

Effectiviteitsanalyse van CCU productketens

Bijlage 1 - Achtergrondanalyse LCA

Auteurs: Anna Schwarz, Toon van Harmelen
TNO, januari 2022

Inhoud

Bijlage 1 - Achtergrondanalyse LCA	1
Inhoud.....	2
Inleiding.....	3
Aanpak.....	3
Functionele eenheid	3
Systeemgrenzen.....	3
Relatief en absoluut perspectief	4
Data en rekenmethode.....	4
Variabelen.....	5
CO ₂ rekenmethodiek.....	6
Inventory	7
Resultaten	8
De CO ₂ prestatie over de keten per product	8
De CO ₂ prestatie van CCU per ketenstap	17
De CO ₂ prestatie per productketen vergeleken	18
Karakterisering en prioritering van CCU productketens.....	21
Appendix	24
Inventory	24
CO ₂ bron	24
Vermeden emissies bij de centrale (relatief perspectief).....	24
Afvang.....	24
Producten en processen.....	25
End-of-life.....	26
Emissiefactoren processen	27

Inleiding

In dit hoofdstuk zal de totale CO₂-uitstoot van de geselecteerde Carbon Capture and Utilization (CCU) ketens worden berekend. Hierbij is het doel om niet alleen inzicht te geven in de CO₂-prestatie van de verschillende productketens, maar ook in de factoren of omstandigheden c.q. ketenstappen die daarbij cruciaal zijn. Hiervoor wordt de methodiek van de Levenscyclusanalyse (LCA) gebruikt. Er wordt geen onderscheid gemaakt in scope 1, 2 en 3 emissies; deze worden alle drie meegenomen. Er wordt met een LCA geen directe locatie of allocatie gegeven aan emissies, maar de emissies over de hele keten worden in kaart gebracht en vernoemd naar de bron (bijvoorbeeld materiaal of energie).

Omdat de keten rondom CO₂-afvang en gebruik complex is, is er voor gekozen om de impact op klimaatverandering vanuit twee perspectieven te laten zien. Het eerste perspectief is het fossiele scenario. Dit is een scenario waarbij fossiele energiebronnen overheersen, en is daarom meest vergelijkbaar met de situatie nu. Er wordt CO₂ afgevangen en gebruikt met de huidige elektriciteitsmix, warmte en waterstof. Het tweede perspectief is het hernieuwbare scenario. Dit is meest vergelijkbaar met een ver toekomstscenario waarbij de energiebronnen volledig hernieuwbaar zijn, en dus een lage footprint hebben. Hier wordt dus gebruik gemaakt van duurzame elektriciteit, warmte en waterstof.

Verder worden alleen de broeikasgasemissies in CO₂-equivalenten meegenomen in deze rapportage. Andere milieu impact categorieën vallen buiten scope, maar kunnen worden aangehaald waar deze een rol van betekenis zouden kunnen spelen. Hieronder vallen onder andere watergebruik, toxiciteit, fijnstofvorming en landgebruik.

Deze LCA wordt gepresenteerd volgens het ISO standaard framework. Hierin beginnen we met het vaststellen van de goal en scope, de inventory (data), gevolgd door de resultaten. De interpretatie van de LCA vindt deels plaats in dit hoofdstuk en deels in hoofdstuk 3. In hoofdstuk 3 worden de resultaten in een breder perspectief geïnterpreteerd en gericht op de provincie Zuid Holland.

Aanpak

Functionele eenheid

Vanwege de grote variatie in technologieën, processen en eindproducten is gekozen voor een functionele eenheid van het beginmateriaal. Deze is gelijk voor alle ketens en biedt daardoor een mogelijkheid tot eerlijke vergelijking. De functionele eenheid is gedefinieerd als volgt:

Het afvangen en omzetten en maken van producten van 1 ton afgevangen CO₂, inclusief het afvalscenario (end-of-life) van het gemaakte product.

Systeemgrenzen

Het systeem van beschouwing betreft de gehele CCU-keten van wieg tot graf (cradle-to-grave). Dus van de afvang van CO₂ uit een bepaalde bron, de omzetting hiervan in een product tot en met de einde-levensfase van het product. Hierbij wordt de gebruiksfase en de hierbij benodigde transportafstanden niet meegenomen. Dit vanwege het feit dat in bijna alle gevallen de directe CO₂-emissies van de gebruiksfase van de hier beschouwde producten verwaarloosbaar zijn. Voor het CCU-systeem worden de CO₂-emissies van en naar de atmosfeer gekwantificeerd. Voor de end-of-life van het CCU-product kan de CO₂ langdurig worden opgeslagen. Dit kan op 2 manieren: door afvang of door het maken van een circulair product (in een toekomstige, circulaire economie). De minimale opslagtijd die hier voor geldt is 100 jaar. Verder wordt de CO₂-opslag (CCS) ook meegenomen als referentieoptie. De prestaties van de CCU-ketens kunnen zo worden vergeleken met de CCS-route.

Relatief en absoluut perspectief

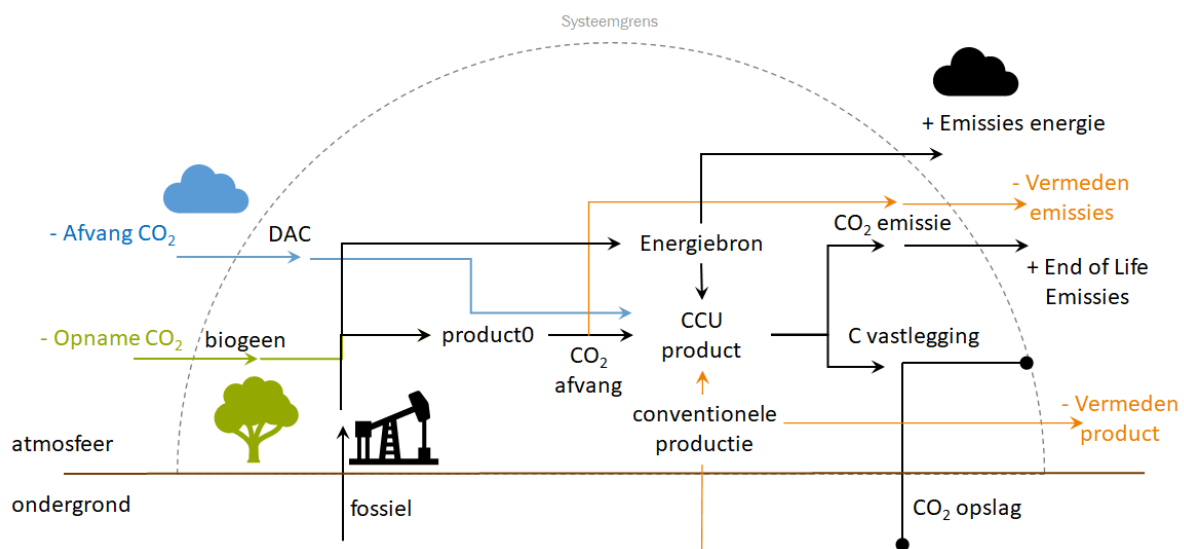
We onderscheiden 2 perspectieven om de CO₂-emissie van het gehele systeem te bepalen:

- Het relatieve perspectief waarbij we vast stellen wat de emissies zijn ten opzichte van de huidige situatie, en
- Het absolute perspectief waar we de netto emissies naar de atmosfeer kwantificeren.

