor de katalysator kunnen beschadigen en daarom zoveel mogelijk verwijderd moeten worden. Dit gebeurt via hydrogenatie, waarbij beide omgezet worden in methaan en stoom via de volgende exotherme reacties:



Het ontstane water in deze reactie wordt verwijderd door koeling en absorptie.

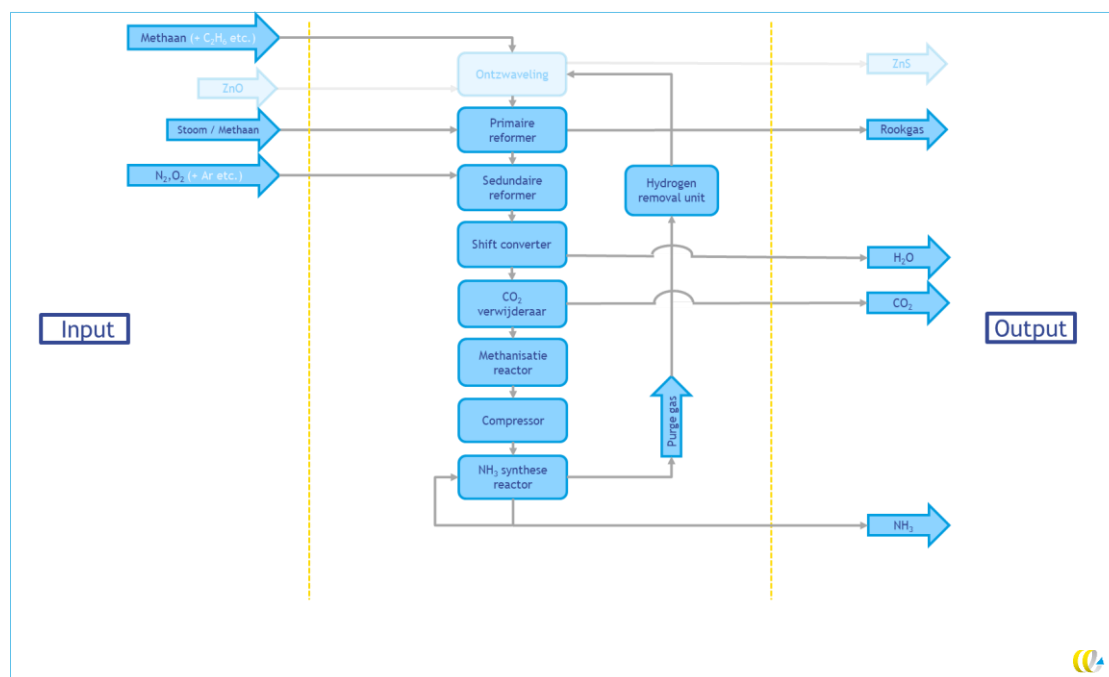
Compressor: In de compressor wordt de druk van het procesgas verhoogd om gunstige reactieomstandigheden te creëren voor de ammoniasynthesereactor. Deze compressoren worden doorgaans aangedreven door stoomturbines, waarbij gebruik wordt gemaakt van stoom uit proceswarmte van eerdere stappen (plantintegratie).

NH₃ synthesesereactor: Ammoniaksynthese vindt plaats middels het Haber-Bosch-proces, waarbij stikstof en waterstof in een optimale molverhouding van ongeveer 1:3, worden samengebracht onder de juiste temperatuur en druk. Door ongunstige evenwichtsomstandigheden wordt echter maar een relatief klein deel van de stikstof en waterstof direct omgezet. In een recycle worden stikstof en waterstof teruggevoerd en ammoniak afgevoerd, zodat de ammoniakproductie gemaximaliseerd worden. De volgende exotherme reactie vindt plaats:



Een continue productstroom van gas dat uit de reactor komt (en zowel stikstof, waterstof als ammoniak bevat) teruggepompt in de reactor. Aangezien er nog een kleine hoeveelheid methaan en inerte gasen aanwezig is, heeft dit de neiging om te accumuleren. Om dit te voorkomen wordt een purge toegepast. Deze wordt voor elektriciteit gebruikt (plantintegratie).

Figuur A.1 - Het produceren van ammoniak door stoomreforming



Massabalans

Voor het opstellen van de massa- koolstof- en energiebalansen zijn een aantal simplificaties toegepast:

Bij onzuiver aardgas is ontzwaveling essentieel. De mate van ontzwaveling hangt af van het gehalte in het aardgas. Dat kan per bron/regio verschillen van laag tot hoog, evenals de exacte samenstelling van het aardgas als geheel. En dit ontzwavelen kost waterstof en zinkoxide, dus genereert dit verschillende broeikasgas emissies. We passen in deze factsheet daarom de simplificatie toe dat de aanvoer van aardgas volledig bestaat uit gezuiverd methaan en laten de ontzwaveling buiten beschouwing. De balansen zijn opgebouwd op basis van molverhoudingen die zijn omgezet in massa.

We nemen aan dat de reacties aflopen, tenzij expliciet anders aangegeven. De BAT (EC, 2007a, 2015) wordt hierbij zo veel mogelijk aangehouden en eventueel aangevuld met inzichten uit de literatuur, zoals MIDDEN-rapporten (PBL & TNO, 2019). SMR-installaties kennen in de praktijk onderlinge verschillen qua type, capaciteit, procescondities en exacte samenstelling van de grondstof- en recyclestromen. De getallen dienen daarom ter indicatie.

In Tabel A.2 staan de massa- en koolstofbalansen voor ammoniakproductie per ton. De primaire reformer heeft als input aardgas (waarvan 0,41 ton CH₄ dient als feedstock) en lucht (1,1 ton bestaande uit O₂, N₂ en H₂O). De 1 ton NH₃ die gedurende het proces wordt geproduceerd verlaat uiteindelijk de ammoniaksynthesereactor als product en de resterende gassen worden intern weer gerecycled. De koolstofbalans beschrijft de koolstofinhoud van de beschreven reacties.

Tabel A.2 - Massa- en koolstofbalans voor de productie van 1 ton ammoniak

Proces	Inputstromen	Outputstromen	Inputstromen	Outputstromen
	ton	ton	Koolstofton	Koolstofton
CH ₄	0,63		0,47	
H ₂ O	1,50	1,16		
CO ₂		1,73		0,47
CO				
N ₂	0,85			
O ₂	0,25			
NH ₃		1,0		
Totaal	3,23	3,89	0,47	0,47

Aardgasbehoefte

Zoals eerder vermeld zijn de balansen opgebouwd op basis van de BREF. Aanvullend hebben we met inzichten uit de literatuur bepaald hoeveel aardgas benodigd is voor de productie van 1 ton ammoniak. De BREF hanteert een energie-input uit aardgas (som van grondstof en brandstof) van 27,6 GJ/ton NH₃. De exacte onderverdeling naar processtap is daarbij onbekend. De MIDDEN-rapporten (PBL & TNO, 2019) geven daar wel aanvullingen voor die we vervolgens hebben geschaald zodat we op het totaal-behoefte aan energie komen uit de BREF: ca. 20,4 GJ/ton NH₃ als grondstof en 10,8 GJ ton/NH₃ als brandstof. Omgerekend naar tonnen met een verbrandingswaarde van methaan van 50 MJ/kg CH₄ is dit gelijk aan 0,63 ton CH₄/ton NH₃.

Luchtbehoefte

De behoefte aan lucht is afgelezen uit paragraaf 2.3.3 uit de BREF en is gelijk aan 1,1 ton/ton NH₃, waarvan het aandeel stikstoftoevoer gelijk is aan 0,85 ton N₂/ton NH₃, het restant is gealloceerd aan zuurstof (EC, 2007a).

Plantintegratie

Zoals eerder vermeld speelt de mate van plantintegratie een belangrijke rol. We hebben geconstateerd dat er belangrijke invloed is van de mate van plantintegratie op het methaangebruik en CO₂-emissie. Tekstkader A 1 beschrijft de impact op levenscyclus-emissies voor ammoniakproductie:

Tekstkader A 1 – Impact van plantintegratie op levenscyclusemissies

Bij de productie van waterstof speelt de mate van plantintegratie (gebruik van reststromen voor (non-)energetisch gebruik) een belangrijke rol. In geval van ammoniakproductie vindt er plantintegratie plaats. Dit hebben we gevalideerd met het PRELIM-raffinagemodel (versie 1.6, 2022). Daarin wordt zowel een casus beschreven mét als zonder plantintegratie. De in deze factsheet gevonden waarden bevinden zich tussen deze twee extremen in, wat impliceert dat er sprake is van gedeeltelijke plantintegratie.

Energiebalans

Tabel A 3 geeft de energiebalans weer die bij de productie van ammoniak hoort. De energie is afkomstig uit de verbanding van aardgas (hier aangenomen dat dit een methaanstroom is) en wordt bij de endotherme reactie in de secundaire reformer omgezet in chemische energie. We hebben hier data uit de BREF aangehouden als referentie voor de berekening en aangevuld met data uit het MIDDEN-rapport (PBL & TNO, 2019). Voor het produceren van 1 ton ammoniak is 27,6 GJ aan energie nodig. Deze toegevoerde energie is grotendeels afkomstig uit de verbanding en toevoer van aardgas (hier aangenomen dat dit een methaanstroom is). Bij de endotherme reactie in de secundaire reformer wordt deze energie weer omgezet in chemische energie. We nemen hier aan dat de toegevoerde energie hiermee volledig wordt benut. Tijdens de watergas-shift-reactie en gedurende de methanisatiestap komt er warmte vrij. Bovendien komt er in de laatste stap van ammoniaksynthese ook warmte vrij en wordt er wat stoom geproduceerd. Deze warmtestromen worden afgevoerd door middel van koeltorens of weer gerecupereerd en nuttig gebruikt in andere industriële processen zodat deze niet vergaan. Echter zijn dergelijke energiestromen buiten beschouwing gelaten voor deze factsheet (plantintegratie).

Tabel A 3 - Energiebalans voor de productie van ammoniak

Energie	Input	Output
	GJ/ton	GJ/ton
Methaan feed	20,4	
Methaan fuel	10,8	
Elektriciteit	0,3	
Stoom	-3,9	
Onbekend		27,6
Totaal	27,6	27,6

De energiebalans geeft een simpel overzicht van de energiestromen. Voor de volledigheid is op te merken dat tijdens het productieproces energiestromen ook gerecupereerd worden naar andere processtappen waarvan moeilijk te bepalen is of ze in de energiebalans zijn meegenomen. De BAT geeft daarvoor de volgende concrete beschrijvingen (European Commission, 2007):

- **Shift convertor:** Dit is een exotherme reactie en wordt over het algemeen in twee stappen (met respectievelijk hogere en lagere temperatuur) gedaan. Op deze manier wordt de CO maximaal verwijderd. De hete gassen die de laagtemperatuurshiftreactor verlaten worden eerst nog gekoeld om overtollig stoom te condenseren en vervolgens te verwijderen voordat deze de CO₂-verwijderaar in gaan.
- **Methanisatie:** In het procesgas zitten in deze stap nog kleine hoeveelheden CO en CO₂ die in de ammoniasynthesereactor de katalysator kunnen beschadigen. Het verwijderen van dergelijke onzuiverheden gebeurt via hydrogenatie. Het ontstane water in deze reactie wordt verwijderd door koeling en absorptie.
- **NH₃-synthese:** Tijdens de exotherme reactie neemt het volume af, waardoor een hogere druk en lagere temperatuur de reactie bevorderen. De ijzerkatalysatoren worden daarom in lagen verdeeld om de temperatuur te regelen, waarbij gassen worden gekoeld met synthesesgas of stoom.

A.2 CO₂-emissies: Input

De totale CO₂-emissies van de inputstromen bedragen 0,18 ton CO₂-eq./tonNH₃.

Van de twee inputstromen is de emissiefactor voor aardgas (verondersteld dat dit voornamelijk methaan is) bekend vanuit de bron (CO₂emissiefactoren.nl, 2024).

We gaan daarbij uit van de emissiefactor van de heat benchmark uit paragraaf 5.1.3.2. uit de NIKI-methode (European Comission, 2021). ¹

Het gebruik van aardgas als brandstof voor de verbranders zal de grootste impact hebben op de uitstoot van CO₂. In Tabel A.4 zijn de CO₂-emissies van de inputstromen gegeven, die in totaal gelijk zijn aan 0,18 ton CO₂-eq./tonNH₃. Voor de emissiefactor van methaan hebben we de WTT-emissiefactor van aardgas van 0,355 kg CO₂-eq./Nm³ gedeeld door de verbrandingswaarde van 31,65 MJ/Nm³ voor aardgas, wat resulteert in 0,0112 ton CO₂-eq./GJ.

Tabel A.4 - Input van massa- en energiestromenstromen en gerelateerde CO₂-emissies per eenheid referentieproduct (1 ton NH₃)

Stof	Eenheid	Hoeveelheid	Emissiefactor	Emissie	Referentie
		Eenheid/ton	ton CO ₂ -eq./ eenheid	ton CO ₂ -eq./ ton	
Methaan feed	GJ	20,4	0,0112	0,229	(CO ₂ emissiefactoren. nl, 2024)
Methaan fuel	GJ	10,8	0,0112	0,121	(CO ₂ emissiefactoren. nl, 2024)
Elektriciteit	GJ	0,3	0,0389	0,012	Benchmark NIKI- methode 5.1.3.2
Stoom	GJ	-3,9	0,0473	-0,184	Heat benchmark NIKI- methode 5.1.3.2
Totaal				0,18	

¹ Voor warmte is deze benchmark gelijk aan 47,3 tCO₂/TJ.

A.3 CO₂-emissies: Proces

In Tabel A.5 zijn de procesemissies weergegeven. Deze bedragen in totaal 1,79 ton CO₂-eq./tonNH₃. Voor de emissiefactor van methaan hebben we de TTW-factor van aardgas van 1.779 kg CO₂-eq./Nm³ gedeeld door de verbrandingswaarde van 31,65 MJ/Nm³ voor aardgas, wat resulteert in 0,0562 ton CO₂-eq./GJ.

De procesemissies bestaan verder uit directe emissies, emissies uit afvalstromen en emissies uit storingen, stoppen en starten. We geven een toelichting op elk van deze procesemissies aangezien een bedrijf bij eventuele verduurzaming mogelijk delen van zijn bestaande productieproces wil aanpassen.

Tabel A.5 - CO₂-emissies gerelateerd aan het proces per eenheid referentieproduct (ton NH₃)

Stof	Eenheid	Hoeveelheid	Emissiefactor		Emissie	Referentie
		Eenheid/ton	kg CO ₂ -eq./Nm ³	ton CO ₂ -eq./eenheid	ton CO ₂ -eq./ton NH ₃	
Feed: CH ₄	GJ	20,4	1.779	0,0562	1,147	(CO ₂ emissiefactoren.nl, 2024)
Fuel: CH ₄	GJ	10,8	1.779	0,0562	0,607	(CO ₂ emissiefactoren.nl, 2024)
Onderhoud/storing, etc. (2%-regel)	Ton				0,035	NIKI-methode
Totaal					1,79	

Directe emissies

De directe emissies komen voornamelijk als rookgas vanuit de (secundaire) reformer. Anders dan in de primaire reformer wordt de warmte geproduceerd in de reformer zelf. Dit is mogelijk doordat lucht en aardgas in deze processtap worden toegevoegd en aardgas intern deels verbrandt om de benodigde warmte te leveren. Daarnaast komt CO₂ vrij bij de CO₂-afscheiding in de gaszuiveringsstap, waar CO₂ uit het synthesesgas wordt verwijderd om zuivere waterstof te verkrijgen.

In Tabel A.6 zijn de directe emissies gerelateerd aan het proces gegeven, dit is in totaal 1,75 ton CO₂-eq./ton NH₃.

Tabel A.6 - Directe CO₂-emissies gerelateerd aan het proces per eenheid referentieproduct (1 ton NH₃)

Stof	Eenheid	Hoeveelheid	Emissiefactor	Emissie
		Eenheid/ton	ton CO ₂ -eq./eenheid	ton CO ₂ -eq./ton NH ₃
Feed: CH ₄	GJ	20,4	0,0562	1,147
Fuel: CH ₄	GJ	10,8	0,0562	0,607
Totaal				1,75

Emissies uit afvalstromen

Er zijn geen emissies uit afvalstromen.

Emissies uit storingen, stoppen en starten

Het restant van circa 0,04 ton CO₂-eq./ton NH₃ is toe te kennen aan emissies gerelateerd aan onderhoud. We houden daarbij de 2%-regel aan zoals beschreven in de methodiek, zie Tabel A.7.

Tabel A.7 - CO₂-emissies gerelateerd aan het proces per eenheid referentieproduct (1 ton NH₃)

Stof	Eenheid	Hoeveelheid	Emissiefactor	Emissie
		Eenheid/ton	Ton CO ₂ -eq./eenheid	Ton CO ₂ -eq./ton NH ₃
Onderhoud/storing, etc. (2%-regel)	Ton	-	-	0,04
Totaal				0,04

A.4 CO₂-emissies: Einde levensduur

In industriële processen, zoals bij kunstmestproductie, kan ammoniak wel reageren met andere stoffen en indirect CO₂-emissies veroorzaken. Ammoniak zelf stoot dus geen CO₂ uit bij einde levensduur, maar indirecte emissies kunnen wel voorkomen, afhankelijk van de toepassing.

Bij het eindverbruik van ammoniak als energiedrager komt ook geen CO₂ vrij want ammoniak bevat geen koolstof, dus bij afbraak of verbranding ontstaat geen CO₂. Bij verbranding van ammoniak komen vooral stikstofoxide (N₂) en water vrij.

Eventuele stikstofoxidevorming (NO_x) dient met een geschikte brander te worden onderdrukt/vermeden.

Literatuurlijst

- CO2emissiefactoren.nl. (2024, 10-03-2025). *CO2emissiefactoren 2024*. CO2 emissiefactoren. <https://co2emissiefactoren.nl/factoren/2024/download/>
- EC. (2007). *Large Volume Inorganic Chemicals - Ammonia, Acids and Fertilisers*.
- EC. (2015). *BAT Reference document for the refining of mineral oil and gas*.
- European Comission. (2021). *Update of benchmark values for the years 2021 – 2025 of phase 4 of the EU ETS*.
- European Commission. (2007). *Large Volume Inorganic Chemicals - Ammonia, Acids and Fertilisers*.
- PBL, & TNO. (2019). *Decarbonisation options for the Dutch fertiliser industry*.

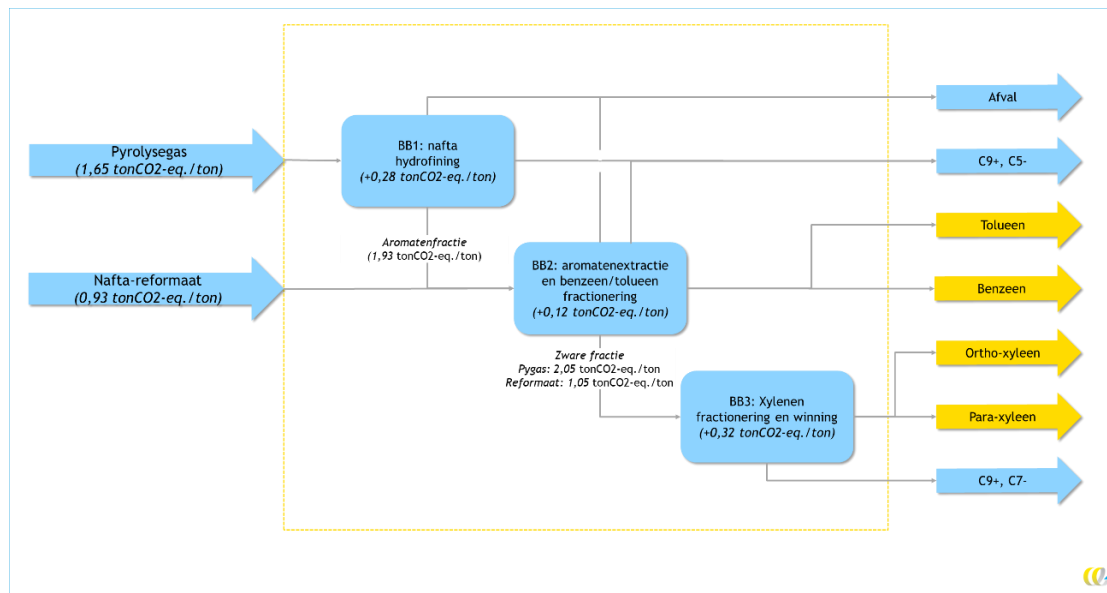
B Benzeen, toluen en xyleen

Benzeen, toluen en xyleen (BTX)

Samenvatting emissiefactoren BTX

Paragraaf B.1, B.2 en B.3 en geven een samenvatting van de emissiefactoren voor Benzeen, Toluene en Xyleen. De achterliggende berekeningen vindt u in de hierop volgende hoofdstukken.

Figuur B.1 - Samenvatting van de opbouw van de input- en procesemissies van de productie van BTX. De specifieke emissiefactor per wordt bepaald door de opbrengst per ingaande stroom. Deze figuur laat de end-of-life-emissiefactoren buiten beschouwing



B.1 Benzeen

Benzeen wordt geproduceerd via hydrofining en aromatenextractie uit een aromaten-fabriek. Het kan hierbij worden gemaakt uit de grondstoffen pygas en uit nafta-reformaat.

Daarom zijn er twee emissiefactoren beschikbaar, afhankelijk van de ingaande stroom. De marktmix is bekend vanuit ecoinvent, *ED%* van het benzeen in Europa wordt gemaakt uit pygas en *ED%* uit reformaat. De losse emissiefactoren zijn op basis hiervan gewogen. De totale emissiefactor van benzeen is daarmee 5,09 CO₂-eq./ton benzeen.

Tabel B 1 - De emissiefactoren van benzeenproductie uit pygas, reformaat en gezamenlijk

Levenscyclusfase	CO ₂ -eq.-emissies (ton CO ₂ -eq./ton benzeen)	Relevant hoofdstuk of bron
Aandeel pygas	<i>ED%</i>	market for benzene - Europe - benzene ecoQuery
Aandeel reformaat	<i>ED%</i>	market for benzene - Europe - benzene ecoQuery
Input pygasproces	2,10	Paragraaf B.9
Input reformaat	1,05	Paragraaf B.12
Input gewogen	1,71	
Proces pygas	0	Paragraaf B.8
Proces reformaat	0	Paragraaf B.11
Proces gewogen	0	
Einde levensduur	3,38	Tabel B.22
Benzeen	5,09	

B.2 Tolueen

Tolueen wordt geproduceerd via hydrofining en aromatenextractie uit een aromaten-fabriek. Het kan hierbij worden gemaakt uit de grondstoffen pygas en uit nafta-reformaat.

Daarom zijn er twee emissiefactoren beschikbaar, afhankelijk van de ingaande stroom. De marktmix is bekend vanuit ecoinvent, *ED%* van het benzeen in Europa wordt gemaakt uit pygas en *ED%* uit reformaat.

De losse emissiefactoren zijn op basis hiervan gewogen. De totale emissiefactor van tolueen is daarmee 4,66 CO₂-eq./ton tolueen.

Tabel B.2 - De emissiefactoren van toluenproductie uit pygas, reformaat en gezamenlijk

Levenscyclusfase	CO ₂ -eq.-emissies (ton CO ₂ -eq./ton benzeen)	Relevant hoofdstuk of bron
Aandeel pygas	ED%	market for toluene, liquid - Europe - toluene, liquid ecoQuery
Aandeel reformaat	ED%	market for toluene, liquid - Europe - toluene, liquid ecoQuery
Input pygasproces	2,10	Paragraaf B.9
Input reformaat	1,05	Paragraaf B.12
Input gewogen	1,31	
Proces pygas	0	Paragraaf B.8
Proces reformaat	0	Paragraaf B.11
Proces gewogen	0	
Einde levensduur	3,35	Tabel B.22
Toluene	4,66	

B.3 Xyleen

Xyleen is een stof die in drie verschillende isomeren bestaat: paraxyleen, orthoxyleen en metaxyleen. Xyleen wordt geproduceerd via hydrofining en aromatenextractie uit een aromatenfabriek, vervolgens worden de verschillende isomeren van xyleen gescheiden in een laatste xylenenextractie. Xyleen kan worden gemaakt uit de grondstoffen pygas en uit nafta-reformaat. Over het algemeen wordt metaxyleen niet gewonnen, maar deze heeft dezelfde emissiefactor als de andere stromen.

Daarom zijn er twee emissiefactoren beschikbaar, afhankelijk van de ingaande stroom. De emissiefactoren voor paraxyleen en orthoxyleen zijn hetzelfde. De marktmix is bekend vanuitecoinvent, ED% van het xyleen in Europa wordt gemaakt uit pygas en ED% uit reformaat. De losse emissiefactoren zijn op basis hiervan gewogen. De totale emissiefactor van de isomeren is daarmee 4,80 CO₂-eq./ton xyleen.

Tabel B.3 - De emissiefactoren van para-, meta- en orthoxyleenproductie uit pygas, reformaat en gezamenlijk

Levenscyclusfase	CO ₂ -eq.-emissies (ton CO ₂ -eq./ton benzeen)	Relevant hoofdstuk of bron
Aandeel pygas	ED%	market for xylene, mixed - Europe - xylene, mixed ecoQuery
Aandeel reformaat	ED%	market for xylene, mixed - Europe - xylene, mixed ecoQuery
Input pygasproces	2,42	Tabel B.18
Input reformaat	1,37	Tabel B.20
Input gewogen	1,48	
Proces pygas	0	Paragraaf B.13
Proces reformaat	0	Paragraaf B.15
Proces gewogen	0	
Einde levensduur	3,32	Tabel B.22
Paraxyleen, orthoxyleen, metaxyleen	4,80	

BTX-productie in een aromatenfabriek

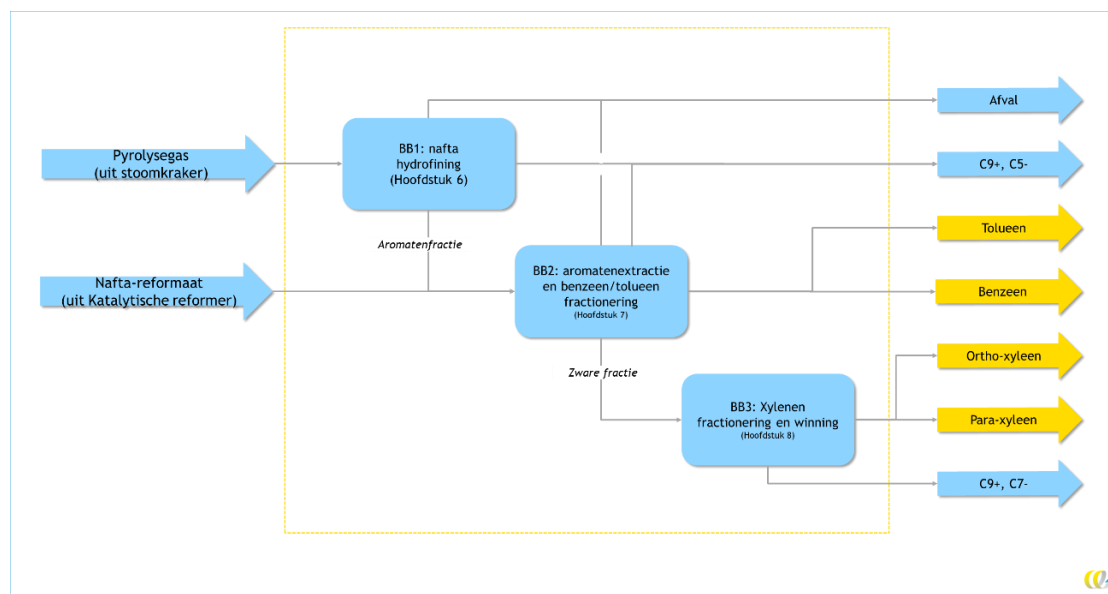
In een aromatenfabriek worden verschillende aromaten gewonnen. Het gaat om stromen die ook wel BTX worden genoemd: benzeen, toluen en xyleen. Xyleen valt weer onder te verdelen in para-, ortho- en metaxyleen. Er bestaat ook metaxyleen, maar dit wordt niet beschreven in de BREF die gebruikt wordt voor berekening van de emissiefactoren en is daarom hier niet meegenomen.

Aromaten worden in de Europese Unie voor 68% gemaakt uit reformaat en voor 28% uit pyrolysegas (ook wel pygas) uit een nafta-stoomkraker. De overige 4% wordt uit cokes gemaakt en niet beschreven in de BREF, dit laten wij hier buiten beschouwing.

In deze factsheet geven wij eerst samenvattend voor elke aromaat uit een specifieke grondstof (pygas of nafta-reformaat) de emissiefactor (hiervoor). Vervolgens bepalen we de emissiefactor van de marktmix.

Ten slotte beschrijven wij de verschillende productiestappen in meer detail en berekenen we de emissiefactor per product en per grondstof. Figuur B.2 geeft een gesimplificeerd overzicht van BTX-productie gebaseerd op de BREF. Elke productiestap (c.q. bouwsteen) wordt in een apart hoofdstuk beschreven waarbij ook de emissiefactor per bouwsteen is berekent volgens de NIKI-methode.

Figuur B.2 - Simplificatie van productiestappen om aromaten te maken zoals beschreven in de BREF



Bron: (Joint Research Centre (European Commission), 2017).

Aromatenfabriek

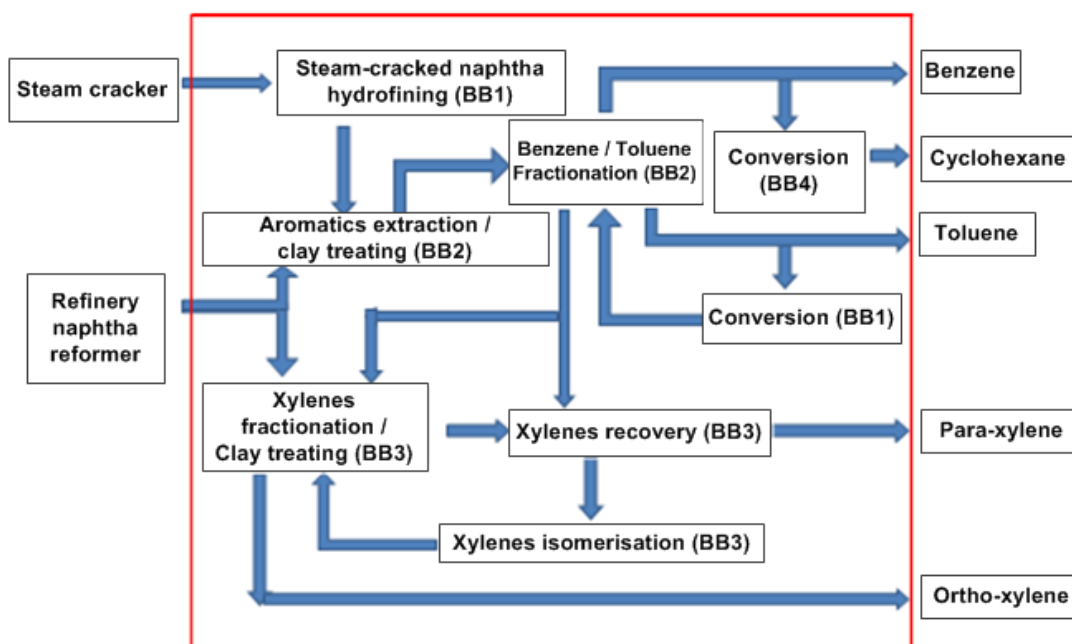
In de BREF (Joint Research Centre (European Commission), 2017) wordt de aromatenfabriek beschreven aan de hand van vier onderdelen (hierna: BB1-BB4, zie ook Figuur B.3). De voorliggende berekening is uitgevoerd voor drie onderdelen, de vierde (BB4) beschrijft de productie van cyclohexaan uit benzeen en valt buiten de scope van deze berekening omdat het hier geen B, T of X betreft.