Door het afvangen van CO₂ bij centrales (bijvoorbeeld in industrie, AVI, of energiecentrale), worden er direct emissies vermeden met de technologie. Normaal zou deze vermeden emissies kunnen worden toegewezen aan het product, bijvoorbeeld elektriciteit bij de AVI of bij de energiecentrale, of bijvoorbeeld staal bij afvang van een industrieel proces. Echter, omdat hier de primaire producten niet worden meegenomen, rekenen we hier de baten van de uitsparing van CO₂ toe aan de CCU-keten in het relatieve perspectief. In figuur 1 zijn de systeemgrenzen van het relatieve perspectief gevisualiseerd, inclusief vermijding van CO₂-emissies volgens de oranje pijlen.

Voor het absolute perspectief wordt er vanuit gegaan dat er geen processen meer zijn die direct CO₂ emitteren (energie is duurzaam, en industrie gebruikt bijvoorbeeld waterstof). Hierdoor kunnen de vermeden emissies bij het proces niet meer worden geclaimd door de keten. In figuur 1 zijn de systeemgrenzen van het absolute perspectief gevisualiseerd, exclusief de oranje pijlen.

Ook voor uitgespaarde producten geldt dit verschil. In het relatieve perspectief worden de vermeden emissies voor primaire productie toegerekend aan de keten. Er hoeft namelijk geen product meer te worden gemaakt via de conventionele (fossiele) route. Deze vermijding wordt niet meer toegerekend in het absolute perspectief.



Figuur 1. Het gehanteerde CCU systeem volgens het relatieve perspectief (inclusief vermijding van CO₂-emissies ten opzichte van de huidige situatie, volgens de oranje pijlen) en het absolute perspectief (exclusief de oranje pijlen).

Data en rekenmethode

De CO₂-kentallen worden verzameld van verschillende bronnen, waaronder ecoinvent, RIVM, en de online database voor emissiefactoren in Nederland. De CO₂-kentallen voor duurzame energie, waarmee de minimale CO₂-emissie in een hernieuwbaar scenario's mee kan worden doorgerekend, zijn doorgerekend met de huidige achtergrondprocessen en infrastructuur. Dit betekent dat 'groene' energie, niet volledig CO₂ neutraal is maar een (kleine) positieve footprint heeft. Hier is voor gekozen, omdat er de impact zal zijn van onder andere de materiaalketen en transportprocessen voorlopig niet verwaarloosbaar zal zijn met de bestaande infrastructuur in de

wereld. De energieprocessen zullen pas op het einde van de transitie volledig CO₂ neutraal kunnen worden, pas op het moment dat alle andere achtergrondprocessen dit ook zijn. Daarnaast wordt veel hernieuwbare technologie gebouwd om meerdere jaren (20-30 jaar) mee te gaan, waardoor er een CO₂-emissie erfenis (legacy) kan ontstaan bij gebruik van 'verouderde hernieuwbare energie'. Als laatste is er een deel van de elektriciteitsopwekking in de toekomst dat nog gebruik maakt van fossiel gas (IEA).

De verzamelde data is zo veel mogelijk specifiek gemaakt voor Nederland. Waar dit niet mogelijk was, zoals bijvoorbeeld productiedata voor chemie, is het Europese gemiddelde gebruikt. De CO₂-emissiefactoren voor de kentallen worden bepaald volgens de IPCC 100 jaar methodiek.

Data rondom de massa en energiebalans, voor de inventory, zijn zo veel mogelijk gehaald uit recente literatuur. Daarnaast is er binnen TNO expertise gezocht naar energie- en materiaalverbruik voor CO₂-afvang.

Variabelen

Voor de tool zijn de onderstaande CCU-ketens geselecteerd. Deze zijn geselecteerd in samenspraak met de klankbordgroep op 20 september 2021.

Producten & processen	Productiemethode	bijproducten meegenomen
Brandstof: DME	Methanol dehydratie	Zuurstof
Brandstof: Kerosine	Fischer Tropsch route	Nafta
Brandstof: Methanol	Katalytische conversie	Zuurstof
Chemie: Koolstofmonoxide	Reverse water gas shift reactie	
Chemie: Kunststoffen (ethyleen)	Elektrochemische reductie	Koolstofmonoxide
Chemie: Methanol	Katalytische conversie	Zuurstof
Chemie: Mierenzuur	Elektrochemische reductie	Waterstof
Mineralisatie: Bouwmateriaal bodemassen	Mineralisatie van Calcium Oxide	
Mineralisatie: Opslag mineraal	Mineralisatie van olivijn	
Voeding: Eiwitsynthese	Micro-organismen	
Voeding: Glastuinbouw (OCAP)	CO ₂ per pijpleiding	
Referentie: CCS	Opslag in oude olie/gasvelden	

Binnen de verschillende ketenstappen wordt er onderscheid gemaakt. De variabelen van de ketenstappen zijn als volgt:

CO ₂ bronnen	Oorsprong koolstof	CO ₂ afvang technologie
Aardgas centrale	Fossiel	Directe afvang
Afval Energie Centrale (AEC)	Biogeen primair	MEA rookgassen AVI
Kunstmest industrie	Biogeen secundair	MEA rookgassen energie
Industrie	Atmosfeer	MEA rookgassen energie, toekomst
Biomassa centrale (primair)	AVI mix	Direct Air Capture
Biomassa centrale (secundair)		Direct Air Capture, toekomst
Biomassa centrale (secundair), toekomst		
Atmosfeer		
Atmosfeer, toekomst		

Brandstof
Kolen
Aardgas
Biomassa primair
Biomassa secundair
Geen

Elektriciteit
Huidige mix
Duurzame mix
Geen

Waterstof
Grijs: Stoom Methaan Reformer op aardgas
Blauw: Stoom Methaan Reformer op aardgas met CO ₂ opslag
Groen: Electrolyse met groene stroom
Geen

End-of-life
CO ₂ -emissie
CO ₂ -vastlegging
CO ₂ -afvang
CO ₂ -opslag
AVI
Circulair
50% AVI / 50% emissie
50% CO ₂ afvang / 50% emissie
50% circulair / 50% emissie

Uit de variabelen hierboven zijn de twee scenario's samengesteld zoals besproken in de inleiding.

Scenario's	Bron	EoL	Elektriciteit	Warmte	Waterstof
Fossiel	Fossiel – aardgascentrale	Standaard	Huidig	Aardgas	Grijs
Hernieuwbaar	DAC	Circulair	Duurzaam	Biogeen secundair	Groen

CO₂ rekenmethodiek

Vanuit de keten gezien zijn de CO₂-emissies voor de verschillende afvang en gebruik routes een som van meerdere processtappen. Deze keten is op twee verschillende manieren op te splitsen: per stap in de keten en per type. Daarnaast wordt er naar de impact gekeken vanuit het product perspectief (cradle-to-gate), waarbij er wordt gekeken naar de impact van 1 kg product, geproduceerd uit afgevangen CO₂. Deze CO₂-footprint is een maat voor de CO₂ effectiviteit van de productie van een product.

De CO₂ kentallen voor achtergronddata (producten, energie, water, etc.) staan in de Appendix van dit document.

CO₂-emissies over de keten (levensfase)

De verschillende levensfasen zijn vastgesteld in de introductie bij de variabelen. Voor de opsplitsing per levensfase is voor de relatieve keten de som als volgt:

Totale CO₂-emissie van de keten = Vermeden emissies + CO₂ bron + Afvang + product proces + End-of-life + vermeden impact van het conventionele proces van het product.