In Figuur B.3 zijn de verschillende productiestappen voor aromaten te zien. Hierin is ook te zien dat er twee ingaande stromen zijn. Dit is pygas (uit de nafta-stoomkraker), waar via stap BB1, BB2 en BB3 aromaten uit worden gemaakt, en optelt tot 28% van de ingaande stromen. De andere ingaande stroom is nafta-reformaat. Reformaat verzorgt 68% van de ingaande (massa)stromen van de Europese aromatenfabrieken.

Hierbij worden aromaten gemaakt via BB2 en BB3. Wij beschrijven in deze factsheet opeenvolgend:

- **BB1:** Het hydrofinen en fractioneren van pygas om de aromatenfractie hieruit te isoleren.
- **BB2:** Extractie en fractionering van benzeen, toluen en xyleen uit pygas.
- **BB2:** Extractie en fractionering van benzeen, toluen en xyleen uit nafta-reformaat.
- **BB3:** Extractie en fractionering van ortho- en paraxyleen uit pygas.
- **BB3:** Extractie en fractionering van ortho- en paraxyleen uit nafta-reformaat.

Figuur B.3 - De productiestappen om van verschillende inputstromen aromaten te maken



Bron: (Joint Research Centre (European Commission), 2017).

BB1, het eerste proces, geldt alleen voor het pygas. Pygas is een van fracties die in een stoomkraker uit nafta gemaakt worden, net als ethyleen en propyleen. Pygas is een koolwaterstoffractie, die rijk is aan aromaten. In de BB1-stap moet deze stroom worden voorbehandeld in een hydrofiner. Hierbij wordt waterstof toegevoegd voor twee doelen. Ten eerste reageert stikstof en zwavel tot ammoniak en waterstofsulfide die kunnen worden afgescheiden. Ten tweede moeten de diolefines volledig gehydrogeneerd worden, oftewel alle dubbele bindingen moeten verzadigd worden (tot enkele bindingen). Als tweede stap van BB1 wordt de aromatenfractie afgescheiden van de resterende stromen in een destillatiestap.

In BB2 worden zowel het pygas als het reformaat uit een nafta-reformer verwerkt. Hier worden eerst de aromaten geëxtraheerd door middel van een selectief oplosmiddel, waarin alleen aromaten oplossen. Vervolgens worden met een 'clay treatment' kleine fracties olefinen omgezet in zwaardere moleculen, zodat deze afgescheiden kunnen worden in de volgende destillatiestap. Als laatste stap zijn er opvolgende destillatiestappen waar benzeen, toluen en xyleen van elkaar worden gescheiden.

In BB3 richt zich op de kleibehandeling en het fractioneren van xyleen, het scheiden van paraxyleen en orthoxyleen, en de isomerisatie van xyleen. Bij het fractioneren wordt het xyleenmengsel gescheiden via een kristallisatie of adsorptiestap.

Het scheiden van xyleenfracties richt zich voornamelijk op paraxyleen, maar orthoxyleen en metaxyleen worden ook geproduceerd.

In Figuur B.3 is ook nog een BB4-stap, deze wordt ook in de BREF beschreven. Hierin wordt benzeen omgezet in cyclohexaan. Deze wordt niet in deze factsheet beschreven.

Tekstkader B 1 - Naamgeving fracties

Fracties in een aromatenfabriek

Verschillende fracties in een aromatenfabriek worden aangegeven met een letter 'C', een getal en een + of – teken. Met deze combinatie wordt een bepaalde fractie van koolwaterstoffen aangegeven. In een aromatenfabriek worden veel fracties gescheiden op kookpunt, wat een redelijke maat voor molmassa is.

Zo kan een zin zijn: 'de C5- fractie wordt afgescheiden van de C6+ fractie'. Dit betekent dat de fractie van alle koolwaterstoffen met vijf koolstofatomen en minder wordt afgescheiden van de fractie van alle koolwaterstoffen met zes koolstofatomen of meer.

Energieverbruik

Hoewel de verschillende stappen in deze productieprocessen complex zijn, zijn deze vrij goed samengevat in de BREF. Het specifieke energieverbruik is goed omschreven in tabel 4.3 in de BREF LVOC (Joint Research Centre (European Commission), 2017).

Omdat het rendement, de opbrengst van producten uit de ingaande stroom op massa-basis, voor alle stappen zeer dichtbij 100% (> 95%) zitten, kunnen hiermee de emissiefactoren berekend worden volgens de NIKI-methode. Immers, alle emissies kunnen over de gehele productmix verdeeld worden, wat in dit geval hetzelfde is als het verdelen over de hele inputstroom. De specifieke verdeling over de outputstromen is hiermee niet relevant.

Figuur B.4 - Het energieverbruik voor de verschillende productiestappen volgens de BREF LVOC

Table 4.3: Energy usage per tonne of product

		Pygas BB1	BTX extraction BB2	Xylene fractionation BB3
		(kWh/t)	(kWh/t)	(kWh/t)
Total	Max.	462	1564	2854
	Min.	418	633	1757
Steam	Min.	182	531	382
	Max.	363	622	1398
Electrical	Min.	15	11	292
	Max.	54	72	320
Fuel	Min.	40	149	1054
	Max.	226	875	3960
Source: Data from data collection (2012).				

Bron: (Joint Research Centre (European Commission), 2017).

BB1: Het hydrofinen en fractioneren van pygas

De eerste stap, BB1, is het voorbehandelen van pygas uit een nafta-stoomkraker, om zo een aromaatrijke stroom te krijgen die verder wordt behandeld in BB2. Hierbij wordt zwavel verwijderd en worden drie fracties van elkaar gescheiden. De grootste fractie is de aromatenfractie, dit is het 'product' uit deze stap en wordt in de vervolgstappen (BB2 en BB3) opgewerkt tot losse aromatenfracties. Hiernaast is er nog een C5- en C9+-fractie, fracties met respectievelijk lichte (C5-) en zware (C9+) koolwaterstoffen. Deze gelden ook als co-product van stap BB1 en hieraan rekenen we dus een evenredig deel van de emissies toe (massabasis).

In totaal hebben de fracties uit BB1 allemaal een emissie van 1,98 ton CO₂/ton. Dit bestaat voor 1,86 ton/ton uit de inputemissies, die voortkomen uit het gebruik van een productstroom uit een stoomkraker, ook zijn hier de emissies van het gebruik van brandstoffen bij opgeteld.

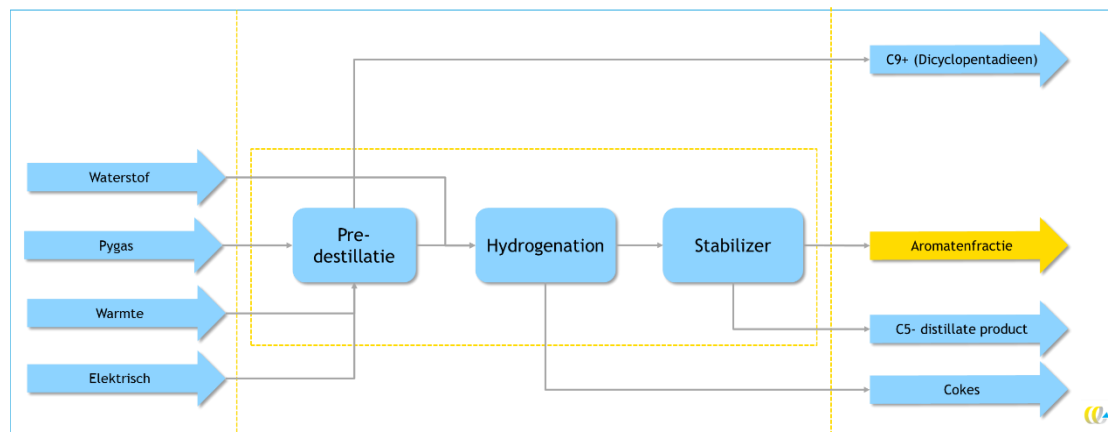
Vervolgens komen er nog 0,12 ton/ton emissies uit het proces. Dit komt grotendeels door de opbouw van cokes in het proces. Deze moeten periodiek worden verwijderd, waarbij CO₂ vrijkomt.

Tabel B.4 - Emissiefactoren voor aromaten

Levenscyclusfase	CO ₂ -eq.-emissies (ton CO ₂ -eq. per ton aromaten)	Relevant hoofdstuk
Input	1,86	Paragraaf B.5
Proces	0,12	Paragraaf B.4
Einde levensduur	0	Paragraaf B.6
Totaal	1,98	

In de volgende figuur zijn de belangrijkste stappen van proces BB1 weergegeven. Deze bestaat uit een pre-destillatie, een hydrogenatie en een stabilizer.

Figuur B.5 - De verschillende stappen in het BB1-proces (hydrotreatment) om aromaten te produceren



Pre-destillatie

De eerste stap is de pre-destillatie, hierbij wordt de C9+-fractie verwijderd. Deze fractie bestaat uit zware koolwaterstoffen (vandaar C9+). Deze fractie geldt als co-product omdat deze op een andere plek nuttig wordt ingezet en een economische waarde heeft.

Hydrogenatie

Hierna volgt de hydrogenatiestap. De samenstelling en waterstofconsumptie zijn afhankelijk van de samenstelling van de feed. Hierover is weinig informatie beschikbaar, omdat de producenten dit als gevoelige informatie beschouwen. De waterstofconsumptie ligt tussen de 20-50 Nm³/ton product (Fuel Cells and Hydrogen Observatory, 2021). De waterstofconsumptie wordt bepaald door de kwaliteit van de ingaande stroom, bijvoorbeeld hoeveel zwavel verwijderd moet worden.

Gassen hebben een constante waarde van 22,4 mol/L onder standaardomstandigheden. Een waterstofconsumptie van 20 Nm³ komt dus overeen met 900 mol waterstof of 1,8 kg. De waterstofconsumptie van de hydrogenatie is dus 1,8 kg/ton product.

Op de katalysatoren vormen cokes die de katalysatoren remmen. Deze moeten met stoom of andere methodes worden verwijderd. Ook deze waarden zijn niet gegeven in de BREF, wij rekenen met 3% cokesvorming (Amir Samimia et al., 2021).

Stabilizer

Als laatste gaat het product naar een stabilizer, dit is in feite een fractionering of destillatie. In deze stap wordt de temperatuur verlaagd, hierdoor wordt ook de lichte fractie (C5-) afgescheiden van de aromaten.

De grootte van de fracties C5- aromaten en C9+ zijn niet belangrijk voor het berekenen van de emissiefactoren van deze stap. Wij nemen typische samenstelling aan uit (Boger et al., 2004). De exacte samenstelling is minder relevant voor deze toepassing.

De toegepaste samenstelling staat in Tabel B.5 weergegeven:

Tabel B.5 - De typische samenstelling van het pygas dat de BB1 in en uit komt

Stroom	Waarde	Bron
Benzeen	39%	(Boger et al., 2004)
Tolueen	18%	(Boger et al., 2004)
Xyleen	5%	(Boger et al., 2004)
Cokes	3%	(Amir Samimia et al., 2021)
C5- en C9+-fracties	35%	
Totaal	100%	

In Tabel B.6 staat de massabalans weergegeven van stap BB1 om uit pygas de aromatenfractie te maken. Wij gaan hierbij uit van 1 ton ingaand pygas en bepalen op basis hiervan de output van de verschillende stromen. Om 1 ton pygas te verwerken is minimaal 1,8 kg waterstof nodig. Uit deze stroom worden 0,62 ton aromaten geproduceerd, 0,35 ton co-producten (C5- en C9+), en 0,03 ton cokes. Alle fracties hebben een aromatische koolstofinhoud: 92% koolstof.

Tabel B.6 - Massabalans en koolstofbalans BB1

Stof	Eenheid	Inputs	Input (koolstof)	Outputs	Output (koolstof)
Pygas	ton	1	0,92		
Waterstof	ton	0,00180			
C5-, C9+	ton			0,35	0,32
Aromaten	ton			0,62	0,57
Cokes	ton			0,03	0,03
Totaal		1	0,92	1	0,92

De energievraag is ook een heterogene mix tussen de verschillende productielocaties, die weinig informatie beschikbaar hebben gesteld. In Tabel B.7 staat de energievraag voor stap BB1, zoals in tabel 4.3 uit de LVOC BREF (Joint Research Centre (European Commission), 2017). Hierbij hebben wij de laagste waarde van het totale energieverbruik leidend gemaakt. Als brandstof hebben wij aangenomen dat het raffinaderijgas betreft, met een emissiefactor van 0,064 kg CO₂/MJ (CO₂emissiefactoren.nl, ongoing).

Tabel B.7 - Bereik van het energieverbruik van stap BB1 volgens de BREF en gekozen waarden voor deze factsheet. Alle waarden in kWh/ton product. We hebben overal een waarde genomen, zodat voor elke aparte energiestroom en het totaal, de waarde in het opgegeven bereik valt. Let op dat het totaal energieverbruik niet overeenkomt met de som van de losse energiestromen.

Stroom	Minimaal energieverbruik	Maximaal energieverbruik	Gekozen waarde
	kWh/ton	kWh/ton	kWh/ton
Stoom	182	363	182
Elektrisch	15	54	15
Brandstof	40	226	221
Totaal energieverbruik	418	462	418

B.4 CO₂-emissies: Proces

De hydrotreatment van pygas resulteert in 0,11 ton CO₂-eq. aan emissie per ton pygas. Hierbij wordt 97% product gevormd, hierom moet voor de emissies per 1 ton product een correctiefactor van 1,03 worden toegepast. Dat komt dan neer op 0,12 ton CO₂-eq./ton product.

Tabel B.8 - Procesemissies voor de productie van aromaten, Stap BB1

Oorsprong	Emissie per ton pygas (ingaaand)	Totale emissie
	Ton CO ₂ /ton pygas	Ton CO ₂ /ton product
Directe emissie	0	0
Afvalstromen	0,11	0,113
Storingen, stoppen en starten	0,0022	0,0023
Totaal		0,116

B.4.1 Directe emissies

Er komen bij het hydrofinen van pygas geen directe emissies vrij.

B.4.2 Emissies uit afvalstromen

De cokes die achterblijven in de kraker, moeten verwijderd worden. Dit wordt gedaan door gecontroleerde verbranding. Hierbij komt 0,11 ton CO₂-eq. vrij per ton pygas.

B.4.3 Emissies door storingen, stoppen en starten

Er zijn geen specifieke hoeveelheid storingen, stoppen en starten benoemd. Wij gaan uit van de generieke 2%-regel (NIKI-methode, paragraaf 6.2), dit levert 0,0022 ton CO₂-eq./ton pygas.

B.5 CO₂-emissies: Input

De totale emissie van de levenscyclusfase van de inputstromen bedraagt 1,80 ton CO₂-eq./ton pygas. 3% van de uitgaande stromen zijn afvalstromen, dus met de emissie moet met deze waarde vermenigvuldigd worden voor 1,86 ton CO₂-eq./ton product.

B.5.1 Grondstoffen

Voor de hydrotreatment van het pygas komen de meeste emissies vrij bij het gebruik van pygas uit nafta. Wij nemen hierbij aan dat we een gelijke waarde van de emissies van etheen kunnen overnemen voor de emissies van pygas, vanuit het stoomkraken van nafta. Immers: alle stromen die de stoomkrakers verlaten hebben dezelfde proces- en inputemissies per ton product. De eindelevensduuremissies laten we buiten beschouwing.

Hiernaast is een belangrijke grondstof van de hydrotreatment waterstof. We hebben hier grijze waterstof aangenomen als grondstof. Realistischer is om de waarde van waterstof uit een geïntegreerde plant aan te nemen, deze is echter niet bekend. Deze zal iets kleiner zijn dan de hier aangenomen waarde. In Tabel B.9 is ook duidelijk dat het effect klein is door de kleine hoeveelheid.

B.5.2 Energie

De energiebehoefte bestaat goeddeels uit stoom en brandstof met een kleine hoeveelheid elektriciteit. Hiervan nemen we aan dat stoom wordt gemaakt als generieke warmte. Ook dit is onwaarschijnlijk; in een goed geïntegreerde plant worden restgassen verbrand om warmte op te leveren voor de processen. Omdat de bron niet bekend is, nemen we de warmtebenchmark aan.

We nemen aan dat de brandstof gelijk is aan, of een vergelijkbare emissiefactor heeft als, raffinaderijgas.

De aannames van de inputs hier zijn allemaal relatief insignificant ten opzichte van de emissiefactor van de input van pygas.

Tabel B.9 - Input van grondstofstromen en gerelateerde CO₂-emissies per eenheid van alle producten. Hierbij zijn enkele belangrijke aannames gedaan, voornamelijk dat de brandstof een gelijke emissiefactor heeft als raffinaderijgas en dat de stoom volgens de warmtebenchmark geproduceerd wordt. Pygas heeft hier dezelfde emissiefactor als etheen.

Stof	Eenheid	Hoeveelheid	Emissiefactor	Emissie	Referentie emissiefactor
		Eenheid/ton	ton CO ₂ -eq./ eenheid	ton CO ₂ -eq./ ton	
Pygas	Ton	1	1,70	1,70	Factsheet etheen (Bijlage A)
Waterstof	Ton	0,0018	10,77	0,02	Factsheet waterstof Bijlage J

Stof	Eenheid	Hoeveelheid	Emissiefactor	Emissie	Referentie emissiefactor
		Eenheid/ton	ton CO ₂ -eq./ eenheid	ton CO ₂ -eq./ ton	
Stoom (als warmte)	GJ	0,66	0,047	0,031	(EC, 2021a)
Elektriciteit	kWh	15	0,00014	0,0021	NIKI-methode
Brandstof (als raffinaderijgas)	GJ	0,80	0,064	0,051	(CO ₂ emissiefactoren.nl, ongoing)
Totaal				1,80	
Totaal per ton aromaten				1,86	

B.6 Einde levensduur

Er wordt geen rekening gehouden met emissies uit de eindelevensduurfase voor de aromatenfractie. Het is een tussenproduct, wat (direct) verder verwerkt wordt tot andere producten.

BB2: Extractie en fractionering van benzeen, toluen en xyleen

De losse aromatenfracties kunnen gemaakt worden uit pygas of uit nafta-reformaat. De emissiefactor om het te produceren uit pygas is 2,10 ton CO₂/ton en uit nafta-reformaat is 1,05 ton CO₂/ton.

Deze emissiefactoren gelden hiermee ook voor de emissiefactor van benzeen en toluen, die als producten uit deze stap komen. De xyleenfractie wordt in een vervolgstap nog verder in isomeren gescheiden.

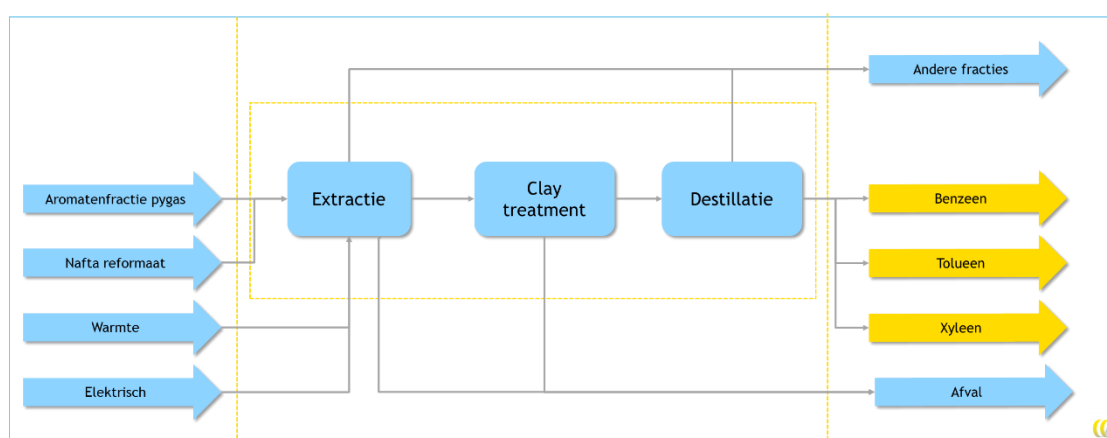
Tabel B.10 - Emissiefactoren van aromaten

	Emissiefactor (ton CO ₂ /ton)
Aromaten uit pygas	2,10
Aromaten uit nafta-reformaat	1,05

BB2 is de tweede stap die in de BREF wordt beschreven in het winningsproces van aromaten. In Stap 2 worden de aromaten gescheiden van de verschillende andere fracties en worden de aromaten weer gescheiden in benzeen, toluen en een xyleen-mengfractie.

Van veel outputs zijn geen samenstellingen of fracties bekend en deze verschillen ook per locatie. Omdat alle processen hier (dichtbij) een totaal rendement van 100% op product hebben, maakt dat voor de toepassing van de factsheet niet uit.

Figuur B.6 - Stap BB2 in het winnen van aromaten



De BB2-stap bestaat uit drie hoofdstappen. Als eerste worden in een extractiestap de stromen opgelost in een oplosmiddel dat selectief is voor aromatische koolwaterstoffen. Hierna wordt in een clay treatment de sporen van niet-aromaten gereageerd tot zware koolwaterstoffen. In de laatste stap zijn verschillende destillatiestappen waarin drie aromatenfracties en de zware koolwaterstoffen van elkaar gescheiden worden.

In de extractie worden aromaten selectief opgelost in een oplossingsmiddel. Hierbij blijven andere fracties over, omdat deze niet oplossen. De extractie is een vloeistofextractie, waarbij de inkomende stromen worden opgelost in een aantal mogelijke oplosmiddelen. De BREF beschrijft extractie met sulfonaat, maar geeft aan dat er weinig verschillen zijn in het energieverbruik, hierom nemen wij het energieverbruik over voor gebruik in deze factsheet. Uit deze eerste stap komen restfracties vrij. Ook is hier een kleine bleed van slib (sludge): resten koolwaterstoffen en oplosmiddel waarvan een deel periodiek moet worden verwijderd om ophoping te voorkomen.

De aromatenfractie kan nog enkele andere koolwaterstoffen, vooral lichte, bevatten en wordt daarom naar een 'clay treatment' gestuurd, waar de lichte moleculen tot zware moleculen reageren.

Als laatste stap wordt de stroom gedestilleerd. Benzeen is de eerste destillatiefractie, daarna toluen en xyleen. De gereageerde koolwaterstoffen uit de clay treatment blijven over als zware fractie en worden teruggestuurd naar het begin van de operatie.

Er zijn twee afvalstromen: 'spent clay' en slib. Het slib bestaat uit resten van oplosmiddel met vervuiling. De 'spent clay' is een deel van de clay treatment dat periodiek vervangen moet worden. De spent clay is 0,104-0,65 kg/ton product. De slibstroom is 0,003-0,05 kg/ton product. Dit is niet significant voor de emissiefactor.

Massabalans

In de massabalans gaan we uit van een ton input. Hieruit worden aromaten (benzeen, toluen en xyleen) gemaakt en nog resterende fracties C5- en C9+ gemaakt. De verdeling van de verschillende fracties is niet bekend, maar in totaal is de opbrengst 100%.

Tabel B.11 - Massa en koolstofbalans voor stap BB2 uit de aromaten fabriek

Stof	Inputs (ton)	Input (koolstofton)	Outputs (ton)	Output (koolstofton)
Aromatenfractie pygas of nafta-reformaat	1,00	0,92		
Benzeen			Onbekend	
Tolueen			Onbekend	
Xyleen			Onbekend	
C5-, C9+			Onbekend	
Clay	0,00		0,00	
Sludge	0,00		0,00	
Totaal	1	0,92	1	0,92

Energiebalans

Het energieverbruik is beschreven in tabel 4.3 in de BREF (Joint Research Centre (European Commission), 2017). De spreiding van de waardes is zeer groot. We hebben de laagste waarde van alle aparte energiestromen leidend gemaakt in onze aannames.

Tabel B.12 - Bereik van het energieverbruik van stap BB1 volgens de BREF en gekozen waarden voor deze factsheet. Alle waarden in kWh/ton product. We hebben overal een waarde genomen, zodat voor elke aparte energiestroom en het totaal, de waarde in het opgegeven bereik valt. Alle waarden in kWh/ton product. Let op dat het totaal energieverbruik niet overeenkomt met de som van de losse energiestromen.

Stroom	Minimale energieverbruik	Maximale energieverbruik	Gekozen waarde
	kWh/ton	kWh/ton	kWh/ton
Stoom	531	622	531
Elektrisch	11	72	11
Brandstof	149	875	149
Totaal	633	1.564	691

B.7 BB2: extractie en fractionering van benzeen, toluen en xyleen uit pygas

De emissie om aromaten uit pygas te maken zijn 2,10 ton CO₂/ton. Dit zijn alleen input-emissies. De procesemissies zijn niet significant en de eindelevensduuremissies worden in een los hoofdstuk besproken. Uit Stap BB2 komen benzeen en toluen als product. Er komt ook een xylenenfractie vrij, maar deze moet in Stap BB3 nog verder worden gefractioneerd in verschillende isomeren.

Tabel B.13 - De levenscyclusemissies van aromaten uit pygas

Levenscyclusfase	CO ₂ -eq.-emissies (ton CO ₂ -eq. per ton aromaten)	Relevant hoofdstuk
Input	2,10	Paragraaf B.9
Proces	≈0	Paragraaf B.8
Einde levensduur	0	
Totaal	2,10	

B.8 CO₂-emissies: Proces

Bij het extraheren en destilleren van de aromaten komen geen emissies vrij. Er zijn geen directe emissies. Er is alleen de kleine sludgestroom (0,104-0,65 kg/ton) die wordt verbrand. Deze is zodanig klein, dat wij hem buiten beschouwing laten.

Hierdoor zijn er ook geen procesemissies die ontstaan door stoppen en starten.

B.9 CO₂-emissies: Input

De totale emissie van de levenscyclusfase-inputs is 2,10 ton CO₂-eq. Dat maar een deel van de output uit aromaten bestaat, maakt niet uit. Omdat de totale efficiëntie 100% is naar producten, hoeft deze emissie niet met een rekenfactor te worden omgerekend.

B.9.1 Grondstoffen

Voor de grondstoffen van aromaten uit pygas is slechts één grondstof nodig, dit is de aromatenfractie uit het pygas. Deze is beschreven in de factsheet van BB1. Deze heeft een emissiefactor van 1,98 ton CO₂/ton product.

B.9.2 Energie

De energie is opgedeeld in een stoomvraag, elektriciteitsvraag, en het verbranden van brandstof.

Dit levert een bijdrage van 0,12 ton CO₂ aan de emissie.

We nemen aan dat de brandstof gelijk is aan, of dat de emissiefactor hetzelfde is als raffinaderijgas.

De aannames van de inputs hier zijn allemaal relatief insignificant ten opzichte van de emissiefactor van de input van pygas. Ook hier is de aanname dat stoom met warmte wordt gemaakt de 'belangrijkste/raarste' maar dit is niet echt significant.

Tabel B.14 - Emissie van de inputstromen energie om aromaten te maken uit pygas. Hierbij nemen we aan dat stoom volgens de warmtebenchmark geproduceerd is en dat de brandstof raffinaderijgas is

Stof	Eenheid	Hoeveelheid	Emissiefactor	Emissie	Bron
		Eenheid/ton	ton CO ₂ -eq./ eenheid	ton CO ₂ -eq./ ton	
Aromatenfractie	ton	1	1,98	1,98	Tabel B.4
Stoom (als warmte)	GJ	1,38	0,047	0,09	(EC, 2021b)
Elektriciteit	kWh	292	0,00014	0,00021	NIKI-methode
Brandstof (raffinaderijgas)	GJ	3,90	0,064	0,03	(CO ₂ emissiefactore n.nl, ongoing)
Totaal				2,10	

BB2: Extractie en fractionering van benzeen, toluen en xyleen uit nafta-reformaat

De emissie om aromaten uit nafta-reformaat te maken zijn 1,05 ton CO₂/ton. Dit zijn alleen inputemissies van grondstoffen en energieverbruik. De procesemissies zijn bij benadering 0 en de eindelevensduuremissies worden in een los hoofdstuk besproken. Uit Stap BB2 komen benzeen en toluen als product. Er komt ook een xylenenfractie vrij, maar deze moet in Stap BB3 nog verder worden gefractioneerd in verschillende isomeren.

Tabel B.15 - De levenscyclusemissies van aromaten uit nafta-reformaat

Levenscyclusfase	CO ₂ -eq.-emissies (ton CO ₂ -eq. per ton aromaten)	Relevant hoofdstuk
Input	1,05	Tabel B.16
Proces	~0	Paragraaf B.11
Einde levensduur	0	
Totaal	1,05	

B.10 Nafta-reformaat

Naast pygas worden aromaten ook gewonnen uit nafta-reformaat. Dit reformaat is 68% van de massafractie van de input van een aromatenfabriek.

Bij het reformen van nafta uit een olie-destillatiekolom worden sommige fracties van de nafta omgezet in aromaten. Hier wordt de zware fractie van nafta voor gebruikt. Hierdoor neemt het aandeel waardevolle producten in de stroom toe. De emissiefactor voor deze grondstof is *EF* kg CO₂/kg reformaat (Ecoinvent, 2025).

B.11 CO₂-emissies: Proces

Bij het extraheren en destilleren van de aromaten komen geen emissies vrij. Er zijn geen directe emissies. Er is alleen de kleine slibstroom (0,104-0,65 kg/ton), die wordt verbrand. Deze is zo klein, dat wij hem buiten beschouwing laten. Hierdoor zijn er ook geen procesemissies die ontstaan door stoppen en starten.

B.12 CO₂-emissies: Input

De totale emissie van de levenscyclusfase-inputs is 1,05 ton CO₂-eq. Dat maar een deel van de output uit aromaten bestaat, maakt niet uit. Omdat de totale efficiëntie 100% is naar producten, hoeft deze emissie niet met een rekenfactor te worden omgerekend.

B.12.1 Grondstoffen

Voor de grondstoffen van aromaten uit reformaat is slechts 1 grondstof nodig, dit is het reformaat van nafta. Hiervan is de emissiefactor uit ecoinvent *EF* ton CO₂/ton (zie Paragraaf B.10).

B.12.2 Energie

De energie is opgedeeld in een stoomvraag, elektriciteitsvraag, en het verbranden van brandstof.

Dit levert een bijdrage van 0,12 ton CO₂ aan de emissie.

We nemen aan dat de brandstof gelijk is aan, of dat de emissiefactor hetzelfde is als raffinaderijgas.

De aannames van de inputs hier zijn allemaal relatief insignificant ten opzichte van de emissiefactor van de input van pygas. Ook hier is de aanname dat stoom met warmte wordt gemaakt de 'belangrijkste/raarste' maar dit is niet echt significant.

Tabel B.16 - Emissie van de inputstromen energie om aromaten te maken uit pygas. Hierbij nemen we aan dat stoom volgens de warmtebenchmark geproduceerd is en dat de brandstof raffinaderijgas is

Stof	Eenheid	Hoeveelheid	Emissiefactor	Emissie	Bron
		Eenheid/ton	ton CO ₂ -eq./ eenheid	ton CO ₂ -eq./ton	
Nafta-reformaat	Ton	1	<i>EF</i>	<i>EF</i>	market for reformat - Global - reformat ecoQuery
Stoom (als warmte)	GJ	1,38	0,047	0,09	(EC, 2021b)
Elektriciteit	kWh	292	0,00014	0,00021	NIKI-methode
Brandstof (raffinaderijgas)	GJ	3,90	0,064	0,03	(CO2emissiefactoren.nl, ongoing)
Totaal				1,05	

BB3: Extractie en fractionering van ortho- en paraxyleen

Uit Stap BB3 komt als zwaarste aromatenfractie de xyleenfractie. Deze bestaat uit verschillende isomeren die van elkaar gescheiden moeten worden. Er zijn drie isomeren van xyleen: ortho-, meta- en paraxyleen.

Er wordt voornamelijk paraxyleen gewonnen en nog een kleinere hoeveelheid orthoxyleen. Er wordt (volgens de BREF) geen metaxyleen gewonnen, omdat dit weinig economische waarde heeft. Door de isomerisatiestap in dit proces wordt metaxyleen continu omgezet in de waardevollere isomeren.

Ook voor xyleen geldt dat er twee inputstromen mogelijk zijn. De ene mogelijke grondstof is pygas, via het BB1- en het BB2-proces, zoals hiervoor beschreven. De andere mogelijke grondstof is nafta-reformaat, dit kan via het BB2-proces, of direct, zie Figuur B.7.

Wij beschrijven hier de twee verschillende mogelijkheden als twee verschillende processtromen. Hierbij gaan wij ervan uit dat de productie van xyleen uit nafta-reformaat die eerst via Stap BB2 loopt en niet direct via Stap BB3.

De emissie van de input en proces voor de verschillende xylenen is 2,42 ton CO₂/ton als de aromaten uit pygas worden gewonnen en 1,37 ton CO₂/ton als het uit nafta-reformaat.

Tabel B.17 - Emissiefactoren van Xyleen

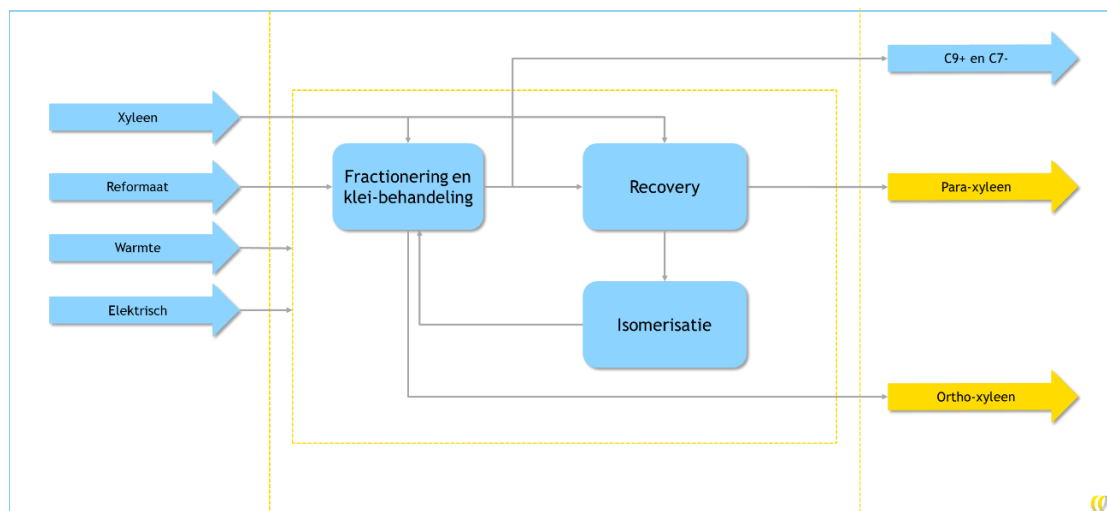
	Emissiefactor (ton CO ₂ /ton)
Xyleen uit pygas	2,42
Xyleen uit nafta-reformaat	1,37

Proces

Er zijn drie isomeren van xyleen, maar voornamelijk paraxyleen wordt gewonnen, met een kleiner aandeel orthoxyleen. Metaxyleen wordt minimaal gewonnen. De xylenenmix wordt gescheiden van elkaar door adsorptie of kristallisatie. Vervolgens wordt paraxyleen afgescheiden. De reststroom wordt naar een isomerisatiestap gestuurd.

Hier wordt een nieuw evenwicht gevormd tussen de verschillende isomeren. In de lus die hieruit ontstaat kunnen verschillende isomeren van xyleen worden gewonnen.

Figuur B.7 - De stappen van BB3 voor het terugwinnen van verschillende isomeren van xyleen



De winning van xylenen is een lus van drie verschillende stappen. Reformaat kan deze lus beginnen bij de fractionering. De xylenenfractie van BB2 kan zowel in de fractionering als in de recovery stap beginnen. Er is dus geen duidelijke 'eerste stap'.

Fractionering

In de fractionering wordt de zware fractie, van C9+, afgescheiden van de lichtere xylenenfractie. Als in deze stap reformaat binnenkomt worden hier ook lichtere fracties (C7-) afgescheiden. Als orthoxyleen een gewenst product is, kan deze hier ook in een zware fractie in de destillatie worden afgescheiden van de andere isomeren.

Recovery

In de volgende stap, recovery, wordt paraxyleen afgescheiden van de andere fracties door kristallisatie of adsorptie. Bij kristallisatie bevriest paraxylene eerder dan de andere isomeren en kan hierna worden afgescheiden als vaste stof. Bij adsorptie bindt de paraxyleen specifiek aan een kolom met adsorptiemateriaal. Vervolgens wordt dit erafgewassen met een oplosmiddel wat afgescheiden kan worden van de paraxyleen.

Isomerisatie

De reststroom bevat de overige isomeren van xyleen. In een vervolgstap worden deze isomeren weer teruggebracht in thermodynamisch evenwicht. Het product hiervan wordt teruggeleid naar de eerste stap: fractionering.

Massabalans

Om een correcte massabalans op te stellen is onvoldoende informatie beschikbaar. In deze stappen worden geen afvalstromen geproduceerd en zijn ook geen directe emissies. Door de procesomstandigheden te veranderen kan de fractie para- en orthoxyleen worden aangepast.

Als de inputstroom de xylenenfractie is, dan is er een co-productstroom van de C9+-fractie. Als de inputstroom reformaat is, dan is hiernaast ook een co-productenstroom van C7- fractie. De opbrengst is 100% en er is dus altijd een ton input voor een ton product nodig.

Energievraag

Tabel B.18 - Bereik van het energieverbruik van Stap BB1 volgens de BREF en gekozen waarden voor deze factsheet. Alle waarden in kWh/ton product. We hebben overal een waarde genomen, zodat voor elke aparte energiestroom en het totaal, de waarde in het opgegeven bereik valt. Alle waarden in kWh/ton product. Let op dat het totaal energieverbruik niet overeenkomt met de som van de losse energiestromen.

Stroom	Minimale energieverbruik	Maximale energieverbruik	Gekozen waarde
	kWh/ton	kWh/ton	kWh/ton
Stoom	382	1.398	382
Elektrisch	292	320	292
Brandstof	1.054	3.960	1.083
Totaal	1.757	2.854	1.757

BB3: Extractie en fractionering van ortho- en paraxyleen uit pygas

De emissies van het produceren van de verschillende xylenen uit pygas zijn 2,42 ton CO₂-eq./ton. Hierbij zijn alle emissies inputemissies. Er zijn minimale procesemissies, die hierbij 0 worden afgerond. De eindelevensduuremissies worden hier buiten beschouwing gelaten omdat dit nog een tussenproduct is.

Tabel B.19 - De levenscyclusemissies van xylenen uit pygas

Levenscyclusfase	CO ₂ -eq.-emissies (ton CO ₂ -eq. per ton)	Relevant hoofdstuk
Input	2,42	Tabel B.20
Proces	≈0	Paragraaf B.13
Einde levensduur	0	
Totaal	2,42	

B.13 CO₂-emissies: Proces

Bij het fractioneren, destilleren en isomeriseren van de xylenen komen geen directe emissies vrij. Er is een kleine afvalstroom van katalysatoren uit de isomerisatie die zodanig klein is dat deze verwaarloosbaar is.

Hierdoor zijn er ook geen procesemissies die ontstaan door stoppen en starten.

B.14 CO₂-emissies: Input

De totale emissie van de levenscyclusfase-inputs is 2,42 ton CO₂-eq. Dat maar een deel van de output uit aromaten bestaat, maakt niet uit. Omdat de totale efficiëntie 100% is naar producten, hoeft deze emissie niet met een rekenfactor te worden omgerekend.

De enige uitgaande stromen zijn orthoxyleen, paraxyleen en reststromen koolwaterstoffen.

B.14.1 Grondstoffen

Voor de winning van de verschillende vormen van xyleen uit pygas wordt alleen de xylenenfractie uit Stap BB2 gebruikt. Er treedt geen verlies van stromen op, waardoor de input voor 1 ton xylenen ook 1 ton is.

Er is maar 1 inputstroom, dit is 1 ton xylenenfractie uit pygas. Dat heeft een emissie van 2,10 ton CO₂-eq./ton.

B.14.2 Energie

De energie is opgedeeld in een stoomvraag, elektriciteitsvraag, en het verbranden van brandstof.

Dit levert een bijdrage van 0,32 ton CO₂ aan de emissie.

Tabel B.20 - De inputemissie van de energiestromen voor de winning van de verschillende xylenen uit pygas. We nemen aan dat de stoom wordt gemaakt volgens de warmtebenchmark en de brandstof raffinaderijgas is.

Stof	Eenheid	Hoeveelheid	Emissiefactor	Emissie	Bron
		Eenheid/ton	ton CO ₂ -eq./ eenheid	ton CO ₂ -eq./ ton	
Xylenenfractie	ton	1	2,10	2,10	Paragraaf BB2 – xylenenfractie uit pygas
Stoom (als warmte)	GJ	1,38	0,047	0,065	(EC, 2021b)
Elektriciteit	kWh	292	0,000014	0,0041	NIKI-methode
Brandstof	GJ	3,90	0,064	0,25	(CO ₂ emissiefactoren.nl, ongoing)
Totaal				2,42	

BB3: Extractie en fractionering van ortho- en paraxyleen uit nafta-reformaat

De emissies van het produceren van de verschillende xylenen uit nafta-reformaat zijn 1,37 ton CO₂-eq./ton. Hierbij zijn alle emissies inputemissies. Er zijn minimale proces-emissies, die hierbij 0 worden afgerond. De eindelevensduuremissies worden hier buiten beschouwing gelaten omdat dit nog een tussenproduct is.

Tabel B.21 - De levenscyclusemissies van xylenen uit nafta-reformaat

Levenscyclusfase	CO ₂ -eq.-emissies (ton CO ₂ -eq. per ton)	Relevant hoofdstuk
Input	1,37	Paragraaf B.16
Proces	≈0	Paragraaf B.15
Einde levensduur	0	
Totaal	1,37	

B.15 CO₂-emissies: Proces

Bij het fractioneren, destilleren en isomeriseren van de xylenen komen geen directe emissies vrij. Er is een kleine afvalstroom van katalysatoren uit de isomerisatie die zodanig klein is dat deze verwaarloosbaar is.

Hierdoor zijn er ook geen procesemissies die ontstaan door stoppen en starten.

B.16 CO₂-emissies: Input

De totale emissie van de levenscyclusfase-inputs is 1,37 ton CO₂-eq. Dat maar een deel van de output uit aromaten bestaat, maakt niet uit. Omdat de totale efficiëntie 100% is naar producten, hoeft deze emissie niet met een rekenfactor te worden omgerekend.

De enige uitgaande stromen zijn orthoxyleen, paraxyleen en reststromen koolwaterstoffen.

B.16.1 Grondstoffen

Voor de winning van de verschillende vormen van xyleen uit pygas wordt alleen de xylenenfractie uit Stap BB2 gebruikt. Er treedt geen verlies van stromen op, waardoor de input voor 1 ton xylenen ook 1 ton is.

Er is maar één inputstroom, dit is 1 ton xylenenfractie uit pygas. Dat heeft een emissie van 1,05 ton CO₂-eq./ton.

B.16.2 Energie

De energie is opgedeeld in een stoomvraag, elektriciteitsvraag en het verbranden van brandstof.

Dit levert een bijdrage van 0,32 ton CO₂ aan de emissie.

Tabel B.22 - De inputemissie van de energiestromen voor de winning van de verschillende xylenen uit pygas. We nemen aan dat de stoom wordt gemaakt volgens de warmtebenchmark en de brandstof raffinaderijgas is

Stof	Eenheid	Hoeveelheid	Emissiefactor	Emissie	Bron
		Eenheid/ton	ton CO ₂ -eq./ eenheid	ton CO ₂ -eq./ ton	
Xylenenfractie uit nafta-reformaat	ton	1	1,05	1,05	Factsheet BB2 – xylenenfractie uit pygas
Stoom (als warmte)	GJ	1,38	0,047	0,065	(EC, 2021b)
Elektriciteit	kWh	292	0,000014	0,0041	NIKI-methode
Brandstof	GJ	3,90	0,064	0,25	(CO ₂ emissiefactoren.nl, ongoing)
Totaal				1,37	

Einde levensduur

De verschillende soorten BTX zijn allemaal halffabricaten. Hiervoor geldt dat voor het berekenen van de eindelevensduuremissies uitgegaan wordt van volledige verbranding. Dat zorgt voor de volgende eindelevensduuremissies voor de vier geproduceerde vormen van BTX.

Tabel B.23 - Eindelevensduuremissies van de verschillende aromaten

BTX	ton	Koolstofinhoud	Emissie
Benzeen	1,00	0,92	3,38
Tolueen	1,00	0,91	3,35
Paraxyleen	1,00	0,91	3,32
Orthoxyleen	1,00	0,91	3,32

Literatuurlijst

- Amir Samimia, Soroush Zarinabadib, Amir Hossein Shahbazi Kootenaeia, Alireza Azimia, & Masoumeh Mirzaeia. (2021). Optimization of Naphtha Hydro-Threating Unit with Continuous Resuscitation Due to the Optimum Temperature of Octanizer Unit Reactors. *Advanced journal of Chemistry*,, 3.
<https://doi.org/10.33945/SAMI/AJCA.2020.2.6>
- CO2emissiefactoren.nl. (ongoing, January 14, 2022). *Lijst emissiefactoren*.
<https://www.co2emissiefactoren.nl/lijs-emissiefactoren/>
- EC. (2021a). *Update of benchmark values for the years 2021 – 2025 of phase 4 of the EU ETS*.
- EC. (2021b). *Update of benchmark values for the years 2021 – 2025 of phase 4 of the EU ETS*.
- Ecoinvent. (2025). *Ecoinvent v3.11*. Ecoinvent. <https://ecoinvent.org/ecoinvent-v3-11/>
- Fuel Cells and Hydrogen Observatory. (2021). *2021 Hydrogen supply and demand*.
- Joint Research Centre (European Commission). (2017). *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Large Volume Organic Chemicals*.
- Thorsten Boger, S.R., Charles Sorensen,. (2004). Patent: System and process for pyrolysis gasoline hydrotreatment. In. New York, United States of America.

| C Etheen

Etheen

Deze bijlage presenteert de berekening van broeikasgasemissies van etheen die vrijkomen over de levenscyclus zoals gedefinieerd in de NIKI-CO₂-emissiereductie-methode.

Etheen (ook wel ethyleen) is een van de grootste bulkchemicaliën ter wereld. Het kan gemaakt worden uit het stoomkraken van verschillende (fossiele) grondstoffen zoals ethaan, propaan, butaan, nafta of gasolie. Hiernaast bestaan andere productieprocessen, maar het stoomkraken van nafta is in Nederland het meest gebruikte productieproces en zal hier worden beschreven. Uit het stoomkraken van nafta kunnen veel producten gemaakt worden, hoewel de twee hoofdproducten etheen en daarna propeen zijn. De verhouding tussen de verschillende producten kan gestuurd worden, afhankelijk van de marktvraag. Omdat etheen een halffabricaat is dat niet los op de (consumenten-) markt komt is de uitstoot van broeikasgassen bij einde levensduur van etheen aangenomen als volledige verbranding.

Tabel C.1 geeft een overzicht van de CO₂-eq.-emissies over de levenscyclus. De basis van deze berekening ligt in de massa- en energiebalans (MEB) van het productieproces (zie Paragraaf C.1) welke in principe is opgesteld volgens de relevante BREF (Best available techniques REFerence document). In dit geval de BREF LVOC (Joint Research Centre (European Commission), 2017). Op basis van de MEB worden ten eerste de directe CO₂-eq.-emissies van het productieproces berekend (zie Paragraaf C.2). Ten tweede laat de MEB zien welke energie- en materiaalinputs er benodigd zijn voor het productieproces, hiermee worden de CO₂-eq.-emissies van de input berekend (zie Paragraaf C.3). Als laatste laat de MEB ook zien wat de koolstofinhoud van het eindproduct, welk worden gebruikt om de CO₂-eq.-emissies bij einde levensduur te bepalen (zie Paragraaf C.4).

Tabel C.1 - De levenscyclusemissies van etheen

Levenscyclusfase	CO ₂ -emissies (ton CO ₂ -eq. per ton etheen)	Relevante paragraaf
Inputs	1,0	Paragraaf C.3
Proces	0,70	Paragraaf C.2
Einde levensduur	3,15	Paragraaf C.4
Totaal	4,85	

C.1 Massa- en energiebalans

Etheen wordt geproduceerd door nafta te stoomkraken. Hierbij wordt nafta eerst gekraakt in kleinere koolwaterstoffen. Vervolgens wordt dit mengsel onder druk gebracht en gesplitst in de verschillende fracties. Door verschillende instellingen aan te passen in een stoomkraker, kan de samenstelling van de producten gestuurd worden. Zo kunnen fracties van grotere koolwaterstoffen teruggestuurd worden naar het begin van de kraker om een grotere fractie kleinere koolwaterstoffen te maken. Fabrikanten beschouwen de exacte samenstelling als vertrouwelijke informatie. Vaak worden krakers gestuurd op een zo groot mogelijke etheenproductie. De BREF (Joint Research Centre (European Commission), 2017) geeft een niet-geoptimaliseerde productenmix. In een onderliggende bron (Worrell et al., 2000) staat een mix die geoptimaliseerd is voor etheen. Dit is samen met het procesdiagram in Figuur C 1 de basis voor de massa- en energiebalans.

Nafta komt vaak direct uit de destillatiestap binnen bij de stoomkraker. Hier wordt warmte aan de stroom toegevoegd in de vorm van stoom. Er wordt een waarde van 0,85 kg stoom/kg nafta gegeven. Voor de massabalans is de hoeveelheid stoom niet relevant, maar de energiehoeveelheid wel. Deze stoom wordt opgewekt uit methaan dat vrijkomt bij de laatste stap van het kraken. Resterende warmtevraag komt uit een generieke warmtebron. Omdat deze stoom niet verbruikt wordt, valt deze buiten de massabalans.

Hierna wordt het gekraakte mengsel onder druk gebracht en gekoeld (compressie). Bij het koelen en onder druk brengen van het productmengsel worden ongewenste bijproducten verwijderd. Het gaat hier voornamelijk om water, kooldioxide en sulfiden. Deze worden verwijderd met amine gaswassers. De hoeveelheid CO₂ die hierbij vrijkomt is niet bekend, op basis van de massabalans wordt deze fractie verwaarloosd. Voor het reinigen van de stroom wordt ofwel amine ofwel loog gebruikt als oplosmiddel. De hoeveelheid die daarbij verbruikt wordt, wordt in de BAT niet gespecificeerd. Hierom is dit buiten beschouwing van de massabalans gehouden. Bij de compressiestap komt één co-product vrij: pygas.

Na de compressie komen verschillende fractioneringsstappen, hierbij worden de kraakproducten van nafta gescheiden van elkaar. Dit kan in verschillende volgorde. Over het algemeen wordt methaan afgescheiden om als brandstof voor de stoom te dienen, daar gaan wij hier ook vanuit. De waterstof wordt gebruikt om alkynen te hydrogenen. Dat is een later proces, hierom tellen wij waterstof als co-product.

De belangrijke afscheidingen zijn etheen en propyleen, C4 en zwaardere fracties. In het stroomschema in Figuur C 1 worden al deze fracties co-producten genoemd. In de massabalans staan deze gespecificeerd.

In stoomkraken blijft een deel van de koolstof achter als cokes, waardoor deze gereinigd moet worden. De hoeveelheid hangt af van de grondstof en is niet gespecificeerd. Wij gaan hier voor de berekening ervan uit dat deze afvalstroom zo groot is als nodig om de massabalans kloppend te maken.

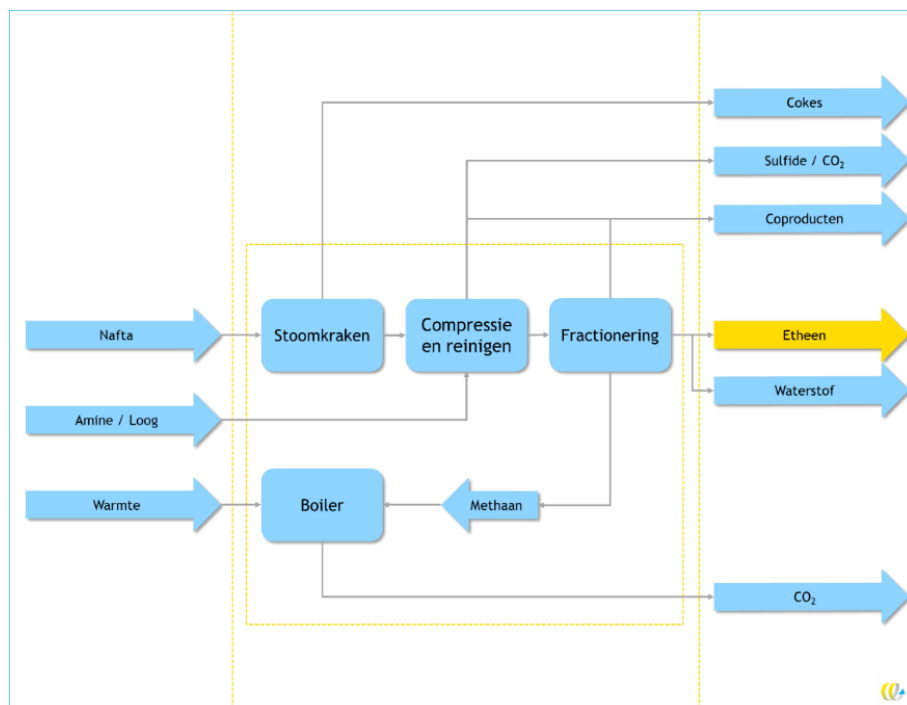
C.1.1 Massabalans

De massabalans gebaseerd op Worrell et. Al (2000) heeft een afwijking van 2%. Er komt 2% minder massa uit dan erin gaat. Hiervoor hebben wij aangenomen dat dit verschil komt door cokesopbouw. Wij hebben de cokesfractie verhoogd totdat de koolstofbalans kloppend is. Hierdoor is in de totale massabalans de output 0,01 ton groter dan de input.

Van twee co-producten, pyrolyse gasoline en stookolie, is geen koolstofgehalte gedefinieerd. Wij hebben aangenomen dat dit alkenen zijn met een koolstofgehalte van 86%.

Voor de productie van 1 ton etheen is 2,94 ton nafta nodig. Naast etheen beschouwen we alle uitgaande stromen behalve cokes als co-producten. De CO₂-eq.-emissies van de inputs en het productieproces worden over al deze stromen verdeeld. Cokes zijn een afvalstroom en methaan wordt binnen het proces verbrand om warmte op te wekken. Hierdoor wordt er bij een ton etheen in totaal 2,38 ton product gemaakt. Van de emissie uit proces en inputs wordt daarom 42% aan etheen toegerekend (massa allocatie principe paragraaf 2.3.1. NIKI-methode).

Figuur C 1 - Het produceren van etheen door het stoomkraken van nafta



Tabel C.2 - Massa- en koolstofbalans voor de productie van etheen

Stof	Eenheid	Kraken, fractioneren, scheiden		Boiler	
		In	Uit	In	Uit
Nafta	ton	2,94			
Waterstof	ton		0,06		
Etheen	ton		1,00		
Propeen	ton		0,47		
Butadieen	ton		0,15		
Pyrolyse gasoline	ton		0,56		
Stookolie	ton		0,15		
Cokes	ton		0,07		
Methaan	ton		0,50	0,50	
Zuurstof (uit lucht)	ton			2,00	
CO ₂	ton				1,38
Water	ton				1,13
Totaal	ton	2,94	2,95	2,50	2,50

C.1.2 Energiebalans

Volgens de BREF is bij het kraken van nafta om onder andere etheen te maken, 26 GJ warmte/ton etheen benodigd. Hierbij wordt de volledige warmtevraag toegerekend aan etheen. Volgens de NIKI-methode van RVO mag deze energievraag over alle producten worden verdeeld.

De totale energievraag voor de productie van etheen is 26 GJ/ton etheen. Dit is als volgt uitgeplitst: 13,5-16,2 GJ/ton wordt gebruikt voor het stoomkraken, 3,5-5,2 GJ/ton voor de fractionering en 6,3-7,3 GJ/ton voor het scheiden van de fracties. Er wordt 0,50 ton methaan geproduceerd per ton etheen, wat overeenkomt met een lower heating value (LHV) van 25 GJ. Netto hoeft er maar 1 GJ/ton van extern te worden gehaald, de rest komt uit methaan.

De chemische energie die nodig is voor het stoomkraken is 6,3-7,3 GJ/ton (Worrell et al., 2000). Hiervan is de middenwaarde genomen, de rest is toegekend aan scheidingswarmte en verlies.

Tabel C.3 - Energiebalans voor de productie van etheen

Energie	Inputs	Outputs
	GJ/ton	GJ/ton
Kraken	14,85	-
Fractioneren	4,35	-
Scheiden	6,8	-
Chemische energie en restwarmte		6,8
Warmte en scheidingsverlies		19,8
Totaal	26	26

C.2 CO₂-emissies: Proces

Bij het kraken van nafta komt 1,66 ton CO₂-eq. vrij. 42% van deze emissies worden aan etheen toegerekend, 58% aan de co-producten. Dat komt uit op 0,70 ton CO₂-eq./ton etheen.

Tabel C.4 - Procesemissies voor de productie van etheen

Oorsprong	Totale emissie	Emissie etheen
	ton CO ₂ /ton	ton CO ₂ /ton etheen
Directe emissie	1,38	0,58
Afvalstromen	0,26	0,11
Storingen, stoppen en starten	0,03	0,01
Totaal	1,66	0,70

Directe emissies

De directe procesemissies ontstaan door de verbranding van methaan. Dit levert een groot deel van de warmte die nodig is voor het proces. Hierbij komt in totaal 1,38 ton CO₂-eq. vrij.

Emissies uit afvalstromen

De cokes die achterblijven in de kraker, moeten gereinigd worden. Dit wordt gedaan door gecontroleerde verbranding. Hierbij komt 0,26 ton CO₂-eq. vrij.

Emissies door storingen, stoppen en starten

Er zijn geen specifieke hoeveelheid storingen, stoppen en starten benoemd. Wij gaan uit van de generieke 2%-regel (NIKI-methode, paragraaf 5.2), dit levert 0,04 ton CO₂-eq.

C.3 CO₂-emissies: Input

De totale emissie van de levenscyclusfase-inputs is 2,40 ton CO₂-eq. Ook hiervan hoeft maar 42% worden toegerekend aan etheen. Dat komt uit op 1,0 ton CO₂-eq./ton etheen.

C.3.1 Grondstoffen

Voor het stoomkraken van nafta is maar een grondstof nodig: nafta. Dit heeft een emissiefactor van 0,80, wat uitkomt op een emissie van 2,35 ton CO₂-eq. Hiervan wordt 42% toegerekend aan etheen, wat uitkomt op 0,99 ton CO₂-eq./ton etheen.

C.3.2 Energie

25 van de 26 GJ/ton etheen die nodig is, komt van methaan dat uit de grondstof nafta komt. Er moet nog 1 GJ/ton etheen extern worden geleverd als input. Wij gaan uit van een generieke warmtebron ((EC, 2021b). Dit levert een emissie van 0,05 ton CO₂-eq., waarvan 0,02 aan etheen wordt toegerekend.

Tabel C.5 - Input van grondstofstromen en gerelateerde CO₂-emissies per eenheid van alle producten (etheen en reststromen)

Stof	Eenheid	Hoeveelheid	Emissiefactor	Emissie	Emissie etheen	Referentie emissiefactor
		Eenheid/ton	ton CO ₂ -eq./ eenheid	ton CO ₂ -eq./ ton	ton CO ₂ -eq./ ton	
Nafta	ton	2,94	0,80	2,35	0,99	Bijlage E Tabel E 26
Warmte	GJ	1	0,047	0,05	0,02	(EC, 2021a)
Totaal				2,40	1,0	

C.4 CO₂-emissies: Einde levensduur

Etheen is een halffabrikaat. Wij nemen hierom aan dat de volledige stroom wordt verbrand. De koolstoffractie van etheen is 0,86 tonC/ton. Hiervan komt bij volledige verbranding 3,15 ton CO₂-eq./ton vrij.

Tabel C.6 - CO₂-eq.-emissies bij einde levensduur etheen

	Wegingsfactor	Fractie	Fractie fossiel	Emissiefactor	Emissie
	-	ton/ton	ton C/ ton product	ton CO ₂ -eq./ ton C	ton CO ₂ -eq./ ton PET
Verbrand - fossiel	1	1	0,86	44/12	3,15
Gerecycled - fossiel	1	0	0,86	0	0
Langdurig vastleggen - fossiel	0,5	0	0,86	44/12	0
Totaal		1			3,15

Literatuurlijst

EC. (2021a). *Update of benchmark values for the years 2021 – 2025 of phase 4 of the eu ets.*

EC. (2021b). *Update of benchmark values for the years 2021 – 2025 of phase 4 of the eu ets.*

Joint Research Centre (European Commission). (2017). *Best available techniques (bat) reference document for the production of large volume organic chemicals.*

Worrell, E., Phylipsen, D., Einstein, D., & Martin, N. (2000). Energy use and energy intensity of the u.S. Chemical industry., 2000.