Voor de absolute keten is de som als volgt:

Totale CO₂-emissie van de keten = CO₂ bron + Afvang + product proces + End-of-life.

In de absolute keten worden de vermeden emissies van de centrale en de vermeden emissies van het conventionele proces niet meer meegenomen. Dit correspondeert met een toekomstig scenario waarin er geen emissies meer zijn van een centrale, en conventionele productie niet meer representatief is.

De getallen voor de berekeningen van de afvang en productieproces zijn uitgesplitst per onderdeel. Deze onderdelen bestaan uit energiestappen (warmte, elektriciteit, waterstof), en de materiaalimpact (impact van materiaal voor productie).

CO₂-emissies van de keten (type)

Binnen deze levensfasen wordt de totale CO₂ uitstoot verdeelt per type impact. De eerste is de energie impact en hieronder vallen alle emissies die voorkomen uit de energie die nodig is voor afvang en productie. Onder energie vallen warmte-, elektriciteit- en waterstofverbruik. De tweede is de materiaalimpact en omvat de impact van alle materialen die nodig zijn, inclusief infrastructuur, chemicaliën, water en andere utiliteiten. Onder de materiaalketen valt ook de koolstofketen, omdat de koolstof door CO₂-afvang en utilisatie wordt omgezet in bruikbare materialen. De CO₂ uitstoot, opgesplitst per ketenstap, is dus als volgt:

Totale CO₂-emissie van de keten = CO₂ Materiaalketen + CO₂ Energieketen – de impact van het conventionele proces van het geproduceerde product.

Inventory

Voor de inventory is gebruik gemaakt van data die beschikbaar is in de literatuur. Veel van de literatuur is gebaseerd op pilot plant en/of lab gebaseerde processen. Er moet daarom rekening mee worden gehouden dat op grotere schaal, en in de toekomst, deze getallen kunnen afwijken. Dit kan gebeuren als er een leercurve ontstaat (verbetering van de technologie) of besparingen door groter schaalniveau.

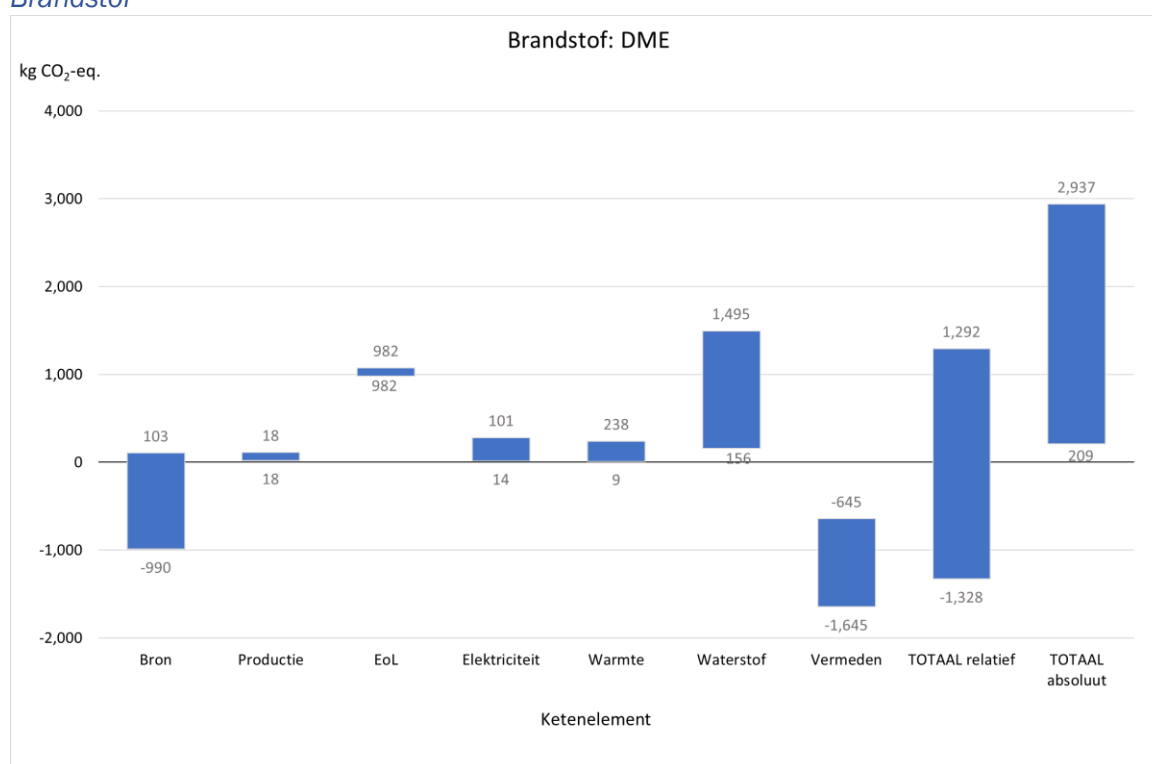
De gebruikte data voor de CCU berekeningen en bijbehorende uitleg is terug te vinden in de Appendix.

Resultaten

De CO₂ prestatie over de keten per product

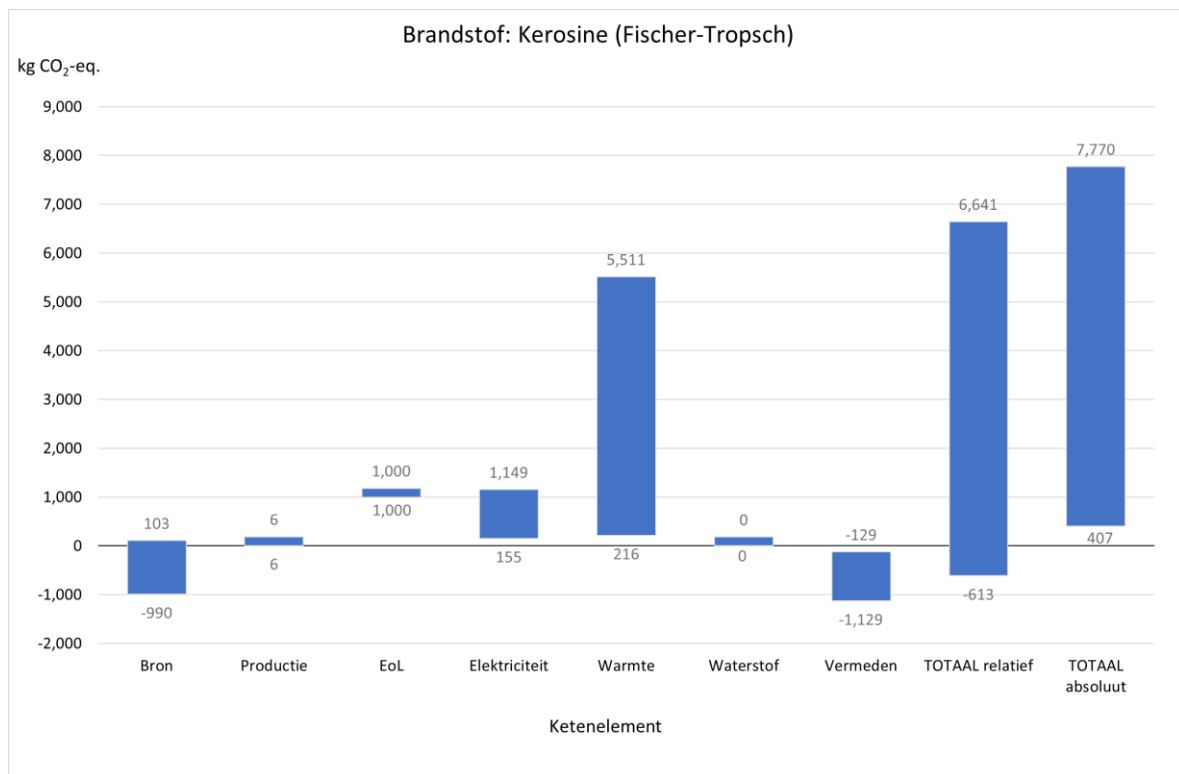
Gegroepeerd naar de vijf typen CCU-ketens (brandstoffen, chemie, mineralisatie, voeding en referentie CCS) wordt voor elk van de twaalf productketens de CO₂ uitstoot weergegeven per ketenstap. De afvang en productiestap zijn uitgesplitst in de energiestappen (elektriciteit, warmte, waterstof) en de materiaalstap van productie. In de grafieken wordt de bandbreedte van de CO₂-emissies weergegeven tussen het fossiele (bovenkant bandbreedte) en hernieuwbare scenario (onderkant bandbreedte). Hiermee kan worden gezien welke onderdelen in de keten de meeste impact bijdragen. Daarnaast wordt in de figuur het totaal getoond van zowel het relatieve (ten opzichte van de emissies in de huidige situatie, wel meerekenen van vermeden emissies) als absolute perspectief (netto emissies naar de atmosfeer, niet meerekenen van vermeden emissies).