D Low Density Poly Ethyleen (LDPE)

Low density polyethylene (LDPE)

Deze bijlage beperkt zich tot de levenscyclus van LDPE. Er zijn drie vormen van polyethyleen: low density polyethyleen (LDPE), high density polyethyleen (HDPE) en linear low density polyethyleen (LLDPE). Door variaties in het productieproces kunnen deze verschillende vormen van PE worden gemaakt.

Alle vormen van polyethyleen wordt gemaakt door de polymerisatie van etheen. Het etheengas komt uit een naftakraker. Dit gas wordt gekoeld en onder druk gebracht. Vervolgens wordt dit etheen naar een reactor geleid, waar de reactie wordt opgestart door een initiator. Deze reactie verloopt niet volledig. In een scheidingsstap wordt het etheengas gescheiden van het polyethyleen, het etheengas wordt teruggedleid naar de start van de reactie. Het polyethyleen wordt verder verwerkt in een extruder om er pellets van te maken. Deze pellets worden opgeslagen in een silo.

Tabel D.1 geeft een overzicht van de CO₂-eq.-emissies over de levenscyclus. De massa- en energiebalans (MEB) van het productieproces is de basis van deze berekening (zie Paragraaf D.1). De MEB is in principe opgesteld volgens de relevante BREF (Best Available Techniques REFerence document), in dit geval de BREF POL (EC, 2007b). Op basis van de MEB worden ten eerste de directe CO₂-eq.-emissies van het productieproces berekend (zie Paragraaf D.2). Ten tweede laat de MEB zien welke inputs (materialen en energie) er nodig zijn voor het productieproces, hiermee worden de CO₂-eq.-emissies van de input berekend (zie Paragraaf D.3E.3). Als laatste laat de MEB ook zien wat de koolstofinhoud van het eindproduct, welk worden gebruikt om de CO₂-eq.-emissies bij einde levensduur te bepalen (zie Paragraaf D.4).

De totale emissie van de levenscyclus van LDPE is 4,91 ton CO₂-eq./ton LDPE. Deze emissies zijn opgebouwd door de emissies van de inputstromen, het proces, en de eindelevensduuremissies.

Tabel D.1 - De levenscyclusemissies van etheen

Levenscyclusfase	CO ₂ -eq.-emissies	Relevant hoofdstuk
	ton CO ₂ -eq./ton LDPE	
Input	1,75	Paragraaf D.3
Proces	0,02	Paragraaf D.2
Einde levensduur	3,14	Paragraaf D.4
Totaal	4,91	

D.1 Massa- en energiebalans

De productie van LDPE bestaat uit de polymerisatie van etheen. De etheen komt vaak rechtstreeks uit een nafta-kraker, waarbij etheen een van de belangrijkste producten is.

Vanaf de instroom van etheen zijn er de volgende processtappen:

1. Compressie.
2. Reactie.
3. Scheiden.
4. Extruder.
5. Silo-opslag.

Compressie

De reactie van LDPE vindt plaats op druk, deze druk is afhankelijk van het reactortype dat gebruikt wordt. Dit ligt tussen de 1.000 en 3.500 bar. In twee stappen wordt de etheen op druk gebracht.

Reactie

De reactie vindt plaats in een autoclaaf of in een 'tubulaire reactor'. In de reactor komt het onder druk gebrachte etheengas binnen. Hier worden chemicaliën (de initiator) toegevoegd om de reactie op te starten. Er zijn twee typen initiators; zuurstof en organische peroxide, wij gaan uit van de organische peroxide. Deze hebben een verbruik van 0,2 kg/ton LDPE.

In de reactiefase kunnen ook andere chemicaliën worden toegevoegd om de product-eigenschappen te controleren, die zijn hier buiten beschouwing gelaten, omdat deze te productspecifiek zijn.

Bij de polymerisatiereactie komt warmte vrij, de reactie moet dus gekoeld worden. Er kan lagetemperatuurstoom vrijkomen die gebruikt kan worden.

De reactie vindt niet volledig plaats, hierom wordt de niet-gereageerde fractie etheengas in de scheidingsstap gescheiden van de polyethyleen en teruggeleid naar de start van de reactor.

Scheiden

Het reactiemengsel wordt na de reactor gescheiden in twee stappen. Het niet-gereageerde etheengas wordt gescheiden van de gevormde polymeren. Dit etheengas wordt gerecycled naar het begin van de reactiefase.

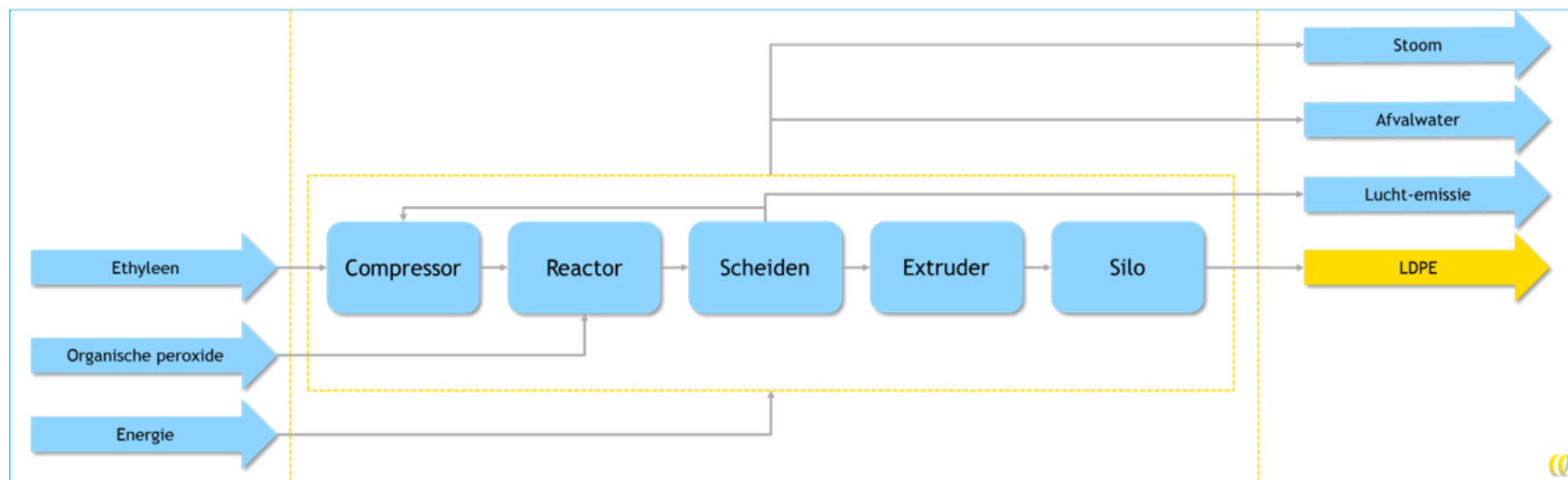
Extruder

Het gevormde polymeer wordt door een extruder gehaald om er pellets van te maken, ook hier kunnen additieven worden toegevoegd. Deze additieven zijn buiten beschouwing gelaten.

Silo

De geproduceerde pellets LDPE worden in een silo opgeslagen. Hieruit kunnen nog restemissies ontstaan.

Figuur D.1 - De procesgrenzen van LDPE-productie



D.1.1 Massabalans

De waarden voor consumptie en emissies voor de productie van LDPE zijn niet uitgesplitst per processtap, maar worden in de BREF in het geheel gegeven. Voor alle stromen die niet zijn gedefinieerd, afval, luchtmissie (VOC), wordt hetzelfde koolstofgehalte aangenomen als voor etheen (86%). De initiator is niet gedefinieerd, er wordt alleen aangegeven dat dit een organische peroxide is. Omdat de hoeveelheid zo klein is, hebben wij het koolstofgehalte niet meegenomen.

Tabel D.2 - Massa- en koolstofbalans voor de productie van LDPE

Stof	Input	Output	Input koolstof	Output koolstof
	ton	ton	Koolstofton	Koolstofton
Etheen	1.006	-	0,865	-
LDPE		1,00	-	0,860
COD in afvalwater		0,00002	-	-
VOC		0,00070	-	0,0006
Afval	-	0,0054	-	0,0047
Initiator/organische peroxide	0,0002	-	-	-
Totaal	1,01	1,01	0,87	0,87

D.1.2 Energiebalans

In de BREF wordt geen onderscheid gemaakt tussen het energieverbruik in de vorm van stoom en elektriciteit. Ook wordt het energieverbruik niet per stap uitgesplitst. Er wordt onderscheid gemaakt tussen direct en primair energieverbruik, wij gaan uit van de waarde voor direct energieverbruik.

De energievraag voor de reactie is 2,88 GJ/ton LDPE. Dit is volledig elektriciteit. De BAT geeft aan dat maximaal 0,72 GJ/ton kan worden teruggewonnen in de vorm van lage-temperatuurstoom.

Tabel D.3 - Energiebalans voor de productie van LDPE

Energie	Eenheid	Inputs	Output
		Eenheid/ton	Eenheid/ton
Elektriciteit	GJ	2,88	
Stoom	GJ	0,00	0,72
Onbekend (verlies + Chemisch)	GJ	0,00	2,16
Totaal energie	GJ	2,88	2,88

D.2 CO₂-emissies: Proces

De totale CO₂-eq.-emissies van het proces zijn 20 kg CO₂-eq./ton LDPE. Dat is de som van 0 direct uit het proces, 19,2 kg CO₂-eq./ton door de afvalstromen en 0,4 kg CO₂-eq./ton PET vanuit onderhoud.

Tabel D.4 - CO₂-eq.-emissies voor de productie van LDPE uit etheen

Stof	Totale emissie
	ton CO ₂ -eq./ton LDPE
Directe emissies	0
Afval	0,019
Storingen, stoppen en starten	0,0004
Totaal	0,020

Directe emissies

Uit het proces komen enkel verwaarloosbare directe CO₂-eq.-emissies vrij.

Emissies uit afvalstromen

Uit het proces ontstaan drie afvalstromen: afval, VOC-emissies naar de lucht en afvalwater. Deze worden volledig verbrand. Voor het VOC en afval nemen wij een koolstofgehalte van 86% aan, gelijk aan etheen. Samen levert dit een emissie van 19 kg CO₂-eq./ton LDPE.

Emissies door storingen, stoppen en starten

Er is geen informatie beschikbaar over de emissie van storingen, stoppen en starten. Hierom wordt de generieke 2%-regel toegepast (NIKI-methode, paragraaf 6.2). Dat levert een emissie van $2\% \times 0,02 = 0,0004$ ton CO₂-eq./ton LDPE.

D.3 CO₂-emissies: Input

De totale emissie van de levenscyclusfase-input is 1,75 ton CO₂-eq./ton LDPE.

D.3.1 Grondstoffen

Er zijn twee grondstoffen nodig voor de productie van polyethyleen: etheen en een organische initiator. De BREF schrijft geen specifieke initiator voor, wij hebben 2,5-dimethylhexaan-2,5-dihydroperoxide gebruikt ter illustratie. De initiator heeft geen significante invloed op de CO₂-emissie. Het gebruik van etheen zorgt voor een input-emissie van *EF* ton CO₂-eq./ton LDPE.

D.3.2 Energie

Voor de elektriciteit is uitgegaan van de waarde uit de methode (NIKI-CO₂-emissie-reductiemethode, paragraaf 6.1.3.1: 0,14 kg CO₂/kWh). De emissie door het elektriciteitsverbruik is 0,11 ton CO₂-eq./ton.

De BREF geeft aan dat er 0-0,72 GJ lagetemperatuurstoom kan worden teruggewonnen uit het proces. Wij nemen hiervan de bovenwaarde aan. Hiermee wordt dit een extra stroom, die als negatieve emissie wordt meegenomen. De 0,72 GJ stoom heeft een negatieve emissie van 0,03 ton CO₂-eq./ton.

Tabel D.5 - Input van grondstofstromen en gerelateerde CO₂-eq.-emissies per eenheid referentieproduct (ton PET)

Stof	Eenheid	Hoeveelheid	Emissiefactor	Emissie	Referentie emissiefactor
		Eenheid/ton	Ton CO ₂ -eq./eenheid	Ton CO ₂ -eq./ton	
Etheen	ton	1,006	1,70	1,71	Bijlage C: Etheen
Organische peroxide	ton	0,0002	<i>EF</i>	<i>EF</i>	market for 2,5-dimethylhexane-2,5-dihydroperoxide - Global - 2,5-dimethylhexane-2,5-dihydroperoxide ecoQuery
Elektriciteit	GJ	2,88	0,039	0,11	NIKI-methode
Stoom	GJ	-0,72	0,0473	-0,03	(EC, 2021b)
Totaal				1,75	

D.4 CO₂-emissies: Einde levensduur

De eindelevensduuremissies zijn niet bekend. Wij nemen hier aan dat de volledige stroom wordt verbrand. De volledige koolstofinhoud is fossiel (0,86 tonC/ton). Hiermee komt er 3,14 tonCO₂-eq./ton LDPE vrij.

Tabel D.6 - CO₂-eq.-emissies bij einde levensduur PET

PET	Wegingsfactor -	Fractie	Fractie fossiel	Emissiefactor	Emissie
		ton/ton	ton C/ ton product	ton CO ₂ -eq./ ton C	ton CO ₂ -eq./ ton PET
Verbrand - fossiel	1	1	0,86	44/12	3,14
Gerecycled - fossiel	1	0	0,86	0	0
Langdurig vastleggen - fossiel	0,5	0	0,86	44/12	0
Totaal		1			3,14

Literatuurlijst

EC. (2007). *Reference document on best available techniques in the production of polymers.*

EC. (2021). *Update of benchmark values for the years 2021 – 2025 of phase 4 of the eu ets.*

E Nafta

Nafta

Nafta is een belangrijk tussenproduct in de raffinage van aardolie. Uit nafta worden veel belangrijke koolwaterstoffen gewonnen, die in de productie van zeer veel kunststoffen worden gebruikt.

Er zijn twee routes waarop nafta wordt gewonnen uit aardolie. De eerste is de productie van nafta via atmosferische destillatie uit aardolie. Een van de fracties die hieruit gedestilleerd wordt is nafta. Uit de atmosferische destillatie komt ook een zware restfractie. Dit atmosferisch residu kan verder worden opgewerkt tot nafta, via een vacuümdestillatie en een katalytische kraker.

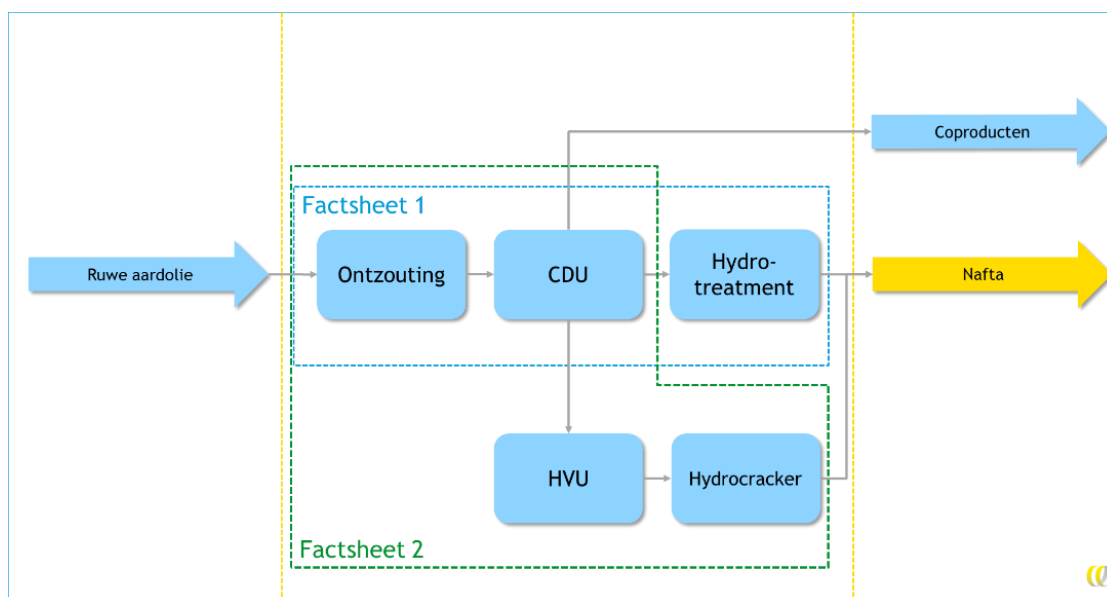
RVO heeft op basis van het carbon transition model van Kalavasta (REF) een analyse gemaakt van de Nederlandse situatie. Hieruit blijkt dat 67% van de nafta via de destillatie wordt gewonnen en 33% wordt via de krakerroute gewonnen.

Hierop volgen twee factsheets, één van de destillatieroute en één van de krakerroute. De input- en procesemissie is daarmee 0,80 ton CO₂/ton nafta. Hier komt nog 3,15 ton CO₂/ton bij voor de end-of-life-emissies.

Tabel E.1 - De levenscyclusemissies van nafta

Emissiefactor	Emissie	ton CO ₂ /ton	Fractie	ton CO ₂ -eq./ton
Destillatieroute	Inputs en proces	0,66	67%	0,44
Krakerroute	Inputs en proces	1,07	33%	0,36
Totaal	Inputs en proces			0,80
Totaal	End-of-life			3,15
Totaal	Totaal			3,95

Figuur E.1 - De twee productieroutes van nafta die in Nederland gangbaar zijn. 2/3^e van de nafta wordt volgens de destillatieroute gemaakt, 1/3 via de hydrocracker



Nafta via de destillatieroute

Deze bijlage presenteert de berekening van broeikasgasemissies van nafta die vrijkomen over de input- en procesfase zoals gedefinieerd volgens de NIKI-CO₂-emissiereductiemethode. Wij bespreken hier de productie van nafta via de destillatieroute.

Nafta wordt gemaakt door de destillatie van aardolie. De aardolie wordt eerst ontzout en vervolgens wordt het gedestilleerd. 96% van de ingaande aardolie wordt door destillatie verdeeld over verschillende fracties. In deze factsheet is uitgegaan van een fractieverdeling van 30% nafta en 70% co-producten.² De nafta-fractie wordt in een laatste stap gestabiliseerd door middel van een hydrotreatment. Hydrotreatment reduceert het aromatische karakter van de stroom en verwijdt stikstof en zwavelatomen. Doordat bij destillatie naast nafta ook andere producten (co-producten) worden geproduceerd, worden de emissies van ontzouting en destillatie voor slechts 30% toegerekend aan nafta.

Tabel E.2 geeft een overzicht van de CO₂-eq.-emissies over de levenscyclus. De massa- en energiebalans (MEB) van het productieproces is de basis van deze berekening (zie Paragraaf E.1). De MEB is in principe opgesteld volgens de relevante BREF (Best Available Techniques REFERENCE document), in dit geval de BREF REF (EC, 2015). Op basis van de MEB worden ten eerste de directe CO₂-eq.-emissies van het productieproces berekend (zie Paragraaf E.2). Ten tweede laat de MEB zien welke inputs (materialen en energie) er nodig zijn voor het productieproces, hiermee worden de CO₂-eq.-emissies van de input berekend (zie Paragraaf E.3). Als laatste laat de MEB ook zien wat de koolstofinhoud van het eindproduct, welk worden gebruikt om de CO₂-eq.-emissies bij einde levensduur te bepalen (zie Paragraaf E.4).

De totale emissie om 1 ton nafta te produceren is 0,66 ton CO₂-eq. De meeste emissies komen van de input, waarbij ruwe aardolie het grootste deel verzorgt.

² Afgerond naar MIDDEN-database PBL. (2021b). *MIDDEN database*. Planbureau voor de Leefomgeving (PBL). <https://www.pbl.nl/en/middenweb/the-database>, casus Shell Pernis.

Tabel E.2 - De levenscyclusemissie van nafta-productie uit ruwe aardolie

Levenscyclusfase	CO ₂ -eq.-emissies	Relevant hoofdstuk
	ton CO ₂ -eq./ton nafta	
Input	0,61	Paragraaf E.3
Proces	0,047	Paragraaf E.2
Einde levensduur	0	Paragraaf E.4
Totaal	0,66	

E.1 Massa- en energiebalans van het productieproces

Nafta is een tussenproduct in de raffinage van olie. Het kan gemaakt worden uit olie van verschillende oorsprong. Afhankelijk van het type olie is de verhouding in de productmix die gemaakt wordt anders. In deze factsheet is uitgegaan van 30% nafta en 70% co-producten. In de gehele berekening zijn wij uitgegaan van 86% koolstofinhoud voor alle aardolie(fracties).

Het productieproces bestaat uit drie stappen:

1. Ontzouten.
2. Destillatie (Crude oil distillation unit (CDU)).
3. Stabiliseren (via hydrotreatment).

Ontzouten

Ruwe aardolie bevat zouten. Deze zouten moeten verwijderd worden om te voorkomen dat deze downstream zorgen voor procesverstoringen. De ruwe aardolie wordt voorverwarmd tot 135 °C. Er worden water en demulsifier chemicals bijgemengd en een elektrische stroom door dit mengsel geleid. De stroom breekt de emulsie waardoor water met zout wordt vrijgemaakt uit de oplossing. Uit dit proces komt een afvalwaterstroom die zout en organische componenten bevat. Deze proceseenheid moet zo nu en dan gereinigd worden van opgehoopt slib.

Voor de ontzoutstap wordt 3% water, 5 ppm demulsifier chemicals, en 0,075 kWh/ton elektriciteit toegevoegd. Het toegevoegde water komt in deze stap ook vrij als afvalwater, dit mag volgens de methode buiten beschouwing worden gelaten.

Destillatie

De hoofdprocesstap is de destillatie van de ontszoute olie. Hierbij wordt er warmte toegevoegd om de verschillende fracties van elkaar te scheiden. De verdeling tussen verschillende fracties wordt grotendeels bepaald door de grondstof. De belangrijkste fracties zijn nafta, kerosine, lichte gasolie, zware gasolie, een niet-condenseerbare fractie en atmosferisch residu.

De niet-condenseerbare fractie (0,5%) is een afvalstroom en wordt volledig verbrand. Dit is raffinaderijgas, waardoor de verbrandingswaarde (45,2 MJ/kg) van deze stap wordt afgetrokken van de energievraag van deze processtap. Van de producten (99,5%) rekenen wij 30% toe aan nafta en 70% aan de resterende fracties. De resterende fracties beschouwen wij als co-producten en splitsen wij niet verder uit in deze factsheet.

Naast de niet-condenseerbare fractie komt er bij destillatie van aardolie ook slib vrij, dit is minder dan 1 ton slib per Mton olie.³ Deze slib is een afvalstroom die wordt verbrand. De emissies van deze verbranding worden toegerekend aan de totale emissies van het destillatieproces.

Hydrotreatment

De nafta afkomstig uit de destillatie wordt gestabiliseerd in een hydrotreater. Hierbij reageert waterstof met de nafta om stikstof- en zwavelatomen te verwijderen en aromatische verbindingen te verbreken. Hier komt een kleine hoeveelheid CO₂ bij vrij, wij gaan hierbij uit van de laagst gegeven waarde in de BREF, 27 kg CO₂/ton nafta.

Tijdens hydrotreatment wordt nafta over een katalysator van kobaltoxide-molybdeenoxide-aluminiumoxide geleid in aanwezigheid van waterstof (1 kg/ton). Een deel van de katalysator wordt verbruikt, gemiddeld 23 ton/Mton voeding (ongestabiliseerde nafta).

Het uiteindelijke product is gestabiliseerde nafta die verder verwerkt kan worden.

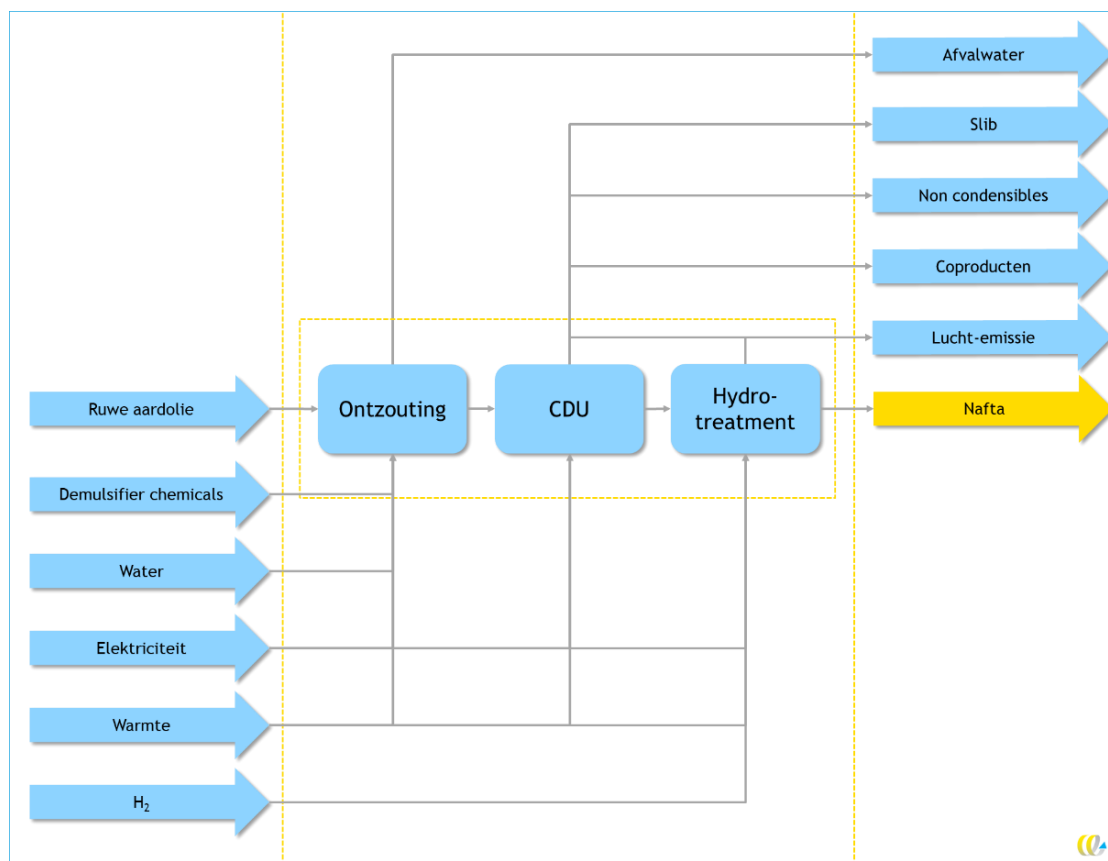
E.1.1 Massabalans

Om 1 ton nafta te produceren, met een aangenomen opbrengst van 30%, is 3,44 ton ruwe aardolie nodig. Van de resterende 70% worden co-producten gemaakt (2,4 ton) en er is een klein verlies (0,04 ton).

³ De BREF geeft een typische slibwaarde van 6,3 ton/jr in een destillatie die 8,7 Mton/jr olie verwerkt (paragraaf 3.19, P208 BREF).

Vervolgens wordt de ontzoute aardolie gedestilleerd, hierbij wordt het gescheiden in verschillende fracties, in dit geval samengevat als nafta en co-producten. Hierbij ontstaan ook twee afvalstromen; de niet-condenseerbare fractie (0,5%), en een slibstroom. Deze slibstroom is verwaarloosbaar. De non-condensibles, gassen die onder de heersende druk- en temperatuurcondities niet condenseren tot vloeistof, omvatten zo'n 0,02 ton per ton nafta.

Figuur E.2 - Het productieproces van nafta uit ruwe aardolie via de destillatie



Tabel E.3 - Massabalans voor de productie van nafta via destillatie (alle waardes zijn in tonnen)

	Ontzouten		Destillatie		Hydrotreatment	
	In (ton)	Uit (ton)	In (ton)	Uit (ton)	In (ton)	Uit (ton)
Ruwe aardolie	3,44	3,44	3,44			
Demulsifier chemicals	0,0000172					
Water	0,10	0,10				
Co-producten				2,40		
Non-condensibles				0,02		
Slib				0,00		

	Ontzouten		Destillatie		Hydrotreatment	
	In (ton)	Uit (ton)	In (ton)	Uit (ton)	In (ton)	Uit (ton)
Nafta				1,03	1,03	1,00
Waterstof					0,00	
Katalysator					0,00	
CO ₂						0,03
Totaal	3,55	3,55	3,44	3,44	1,03	1,03

Tabel E 4 - Massa- en koolstofbalans voor de productie van nafta

Stof	Input (ton)	Output (ton)	Input (koolstofon)	Output (koolstofon)
Ruwe aardolie	3,44		2,96	
Demulsifier chemicals	0,00		0,00	
Water	0,10	0,10	0,00	0,00
Co-producten		2,40		2,06
Non-condensibles		0,02		0,01
Slib		0,00		0,00
Nafta		1,00		0,86
Waterstof	0,00		0,00	
Katalysator	0,00		0,00	
CO ₂		0,03		0,01
Totaal	3,55	3,55	2,96	2,96

E.1.2 Energie

De BREF geeft typische waarden voor het verbruik van alle inputs voor warmte, elektriciteit en stoom. Deze waardes nemen geen verdere warmte-integratie mee. In Tabel E.5 staan per stap het warmte- en elektriciteitsverbruik gegeven voor de productie van 1 ton nafta. Deze waarden zijn berekend op basis van de massabalans. Bijvoorbeeld; de warmtevraag voor destillatie is de warmtevraag voor 3,44 ton ruwe aardolie, waar uiteindelijk 1 ton nafta en 2,4 ton co-producten van wordt gemaakt.

Voor de ontzouting wordt 0,075 kWh/ton olie gebruikt. Hiervoor wordt de olie ook voorverwarmd, maar deze waarde is onbekend. Wij nemen aan dat deze warmtevraag wordt gedekt met de warmtevraag van destillatie.

In de destillatie wordt 400 MJ brandstof per ton aardolie verbruikt, 4 kWh elektriciteit per ton aardolie en 25 kg stoom per ton aardolie. Wij nemen aan dat de stoomconsumptie wordt gedekt met de brandstofvraag. Een deel van de brandstofvraag wordt gedekt door de productie van non-condensibles of raffinaderijgas.

In de hydrotreatment wordt 200 MJ brandstof, 5 kWh elektriciteit, en 10 kg stoom per ton nafta. Wij nemen aan dat de stoomconsumptie wordt gedekt met de brandstofvraag en laten deze dus buiten beschouwing.

Tabel E.5 - Energie-inputs voor de productie van 1 ton nafta

Energie	Eenheid	Ontzouten	Destillatie	Hydrotreatment	Totaal
Warmte	MJ		1.377	206	1.583
Elektriciteit	kWh	0,26	13,8	5,1	19,2

E.2 CO₂-emissies: Proces

De procesemissies voor de productie van nafta bestaan uit drie onderdelen; directe emissies, emissies uit afvalstromen, en emissies door storingen, stoppen en starten. De directe emissies zijn 0,03 ton CO₂-eq. per ton nafta. De emissies uit afvalstromen zijn 0,05 ton CO₂-eq. De emissies voor onderhoud, stoppen en starten zijn 0,0016 ton CO₂-eq. Dat brengt het totaal aan procesemissies op 0,045 kg CO₂-eq./ton nafta.

De totale CO₂-eq.-emissies van het proces zijn 0,08 ton CO₂-eq. De directe emissies per ton nafta komen direct uit de massabalans. De emissies uit de verwerking van afvalstromen en van storingen, stoppen en starten zijn verdeeld over co-producten (30/70), waardoor de uiteindelijke emissie uitkomt op 0,045 ton CO₂-eq./ton nafta.

Tabel E.6 - Procesemissies voor de productie van nafta

Oorsprong	Totale emissie	Emissie nafta
	ton CO ₂ -eq./ton	ton CO ₂ -eq./ton nafta
Directe emissie	0,03	0,03
Afvalstromen	0,05	0,016
Storingen, stoppen en starten	0,00	0,001
Totaal	0,08	0,047

E.2.1 Directe emissies

Uit het proces komt direct een emissie vrij van 0,028 ton CO₂-eq./ton nafta. Deze komt uit de hydrotreatment en wordt volledig toegekend aan nafta.

E.2.2 Emissies uit afvalstromen

Er komen drie afvalstromen uit het totale productieproces. Dat zijn afvalwater uit de ontzouting, niet-condenseerbaar gas uit de destillatie en slib uit de destillatie. Dit is een totale emissie van 0,05 ton CO₂-eq. Al deze emissies worden voor 29,4% toegekend aan nafta (1 ton), de rest is toegerekend aan de restproducten (2,4 ton), dat is 0,016 ton CO₂-eq. per ton nafta.

De hoeveelheid slib die vrijkomt is verwaarloosbaar en draagt niet bij aan de CO₂-eq.-emissie.

De belangrijkste stroom die vrijkomt is niet-condenseerbaar gas bij de destillatiestap. We gaan hier uit van de koolstofinhoud van olie (86%). Dit levert 0,05 ton CO₂-eq./ton. Deze niet-condenseerbare fractie is raffinaderijgas met een waarde van 45,2 MJ/kg. Wij trekken deze verbrandingswaarde af van de energievraag in het proces.

E.2.3 Emissies door storingen, stoppen en starten

Er is geen informatie beschikbaar over de emissie van storingen, stoppen en starten. Hierom wordt de generieke 2%-regel toegepast (NIKI-methode, paragraaf 6.2). Dat levert een emissie van $2\% \times 0,044 = 0,001$ ton CO₂-eq./ton nafta.

E.3 CO₂-emissies: Input

De totale emissie van de levenscyclusfase-input is 0,61 ton CO₂-eq./ton nafta.

E.3.1 Grondstoffen

Voor de productie van nafta zijn vijf inputs nodig: ruwe aardolie, demulsifier chemicals, water, katalysator en waterstof. De eerste drie inputs worden gebruikt voor ontzouting en destillatie, hierom worden deze emissies verdeeld over zowel nafta als de co-producten. Het waterstof en de katalysator wordt alleen gebruikt voor de stabilisatie van nafta en wordt dus volledig aan nafta toegerekend.

Voor ruwe aardolie hebben wij de Europese marktmix aangenomen. Er wordt 3,44 ton ruwe aardolie gebruikt voor een totale emissie van *ED* ton CO₂-eq. Hiervan wordt 0,59 ton CO₂-eq. aan nafta toegerekend.

Demulsifier chemicals is niet gespecificeerd, wij hebben gekozen voor een waarde van epoxyhars. Dit is een demulsifier chemical met een hoge emissiefactor. De emissie van de demulsifier chemicals draagt niet significant bij aan de CO₂-eq.-emissies van de productie van nafta.

Water heeft geen CO₂-eq.-emissie.

Op raffinaderijen wordt grijze waterstof gebruikt. De volledige emissie van 0,01 ton CO₂-eq. wordt toegekend aan nafta.

Het is niet bekend wat de verhouding tussen de verschillende metaaloxiden in de katalysator is. Wij hebben de hoogste waarde (kobaltoxide) genomen, dit toont aan dat deze emissie geen significante invloed heeft. De totale emissie van het verbruik van de katalysator moet aan nafta worden toegerekend.

E.3.2 Energie

De emissie door warmte- en elektriciteitsvraag die nodig is voor ontzouting en destillatie moet worden toegerekend aan nafta en de co-producten. De warmte- en elektriciteitsvraag van de hydrotreatment is volledig voor rekening van nafta.

De warmtevraag is gesplitst tussen de destillatie en hydrotreatment. De warmtevraag van de destillatie (1.377 MJ) wordt verdeeld over nafta en co-producten, dat komt neer op 405 MJ voor nafta. De warmtevraag van de hydrotreatment (206 MJ) wordt volledig aan nafta toegekend. In totaal is de warmtevraag die aan nafta wordt toegerekend 611 MJ/ton nafta. Dat levert 0,03 ton CO₂-eq./ton nafta.

De stroomvraag van de ontzouting (0,26 kWh) en destillatie (13,77 kWh) wordt verdeeld over nafta en co-producten. De stroomvraag van de hydrotreatment (5,14 kWh) wordt volledig aan nafta toegekend. Dat levert een stroomvraag van 9,3 kWh/ton nafta, wat gelijk staat aan 0,003 ton CO₂-eq./ton nafta.

Hiervan wordt de energie die geleverd wordt door de productie van raffinaderijgas nog afgetrokken van de inputstromen.

Tabel E.7 - Input van grondstofstromen en gerelateerde CO₂-emissies die nodig zijn voor de productie van 1 ton nafta én bijbehorend restproduct

Stof	Eenheid	Hoeveelheid	Emissiefactor	Emissie	Emissie nafta	Referentie emissiefactor
		Eenheid/ton	ton CO ₂ -eq./ eenheid	ton CO ₂ -eq./ ton	ton CO ₂ -eq./ ton nafta	
Ruwe aardolie	ton	3,44	<i>EF</i>	<i>EF</i>	0,59	Petroleum {Europe without Switzerland} market for petroleum Cut-off, U (Ecoinvent, 2023)
Demulsifier chemicals	ton	0,00002	<i>EF</i>	<i>EF</i>	0,00	Epoxy resin, liquid {RER} market for epoxy resin, liquid Cut-off, U (Ecoinvent, 2023)
Katalysator	ton	0,000047	<i>EF</i>	<i>EF</i>	0,00	Cobalt oxide {GLO} cobalt production Cut-off, U (Ecoinvent, 2023)
Waterstof	ton	0,00103	10,77	0,01	0,01	(CO ₂ emissiefactor ren.nl, 2024) Factsheet waterstof Bijlage J
Warmte	MJ	1.582,77	0,000047	0,07	0,03	(EC, 2021a)
Elektriciteit	KWh	19,17	0,00029	0,01	0,003	NIKI-methode
Non-condensable (raffinaderijgas)	MJ	-904	0,000064	-0,058	-0,017	(CO ₂ emissiefactor ren.nl, 2024)
Totaal					0,61	

Nafta via de krakerroute

Deze factsheet presenteert de berekening van broeikasgasemissies van nafta via de krakerroute die vrijkomen over proces en inputstappen zoals gedefinieerd volgens de NIKI-CO₂-emissiereductiemethode.

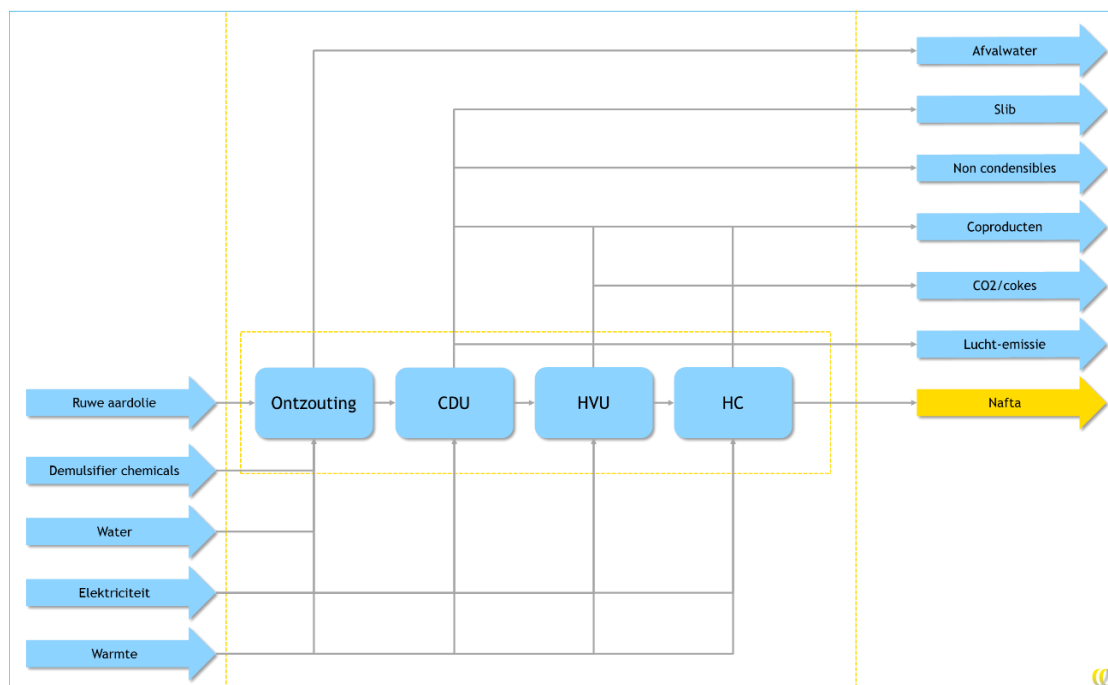
Naast destillatie van aardolie via een atmosferische destillatie, wordt nafta ook via vacuümdestillatie en een kraker gemaakt. Hierbij wordt het atmosferisch residu uit een atmosferische destillatie verder verwerkt in een destillatietoren onder lage druk. Hierdoor is het mogelijk om meer waardevolle producten uit de aardolie te winnen. Hiermee wordt onder andere heavy fuel gasoil gemaakt (HVGO). Deze stroom wordt vervolgens gekraakt om kleinere koolwaterstoffen te produceren.

De levenscyclusemissies van de productie van nafta via de krakerroute zijn 1,07 ton CO₂-eq./ton nafta. Hierbij zijn er geen emissies voor de fase einde levensduur meegenomen. De emissiefactor wordt per processtap berekend, omdat deze anders onderschat wordt.

De eerste stappen van naftaproductie zijn hetzelfde als bij de destillatieroute. Eerst wordt de olie ontzout. Vervolgens komt de destillatiestap. Hierbij worden verschillende fracties gevormd. De naftafractie via de destillatieroute is eerder al besproken. Hier komt ook een atmosferisch residu vrij, dit wordt opgewerkt tot lichtere fracties in de vacuümdestillatie (HVU), één van deze fracties is HVGO. Van HVGO worden in een kraker nafta, diesel en andere producten gemaakt.

Figuur E.3 - Productieproces van nafta via de krakerroute. Uit de CDU komt ook een naftafractie, deze wordt in het andere deel van de factsheet besproken

CDU = atmosferische destillatie, HVU = vacuümdestillatie, HC = hydrocracker



Ontzouten

Olie kan veel zout bevatten. Deze stroom moet gewassen worden met water, hierbij worden demulsifier chemicals toegevoegd om de ontzouting te helpen. Er komt een vuilwaterstroom vrij die rijk is aan zouten.

Destillatie (CDU)

De hoofdprocesstap is de destillatie van de ontzoute olie. Hierbij wordt er warmte toegevoegd om de verschillende fracties van elkaar te scheiden. De verdeling tussen verschillende fracties wordt grotendeels bepaald door de grondstof. De belangrijkste fracties zijn nafta, kerosine, lichte gasolie, zware gasolie, een niet-condenseerbare fractie en atmosferisch residu.

De niet-condenseerbare fractie (0,5%) is raffinaderijgas, een afvalstroom en wordt volledig verbrand. De warmte (45,2 MJ/kg) van deze verbranding wordt ingezet bij de processen in een raffinaderij. Van de producten (99,5%) rekenen wij 30% toe aan nafta en 70% aan de resterende fracties. De exacte verdeling maakt niet uit voor de berekening van de nafta-footprint want geeft dezelfde waarde per ton.

Naast de niet-condenseerbare fractie komt er bij destillatie van aardolie ook nog een andere afvalstroom als slib vrij, dit is minder dan 1 ton slib per Mton olie. Deze afvalstroom wordt ook verbrand. De emissies van deze verbranding worden toegerekend aan de totale emissies van het destillatieproces.

Uit de atmosferische destillatie komen verschillende koolwaterstoffracties vrij, het atmosferisch residu is de fractie die in de vacuümdestillatie verder wordt opgewerkt. Dit is ongeveer 28% van de ingaande stroom.

Vacuümdestillatie (HVU)

Een vacuümdestillatie is een verdere destillatie van het atmosferisch residu uit de vorige destillatiestap. Door de druk te verlagen is het mogelijk om meer waardevolle fracties uit deze fractie te scheiden.

In een vacuümdestillatie wordt de ingaande stroom opgewarmd tot 400 °C en wordt stoom toegevoegd. De productstroom die de kraker in wordt geleid is het high vacuüm gas oil (HVGO). Dit is 20% van de uitgaande stroom.

Tabel E.8 - Energieverbruik van een vacuümdestillatie (voor de berekeningen zijn de laagste waarden gebruikt)

Verbruik	Eenheid	Waarde
Stoom	20-60	Kg/ton
Brandstof (raffinaderijgas)	400-800	MJ/t
Elektriciteit	1,5-4,5	kWh/t
Directe emissie	41	Kg CO ₂ /ton

Bron: Zie tabel 3,77 en paragraaf 3.19 uit (EC, 2015).

Hydrocracker

In een hydrocracker (HC) worden grote koolwaterstoffen onder overdruk met waterstof gekraakt tot kleinere koolwaterstoffen. Hierbij worden ook veel vervuilingen (stikstof, zwavel) verwijderd. Dit gebeurt onder hoge druk (35-200 kg/cm²) en temperatuur (280-475 °C).

Er is volgens de BREF niets bekend over directe emissies of cokes-vorming in een hydrocracker. Het is bekend dat er cokes vormen, maar de hoeveelheid is niet bekend. Vanuit de MIDDEN-database (PBL, 2021b) nemen wij over dat er 43 kg/ton raffinaderijgas gevormd wordt. Dit wordt verbrand en de warmte wordt nuttig ingezet binnen de raffinaderij.

Tabel E.9 - Energieverbruik van een hydrocracker (voor de berekeningen zijn de laagste waardes gebruikt)

Verbruik	Eenheid	Waarde
Waterstof	260-400	Nm ³ /ton
Waterstof	23,4-36	Kg/ton
Brandstof (raffinaderijgas)	400-1.200	MJ/t
Elektriciteit	20-150	kWh/t

E.4 Massabalans

Van zowel de CDU, de HVU als de HC geeft de BAT niet aan in welke verdeling de fracties vrijkomen. Omdat de totale opbrengst bij benadering 100% is, maakt dit niet uit voor de uitkomsten. Wij hebben de verdelingen overgenomen uit de MIDDEN-database over Shell Pernis. Hierbij hebben wij de aanname gedaan dat de thermocracker de hydrocracker is, omdat dit de enige stap is waar nafta vrijkomt. Uit een atmosferische destillatie komt 27% nafta direct en 28% vacuüm gasolie, dat verder wordt verwerkt. Uit een HVU komt 20% HVGO en uit een hydrocracker komt 76% nafta. Voor de hier gepresenteerde berekeningen is voornamelijk het totale rendement belangrijk. Dat is in al deze stappen > 95%. Daarom maakt de exacte verdeling niet uit voor de berekening van de emissiefactoren.

Behalve de cokes hebben alle stromen uit een destillatie (CDU en HVU) en een kraker (HC) economische waarde. Het telt dus als co-product en er moet een massa-aandeel emissie aan worden toegekend (NIKI-methode 2.3.1). Als er raffinaderijgas vrijkomt, dan wordt dit als afvalstroom verbrand en vervolgens wordt de hierbij vrijkomende warmte in mindering gebracht op de energievraag van die stap.

Tabel E.10 - Massabalans (groot) voor de productie van nafta via de krakerroute

Stof	Eenheid	Inputs					Outputs				
		Ontzouten	Destillatie	HVU	HC	Totaal	Ontzouten	Destillatie	HVU	HC	Totaal
Aardolie	ton	22,38	22,38	-	-	22,38	22,38	-	-	-	-
Water	ton	0,67		-	-	0,67	0,67	-	-	-	0,67
Demulsifier chemicals	ton	0,00011		-	-	0,00		-	-	-	-
Nafta	ton			-	-			6,04	-	1,00	7,04
Atmosferisch residu	ton			6,27	-	-		6,27	-	-	
Co-producten	ton			-	-			10,07	4,95	0,32	15,34
HVGO	ton			-	1,32	-		-	1,32	-	
Waterstof	ton			0,01	0,03	0,04		-	-	-	-
Raffinaderijgas	ton			-	-			1,12	-	0,06	1,18
Totaal	ton	23,05	22,38	6,27	1,35	23,09	23,05	23,50	6,27	1,37	24,22

Tabel E.11 - Massa- en koolstofbalans voor de productie van nafta via de krakerroute. Via de krakerroute wordt hier 1 ton nafta geproduceerd, de rest komt uit de atmosferische destillatie

Stof	Inputs (ton)	Outputs (ton)	Input (koolstofton)	Output (koolstofton)
Aardolie	22,38		18,57	-
Water	0,67	0,67		
Demulsifier chemicals	0,00011			-
Nafta		7,04		5,84
Co-producten		15,34		12,73
Waterstof	0,04			
Raffinaderijgas		1,18		0,98
Totaal	23,09	24,22	18,57	19,55

E.5 Energiebalans

Het energieverbruik dat hoort bij deze opvolgende stappen is gegeven in de volgende tabel.

Tabel E.12 - Energieverbruik voor de productie van 1 ton feed per processtap

Energie	Eenheid	Ontzouten	Atmosferische destillatie (CDU)	Vacuum-destillatie (HVU)	Hydrocracker (HC)
Brandstof	MJ		400	400	400
Elektriciteit	kWh	3	4	1,5	20
Brandstof raffinaderijgasproductie	ton		-0,05		-0,043

E.5.1 Atmosferische destillatie (CDU)

Uit een atmosferische destillatie (CDU) komt per ton ingaande aardolie 0,27 ton nafta. Deze is in het andere deel van de factsheet besproken. Daarnaast komt hier 0,28 ton residu uit. Het totale rendement aan producten is 99,5%.

Voor alle berekeningen, nemen we de massabalansen over uit het MIDDEN-rapport van Shell Pernis. Bij de atmosferische destillatie, komt daar onderstaande massabalans uit per ton ingaande stroom aardolie.

Tabel E.13 - Eenvoudige massabalans over een atmosferische destillatie met uitgaande fracties volgens de MIDDEN-database

Stroom	In (ton)	Uit (ton)
Aardolie	1,00	
Nafta		0,27
Kerosine		0,16
Diesel		0,18
Atmosferisch residu (vacuüm gasolie)		0,28
Residu		0,12
Non-condensibles (raffinaderijgas)		0,05

Bron: (PBL, 2021b).

Tabel E.14 - De levenscyclusemissie van de productie van atmosferisch residu uit aardolie door atmosferische destillatie

Levenscyclusfase	CO ₂ -eq.-emissies	Relevant hoofdstuk
	ton CO ₂ -eq./ton nafta	
Input	0,61	Paragraaf E.7
Proces	0,016	Paragraaf E.6
Einde levensduur	-	Paragraaf E.14
Totaal	0,63	

E.6 CO₂-emissies: Proces

De procesemissies van atmosferisch residu uit een destillatie bestaan uit drie onderdelen: directe emissies, emissies uit afvalstromen, en emissies door storingen, stoppen en starten. De totale procesemissies zijn 0,016 ton CO₂-eq./ton nafta.

Er zijn geen directe emissies uit een destillatie. De emissies uit afvalstromen zijn 0,015 ton CO₂/ton ingaande olie. De emissies voor onderhoud, stoppen en starten zijn 0,0003 ton CO₂-eq./ton atmosferisch residu.

Tabel E.15 - Procesemissies atmosferische destillatie voor de productie van atmosferisch residu

Oorsprong	Emissie nafta
	ton CO ₂ -eq./ton nafta
Directe emissie	0
Afvalstromen	0,015
Storingen, stoppen en starten	0,0003
Totaal per ton ingaand	0,016
Totaal per ton atmosferisch residu	0,016

E.6.1 Directe emissies

Bij de productie van atmosferisch residu komen geen directe emissies vrij.

E.6.2 Emissies uit afvalstromen

Er zijn drie afvalstromen uit de productie van atmosferisch via een CDU. De eerste is water uit de ontzoutingsstap. Dit water heeft geen emissie.

Bij atmosferische destillatie (CDU) komen non-condensibles vrij, 50 kg/ton ingaande stroom. Deze 0,05 ton raffinaderijgas heeft een verbrandingswaarde van 45,2 MJ/kg. Hierdoor trekken wij 226 MJ van de energiebehoefte af.

Bij atmosferische destillatie wordt 7,2 g slib per ton ingaande stroom gevormd als afvalstroom. Deze 7,2 g slib geeft een emissie van 22 g CO₂.

Tabel E.16 - De afvalemissies van de productie van nafta via de krakeroute

Stof	Hoeveelheid	Koolstofinhoud	Emissie
	ton/ton ingaand	ton C/ton	ton CO ₂ -eq. /ingaande stroom
Non-condensibles	0,005	0,004	0,015
Slib	0,0000072	0,0000060	0,000022
Totaal			0,015

E.6.3 Emissies door storingen, stoppen en starten

De emissies door storingen, stoppen en starten zijn 2% van de andere procesemissies. Dat komt neer op totaal 0,003 ton CO₂-eq.

E.7 CO₂-emissies: Input

De emissie om 1 ton ruwe aardolie te destilleren zijn 0,61 ton CO₂-eq./ton aardolie ingaand. Omdat de opbrengt 99,5% is, is ook voor alle uitgaande stromen de inputemissie 0,61 ton CO₂-eq./ton.

E.7.1 Grondstoffen

De productie van atmosferisch residu heeft drie grondstoffen: aardolie, water, en demulsifier chemicals.

Hierbij is duidelijk dat de grootste emissies komen van het gebruik van aardolie als ruwe grondstof. Water heeft geen CO₂-emissies. De emissies van de chemicaliën zijn verwaarloosbaar klein.

E.7.2 Energie

De destillatie van aardolie kost veel energie. Dit is voornamelijk nodig in de vorm van warmte, die wordt geleverd door het verbranden van gassen. Dit is voornamelijk raffinaderijgas, maar kan aangevuld worden met aardgas.

Tabel E.17 - Input energie en grondstoffen voor de productie van atmosferisch residu uit een CDU

Stroom	Eenheid	Energievraag	Emissiefactor	Emissie	Bron
		Eenheid/ton	Ton CO ₂ -eq./eenheid	Ton CO ₂ -eq./ton	
Ruwe aardolie	ton	1	<i>EF</i>	<i>EF</i>	Market for petroleum Europe without Switzerland (EcolInvent, ongoing)
Demulsifier chemicals	ton	0,00005000	<i>EF</i>	<i>EF</i>	Epoxy resin, liquid {RER} market for epoxy resin, liquid Cut-off, U (EcolInvent, ongoing)
Brandstof (als raffinaderijgas)	MJ	400	0,000064	0,026	(CO2emissiefactoren.nl, ongoing)
Opwek raffinaderijgas	MJ	-226	0,000064	-0,014	(CO2emissiefactoren.nl, ongoing)
Elektriciteit	kWh	4	0,0002900	0,0012	Niki-methode
Totaal per ton ingaand				0,61	
Totaal per ton atmosferisch residu				0,61	

E.8 Vacuümdestillatie (HVU)

In een vacuümdestillatie gaat vacuüm gasolie, wat verder wordt gesplitst in vacuümdestillaat, short residu (HVGO) en light residu. Volgens de MIDDEN-database is de verhouding hiervan als volgt. De opbrengst is 96%, de rest gaat naar CO₂ als directe emissie.

Tabel E.18 - Eenvoudige massabalans van een vacuümdestillatie per ton ingaande stroom volgens MIDDEN-database

Stroom	Ingaand (ton)	Uitgaand (ton)
Atmosferische residu	1,00	
Vacuümdestillaat		0,57
High vacuum gas oil (HVGO)		0,21
Light destillaat		0,20
CO ₂		0,041

Bron: (PBL, 2021b).

Tabel E.19 - De levenscyclusmissie van naftaproductie uit ruwe aardolie via de krakeroute

Levenscyclusfase	CO ₂ -eq.-emissies	Relevant hoofdstuk
	ton CO ₂ -eq./ton Nafta	
Input	0,69	Paragraaf E.10
Proces	0,043	Paragraaf E.9
Einde levensduur	-	
Totaal	0,73	

E.9 CO₂-emissies: Proces

De procesemissies van HVGO uit een vacuümdestillatie bestaan uit drie onderdelen: directe emissies, emissies uit afvalstromen, en emissies door storingen, stoppen en starten. De totale procesemissies zijn 0,042 ton CO₂-eq./ton ingaande stroom. Omdat de opbrengst 96%, moet deze hiermee worden verhoogd. Dat levert 0,043 ton CO₂-eq./ton HVGO.

Tabel E.20 - Procesemissies voor de productie van HVGO via vacuümdestillatie

Oorsprong	Totale emissie
	ton CO ₂ -eq./ton
Directe emissie	0,041
Afvalstromen	0
Storingen, stoppen en starten	0,000082
Totaal per ton ingaand	0,042
Totaal per ton HVGO	0,043

E.9.1 Directe emissies

Bij een vacuümdestillatie komen 41 kg CO₂/ton ingaande stroom vrij.

E.9.2 Emissies uit afvalstromen

Er zijn geen afvalstromen uit een vacuümdestillatie volgens de BREF.

E.9.3 Emissies door storingen, stoppen en starten

De emissies door storingen, stoppen en starten zijn 2% van de andere procesemissies. Dat komt neer op 0,00082 ton CO₂-eq.

E.10 CO₂-emissies: Input

Om 1 ton atmosferisch residu te verwerken in een vacuümdestillatie, is 1 kg waterstof nodig. De grondstofemissies zijn 0,64 ton CO₂-eq./ton ingaand. Daarnaast zijn er energie-emissies van 0,026 ton CO₂-eq./ton ingaand. Deze emissies zijn samen 0,67 ton CO₂-eq./ton ingaand. Omdat de opbrengst 96% is, moet voor de uitgaande stromen deze hierdoor worden gedeeld tot 0,69 ton CO₂-eq./ton ingaand.

E.10.1 Grondstoffen

De productie van HVGO uit atmosferisch residu heeft twee grondstoffen: atmosferisch residu en waterstof. De HVGO zorgt voor de grootste emissies, waterstof heeft een kleinere bijdrage.

E.10.2 Energie

De destillatie van aardolie kost veel energie. Dit is voornamelijk nodig in de vorm van warmte, die wordt geleverd door het verbranden van gassen. Dit is voornamelijk raffinaderijgas, maar kan aangevuld worden met aardgas.

Tabel E.21 - Input energie voor de productie van HVGO via vacuümdestillatie

Stroom	Eenheid	Energievraag	Emissiefactor	Emissie	Bron
		Eenheid/ton	ton CO ₂ -eq./eenheid	ton CO ₂ -eq./ton	
Atmosferisch residu	ton	1	0,63	0,63	E.5.1
Waterstof	ton	0,001	10,77	0,01	Bijlage J: Waterstof
Brandstof (als raffinaderijgas)	MJ	400	0,000064	0,026	(CO ₂ emissiefactoren.nl, ongoing)
Elektriciteit	kWh	1,5	0,0002900	0,00044	NIKI-methode
Totaal per ton ingaand				0,67	
Totaal per ton HVGO				0,69	

E.11 Hydrocracker

In Nederland produceren de meeste raffinaderijen nafta ook via een hydrocracker. Daarom nemen we deze situatie aan als representatief voor de Nederlandse situatie.

Uit 1 ton short residu (HVGO) komt 96% aan producten via een hydrocracker. De grootste fractie is nafta, daarnaast wordt er ook diesel en residu olie geproduceerd. De overige 4% is raffinaderijgas, die wordt verbrand om energie op te wekken voor andere raffinage-processen.

Tabel E.22 - Vereenvoudigde massabalans van een hydrocracker volgens de MIDDEN-database

	In (ton)	Uit (ton)
HVGO	1,00	
Waterstof	0,023	
Diesel		0,16
Nafta		0,76
Residu olie		0,06
Raffinaderijgas		0,043

Bron: (PBL, 2021b).

De totale emissies van de productie van nafta worden veroorzaakt door de inputs van HVGO en waterstof en energie. De procesemissies worden veroorzaakt door de verbranding van raffinaderijgas, dit is 0,043 ton raffinaderijgas/ton HVGO (PBL, 2021b). Deze wordt verbrand met een verbrandingswaarde van 45,2 MJ/kg (CO2emissiefactoren.nl, 2024). Deze energie wordt afgetrokken van de inputemissies.

Tabel E.23 - De levenscyclusemissie van nafta uit HVGO via een katalytische kraker

Levenscyclusfase	CO ₂ -eq.-emissies	Relevant hoofdstuk
	ton CO ₂ -eq./ton Nafta	
Input	0,93	Paragraaf E.13
Proces	0,14	Paragraaf E.12
Einde levensduur	-	
Totaal	1,07	

E.12 CO₂-emissies: Proces

De procesemissies van een hydrocracker zijn 0,14 ton CO₂/ton ingaande stroom. Omdat de totale opbrengst 96% is, moet deze hiermee verdeeld worden. De waarde verandert hierdoor niet.

Tabel E.24 - Procesemissies voor de productie van HVGO via vacuümdestillatie

Oorsprong	Totale emissie
	ton CO ₂ -eq./ton
Directe emissie	0
Afvalstromen	0,13
Storingen, stoppen en starten	0,0025
Totaal per ton ingaand	0,013
Totaal per ton nafta	0,014

E.12.1 Directe emissies

Er komen bij een kraker geen directe CO₂-emissies vrij.

E.12.2 Emissies uit afvalstromen

De afvalemissies van een hydrocracker zijn 0,13 ton CO₂-eq./ton ingaand.