Brandstof



Figuur 2 Bandbreedte van ketenemissies per ketenelement en totalen volgens relatief en absoluut perspectief (respectievelijk met en zonder vermeden emissies huidige situatie) voor de CCU-keten DME.

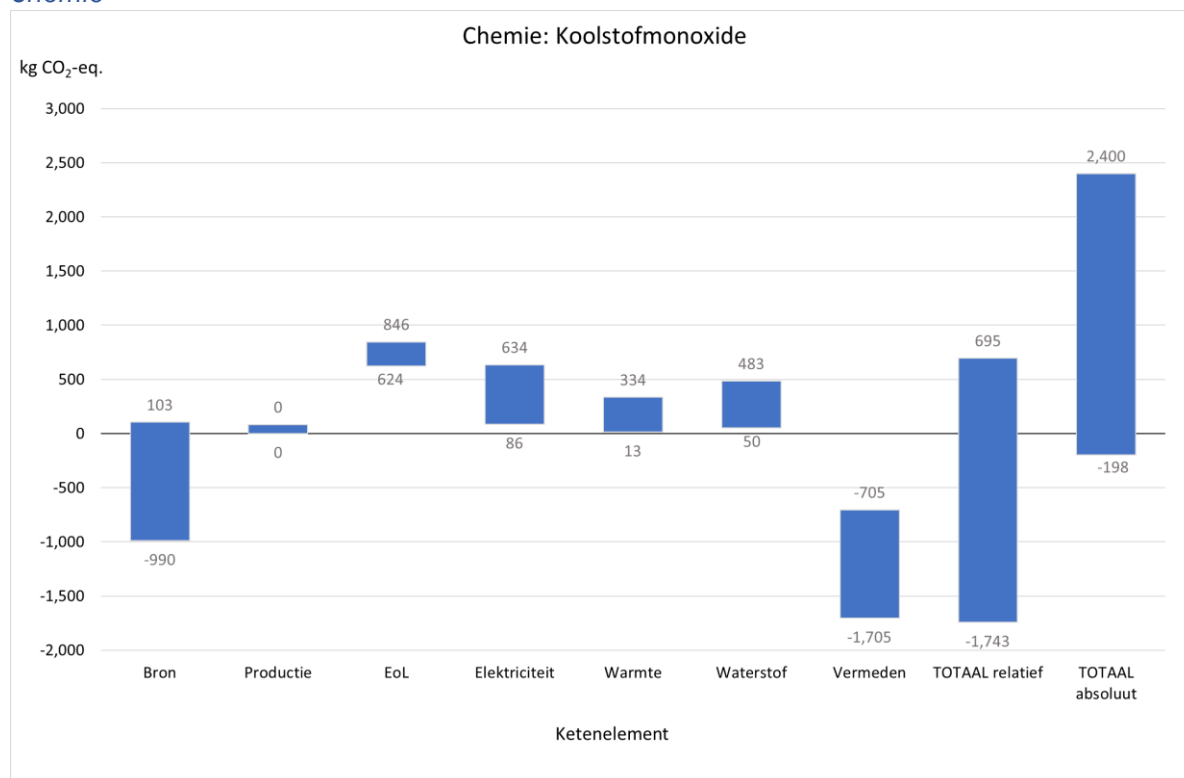
In het volledig hernieuwbare scenario heeft DME via de CCU route (Figuur 2) een lagere CO₂ footprint dan de huidige conventionele DME (zie Appendix), maar niettemin een minimale absolute footprint van 209 kg CO₂/ton afgevangen CO₂. Vermindering van de CO₂-emissies vindt vooral plaats als er gebruik wordt gemaakt van groene waterstof en een hernieuwbare CO₂ bron.



Figuur 3 Bandbreedte van ketenemissies per ketenelement en totalen volgens relatief en absoluut perspectief (respectievelijk met en zonder vermeden emissies huidige situatie) voor de CCU-keten kerosine.

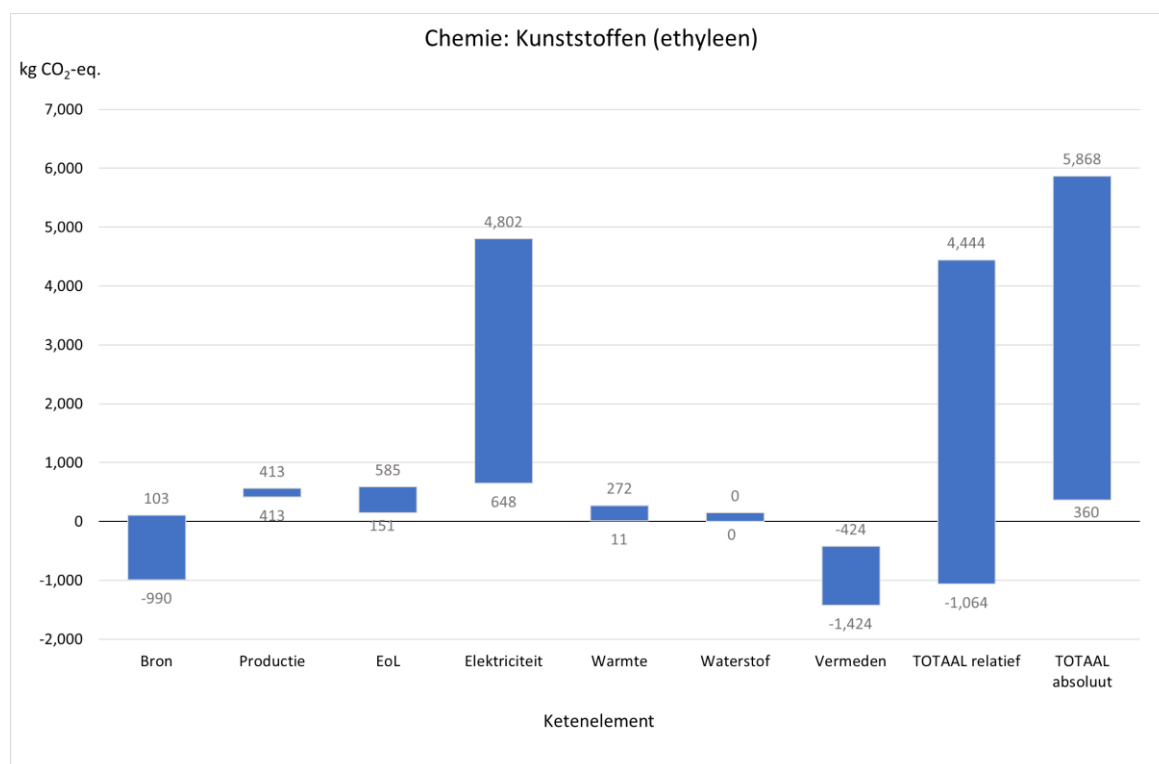
In het hernieuwbare scenario heeft kerosine via de CCU-keten (Figuur 3) in absolute zin een positieve CO₂-emissie van 407 kg CO₂ / ton afgevangen CO₂. In relatieve zin komt de kerosineketen in het hernieuwbare scenario met een negatieve footprint van -613 kg CO₂/ton afgevangen CO₂. Vergroening van met name warmte kan voor een flinke emissiereductie zorgen in deze keten.