Tabel E.25 - De afvalemissies van de productie van nafta via een hydrocracker

Stof	Hoeveelheid	Emissiefactor	Emissie	Bron
	ton	ton/ton	ton CO ₂ -eq./ ton ingaand	
Non-condensibles (raffinaderijgas)	0,043	2,911	0,13	(CO ₂ emissiefactoren.nl, ongoing)

E.12.3 Emissies door storingen, stoppen en starten

De emissies door storingen, stoppen en starten uit een hydrocracker zijn 2%, dat is 0,0025 ton CO₂-eq./ton ingaand.

E.13 CO₂-emissies: Input

De emissies om via een katalytische kraker uit HVGO nafta te maken, zijn 0,89 ton CO₂-eq. Omdat de opbrengst 96% is, moet deze hiermee verrekend worden. Dat komt neer op 0,93 ton CO₂-eq./ton nafta.

E.13.1 Grondstoffen

De productie van nafta heeft twee grondstoffen: HVGO en waterstof. De grondstof-emissies van het hydrocracken van 1 ton HVGO is 0,98 ton CO₂/ton.

E.13.2 Energie

Het hydrocracken van HVGO naar nafta kost veel energie. Dit bestaat voornamelijk uit brandstof, waarvan wij aannemen dat het raffinaderijgas is. Verder wordt er nog elektriciteit gebruikt en komt er stoom vrij. De stoom nemen wij als korting op de emissiefactor, omdat deze op een andere plek in de raffinaderij nuttig ingezet kan worden. Ook het geproduceerde raffinaderijgas brengen wij in mindering op de emissiefactor. Hierdoor wordt een hydrocracker in deze berekening een energieproducerende processtap. De emissies van het verwerken van 1 ton HGVO is -0,09 ton CO₂-eq./ton.

Tabel E 26 - Input energie voor de productie van nafta uit HVGO in een katalytische kraker

Stroom	Eenheid	Energievraag	Emissiefactor	Emissie	Bron
		Eenheid/ton	ton CO ₂ -eq./ eenheid	ton CO ₂ -eq./ ton	
HVGO	ton	1	0,73	0,73	Hoofdstuk E.8
Waterstof	ton	0,023	10,77	0,25	Bijlage J: Waterstof
Brandstof (als raffinaderijgas)	MJ	400	0,000064	0,026	(CO ₂ emissiefactore n.nl, ongoing)
Raffinaderijgas	MJ	-1.940	0,000064	-0,12	(CO ₂ emissiefactore n.nl, ongoing)
Elektriciteit	kWh	20	0,0002900	0,0058	NIKI-methode
Stoom	MJ	-82,5	0,0000473	-0,0039	Heat benchmark (EC, 2021b)
Totaal per ton ingaaand				0,89	
Totaal per ton nafta				0,93	

E.14 End-of-life

De end-of-life-emissies van nafta worden veroorzaakt door de volledige verbranding van nafta. Bij een halffabricaat gaat de NIKI-methode uit van volledige verbranding.

Tabel E.27 – End-of-life-emissies van nafta

Stroom	ton	Koolstofton	Emissie (ton CO ₂ -eq./ton)
Nafta	1	0,86	3,15

Literatuurlijst

- CO2emissiefactoren.nl. (2024, 10-03-2025). *Co2emissiefactoren 2024*. CO2 emissiefactoren. <https://co2emissiefactoren.nl/factoren/2024/download/>
- CO2emissiefactoren.nl. (ongoing, January 14, 2022). *Lijst emissiefactoren*. <https://www.co2emissiefactoren.nl/lijt-emissiefactoren/>
- EC. (2015). *Bat reference document for the refining of mineral oil and gas*.
- EC. (2021a). *Update of benchmark values for the years 2021 – 2025 of phase 4 of the eu ets*.
- EC. (2021b). *Update of benchmark values for the years 2021 – 2025 of phase 4 of the eu ets*.
- Ecoinvent. (2023). *Ecoinvent v3.9*. ecoinvent. <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/data-releases/ecoinvent-3-9/>
- Ecoinvent. (ongoing). The ecoinvent database.
- PBL. (2021). *Midden database*. Planbureau voor de Leefomgeving (PBL). <https://www.pbl.nl/en/middenweb/the-database>

F Polyethyleen terephthalate (PET)

Polyethyleen tereftalaat (PET)

Deze bijlage presenteert de berekening van broeikasgasemissies van PET die vrijkomen over de gehele levenscyclus zoals gedefinieerd volgens de NIKI-CO₂-emissiereductie-methode.

PET wordt gemaakt door een polymerisatiereactie tussen mono-ethyleen glycol (MEG) en tereftaalzuur (TPA⁴). De polymerisatie vindt plaats in drie stappen. De grondstoffen worden in de polycondensatie gemengd en de polymerisatie start. Vervolgens wordt de polymerisatiereactie vervolgd in de post-condensatiestap om een hoge opbrengst te realiseren. Als laatste worden er verhandelbare producten van gemaakt. Voor de berekening in de factsheet is uitgegaan van spinning chips.

Tabel F.1 geeft een overzicht van de CO₂-emissies over de levenscyclus. De massa- en energiebalans (MEB) van het productieproces is de basis van deze berekening (zie Paragraaf F.1). De MEB is in principe opgesteld volgens de relevante BREF (Best Available Techniques REFERENCE document), in dit geval de BREF POL (EC, 2007b). Op basis van de MEB worden ten eerste de directe CO₂-eq.-emissies van het productieproces berekend (zie Paragraaf F.2). Ten tweede laat de MEB zien welke inputs (materialen en energie) er nodig zijn voor het productieproces, hiermee worden de CO₂-emissies van de input berekend (zie Paragraaf F.3). Als laatste laat de MEB ook zien wat de koolstofinhoud van het eindproduct, welk worden gebruikt om de CO₂-emissies bij einde levensduur te bepalen (zie Paragraaf F.4).

De grenzen van dit proces liggen bij de grondstoffen die de fabriekslocatie inkomen. Het proces beschrijft het TPA-polymerisatieproces. PET wordt hoofdzakelijk ingezet voor de productie van vier verschillende producten die van PET gemaakt worden; flessen, trays, verpakkingen en textiel. Hiervan worden alleen flessen significant gerecycled in Nederland (zie ook Paragraaf F.4).

⁴ TPA is de afkorting in de BREF, als **terephthalic acid**. Ookwel PTA: **Purified Terephthalic acid**.

Tabel F.1 - De levenscyclusemissies van PET volgens het TPA-proces

Levenscyclusfase	CO ₂ -emissies (ton CO ₂ -eq. per ton PET)	Relevante paragraaf
Inputs	2,67	Paragraaf F.3
Proces	≈0	Paragraaf F.2
Einde levensduur	1,89	Paragraaf F.4
Totaal	4,56	

F.1 Massa- en energiebalans

Het meest gebruikte proces om Polyethyleen tereftalaat (PET) te maken is via een polymerisatiereactie (esterificatie) tussen tereftaalzuur (TPA) en mono-ethyleen glycol (MEG) (Köpnick et al., 2000). Tereftaalzuur heeft twee carboxylgroepen en ethyleen glycol heeft twee alcoholgroepen. De esterificatie verloopt hierom in een 1:1 molverhouding.

PET wordt gemaakt van TPA en MEG. Dit zijn allebei bulkchemicaliën die vrij verhandeld worden. Ze worden momenteel volledig uit nafta gemaakt, de biogene fractie is dus 0. Verder wordt er generiek gesproken over een katalysator op basis van antimoon, wij gaan er hier van uit dat dit antimoonoxide is.

De productie bestaat uit drie stappen:

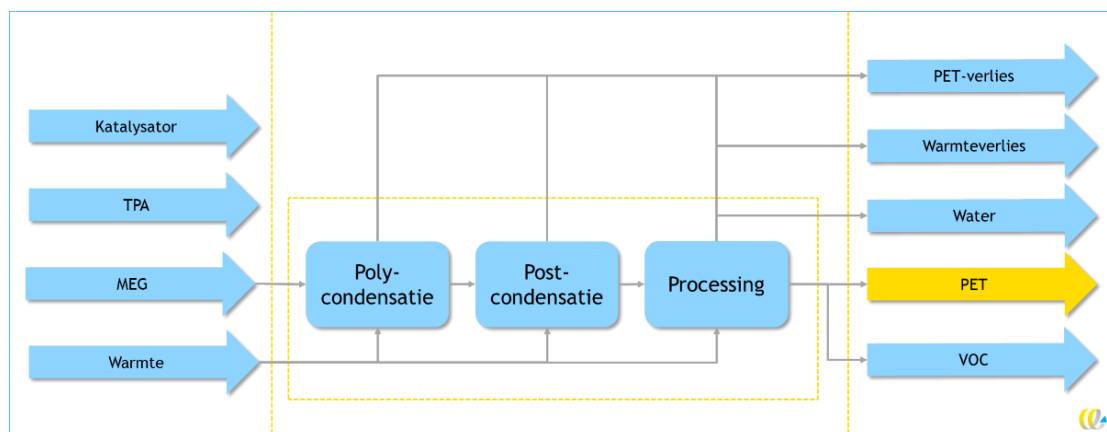
1. Polycondensatie.
2. Post condensatie.
3. Processing.

TPA en MEG worden tijdens de polycondensatie gemengd en er vindt een eerste (onvolledige) polymerisatiestap plaats. Hier moet warmte worden toegevoegd omdat de reactie endotherm is. In de postcondensatie wordt de polymerisatie verder vervolgd, hier wordt continu water uit de reactie verwijderd om de reactie zo ver mogelijk te laten plaatsvinden, ook hier wordt warmte in het proces toegevoegd. Als laatste wordt er van de PET een verhandelbaar product gemaakt. In dit document gaan wij uit van de productie van spinning chips. Wij beschouwen de drie stappen in de reactie als één reactie voor de massa- en energiebalans.

De reactie naar PET heeft een opbrengst van bijna 100%, Er is een kleine fractie PET-verlies (< 1%). Verder komen er in de laatste stap in de afvalstroom volatile organic chemicals (VOC) vrij. Ook komt er water vrij door de polymerisatiereactie. De restwarmte die niet als reactiewarmte wordt opgenomen, komt vrij.

Uit de BREF en een literatuurscan is niet bekend hoeveel warmte wordt opgenomen in de reactie en hoeveel verloren gaat als restwarmte. De totale warmtevraag is wel bekend en bepalend voor de CO₂-eq.-emissies

Figuur F.1 - De procesgrenzen van PET-productie via de TPA-methode

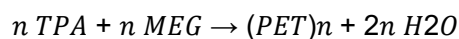


F.1.1 Massabalans

Er zijn drie ingaande massastromen; katalysator, MEG en TPA. De minimale waarden in de BREF tellen samen net niet op tot 1 ton product, daarom is op molaire basis de waarde voor TPA (+5%) en EG (+1%) net iets verhoogd (binnen het gegeven bereik in de BREF) om tot een sluitende balans te komen.

Bij de polymerisatiereactie komt water vrij, zoals te zien in de reactievergelijking (Vergelijking 1). Eén ton PET is 5205 mol, daarmee komt er 10.411 mol water vrij, of 0,19 ton.

Vergelijking 1 - De reactievergelijking voor PET-productie:



Er is voor de reactie 270 g/ton katalysator nodig, dit is aan metaaloxide en bevat geen koolstof.

De BREF geeft aan dat er twee afvalstromen vrijkomen: PET-afval (0,5 g/kg) en VOC (5 mg/kg). Van de VOC is voor de koolstofbalans aangenomen dat dit acetaldehyde is.

Tabel F.2 - Massa- en koolstofbalans voor de productie van PET volgens het TPA-proces

Stof	Input	Output	Input	Output
	ton	ton	Koolstofton	Koolstofton
PET		1,00		0,63
Water		0,19		
TPA	0,86		0,50	
MEG	0,32		0,13	
Katalysator	0,00027			
VOC		0,00		0,00
PET-afval		0,00		0,00
Totaal	1,19	1,19	0,63	0,63

F.1.2 Energiebalans

De energievraag voor de productie van een ton PET wordt gegeven in de BREF. Hiervoor zijn de waarden genomen voor het TPA-proces voor de polycondensatie, de continue post condensatie, en de productie van spinning chips (PET).

De specifieke chemische energie voor de polymerisatie van PET is niet bekend uit de BREF of een literatuurscan. De inputwarmte wordt verdeeld tussen chemische energie voor esterificatie en restwarmte. Dit maakt voor de vervolgberekening geen verschil, de chemische energie en de restwarmte worden als 'verloren' beschouwd.

Tabel F.3 - Energiebalans voor de productie van PET via het TPA-proces

Energie	Inputs	Outputs
	MJ/ton	MJ/ton
Warmte polycondensatie	2.087	
Warmte post-condensatie	903	
Warmte processing	154	
Chemische energie en restwarmte		3.144
Totaal	3.144	3.144

F.2 CO₂-emissies: Proces

De totale CO₂-emissies van het proces zijn 0,0014 ton CO₂-eq./ton PET. Dit is de som van 0 directe emissies, 0,00133 ton CO₂-eq./ton emissies uit afvalstromen en 0,0003 ton CO₂-eq./ton emissies door storingen, stoppen en starten. In het totaaloverzicht (Tabel F.4) wordt deze hoeveelheid als verwaarloosbaar (≈0) beschouwd.

Tabel F.4 - CO₂-eq.-emissies voor de productie van 1 ton PET via het TPA-proces

Stof	Totale emissie
	ton CO ₂ -eq./ton PET
Directe emissies	0
Afval	0,0013
Storingen, stoppen en starten	0,00003
Totaal	0,0014

F.2.1 Directe emissies

Uit het proces komen geen directe CO₂-eq.-emissies vrij.

F.2.2 Emissies uit afvalstromen

Uit het proces komen twee afvalstromen vrij: PET-afval en VOC. Deze worden volledig verbrand, dit levert een emissie van 1,3 kg CO₂-eq./ton.

Er komt ook water vrij bij het proces, dit heeft geen emissiefactor.

Tabel F.5 - CO₂-emissies door afvalstromen uit het TPA-proces

Stof	Eenheid	Hoeveelheid	Koolstofinhoud	Emissie
		Eenheid/ton product	Eenheid C/ton product	kg CO ₂ -eq./product
Water	kg	190	0	0
VOC	kg	0,5	0,27	1,00
PET-afval	kg	0,145	0,091	0,33
Totaal	kg			1,33

F.2.3 Emissies door storingen, stoppen en starten

Er is geen informatie beschikbaar over de emissie van storingen, stoppen en starten. Hierom wordt de generieke 2%-regel toegepast (NIKI-methode, paragraaf 6.2). Dat levert een emissie op van 0,03 kg CO₂-eq./ton.

F.3 CO₂-emissies: Input

De totale hoeveelheid CO₂-emissies van input bedraagt 2,19 ton CO₂/ton. Hiervan komt 2,04 ton CO₂-eq. uit de grondstoffen en 0,15 ton CO₂-eq. uit de warmtevraag.

F.3.1 Grondstoffen

Voor de productie van PET zijn drie grondstoffen nodig: TPA, MEG en katalysator.

TPA en MEG zijn grondstoffen die vrij beschikbaar zijn in de markt en deze emissiefactoren zijn bekend in de ecoinvent-database.

Er is geen emissiefactor bekend voor antimoonoxide, daarom is hiervoor de emissiefactor van antimoon gebruikt. Het mijnen en zuiveren van metalen zal de grootste impact hebben op de uitstoot van BKG. Het vervolgens oxideren zal minimaal toevoegen aan de uitstoot, naast de kleine hoeveelheid die nodig is. De CO₂-eq.-emissie door het gebruik van de katalysator is niet significant.

De totale emissie door grondstoffen is 2,04 ton CO₂-eq./ton PET.

F.3.2 Energie

Voor de productie van PET wordt 3.114 MJ warmte gebruikt. Voor de emissiefactor van warmte wordt de warmtebenchmark (EC, 2021b) gebruikt. Dit levert 0,15 ton CO₂-eq./ton PET op.

In de BAT wordt niet gesproken over een specifieke energiebron, voor de emissiefactor gaan we uit dat dit warmte is met een generieke productiewaarde.

Tabel F.6 - CO₂-eq.-emissies van de input per ton PET, geproduceerd via het TPA-proces

Stof	Eenheid	Hoeveelheid	Emissiefactor	Emissie	Referentie emissiefactor
		Eenheid/ton	ton CO ₂ -eq./eenheid	ton CO ₂ -eq./ton	
TPA	ton	0,86	EF	EF	purified terephthalic acid production - Europe - purified terephthalic acid ecoQuery
MEG	ton	0,32	EF	EF	market for ethylene glycol - Europe - ethylene glycol ecoQuery
Katalysator	ton	0,00	EF	EF	antimony production - Rest-of-World - antimony ecoQuery
Warmte	MJ	3.114	0,0000473	0,15	(EC, 2021b)
Totaal				2,67	

F.4 CO₂-emissies: Einde levensduur

De CO₂-emissie van het einde levensduur van PET is 1,89 ton CO₂-eq./ton PET.

Op basis van (Systemiq, 2023) zijn de belangrijkste producten van PET geïdentificeerd; flessen (42%), trays (12%), overige verpakkingen (6%), en textiel (40%). Hiervan worden alleen flessen significant gerecycled (42%) (EC, 2022), (Rebel, 2020; Royal HaskoningDHV, 2021). Netto wordt daarmee 18% van het PET gerecycled. Voor de overige 82% is hier aangenomen dat deze wordt verbrand.

De volledige koolstofinhoud van PET is fossiel (0,63 ton C/ton). Hierdoor komt de emissie uit op 1,89 ton CO₂-eq./ton PET.

Tabel F.7 - CO₂-eq.-emissies bij einde levensduur PET (volgens NIKI-methode paragraaf 5.4.4.)

PET	Fractie	Emissie (fossiel)
		ton CO ₂ -eq./ton
Niet gerecycled/verbrand	82%	1,89
Gerecycled	18%	0
Langdurig vastleggen	0%	0
Totaal	100%	1,89

Literatuurlijst

- EC. (2007). *Reference Document on Best Available Techniques in the Production of Polymers*. https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/pol_bref_0807.pdf
- EC. (2021). *Update of benchmark values for the years 2021 – 2025 of phase 4 of the EU ETS*. https://climate.ec.europa.eu/system/files/2021-10/policy_ets_allowances_bm_curve_factsheets_en.pdf
- EC. (2022). *Annex C, Default application-specific and material-specific values for the parameters to be used in the application of the Circular Footprint Formula when performing a PEF or OEF study*. European Commission. <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/developerEF.xhtml>
- Köpnick, H., Schmidt, M., Brüggling, W., J., R., Kaminsky, W., Schmidt, M., Brüggling, W., J., R., & Kaminsky, W. (2000). Polyesters. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, 2000. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/14356007.a21_227
- Rebel. (2020). *PET-trays circulair : een onderzoek naar knelpunten en oplossingsrichtingen*. https://kidv.nl/media/rapportages/rapport_pet-trays_circulair_albert_heijn_en_rebelgroup_2020_.pdf
- Royal HaskoningDHV. (2021). *Monitoring beleidsprogramma circulair textiel. Nulmeting peiljaar 2018*. <https://open.overheid.nl/documenten/ronl-9a6b4b22-eefa-4875-a83f-e03404de4e63/pdf>
- Systemiq. (2023). *Circularity of PET/polyester packaging and textiles in Europe*. <https://www.systemiq.earth/wp-content/uploads/2023/02/Systemiq-PET-Circularity-Europe-Synthesis-Report-High-Res.pdf>

| G Propyleen

Propyleen

Deze bijlage presenteert de berekening van broeikasgasemissies die vrijkomen over de levenscyclus van propyleen zoals gedefinieerd in de NIKI CO₂-emissiemethode. Propyleen wordt in de literatuur of in vakjargon ook wel als propaan aangeduid. In deze factsheet gebruiken we propyleen.

Propyleen behoort samen met ethyleen (of etheen) tot één van de grootste bulkchemicaliën ter wereld. Het kan gemaakt worden uit het stoomkraken van verschillende (fossiele) grondstoffen zoals ethaan, propaan, butaan, nafta of gasolie. Er bestaan ook andere productieprocessen die deze bulkchemicaliën kunnen maken, maar het stoomkraken van nafta is in Nederland en EU het meest gebruikte productieproces en zal hier worden beschreven. Een belangrijke bron voor de emissieberekening is de BREF-documentatie die het kraakproces beschrijft: de *Large Volume Organic Chemicals BREF* uit 2017 (Joint Research Centre (European Commission), 2017).

Uit het stoomkraken van nafta kunnen veel producten gemaakt worden, hoewel de twee hoofdproducten ethyleen en daarna propyleen zijn. De verhouding tussen de verschillende producten kan gestuurd worden door procesparameters⁵ aan te passen, afhankelijk van de marktvraag. De uitstoot van broeikasgassen bij het einde van de levensduur van propyleen hangt af van hoe propyleen wordt verwerkt tot eindproducten en uiteindelijk wordt verwerkt bij einde levensduur. In deze factsheet is ervan uitgegaan dat propyleen bij einde levensduur in zijn geheel wordt verbrand.

Tabel G.1 - Levenscyclusemissies van propyleen

Levenscyclusfase	BKG-emissies (ton CO ₂ -eq. per ton propyleen)	Relevant hoofdstuk
Inputs	0,97	Paragraaf G.3
Proces	0,67	Paragraaf G.2
Einde levensduur	3,15	Paragraaf G.4
Totaal	4,79	

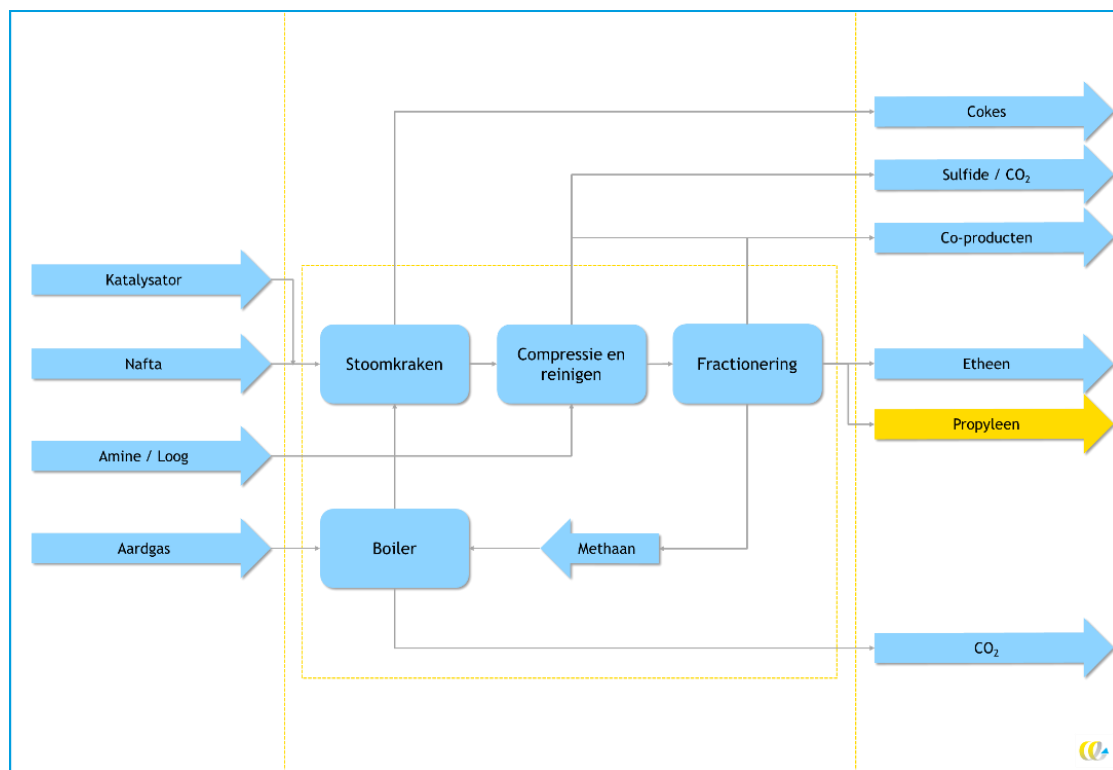
⁵ De productverhouding bij stoomkraken hangt af van verschillende factoren, zoals de temperatuur – waarbij hogere temperaturen de ethyleenopbrengst verhogen – het type nafta (lichter of zwaarder) en de stoom/koolwaterstof-verhouding, die de selectiviteit van de reactie beïnvloedt.

Tabel G.1 geeft een overzicht van de CO₂-emissies over de levenscyclus. De basis van deze berekening ligt in de massa- en energiebalans (MEB) van het productieproces (zie Paragraaf G.1) welke in principe is opgesteld volgens de relevante BREF (Best available techniques REFerence document). Op basis van de MEB worden ten eerste de directe CO₂-emissies van het productieproces berekend (Paragraaf G.2). Ten tweede laat de MEB zien welke energie- en materiaalinputs er benodigd zijn voor het productieproces, hiermee worden de CO₂-emissies van de input berekend (Paragraaf G.3). Als laatste laat de MEB ook zien wat de koolstofinhoud van het eindproduct is, die wordt gebruikt om de CO₂-emissies bij einde levensduur te bepalen (Paragraaf G.4).

G.1 Massa- en energiebalans

Propyleen wordt geproduceerd door nafta te stoomkraken. Hierbij wordt nafta eerst gekraakt in kleinere koolwaterstoffen. Vervolgens wordt dit mengsel onder druk gebracht en gesplitst in de verschillende fracties. Door verschillende instellingen aan te passen in een stoomkraker kan de samenstelling van de producten gestuurd worden. Zo kunnen fracties van grotere koolwaterstoffen teruggestuurd worden naar het begin van de kraker om een hogere fractie kleinere koolwaterstoffen te maken. Fabrikanten beschouwen de exacte samenstelling als vertrouwelijke informatie. Vaak worden krakers gestuurd op een zo groot mogelijke etheenproductie (en daarmee ook propyleenproductie) omdat dit verreweg de grootste van de bulkchemicaliën is. De BREF geeft een niet-geoptimaliseerde productenmix (Joint Research Centre (European Commission), 2017). In een onderliggende bron (Worrell et al., 2000) staat een mix die geoptimaliseerd is voor etheen. Hieruit kunnen we vervolgens alle procescondities afleiden die voor propyleen gelden. De BREF is samen met de onderliggende bron de basis voor het procesdiagram Figuur G.1 en daarmee ook de basis voor de massa- en energiebalans.

Figuur G.1 - Het produceren van propyleen door het stoomkraken van nafta



Stoomkraken

Bij het stoomkraken van nafta wordt een verhouding van 0,85 kg stoom/kg nafta aangehouden. In een stoomkraker wordt de primaire thermische energie geleverd door de verbranding van aardgas en restgassen in krakerovens/boilers die de hoge temperaturen (800-900 °C) genereren voor het kraken van koolwaterstoffen. Bovendien worden boilers ook gebruikt om restwarmte om te zetten in stoom, die wordt ingezet voor turbines, compressoren en andere processen in de fabriek. Omdat deze stoom niet verbruikt wordt, valt deze buiten de massabalans.

Compressie en reinigen

Bij het koelen en onder druk brengen van het productmengsel worden ongewenste bijproducten verwijderd. Het gaat hier voornamelijk om water, koolstofdioxide en sulfiden. Deze worden verwijderd met amine gaswassers. De hoeveelheid CO₂ die hierbij vrijkomt is niet bekend, gegeven de massabalans wordt deze fractie verwaarloosd. Voor het reinigen van de stroom wordt ofwel amine ofwel loog gebruikt als oplosmiddel. De hoeveelheid die daarbij verbruikt wordt, wordt in de BAT niet gespecificeerd. Daarom is dit buiten beschouwing van de massabalans gehouden.

Fractionering

Na de compressie komen verschillende fractioneringsstappen. Dit kan in verschillende volgordes. Over het algemeen wordt methaan afgescheiden om als brandstof voor de stoom te dienen, daar gaan wij hier ook vanuit. De waterstof wordt gebruikt om alkenen te hydrogenen. Dat is een later proces, hierom tellen wij waterstof als reststroom. De belangrijke afscheidingen zijn ethyleen en propyleen, C4 en zwaardere fracties. In het stroomschema in Figuur G.1 allen alle reststromen onder het kopje co-producten.

Cokesvorming in kraakinstallaties

In stoomkraken blijft een deel van de koolstof achter als cokes, waardoor deze gereinigd moet worden. De hoeveelheid hangt af van de grondstof en is niet gespecificeerd. Wij gaan hier voor de berekening ervan uit dat deze afvalstroom zo groot is als nodig om de massabalans kloppend te maken.

G.1.1 Massabalans

De massabalans uit Worrell et al. (2000) heeft een afwijking (onderschijding) van 2%, deze hebben wij toegerekend aan cokesvorming. Hiervoor hebben wij de koolstofbalans gebruikt (in lijn met de NIKI-methodiek). De massabalans heeft hierdoor een kleine afwijking van 0,5% ten opzichte van de inputstroom.

Pyrolyse gasoline (ook wel pygas) en fuel oil zijn geen gedefinieerde producten. Pyrolyse gasoline en fuel olie zijn mengsels van verschillende koolwaterstoffen (e.g. alkenen, BTX⁶, andere olefinen), waardoor ze geen vast koolstofgehalte hebben. Afhankelijk van de gebruikte grondstoffen en proces kan het koolstofgehalte ook nog variëren. Wij hebben voor de massabalans aangenomen dat pygas en fuel oil beiden alkenen zijn met een koolstofgehalte van 92%.⁷

Voor de productie van 1 ton propyleen is 6,25 ton nafta nodig. Alle uitgaande stromen, op propyleen en cokesvorming na, beschouwen we ook als co-producten, waarover de CO₂-emissies voor het productieproces verdeeld worden. Cokes en methaan worden niet als product, maar als emissie of afvalstroom beschouwd. Hierdoor wordt er bij een ton propyleen in totaal 5,04 ton product gemaakt. Van de emissie uit proces en inputs wordt daarom 19% aan propyleen toegerekend.

⁶ BTX staat voor benzeen, tolueen en xyleen en zijn allen producten van het kraakproces.

⁷ Op basis van het koolstofgehalte van de drie grootste aromaten: benzeen, tolueen en xyleen (BTX).

Tabel G.2 - Massa- en koolstofbalans voor de productie van een ton propyleen

Stof	Eenheid	Kraken, fractioneren, scheiden		Boiler	
		Input	Output	Input	Output
Nafta	ton	6,25	-	-	-
Waterstof	ton	-	0,13	-	-
Methaan	ton	-	1,06	1,06	-
Zuurstof (lucht)	ton	-	-	4,25	-
Ethyleen	ton	-	2,13	-	-
Propyleen	ton	-	1,00	-	-
Butadieen	ton	-	0,31	-	-
Pyrolyse gasolie	ton	-	1,19	-	-
Stookolie (alkenen, aromaten, etc.)	ton	-	0,31	-	-
Cokes	ton	-	0,15	-	-
Water	ton	-	-	-	2,39
CO ₂	ton	-	-	-	2,91
Totaal	ton	6,3	6,3	5,3	5,3

G.1.2 Energiebalans

Stoomkrakers worden vergeleken op energie-efficiëntie aan de hand van het energieverbruik in GJ per ton ethyleen. Volgens de BREF is bij het kraken van nafta 26 GJ/ton ethyleen benodigd. Uit de massabalans is duidelijk dat voor elke ton propyleen 2,13 ton ethyleen wordt geproduceerd. De energiebehoefte voor een ton propyleen komt daarmee uit op 55,3 GJ/ton propyleen. Zoals de NIKI-methode voorschrijft, is daar in deze berekening is van afgeweken en is de totale warmtevraag, op massabasis, verdeeld over de verschillende product- en reststromen die uit de kraker komen.

De energievraag van 26 GJ/ton etheen wordt gebruikt voor alle stappen van het proces. Hiervan wordt 28,7-34,4 GJ/ton gebruikt voor het stoomkraken, 7,4-11,1 GJ/ton voor de fractionering en 13,4-15,5 GJ/ton voor het scheiden van de fracties. Circa 53,1 GJ/ton kan worden geleverd door de verbranding van het vrijgekomen methaan.⁸

Netto hoeft er maar 2,13 GJ/ton van extern te worden gehaald, de rest komt uit de proces-emissies, voornamelijk methaanrijke rookgassen die intern op basis van gevormde bij-producten energie leveren. Dit genereert CO₂-emissies als gevolg van het verbrandingsproces. Deze CO₂-uitstoot wordt beschouwd als een procesemissie.

De chemische energie die nodig is voor het stoomkraken is 13,4-15,5 GJ/ton (Worrell et al., 2000)⁹. Hiervan is de middenwaarde genomen, de rest is toegekend aan scheidingswarmte en verlies.

Tabel G.3 - Energiebalans voor de productie van propyleen

Energie	Inputs	Outputs
	GJ/ton	GJ/ton
Kraken	31,6	-
Fractioneren	9,2	-
Scheiden	14,5	-
Chemische energie en restwarmte	-	7,2
Warmte en scheidingsverlies	-	48,1
Totaal	55,3	55,3

G.2 CO₂-emissies: Proces

Bij het kraken van 6,25 ton nafta zijn de procesemissies gelijk aan 3,53 ton CO₂, zie Tabel G.4. Uit de brede variëteit aan fracties die worden geproduceerd heeft propyleen een aandeel van 19%, daarmee wordt 19% van de procesemissies aan propyleen toegerekend. Dat komt uit op: 0,67 ton CO₂-eq./ton propyleen.

⁸ Een ton methaan heeft een energie-inhoud van circa 50 GJ_{LHV} Thermal Engineering. (2025). *Methaan: Warmtewaarde, Aardgas en Energiebron*. Thermal Engineering. <https://www.thermal-engineering.org/nl/methaan-warmtewaarde-aardgas-en-energiebron/#:~:text=Voor%20methaan%20is%20de%20LHV%20ongeveer%2050%20CO%20MJ%20Fkg.,voor%20een%20aanzienlijk%20deel%20van%20de%20wereldwijde%20energieproductie..>

⁹ Gecorrigeerd voor de productie van 1 ton propyleen.

Tabel G.4 - Procesemissies voor de productie van propyleen

Stof	Totale emissie	Emissie propyleen
	ton CO ₂ -eq./ton	ton CO ₂ -eq./ton propyleen
Methane	2,91	0,55
Cokes	0,55	0,11
Onderhoud/storing	0,07	0,01
Totaal	3,53	0,67

Procesemissies

De directe procesemissies ontstaan door de verbranding van methaan, waar CO₂ bij vrijkomt. Dit levert een groot deel van de warmte die nodig is voor het proces. Hierbij komt in totaal 2,91 ton CO₂ vrij, zie Tabel G.4.

Emissies uit afvalstromen

De cokes die achterblijven in de kraker moeten gereinigd worden. Dit wordt gedaan door gecontroleerde verbranding. Hierbij komt 0,55 ton CO₂ vrij per ton slate.

Emissies door storingen, stoppen en starten

Aangezien er geen specifieke hoeveelheid emissies door storingen, stoppen en starten zijn benoemd, hanteren we de generieke 2%-regel (NIKI-methode, paragraaf 6.2) en berekenen daarmee 0,07 ton CO₂/ton slate, zie Tabel G.4.

G.3 CO₂-emissies: Input

De totale emissie van de levenscyclusfase-input is 5,10 ton CO₂/ton. Ook hiervan hoeft maar 19% te worden toegerekend aan propyleen. Dat komt uit op 0,97 ton CO₂/ton propyleen.

Voor de productie van propyleen zijn drie inputs nodig, nafta als grondstof, warmte en lucht/zuurstof. In Tabel G.5 zijn de CO₂-emissies van nafta weergegeven, dit is in totaal 5,0 ton CO₂-eq./ton.

De totale warmtevraag is 55,3 GJ/ton, hiervan kan 53,1 GJ/ton worden geleverd door de verbranding van het vrijgekomen methaan. Netto hoeft er maar 2,2 GJ/ton van extern te worden gehaald. Wij gaan uit van de emissiefactor van de heat benchmark uit de NIKI-

methode (European Comission, 2021).¹⁰ Daarmee komt de totale emissie voor warmtevoorziening neer op 0,10 ton CO₂.

Tabel G.5 - Input van grondstofstromen en gerelateerde CO₂-emissies per eenheid van alle producten (propyleen en reststromen)

Stof	Eenheid	Hoeveelheid	Emissiefactor	Emissie	Emissie propyleen	Referentie emissiefactor
		Eenheid/ton	ton CO ₂ -eq./ eenheid	ton CO ₂ -eq./ ton	ton CO ₂ -eq./ ton propyleen	
Nafta	ton	6,25	0,80	5,0	0,95	Bijlage E: Nafta Tabel E 26
Warmte	GJ	2,13	0,047	0,10	0,02	(European Comission, 2021)
Zuurstof (lucht)	ton	4,25	0	0	0	
Totaal				5,1	0,97	

G.4 CO₂-emissies: Einde levensduur

Propyleen is een halffabricaat dat verder wordt verwerkt tot verschillende eindproducten. De emissies bij einde levensduur zijn daarmee sterk afhankelijk van de toepassing. Hier gaan we ervan uit dat alle koolstofatomen worden omgezet in CO₂ als gevolg van verbranding. Daarbij bindt elk koolstofatoom die wordt verbrand zich aan zuurstof en wordt daarmee zwaarder met een factor 44/12 (= 3,67 gCO₂/gC), zie Tabel G.6.

De emissies die gepaard gaan met de volledige verbranding van 1 ton slate zijn gelijk aan 3,15 ton CO₂-eq.

Tabel G.6 - CO₂-eq.-emissies bij einde levensduur propyleen

	Eenheid	Fractie fossiel	Emissiefactor	Emissie
		%C	ton CO ₂ -eq./ton C	ton CO ₂ -eq./ton
Verbrand - fossiel	ton	0,86	44/12	3,15
Gerecycled - fossiel	ton	0,86	0,0	0
Langdurig vastleggen - fossiel	ton	0,86	44/12	0
Totaal				3,15

¹⁰ Voor warmte is deze benchmark gelijk aan 47,3 t CO₂/TJ.

Literatuurlijst

- European Comission. (2021). *Update of benchmark values for the years 2021 – 2025 of phase 4 of the EU ETS*.
- Joint Research Centre (European Commission). (2017). *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Large Volume Organic Chemicals*.
- Thermal Engineering. (2025). *Methaan: Warmtewaarde, Aardgas en Energiebron*. Thermal Engineering. <https://www.thermal-engineering.org/nl/methaan-warmtewaarde-aardgas-en-energiebron/#:~:text=Voor%20methaan%20is%20de%20LHV%20ongeveer%2050%20C0%20MJ%20Fkg.,voor%20een%20aanzienlijk%20deel%20van%20de%20wereldwijde%20energieproductie>.
- Worrell, E., Phylipsen, D., Einstein, D., & Martin, N. (2000). Energy use and energy intensity of the U.S. chemical industry., 2000. <https://doi.org/10.2172/773773>.

| H Polyurethaan (PUR)

PUR

Hier vindt u de berekening van de emissiefactor voor PUR. Om tot deze emissiefactor te komen, volgen wij de 'hiërarchie van emissiefactoren' (Appendix A1 in de NIKI CO₂-emissiereductiemethode). De emissiefactor is niet beschikbaar via bronnen in Stap 1 t/m 3 en hoewel er wel een emissiefactor voorhanden is via ecoinvent (Stap 4) is deze data verouderd. Hierdoor komen wij uit bij Stap 5-'peer reviewed publicaties'. Wij gebruiken een LCA-studie in opdracht van Europur (Sphera Solutions GmbH, 2025) welke is uitgevoerd en gereviewed door gerenommeerde onderzoekers. De totale emissiefactor voor PUR is 5,80 ton CO₂-eq./ton PUR.

Tabel H.1 - De CO₂-emissiefactor van PUR op basis van LCI-data uit ecoinvent

Levenscyclusfase	CO ₂ -emissies (ton CO ₂ -eq. per ton PUR)	Relevante paragraaf
Inputs	3,45	Paragraaf 1.3.2 in Sphera (2025)
Proces		
Einde levensduur	2,35	Paragraaf H.4
Totaal	5,80	

PUR (voorbeeld berekening o.b.v. ecoinvent)

Deze bijlage presenteert de berekening van de CO₂-emissiefactor voor PUR. Uitgangspunt van deze berekening is een MEB gebaseerd op de ecoinvent LCI-database versie 3.11 (Ecoinvent, 2025) zoals voorgeschreven in stap 4 uit paragraaf 2.3 van de NIKI-methode. De hierna volgende berekening dient als voorbeeld voor het uitvoeren van een emissieberekening op basis van LCI-data. De emissiefactor die hier uitgerekend is, wijkt af van de NIKI-referentiewaarde voor PUR die dient te worden gebruikt in een NIKI-aanvraag. Deze factor vindt u in Tabel H.1.

Tekstkader H.1 - Achtergrond bij de ecoinvent LCI-database

De ecoinvent-database voorziet in life cycle inventory (LCI)-data ten behoeve van de uitvoer van levenscyclusanalyses (LCA). De data is gebaseerd op wetenschappelijke literatuur en samengesteld door LCA-experts. Daarbij wordt geen uitgebreide beschrijving of berekening van de benodigde (grond)stof en energiestromen gegeven, maar kan de data wel worden gebruikt in een versimpelde 'black box'-benadering van het productieproces. Hierbij kan worden uitgegaan van een kloppende massabalans, de database biedt echter geen ruimte om deze te controleren. Het is niet mogelijk om op basis van ecoinvent-data een energiebalans op te stellen. De basisinformatie in de ecoinvent-database omvat de ingaande en uitgaande stromen van een unitproces.

Hier dient te worden opgemerkt dat LCI-data niet een-op-een vergelijkbaar is met data in een chemisch proces flowdiagram. Dat komt omdat deze data wordt gebruikt voor de uitvoer van LCA-studies. Zo kunt u bijvoorbeeld als input een hele kleine hoeveelheid 'chemical factory' aantreffen. Dat is belangrijk in LCA's maar niet voor de berekening van de NIKI CO₂-emissiefactor. Een belangrijk verschil met gebruik van een BREF is dat deze een minimumwaarde (beste beschikbaar) voor energie- en grondstoffengebruik aangeeft. Hierdoor zal een massabalans op basis van de BAT een best-casescenario weergeven. Ecoinvent geeft de (gemiddelde) waarden aan voor de huidige situatie. Hierdoor zal een emissie op basis van ecoinvent altijd een hogere emissiewaarde berekenen ten opzichte van de NIKI-methode.

Voor toepassing van de ecoinvent-database bij het opstellen van de MEB zijn er in deze factsheet een aantal tekstkaders opgenomen met aanvullende instructie.

Voor de productie van PUR zijn verschillende routes denkbaar door TDI, MDI en een polyol in verschillende verhoudingen met elkaar te laten reageren. De berekening in deze factsheet richt zich op de productie van 'TDI-based, high density PUR'. Dit is een PUR-variant die volgens ecoinvent een groot aandeel op de PUR-markt heeft en die voornamelijk wordt toegepast in meubels en matrassen. Uitgangspunt voor data is hier de ecoinvent 3.11 (cutoff)-database met de specifieke dataset voor [polyurethane production, flexible foam, TDI-based, high density - Europe - polyurethane, flexible foam | ecoQuery](#).

Tabel H.2 geeft een overzicht van de broeikasgasemissies over de gehele levenscyclus. De basis van deze berekening ligt in de massa- en energiebalans (MEB) van het productieproces (zie Paragraaf H.1) welke is opgesteld door gebruik te maken van data voorhanden in de ecoinvent-database. Op basis van de MEB worden ten eerste de directe broeikasgasemissies van het productieproces berekend (zie Paragraaf H.2). Ten tweede laat de MEB zien welke energie- en materiaalinputs er benodigd zijn voor het productieproces, hiermee worden de broeikasgasemissies van de input berekend (zie Paragraaf H.3). Als laatste laat de MEB ook zien wat de koolstofinhoud van het eindproduct is, welke worden gebruikt om de CO₂-emissies bij einde levensduur te bepalen (zie Paragraaf H.4).

Tabel H.2 - De CO₂-emissiefactor van PUR op basis van LCI-data uit ecoinvent

Levenscyclusfase	CO ₂ -emissies (ton CO ₂ -eq. per ton PUR)	Relevante paragraaf
Inputs	4,45	Paragraaf H.3
Proces	0,063	Paragraaf H.2, C.2
Einde levensduur	2,35	Paragraaf H.4
Totaal	6,87*	

* ! Let op deze waarde is slechts de uitkomst van een voorbeeld berekening. De juiste NIKI-emissiefactor voor PUR vindt u in Tabel H.1.

H.1 Massa- en energiebalans op basis van ecoinvent data

Tekstkader H. 2 - Aanvullende instructie voor opstellen MEB op basis van ecoinvent

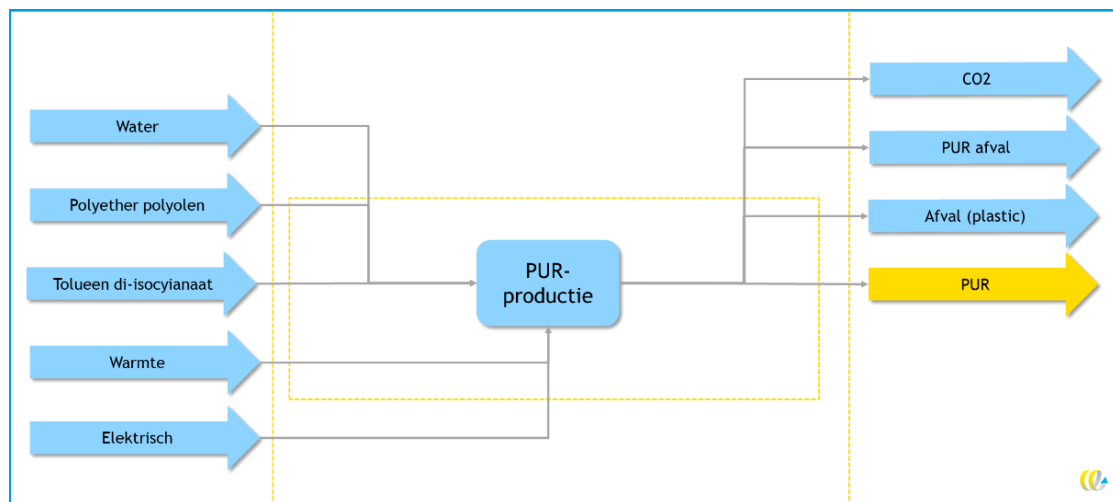
Bij het opstellen van de massabalans van een proces met behulp van ecoinvent dient minimaal 90% van de in de dataset benoemde ingaande massastromen en uitgaande afvalstromen te worden meegenomen. Het opstellen van een energiebalans is op basis van ecoinvent-data niet mogelijk.

In de berekening dienen wel de ingaande energiestromen te worden meegenomen om de CO₂-emissies van de inputs te bepalen.

De massabalans is opgesteld met de grootste stromen (exchanges) uit de dataset die samen meer dan 95% van de ingaande massa omvatten. De hier beschouwde ingaande grondstofstromen bestaan uit de twee monomeren en water om te zorgen voor schuimvorming. Naast de ingaande grondstofstromen, zijn er ook afvalstromen. De hier beschouwde afvalstromen omvatten samen meer dan 90% van de resterende uitgaande afvalstromen. Daarnaast zijn alle ingaande energiestromen meegenomen. Op basis van de informatie in ecoinvent is het niet mogelijk om een energiebalans over het proces op te stellen.

Bij de productie van PUR worden twee monomeren samengevoegd, waarbij de reactie exotherm verloopt. Er hoeft geen extra reactie-energie te worden toegevoegd. De monomeren reageren in een een-op-een molverhouding. Naast de monomeren wordt er ook katalysator toegevoegd, deze is in de massabalans buiten beschouwing gelaten. De polyolen worden opgelost in water, deze reageren met de diisocyanaten. Hierbij wordt CO₂ gevormd, als deze vrijkomt helpt dit mee om het schuim te vormen. Om de massabalans kloppend te maken, hebben wij de hoeveelheid water berekend als een-op-een in molverhouding met de CO₂ die vrijkomt.

Figuur H.1 - Procesgrenzen van PUR-productie op basis van ecoinvent-data



H.1.1 Massa- en koolstofbalans

De massa- en koolstofbalans is opgenomen in Tabel H.3. De massabalans heeft een afwijking van 2%. Het koolstofgehalte van de ingaande grondstoffenstromen en PUR is gedefinieerd in het ecoinvent-proces; [polyurethane production, flexible foam, TDI-based, high density - Europe - polyurethane, flexible foam | ecoQuery](#).

Tabel H.3 - Massa- en koolstofbalans voor de productie van 1 ton PUR

Stof	Eenheid	Massabalans		Koolstofinhoud	
		In	Uit	In	Uit
PUR	ton		1		ED
Polyether, polyols, long chain	ton	ED		ED	
Tolueen diisocyanaat	ton	ED		ED	
Plastic, mixture (afval)	ton		ED		ED
PUR (afval)	ton		ED		ED
Kooldioxide	ton		ED		ED
Totaal	ton	1,04	1,05	0,652	0,651

H.1.2 Energiebalans

Het is niet mogelijk om op basis van ecoinvent-data een energiebalans op te stellen. Ecoinvent voorziet enkel in de gemiddelde energie-input voor de productie van 1 ton PUR op fabrieksniveau. Deze energie-input zullen wel worden gebruikt om te komen tot een berekening van de CO₂-emissies van de inputs (zie Paragraaf H.3).

Tabel H.4 – Energie-inputs voor de productie van 1 ton PUR (fabrieksniveau)

Energie	Eenheid	Inputs
Electricity, medium voltage	kWh	<i>ED</i>
Heat, district or industrial, natural gas	MJ	<i>ED</i>

H.2 CO₂-emissies: Proces

Bij de productie van 1 ton PUR komt 0,063 ton CO₂-eq.-vrij.

Tabel H.5 - Procesemissies voor de productie van 1 ton PUR

Oorsprong	Totale emissie (ton CO ₂ /ton)
Directe emissie	<i>EF</i>
Afvalstromen	<i>EF</i>
Storingen, stoppen en starten	0,001
Totaal	0,063

Directe emissies

De directe procesemissies zijn *EF* ton CO₂-eq./ton PUR en zijn direct uit ecoinvent gehaald.

Emissies uit afvalstromen

De afvalstromen worden verbrand en direct omgezet in CO₂-emissies. Dat komt neer op *EF* ton CO₂-eq./ton PUR.

Tabel H.6 - CO₂-eq.-emissies door afvalstromen uit het proces

Stof	Eenheid	Hoeveelheid	Koolstofinhoud	Emissie
		Eenheid/ton product	Eenheid C/ ton product	ton CO ₂ -eq./ ton product
Plastic, mixture (afval)	ton	0,00095	ED	EF
PUR (afval)	ton	0,00442	ED	EF
Totaal	ton	-	-	EF

Emissies door storingen, stoppen en starten

Er zijn geen specifieke hoeveelheid storingen, stoppen en starten benoemd. Wij gaan uit van de generieke 2%-regel (NIKI-methode, paragraaf 5.2), dit levert 0,001 ton CO₂-eq.

H.3 CO₂-emissies: Input

De totale CO₂-emissie van de levenscyclusfase-inputs is 4,45 ton CO₂-eq., zie Tabel H.7.

Tabel H.7 - Input van grondstofstromen en gerelateerde CO₂-emissies per ton PUR

Stof	Eenheid	Hoeveelheid	Emissiefactor	Emissie	Referentie emissiefactor
		Eenheid/ton	ton CO ₂ -eq./ eenheid	ton CO ₂ -eq./ ton	
Polyether, polyols, long chain	ton	0,748	EF	EF	market for polyether polyols, long chain - Europe - polyether polyols, long chain ecoQuery
Toluene diisocyanate	ton	0,278	EF	EF	market for toluene diisocyanate - Europe - toluene diisocyanate ecoQuery
Elektriciteit	kWh	36,6	0,14	0,0051	NIKI-methode
Warmte	MJ	0,667	0,047	0,000031	(EC, 2021a)
Totaal				4,45	

H.4 CO₂-emissies: Einde levensduur

Voor de berekening van de CO₂-emissies bij einde levensduur van PUR nemen wij aan dat de volledige stroom wordt verbrand. De koolstoffractie van PUR is gelijk aan ED tonC/ton PUR. Hiervan komt bij volledige verbranding 2,35 ton CO₂-eq./ton PUR vrij.

Literatuurlijst

- EC. (2021). *Update of benchmark values for the years 2021 – 2025 of phase 4 of the EU ETS* (Benchmark curves and key parameters, Issue. https://climate.ec.europa.eu/system/files/2021-10/policy_ets_allowances_bm_curve_factsheets_en.pdf
- Ecoinvent. (2025). *Ecoinvent v3.11*. Ecoinvent. <https://ecoinvent.org/ecoinvent-v3-11/>
- Sphera Solutions GmbH (2025), Eco-profile of Flexible Polyurethane (PU) Foam - EUROPUR February 2025. [2025-Eco-Profile-of-Flexible-PU-Foam.pdf](#)

I Polyvinylchloride (pvc)

Polyvinylchloride (PVC)

Deze bijlage presenteert de berekening van broeikasgasemissies die vrijkomen over de gehele levenscyclus van PVC zoals gedefinieerd volgens de NIKI CO₂-emissiereductie-methode.

PVC wordt gemaakt door een polymerisatiereactie van een enkel monomeer: monovinylchloride (MVC). Er zijn twee type productieprocessen: S-PVC (suspension) en E-PVC (emulsion). In de EU en in Nederland wordt meer dan 85% van het productievolume via het S-PVC-proces gemaakt. Daarom beschrijven wij deze methode als de benchmark. De twee varianten van PVC hebben andere producteigenschappen.

S-PVC wordt gemaakt in drie stappen, een polymerisatiereactie, een stripper om de producten af te scheiden en een processingstap om deze op te werken (EC, 2007b).

Tabel I.1 - De levenscyclusemissies van PVC volgens het S-PVC-proces

Levenscyclusfase	CO ₂ -eq.-emissies (ton CO ₂ -eq. per ton PVC)	Relevant hoofdstuk
Input	1,89	Paragraaf I.3
Proces	~0	Paragraaf I.2
Einde levensduur	0,75	Paragraaf I.4
Totaal	2,64	

I.1 Massa- en energiebalans

De productie van polyvinylchloride verloopt via een batchproces waarin vinylchloride (VCM) wordt gepolymeriseerd. VCM is een monomeer dat met zichzelf een polymerisatiereactie aan kan gaan.

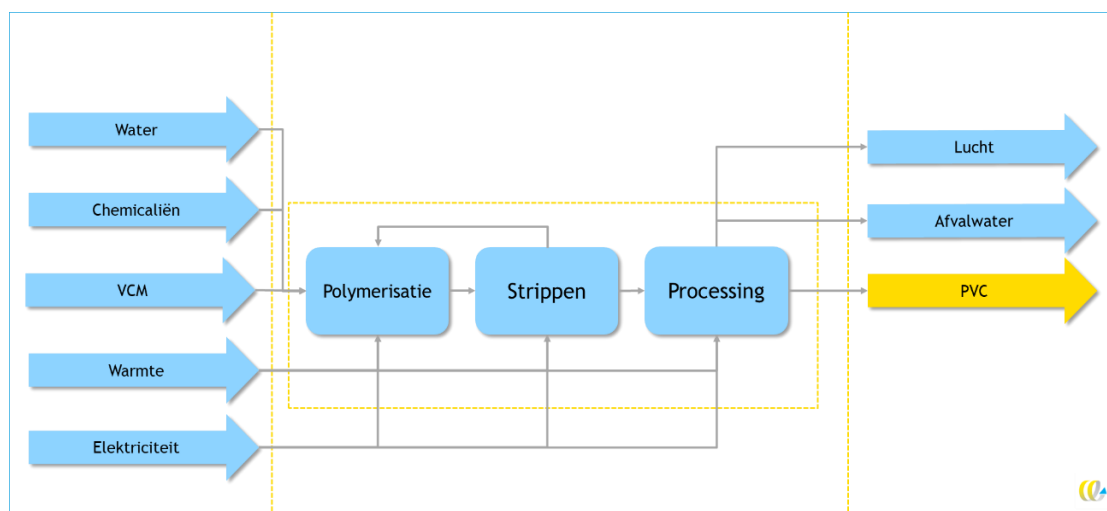
In de eerste stap wordt VCM opgelost in gedemineraliseerd water. Bij dit water worden emulgatoren gevoegd om de oplossing te verbeteren. Hierbij worden aan het begin polymerisatie-initiators gevoegd om de reactie te starten. Aan het eind van de reactie wordt de polymerisatie gestopt door fenolen toe te voegen.

Beide stoffen worden in concentraties van 1 kg/ton toegevoegd. De reactie verloopt met een efficiëntie van 85-90%.

Hierna wordt het reactiemengsel naar een stripkolom geleid. Hier wordt het product (PVC) gescheiden van de niet-gereageerde VCM. De VCM wordt teruggestuurd naar het begin van het proces, waardoor uiteindelijk bijna alle VCM in het product wordt verwerkt.

Hierna wordt het PVC opgewerkt naar een eindproduct, waarbij afvalwater vrijkomt met een hoeveelheid van 3,5 gram VCM/ton PVC. Qua luchtemissies komen in het proces 18 g/ton VCM-vrij en 40 g/ton PVC.

Figuur I.1 - De procesgrenzen van PVC-productie volgens het S-PVC-proces



I.1.1 Massabalans

Wij nemen aan dat er een volledige recycling van het VCM plaatsvindt in de stripperkolom. De teruggewonnen VCM wordt teruggestuurd naar het begin van het proces. Hoewel een enkele batch 85-90% efficiëntie haalt, haalt het proces uiteindelijk hiermee een efficiëntie die dichtbij de 100% komt. De hoeveel VCM-input is gebaseerd op 1 ton output en de afvalstromen zoals beschreven in de BAT.

Tabel I.2 - Massa- en koolstofbalans voor de productie van 1 ton PVC volgens het S-PVC-proces

Stof	Eenheid	Input	Input (koolstof)	Output	Output (koolstof)
PVC	ton	-	-	1,00	0,38
VCM	ton	1,00	0,38	0,00	0,00
Polymerisatie initiatoren	ton	0,00	-	-	-
Fenolen	ton	0,00	-	-	-
PVC-lucht	ton	-	-	0,00	0,00
Totaal		1,00	0,38	1,00	0,38

I.1.2 Energiebalans

De warmtevraag voor het proces is 2.000 MJ/ton PVC. Hiernaast wordt er 700 MJ/ton PVC aan elektriciteit verbruikt. Er wordt geen warmte teruggewonnen.

Tabel I.3 - Energiebalans voor de productie van PVC volgens het S-PVC-proces

Energie	Input	Output
	MJ/ton	MJ/ton
Warmtevraag	2.000	
Elektriciteitsvraag	700	
Chemische energie en restwarmte		2.700
Totaal	2.700	2.700

I.2 CO₂-emissies: Proces

De totale CO₂-emissies van het proces zijn ~0 kg CO₂-eq./ton PVC. Dit is de som van 0 directe emissies, 0,12 kg CO₂-eq./ton emissies uit afvalstromen en 0,002 kgCO₂-eq./ton emissies door storingen, stoppen en starten.

Tabel I.4 - CO₂-eq.-emissies voor de productie van PVC volgens het S-PVC-proces

	Emissie (ton CO ₂ -eq./ton)
Directe emissie	-
Afvalstromen	0,000117
Onderhoud	0,00000234
Totaal	0,00

I.2.1 Directe emissies

Uit het proces komen geen directe CO₂-emissies vrij.

I.2.2 Emissies uit afvalstromen

Uit het proces komen drie afvalstromen vrij uit VCM en PVC. Hierbij komt 18 g VCM/ton PVC vrij in afvalwater en in de lucht. Het afvalwater mag volgens de methode buiten beschouwing worden gelaten. Daarnaast komt er 40 g/ton PVC vrij naar de lucht. Hierdoor komt in totaal 0,12 kg CO₂-eq./ton PVC vrij. Deze berekening staat in Tabel I.5.

Er komt ook water vrij door de chemische reactie, dit heeft geen emissiefactor. Hiernaast is er een grote waterstroom, waar initieel de VCM en de additieven in opgelost worden. Deze waterstroom komt uiteindelijk als afvalwater vrij en dient te worden gezuiverd. Deze hele stroom laten wij, als voorgeschreven in de NIKI-methode, buiten beschouwing van de massabalans, omdat het niet geconsumeerd wordt in het proces, en geen emissie veroorzaakt.

Tabel I.5 - CO₂-eq.-emissies door afvalstromen uit productie van PVC volgens het S-PVC-proces

Stof	Hoeveelheid	Koolstofinhoud	Emissie
	kg/ton product	kg C/ton product	kg CO ₂ -eq./product
Water	3.100	0	0
VCM	0,018	0,0069	0,025
PVC	0,04	0,025	0,092
Totaal			0,12

I.2.3 Emissies door storingen, stoppen en starten

Er is geen informatie beschikbaar over de emissie van storingen, stoppen en starten. Hierom wordt de generieke 2%-regel toegepast (NIKI-methode, paragraaf 6.2). Hierdoor komt er een emissie van 2,3 g CO₂-eq./ton PVC vrij.

I.3 CO₂-emissies: Input

De totale hoeveelheid CO₂-emissies van input bedraagt 1,89 ton CO₂-eq./ton. Hiervan komt *EF* ton CO₂-eq. uit de grondstoffen en 0,16 ton CO₂-eq. uit de energievraag.

I.3.1 Grondstoffen

Voor de productie van PET zijn drie grondstoffen nodig: VCM, polymerisatie initiator en fenolen. Omdat de hoeveelheid van de laatste twee zeer laag zijn, worden deze buiten beschouwing gelaten.