Chemie



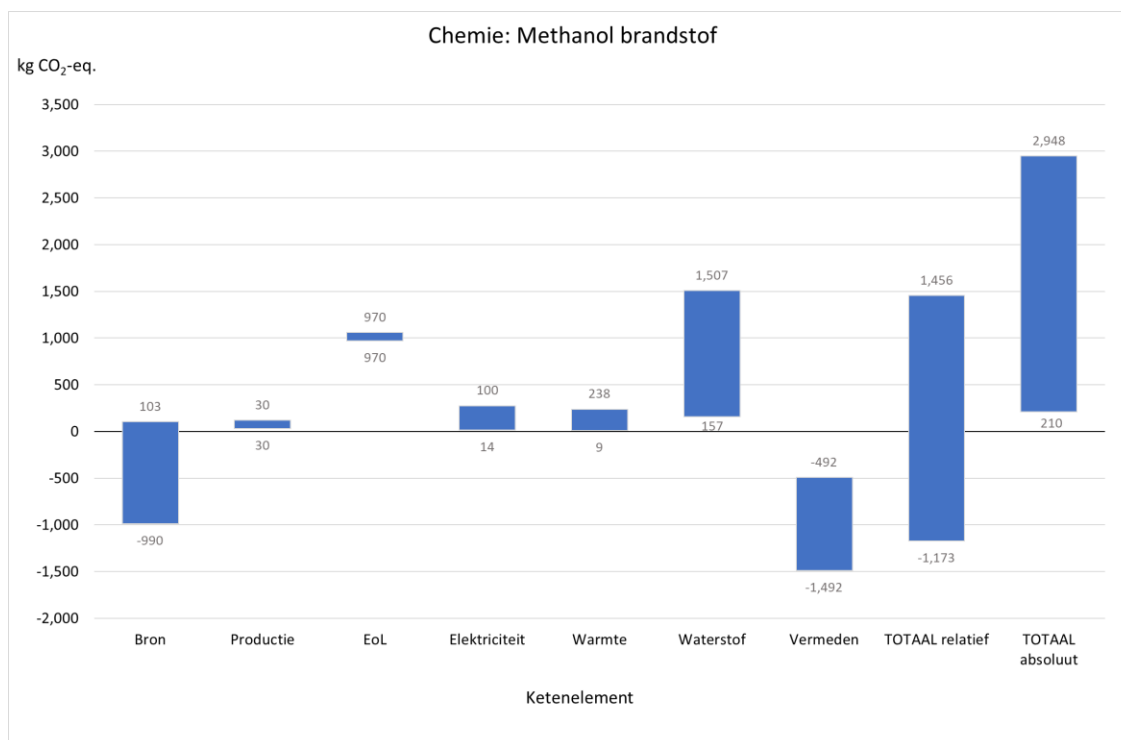
Figuur 4 Bandbreedte van ketenemissies per ketenelement en totalen volgens relatief en absoluut perspectief (respectievelijk met en zonder vermeden emissies huidige situatie) voor de CCU-keten koolstofmonoxide.

In het hernieuwbare scenario heeft koolstofmonoxide (Figuur 4) ook in de absolute keten een negatieve CO₂-footprint van -198 kg CO₂/ton afgevangen CO₂. De emissies van de end-of-life worden in het hernieuwbare scenario voor 50% vastgelegd, maar deze vastlegging kan plaatsvinden als de CO niet wordt ingezet voor brandstof. Mocht dit het geval zijn, dan zal 100% van de emissies weer naar de atmosfeer gaan en de absolute CO₂ footprint doen stijgen.

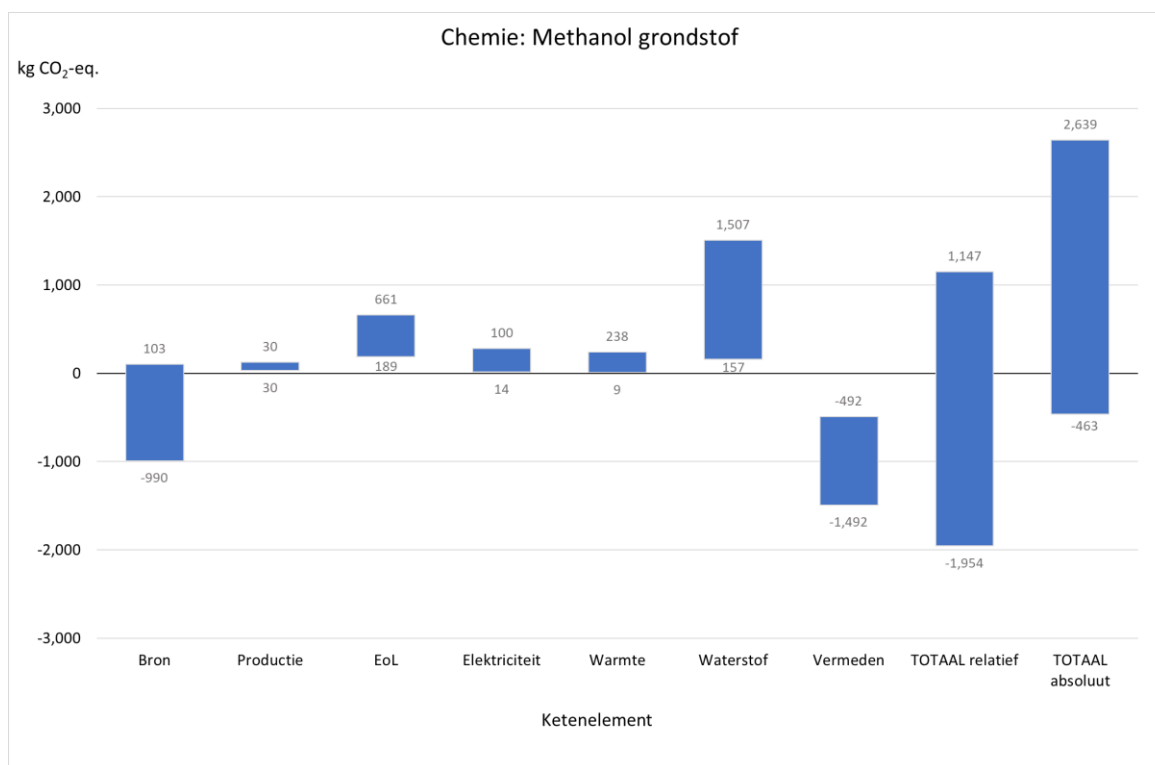


Figuur 5 Bandbreedte van ketenemissies per ketenelement en totalen volgens relatief en absoluut perspectief (respectievelijk met en zonder vermeden emissies huidige situatie) voor de CCU-keten kunststoffen (ethyleen).