VCM is vrij beschikbaar op de markt. Hiervan wordt de emissiefactor uit ecoinvent gehaald op *EF* kg CO₂-eq./kg.

De totale emissie door grondstoffen is *EF* ton CO₂-eq./ton PVC.

I.3.2 Energie

Voor de productie van PVC wordt 2.000 MJ/ton PVC warmte gebruikt. Voor de emissiefactor van warmte wordt de warmtebenchmark gebruikt. Dit levert 0,09 ton CO₂-eq./ton PVC op.

Hiernaast wordt 700 MJ elektriciteit gebruikt, hiervoor gebruiken wij de benchmark van 0,14 kg CO₂-eq./kWh. Dit levert 0,03 ton CO₂-eq./ton PVC op.

Tabel I.6 - CO₂-eq.-emissies van de inputstromen van PVC volgens het S-PVC-proces

Stof	Eenheid	Hoeveelheid	Emissiefactor	Emissie	Referentie emissiefactor
		Eenheid/ton	ton CO ₂ -eq./eenheid	ton CO ₂ -eq./ton	
VCM	ton	1	EF	EF	'vinyl chloride production - RER - vinyl chloride' Vinyl chloride 3.11 Cut-off, U (Ecoinvent, 2023)
Warmte	MJ	2.700	0,0000473	0,13	(EC, 2021b)
Elektriciteit	MJ	700	0,000039	0,03	NIKI-methode: 0,14 kg/kWh
Totaal				1,89	

I.4 CO₂-emissies: Einde levensduur

De CO₂-emissie van het einde levensduur van PVC is 0,75 ton CO₂-eq./ton.

In de EU wordt jaarlijks 34% van het PVC-afval gerecycled, 41% wordt verbrand en 25% wordt gestort (EC, 2020). Wij nemen hierbij aan dat het storten van PVC zorgt voor het langdurige vastleggen van deze koolstof in PVC. De volledige koolstofinhoud van PVC is fossiel (0,38 ton C/ton).

Bij volledige verbranding wordt $0,38 \text{ ton C/ton PVC} \times 44/12 = 1,39 \text{ ton CO}_2\text{-eq./ton PVC}$. 41% wordt verbrand, wat neerkomt op 0,58 ton CO₂-eq./ton PVC.

Bij het langdurig vastleggen, hoeft volgens de NIKI-methode slechts de helft van de CO₂-eq.-emissie meegenomen te worden in vergelijking met volledige verbranding. Dat komt neer op $0,5 \times 25\% \times 1,39 = 0,18 \text{ ton CO}_2\text{-eq./ton PVC}$.

Tabel I.7 - CO₂-eq.-emissies bij einde levensduur PVC

PVC	Fractie	Emissie (fossiel)
		ton CO ₂ -eq./ton
Niet gerecycled (= verbrand)	41%	0,58
Gerecycled	34%	0
Langdurig vastleggen	25%	0,18
Totaal	100%	0,75

Literatuurlijst

- EC. (2007). *Reference Document on Best Available Techniques in the Production of Polymers*. https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/pol_bref_0807.pdf
- EC. (2020). *Circular Plastics Alliance - State of Play on Collected and Sorted Plastic Waste from Construction*. <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/43694>
- EC. (2021). *Update of benchmark values for the years 2021 – 2025 of phase 4 of the EU ETS*. https://climate.ec.europa.eu/system/files/2021-10/policy_ets_allowances_bm_curve_factsheets_en.pdf
- Ecoinvent. (2023). *ecoinvent v3.9*. ecoinvent. <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/data-releases/ecoinvent-3-9/>

J Waterstof

Waterstof

Deze bijlage presenteert de berekening van CO₂-emissies van waterstof die vrijkomen over de gehele levenscyclus zoals gedefinieerd in de NIKI-CO₂-emissiereductiemethode. Voor deze bijlage is uitgegaan van de productie van (grijze) waterstof via het steam methane reforming (SMR)-proces.

Tabel J.1 geeft een overzicht van de CO₂-emissies over de levenscyclus. De massa- en energiebalans (MEB) van het productieproces is de basis van deze berekening (zie Paragraaf J.1). De MEB is in principe opgesteld volgens de relevante BREF (Best available techniques REference document), in dit geval *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Refining of Mineral Oil and Gas* en *BAT Reference document for Large Volume Inorganic Chemicals – Ammonia, Acids and Fertilisers* (EC, 2007a, 2015). Op basis van de MEB worden ten eerste de directe CO₂-emissies en de CO₂-emissies van afvalstromen van het productieproces berekend (zie Paragraaf J.2 en J.3). Ten tweede laat de MEB zien welke inputstromen (materialen en energie) er nodig zijn voor het productieproces, hiermee worden de CO₂-emissies van de input berekend. Als laatste laat de MEB ook zien wat de koolstofinhoud van het eindproduct is, die kan worden gebruikt om de CO₂-emissies bij einde levensduur te bepalen (zie Paragraaf J.4).

Tabel J.1 - De levenscyclusemissies van grijze waterstof

Levenscyclusfase	CO ₂ -emissies (ton CO ₂ -eq. per ton H ₂)	Relevante paragraaf
Inputstromen	1,60	Paragraaf J.2
Proces	9,17	Paragraaf J.3
Einde levensduur	0	Paragraaf J.4
Totaal	10,77	

Eventuele verschillen met bronnen zoals CO₂emissiefactoren.nl zijn te verklaren door verschil in methodiek en scope (we nemen bijvoorbeeld waterstoftransport en compressie niet mee en nemen aan dat de input van aardgas volledig bestaat uit methaan). Zie ook Tekstkader J.1.

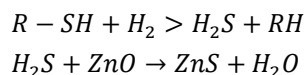
J.1 Massa- en energiebalans

Het produceren van waterstof gebeurt in Nederland voor circa 80% door gebruik te maken van zogenaamde steam methane reformers (Milieu Centraal). Deze methode maakt primair gebruik van aardgas als grondstof. In enkele gevallen kunnen raffinaderijgassen, LPG en lichte nafta ook dienen als grondstof. Dit productieproces is gebaseerd op fossiele grondstoffen wordt daarom grijze waterstof genoemd. De broeikasgassen die hierbij vrijkomen worden uitgestoten naar de atmosfeer.

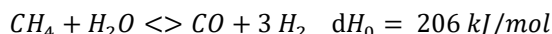
Steam methane reforming bestaat uit vier stappen: ontzwaveling, primary reforming, secondary reforming, shift conversie, en pressure swing adsorption (PSA), zie ook Figuur J.1. Deze zes stappen worden hierna nader belicht.

Ontzwaveling: Eén van de twee voornaamste grondstoffen voor de productie van waterstof is aardgas met methaan als voornaamste component. Aardgas is echter normaal gesproken niet in schone vorm aanwezig, en bevat onder andere zwavelverbindingen als verontreiniging. Deze zwavel is schadelijk voor een katalysator later in het proces en wordt daarom zoveel mogelijk onttrokken aan de aanvoer. Dit gebeurt eerst met behulp van hydrogenatie met waterstof naar waterstofsulfide wat vervolgens reageert met zinkoxide tot zinksulfide. De gebruikte waterstof is afkomstig uit de waterstof die uiteindelijk geproduceerd wordt.

Het gevormde waterstofsulfide (H_2S) wordt geadsorbeerd op de zinkoxide waar het reageert tot zinksulfide (ZnS) die vervolgens wordt afgevoerd. Het gaat om de volgende chemische reacties:



Pre-reformer: Het gezuiverde aardgas wordt gemixt met lagedrukstoom en komt de primaire reformer in op een temperatuur van 400-600 °C. De pre-reformer dient om de hogere koolwaterstoffen te kraken en een deel van de methaan al om te zetten naar waterstof. Stoom wordt extern geproduceerd en over het algemeen in een stoom/koolstof-molverhouding van 3,0 toegevoegd. Op deze manier verloopt de reactie in de gewenste richting en wordt het gros van de methaan omgezet via de endotherme¹¹ steam reforming-reactie:

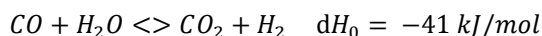


¹¹ De reactie-enthalpie H is een thermodynamische grootheid. Bij processen op constante druk is het verschil tussen twee toestanden gelijk aan de hoeveelheid warmte die is opgenomen of afgestaan.

met dH_0 de enthalpieverandering onder standaardcondities. De warmte die hiervoor benodigd is komt uit warmtewisselaars voor en na de pre-reformer.

Reformer: In de pre-reformer heeft nog maar circa 10-30% van alle methaan gereageerd en daarom is er een additionele reformer stap. Hierin wordt vrijwel alle resterende methaan via dezelfde reactie als in de pre-reformer omgezet in waterstof. Voor de warmte-toevoer gebruikt een SMR een fornuis waarbij het feedgas door verticale pijpen stroomt, die van de buitenkant verhit worden door restgassen en aardgas. Een voordeel hiervan is dat er minder warmte hoeft te worden toegevoegd, hoge temperaturen worden bereikt en methaan maximaal wordt omgezet. Vóór de volgende processtap wordt de gevormde warmte weer verwijderd middels een warmtewisselaar tot onder de 400 °C.

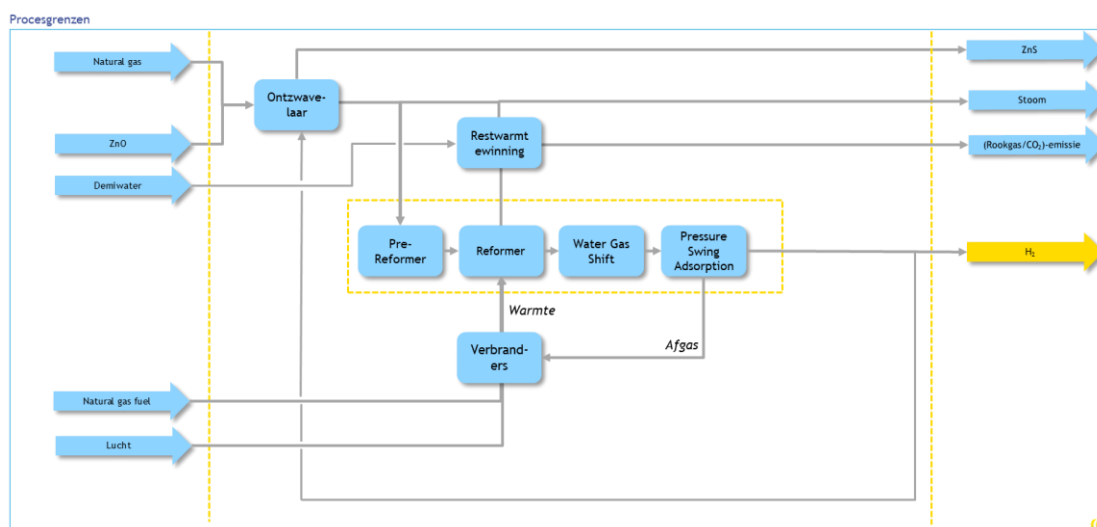
Shift conversie: Naast waterstof is er in de reformers ook koolstofmonoxide (CO) geproduceerd. Het grootste deel hiervan wordt in de shift reactor omgezet in extra waterstof en koolstofdioxide (CO₂). Dit wordt over het algemeen in twee stappen (met respectievelijk hogere en lagere temperatuur) gedaan. De eerste stap is een reactie in een ijzer/chroomoxide bed op 350-380 °C. Hierna wordt een deel van de warmte verwijderd en volgt de tweede stap: een reactie met een koper/zink oxide katalysator op 200-220 °C. Op deze manier wordt de CO maximaal omgezet. De reactie wordt ook wel de water-gas shift reactie genoemd. Deze is exotherm, er komt dus warmte vrij en ziet er als volgt uit:



De energiecontent van deze gasstroom kan daarmee bijdragen aan het opwaarderen van stoom die in de reformers gebruikt wordt.

Pressure Swing Adsorption: Het voornaamste doel van de Pressure Swing Adsorber is het opzuiveren van de waterstofrijke stroom tot ultrapuur waterstof (zuiverheid: circa 99,999%) op basis van verschillende adsorptie bij verschillende druk. Een deel van de waterstof, doorgaans circa 5%, gaat verloren via het afgas (PBL, 2021a). Dit waterstofhoudend PSA-afgas wordt gerecycled en ingezet als brandstof voor de branders in de reformer (EC, 2007a).

Figuur J.1 - Process flowdiagram voor de productie van grijze waterstof



J.1.1 Massabalans

Voor het opstellen van de massa- koolstof- en energiebalansen zijn een aantal simplificaties gemaakt:

Bij onzuiver aardgas is ontwaveling essentieel. De mate van ontwaveling hangt af van het gehalte in het aardgas. Dat kan per bron/regio verschillen van laag tot hoog, evenals de exacte samenstelling van het aardgas als geheel. En dit ontwavelen kost waterstof en zinkoxide, dus genereert verschillende broeikasgasemissies. We maken in deze factsheet de simplificatie dat de aanvoer van aardgas volledig bestaat uit gezuiverd methaan. We laten het ontwavelen daarom buiten beschouwing. De balansen zijn opgebouwd op basis van molverhoudingen die vervolgens zijn omgezet in massa, we proberen daarmee zoveel mogelijk aan te sluiten op de waarden uit de BREF en het MIDDEN-rapport (PBL, 2021a).

We nemen aan dat de reacties aflopen, tenzij expliciet anders aangegeven. De BREF (P. Barthe, 2015) (EC, 2007a) wordt hierbij zo veel mogelijk aangehouden. SMR-installaties kennen in de praktijk onderlinge verschillen qua type, capaciteit, procescondities en exacte samenstelling van de grondstof- en recyclestromen. De getallen dienen daarom ter indicatie.

In Tabel J.2 is de massa- en koolstofbalans van grijswaterstofproductie weergegeven. De systeemgrenzen zijn om het SMR-proces, shift reactie en PSA gehouden zoals weergegeven in Figuur J.1. De pre-reformer heeft als inputstromen aardgas (3,2 ton CH₄) en lagetemperatuurstoom (6,60 ton H₂O). Deze worden omgezet in respectievelijk waterstof en koolstofmonoxide.

In de reformer wordt 20 MJ aan externe thermische energie toegevoegd vanuit de branders: circa 0,40 ton aardgas is daarvoor nodig . De 1 ton H₂ die gedurende het proces wordt geproduceerd verlaat de PSA als product en de resterende gassen worden intern weer teruggevoerd naar de verbranders. De koolstofbalans beschrijft de koolstofinhoud van de beschreven reacties.

Tabel J.2 - Massa- en koolstofbalans voor de productie van 1 ton waterstof

Stof	Inputstromen	Outputstromen	Inputstromen	Outputstromen
	ton	ton	Koolstofton	Koolstofton
O ₂	2,99	-	-	-
CO ₂	-	8,78	-	2,40
CH ₄	3,20	-	2,40	-
H ₂ O	6,60	2,0	-	-
H ₂	-	1,00	-	-
Totaal	12,79	11,78	2,40	2,40

Aardgas- en energiebehoefte

Om 1 ton waterstof te produceren is circa 3,2 ton aardgas benodigd. De BREF geeft per ton (aardgas)feedstock 240-310 kg waterstof wordt geproduceerd. Dat komt voor 1 ton waterstof neer op 3,2-4,2 ton aardgas. Echter is de BREF niet eenduidig of dit inclusief aardgas als brandstof is. De MIDDEN-rapporten noteren een interval van 2,6-2,9 ton aardgas per ton waterstof. Gezien ook deze waarden niet ver van de BREF liggen gebruiken we – conform de NIKI-methodiek – de laagste waarde uit de BREF van 3,2 ton aardgas per ton waterstof. Daar gaan we ervan uit dat een deel daarvan bestaat uit het volume aan aardgas dat benodigd is om de thermische energie te leveren voor het reformingsproces. De BREF geeft in Tabel 3.67 aan dat 20 MJ aan energie benodigd is voor de productie van 1 ton waterstof. Omgerekend is daar 0,40¹² ton aardgas voor nodig in de branders. Dat betekent dat 2,8 ton aardgas benodigd is als feedstock per ton waterstof.

Stoombehoefte

De LVIC-AAF BREF geeft geen getal voor de stoombehoefte per ton waterstof. Er wordt wel aangegeven dat een S/C-ratio = 3,0 gangbaar is voor conventionele SMR's, lagere verhoudingen kunnen voorkomen wanneer energie-efficiëntie en economisch redenen belangrijk zijn. We houden om die reden het MIDDEN-rapport aan die 6,60 ton H₂O per ton waterstof aangeeft die hoort bij een aardgasfeed van ~3,0 ton per ton waterstof (PBL,

¹² Berekend met een verbrandingswaarde van aardgas gelijk aan 50 MJ/kg CH₄ LHV.

2021a). Circa 4 ton aan stoom wordt omgezet in de shift reactor. Het restant verlaat de PSA-unit als exportstoom.

Plantintegratie

We merken op dat plantintegratie een belangrijke rol speelt. We hebben geconstateerd dat er belangrijke invloed is van de mate van plantintegratie op het methaangebruik en CO₂-emissie. Tekstkader J 1 beschrijft de impact op levenscyclusemissies voor waterstof-productie (c.q. petrochemische productie).

Tekstkader J 1 - Impact van plantintegratie op levenscyclusemissies

Zowel bij de productie van waterstof in petrochemische productie als voor de productie van ammoniak speelt de mate van plantintegratie (gebruik van reststromen voor (non-)energetisch gebruik) een belangrijke rol en verschilt daarin onderling. Dit hebben we gevalideerd met het PRELIM-raffinagemodel (versie 1.6, 2022). Daarin wordt zowel een casus beschreven mét als zonder plantintegratie. De in deze factsheet gevonden waarden bevinden zich tussen deze twee extremen in, wat impliceert dat er sprake is van gedeeltelijke plantintegratie.

J.1.2 Energiebalans

Tabel J.3 geeft de energiebalans weer die bij de productie van grijze waterstof hoort. We hebben hier data uit Tabel 3.67 (P. Barthe, 2015) aangehouden als referentie. Voor het produceren van 1 ton waterstof is circa 20 GJ thermische energie nodig in de reformer. De energie is afkomstig uit de verbanding van aardgas en wordt bij de endotherme reactie in de reformer omgezet in chemische energie. We nemen hier aan dat dit volledig wordt benut. 2,8 ton methaan als grondstof beslaat een energiestroom van 140 GJ.

De BREF hanteert voor de hoeveelheid elektrische energie een waarde van 200 kWh/ton H₂ voor conventionele steam methane reformers. Omgerekend is dit 720 MJ/ton H₂. De exacte opsplitsing naar verbruik is niet bekend vanuit de BREF, echter is wel aan te merken dat het gebruik van elektrische compressoren, pompen, etc., hieronder kan vallen en dat het grootste deel in de vorm van warmte vrijkomt. Deze warmtestromen worden afgevoerd door middel van koeltorens of weer gerecupereerd en nuttig gebruikt in andere industriële processen zodat deze niet vergaan.

Tabel J.3 - Energiebalans voor de productie van waterstof

Energie	Input	Output
	MJ/ton	MJ/ton
Methaan feed	140.000	
Methaan fuel	20.000	
Chemische energie		20.000
Stoom	-4.800	
Elektrische energie	720	
Warmte		135.920
Totaal	155.920	155.920

J.2 CO₂-emissies: Input

De totale CO₂-emissies van de inputstromen bedragen 1,60 ton CO₂-eq./tonH₂.

Van de drie inputstromen is de emissiefactor voor aardgas (verondersteld dat dit voornamelijk methaan is) bekend vanuit CO₂emissiefactoren.nl (2024). Voor gebruik van elektriciteit door instrumentarium (e.g. pompen, compressoren, etc.) is aangenomen dat dit nog fossiel wordt opgewekt. Hiervoor is de emissiefactor voor elektriciteit gebruikt uit Paragraaf 5.1.3.2. van de NIKI-methode.

Het gebruik van aardgas als brandstof voor de branders zal de grootste impact hebben op de uitstoot van CO₂. In Tabel J.4 zijn de CO₂-emissies van de inputstromen gegeven, die zijn in totaal gelijk aan 1,6 ton CO₂-eq./tonH₂. Voor de emissiefactor van methaan hebben we de WTT-factor van aardgas van 0,355 kg CO₂-eq./Nm³ gedeeld door de verbrandingswaarde van 31,65 MJ/Nm³ voor aardgas, wat resulteert in 0,0112 ton CO₂-eq./GJ.

Tabel J.4 - Input van grondstofstromen en gerelateerde CO₂-emissies per eenheid referentieproduct (per ton geproduceerde H₂)

Stof	Eenheid	Hoeveelheid	Emissiefactor	Emissie	Referentie
		Eenheid/ton	Ton CO ₂ -eq./eenheid	Ton CO ₂ -eq./ton	
Feed: CH ₄	GJ	140	0,0112	1,570	(CO ₂ emissiefactoren.nl, 2024)
Fuel: CH ₄	GJ	20	0,0112	0,224	(CO ₂ emissiefactoren.nl, 2024)
Elektriciteit	GJ	0,720	0,0389	0,028	Paragraaf 5.1.3.2. NIKI-methode
Exportstoom	GJ	-4,80	0,0473	-0,227	Paragraaf 5.1.3.2. NIKI-methode
Totaal				1,60	

J.3 CO₂-emissies: Proces

In Tabel J.5 zijn de procesemissies gerelateerd aan het proces gegeven, dit is in totaal 9,17 ton CO₂-eq./tonH₂. Voor de emissiefactor van methaan hebben we de TTW-factor van aardgas van 1,779 kg CO₂-eq./Nm³ gedeeld door de verbrandingswaarde van 31,65 MJ/ Nm³ voor aardgas, wat resulteert in 0,0562 ton CO₂-eq./GJ.

Tabel J.5 - CO₂-emissies gerelateerd aan het proces per eenheid referentieproduct (ton H₂)

Stof	Eenheid	Hoeveelheid	Emissiefactor		Emissie	Referentie
		Eenheid/ton	kg CO ₂ -eq./Nm ³	ton CO ₂ -eq./eenheid	ton CO ₂ -eq./ton H ₂	
Feed: CH ₄	GJ	140	1,779	0,0562	7,869	(CO ₂ emissiefactoren.nl, 2024)
Fuel: CH ₄	GJ	20	1,779	0,0562	1,124	(CO ₂ emissiefactoren.nl, 2024)
Onderhoud/storing, etc. (2%-regel)	ton				0,180	NIKI-methode
Totaal					9,17	

Directe emissies

De directe (CO₂-)emissies komen voornamelijk als rookgas vanuit de reformer. Anders dan in de pre-reformer wordt de warmte geproduceerd in de reformer zelf. Dit is mogelijk doordat lucht en aardgas in deze processtap worden toegevoegd en aardgas intern deels verbrandt om de benodigde warmte te leveren. In Tabel J.6 zijn de directe emissies gerelateerd aan het proces gegeven, dit is in totaal 8,99 ton CO₂-eq./ton H₂.

Tabel J.6 - Directe CO₂-emissies gerelateerd aan het proces per eenheid referentieproduct (1 ton H₂)

Stof	Eenheid	Hoeveelheid	Emissiefactor	Emissie
		Eenheid/ton	ton CO ₂ -eq./eenheid	ton CO ₂ -eq./ton H ₂
Feed: CH ₄	GJ	140	0,0562	7,869
Fuel: CH ₄	GJ	20	0,0562	1,124
Totaal				8,99

Emissies uit storingen, stoppen en starten

Het restant van circa 0,18 ton CO₂-eq./ton H₂ is toe te kennen aan emissies gerelateerd aan onderhoud. We houden daarbij de 2%-regel aan zoals beschreven in de methodiek, zie Tabel J.7.

Tabel J.7 - CO₂-emissies gerelateerd aan het proces per eenheid referentieproduct (1 ton H₂)

Stof	Eenheid	Hoeveelheid	Emissiefactor	Emissie
		Eenheid/ton	ton CO ₂ -eq./eenheid	ton CO ₂ -eq/ton H ₂
Onderhoud/storing etc. (2%-regel)	ton			0,18
Totaal				0,18

Verbranding/verbruik

Steam Methane Reformers produceren waterstof en verbranden deze niet. Er zijn verder twee interne waterstofverliezen in de SMR. Het eerste is de aftap voor ontzwaveling: door hydrogenatie met waterstof naar waterstofsulfide wat vervolgens reageert met zinkoxide wordt zinksulfide gevormd. Het gevormde zinksulfide (ZnS) wordt afgevoerd.

Het tweede verlies is de waterstofrecycle afkomstig uit de laatste stap in de keten van waterstofproductie: de Pressure Swing Adsorption. Beide al zijn inbegrepen in het netto gasverbruik van de reformer zoals weergegeven in de BREF.

J.4 CO₂-emissies: Einde levensduur

Waterstof bevat geen koolstof, bij (eind)verbruik van waterstof als energiedrager of als grondstof in de chemische energie komt dus geen CO₂ vrij die kan worden toegeschreven aan waterstof. De CO₂-emissies bij einde levensduur van waterstof zijn dus 0.

Literatuurlijst

- Amir Samimia, Soroush Zarinabadib, Amir Hossein Shahbazi Kootenaeia, Alireza Azimia, & Masoumeh Mirzaeia. (2021). Optimization of Naphtha Hydro-Threating Unit with Continuous Resuscitation Due to the Optimum Temperature of Octanizer Unit Reactors. *Advanced journal of Chemistry*, 3.
<https://doi.org/10.33945/SAMI/AJCA.2020.2.6>
- Boger, T., Roy, S., & Sorensen, C. (2004). *System and process for pyrolysis gasoline hydrotreatment* (New York, US Patent No. C. Incorporated).
<https://patents.google.com/patent/US20040004031A1/en>
- CO₂emissiefactoren.nl. (2024, 10-03-2025). CO₂emissiefactoren 2024. CO₂emissiefactoren. <https://co2emissiefactoren.nl/factoren/2024/download/>
- CO₂emissiefactoren.nl. (ongoing, January 14, 2022). *Lijst emissiefactoren*.
<https://www.co2emissiefactoren.nl/lijs-emissiefactoren/>

- EC. (2007a). *Large Volume Inorganic Chemicals - Ammonia, Acids and Fertilisers*. Large Volume Inorganic Chemicals - Ammonia, Acids and Fertilisers
- EC. (2007b). *Reference Document on Best Available Techniques in the Production of Polymers*. https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/pol_bref_0807.pdf
- EC. (2015). *BAT Reference document for the refining of mineral oil and gas*. https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/REF_BREF_2015.pdf
- EC. (2020). *Circular Plastics Alliance - State of Play on Collected and Sorted Plastic Waste from Construction*. <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/43694>
- EC. (2021a). *Update of benchmark values for the years 2021 – 2025 of phase 4 of the EU ETS* (Benchmark curves and key parameters, Issue. https://climate.ec.europa.eu/system/files/2021-10/policy_ets_allowances_bm_curve_factsheets_en.pdf
- EC. (2021b). *Update of benchmark values for the years 2021 – 2025 of phase 4 of the EU ETS*. https://climate.ec.europa.eu/system/files/2021-10/policy_ets_allowances_bm_curve_factsheets_en.pdf
- EC. (2022). *Annex C, Default application-specific and material-specific values for the parameters to be used in the application of the Circular Footprint Formula when performing a PEF or OEF study*. European Commission. <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/developerEF.xhtml>
- Ecoinvent. (2023). *ecoinvent v3.9*. ecoinvent. <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/data-releases/ecoinvent-3-9/>
- Ecoinvent. (2025). *Ecoinvent v3.11*. Ecoinvent. <https://ecoinvent.org/ecoinvent-v3-11/>
- Ecoinvent. (ongoing). *The ecoinvent database*. <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/>
- European Commission. (2021). *Update of benchmark values for the years 2021 – 2025 of phase 4 of the EU ETS* (Benchmark curves and key parameters, Issue. https://climate.ec.europa.eu/system/files/2021-10/policy_ets_allowances_bm_curve_factsheets_en.pdf
- European Commission. (2007). *Large Volume Inorganic Chemicals - Ammonia, Acids and Fertilisers*.
- Fuel Cells and Hydrogen Observatory. (2021). *2021 Hydrogen supply and demand*. <https://observatory.clean-hydrogen.europa.eu/sites/default/files/2023-05/Chapter-2-Hydrogen-Supply-and-Demand-2021.pdf>
- Joint Research Centre (European Commission). (2017). *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Large Volume Organic Chemicals* (EUR 28882 EN). https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/JRC109279_LVOC_Bref.pdf
- Köpnick, H., Schmidt, M., Brüggling, W., J., R., Kaminsky, W., Schmidt, M., Brüggling, W., J., R., & Kaminsky, W. (2000). Polyesters. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, 2000. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/14356007.a21_227
- Milieu Centraal. Waterstof. In.

- P. Barthe, M. C., S. Roudier, L. Sancho. (2015). *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Refining of Mineral Oil and Gas*.
- PBL. (2021a). *Decarbonisation options for the Dutch industrial gases production*.
- PBL. (2021b). *MIDDEN database*. Planbureau voor de Leefomgeving (PBL).
<https://www.pbl.nl/en/middenweb/the-database>
- PBL, & TNO. (2019). *Decarbonisation options for the Dutch fertiliser industry*.
<https://www.pbl.nl/en/publications/decarbonisation-options-for-the-dutch-fertiliser-industry>
- Rebel. (2020). *PET-trays circulair : een onderzoek naar knelpunten en oplossingsrichtingen*. https://kidv.nl/media/rapportages/rapport_pet-trays_circulair_albert_heijn_en_rebelgroep_2020_.pdf
- Royal HaskoningDHV. (2021). *Monitoring beleidsprogramma circulair textiel. Nulmeting peiljaar 2018*. <https://open.overheid.nl/documenten/ronl-9a6b4b22-eefa-4875-a83f-e03404de4e63/pdf>
- Sphera Solutions GmbH. (2025). *Eco-profile of Flexible Polyurethane (PU) Foam*.
<https://europur.org/wp-content/uploads/2025/02/2025-Eco-Profile-of-Flexible-PU-Foam.pdf>
- Systemiq. (2023). *Circularity of PET/polyester packaging and textiles in Europe*.
<https://www.systemiq.earth/wp-content/uploads/2023/02/Systemiq-PET-Circularity-Europe-Synthesis-Report-High-Res.pdf>
- Thermal Engineering. (2025). *Methaan: Warmtewaarde, Aardgas en Energiebron*. Thermal Engineering. <https://www.thermal-engineering.org/nl/methaan-warmtewaarde-aardgas-en-energiebron/#:~:text=Voor%20methaan%20is%20de%20LHV%20ongeveer%2050%20C0%20MJ%2Fkg.,voor%20een%20aanzienlijk%20deel%20van%20de%20wereldwijde%20energieproductie>.
- Worrell, E., Phylipsen, D., Einstein, D., & Martin, N. (2000). Energy use and energy intensity of the U.S. chemical industry., 2000. <https://doi.org/10.2172/773773>.