In het hernieuwbare scenario heeft de ethyleenketen (Figuur 5) in absolute zin een positieve CO₂-footprint (360 kg CO₂/ton afgevangen CO₂). Dit komt mede door een lage efficiëntie van het omzettingsproces naar ethyleen. Het vergroenen van elektriciteit zal de CO₂-emissies van de CCU-keten het meest doen verminderen.



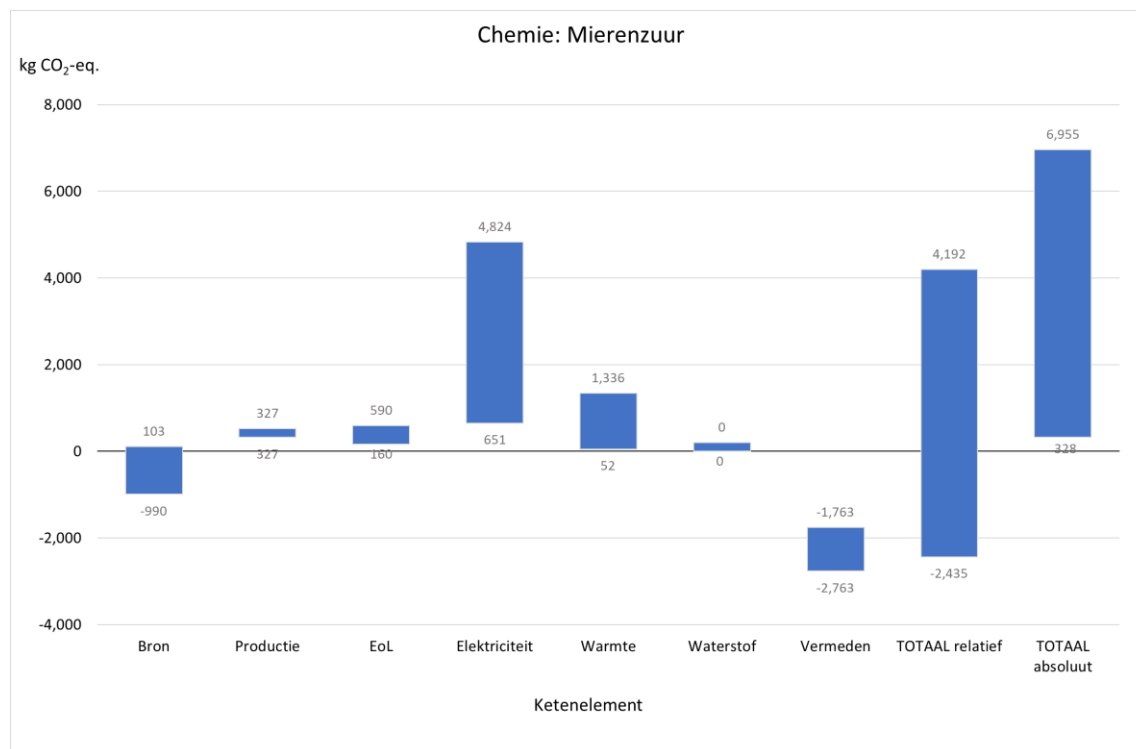
Figuur 6 Bandbreedte van ketenemissies per ketenelement en totalen volgens relatief en absoluut perspectief (respectievelijk met en zonder vermeden emissies huidige situatie) voor de CCU-keten methanol als brandstof.



Figuur 7 Bandbreedte van ketenemissies per ketenelement en totalen volgens relatief en absoluut perspectief (respectievelijk met en zonder vermeden emissies huidige situatie) voor de CCU-keten methanol als grondstof.

In het hernieuwbare scenario heeft de methanolketen als grondstof (Figuur 7) een negatieve CO₂-footprint in zowel absoluut als relatief opzicht (respectievelijk -463 kg en -1954 CO₂ /ton afgevangen CO₂). Een negatieve footprint wordt alleen bereikt als er geen brandstof van wordt

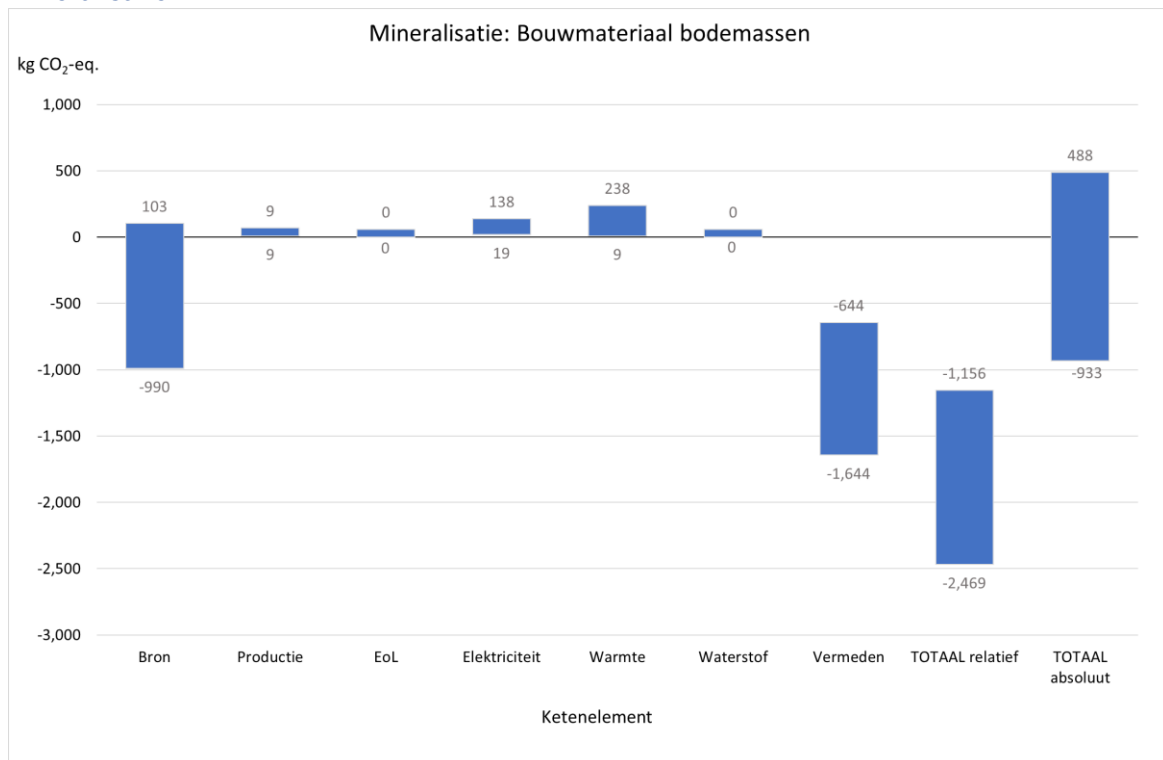
gemaakt (Figuur 6). Wordt dit wel gedaan, dan is een footprint van 210 kg CO₂/ ton afgevangen CO₂ haalbaar voor de methanolketen.



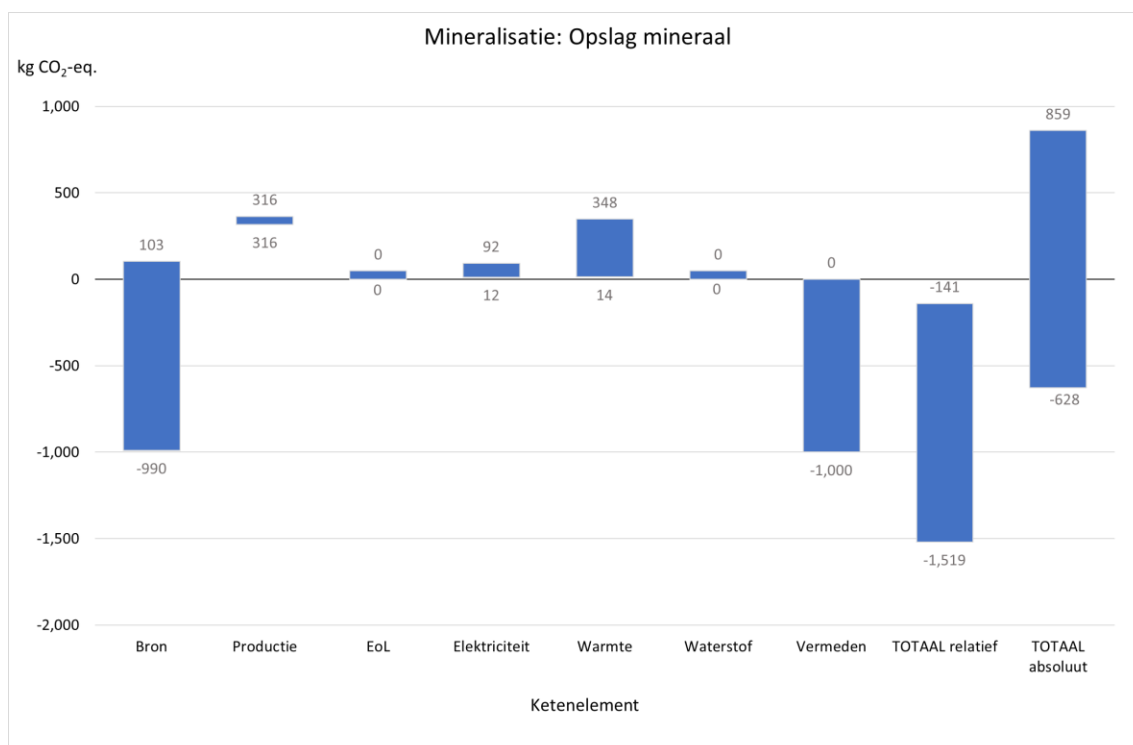
Figuur 8 Bandbreedte van ketenemissies per ketenelement en totalen volgens relatief en absoluut perspectief (respectievelijk met en zonder vermeden emissies huidige situatie) voor de CCU-keten mierenzuur.

In het hernieuwbare scenario heeft de mierenzuurketen (Figuur 8) in de absolute keten een positieve CO₂-footprint (228 kg CO₂/ton afgevangen CO₂). Een hoge impact van elektriciteitsverbruik, ook in het hernieuwbare scenario, ligt hier aan ten grondslag. Vergroening van de elektriciteitsbron is van groot belang bij mierenzuurproductie bij CO₂ emissiereductie.

Mineralisatie



Figuur 9 Bandbreedte van ketenemissies per ketenelement en totalen volgens relatief en absoluut perspectief (respectievelijk met en zonder vermeden emissies huidige situatie) voor de CCU-keten bouwmateriaal bodemassen.

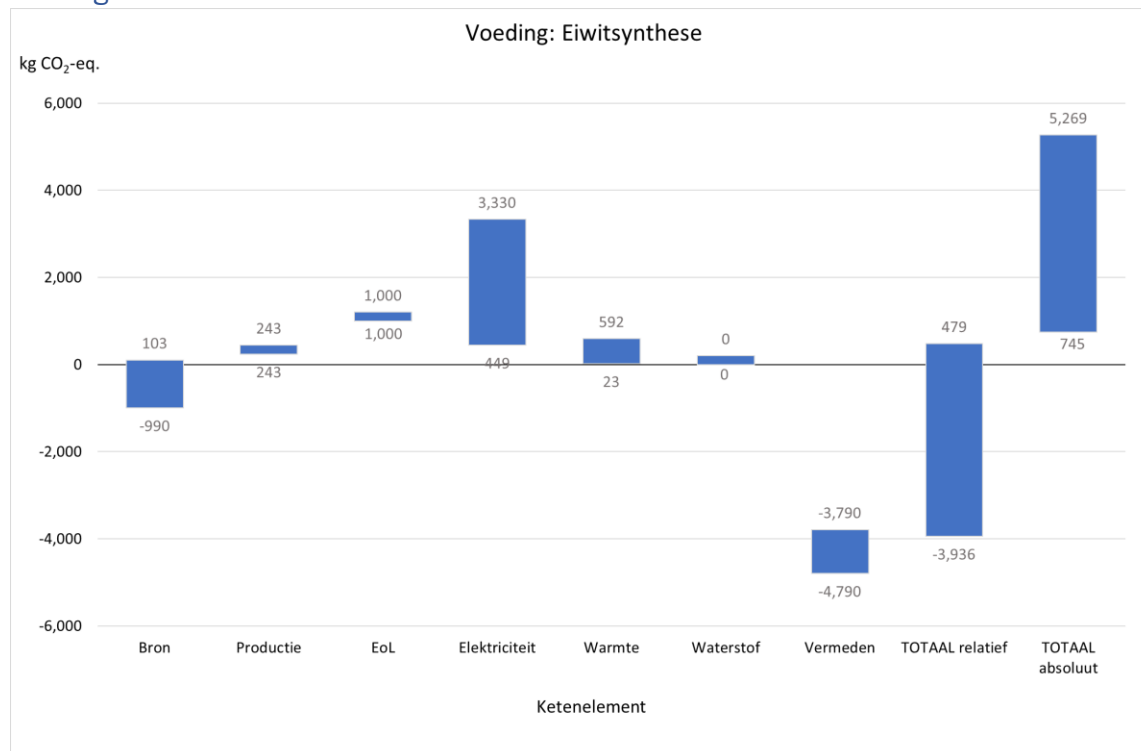


Figuur 10 Bandbreedte van ketenemissies per ketenelement en totalen volgens relatief en absoluut perspectief (respectievelijk met en zonder vermeden emissies huidige situatie) voor de CCU-keten opslag mineraal.

Beide methoden van opslag in mineralen (Figuur 9, Figuur 10) geeft een negatieve CO₂ footprint in het hernieuwbare scenario, zowel absoluut gezien als relatief gezien. Mineralisatie van

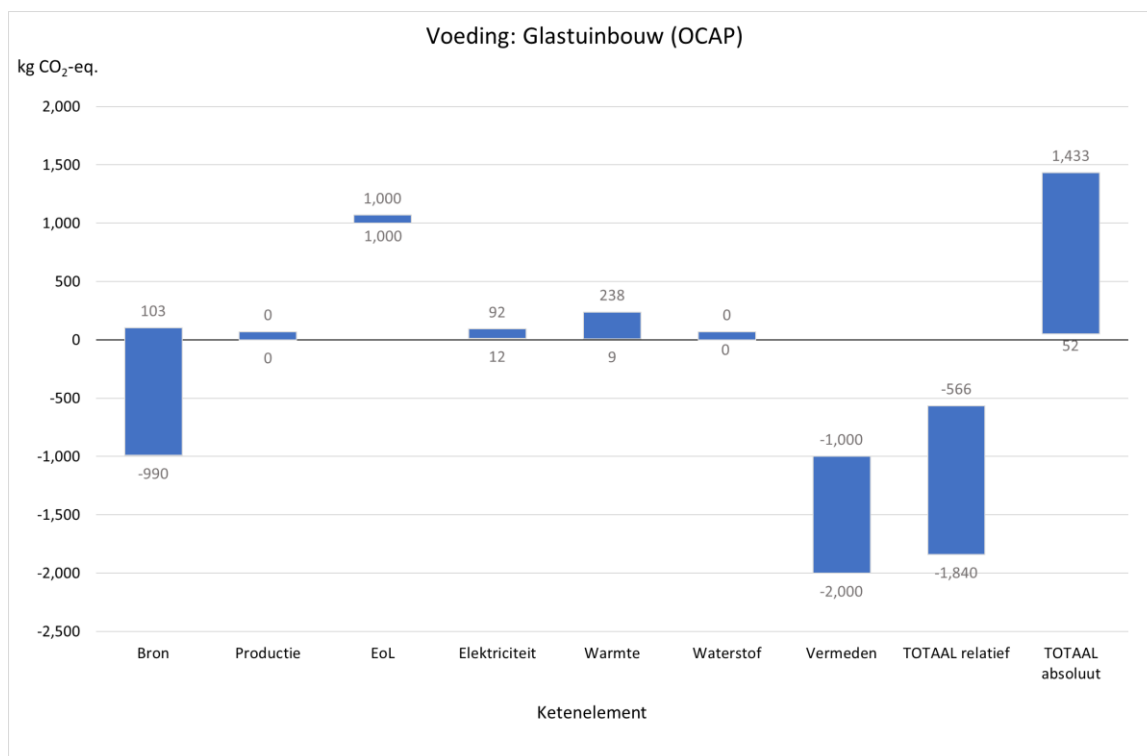
bodenassen tot bouw materiaal (Figuur 9) presteert hierbij iets beter. Het belang van een groene CO₂ bron bij beide ketens voor de vermindering van de CO₂-emissies van de CCU-keten.

Voeding



Figuur 11 Bandbreedte van ketenemissies per ketenelement en totalen volgens relatief en absoluut perspectief (respectievelijk met en zonder vermeden emissies huidige situatie) voor de CCU-keten eiwitsynthese.

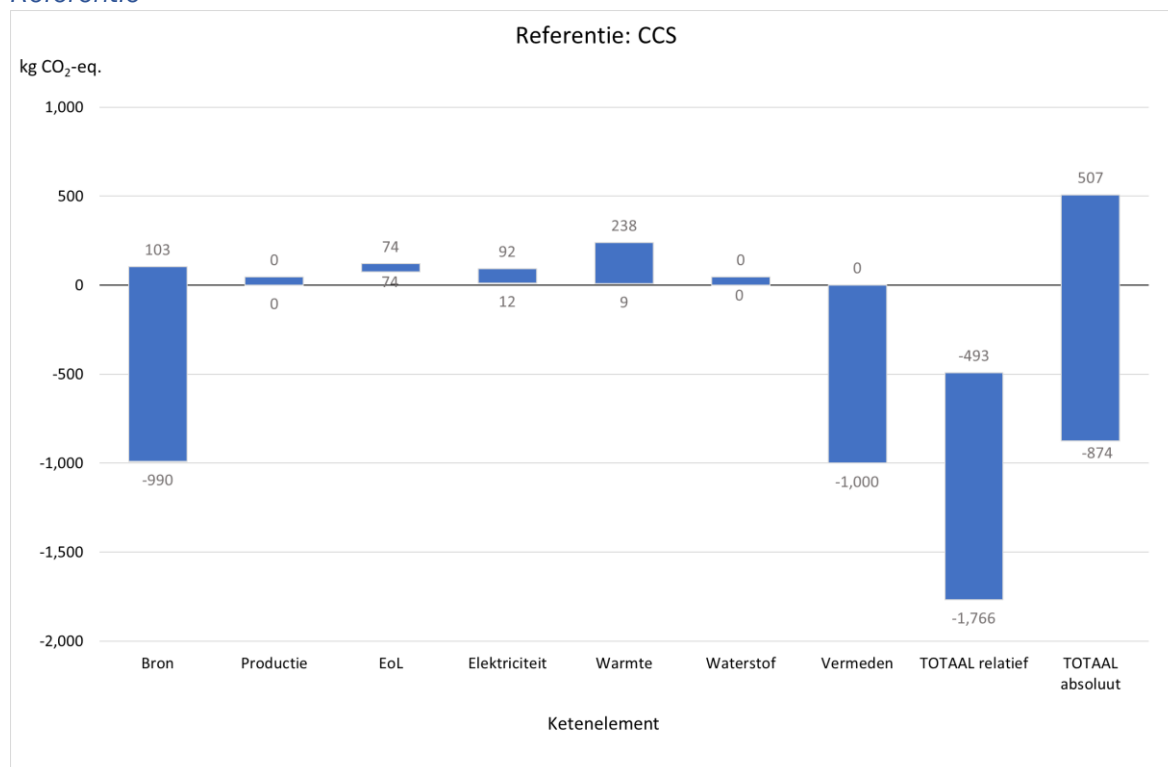
De eiwitketen (Figuur 11) heeft in absolute zin de hoogste CO₂ uitstoot van alle ketens in het hernieuwbare scenario (745 kg CO₂/ton afgevangen CO₂). Dit komt door het hoge elektriciteitsverbruik en de CO₂ uitstoot hiervan. Een andere oorzaak is dat de afgevangen CO₂-emissies in de end-of-life (na eenmaal te worden gebruikt) weer teruggaan naar de atmosfeer. Echter moet er wel rekening mee worden gehouden dat eiwitproductie op land ook gepaard (kan) gaan met hoge milieu-impact. Daarnaast kunnen met deze route ook andere impactcategorieën worden beïnvloedt: eutrofiering en ecotoxiciteit, die gepaard gaan met landbouw, zullen hoogstwaarschijnlijk lager zijn in de CO₂ route dan met conventionele eiwitsynthese. Een uitgebreide LCA kan hier inzicht in bieden.



Figuur 12 Bandbreedte van ketenemissies per ketenelement en totalen volgens relatief en absoluut perspectief (respectievelijk met en zonder vermeden emissies huidige situatie) voor de CCU-keten glastuinbouw (OCAP).

Voor de OCAP keten (Figuur 12) geldt in absolute zin dat er een kleine emissie overblijft in het hernieuwbare scenario (52 kg CO₂/ ton afgevangen CO₂). Dit ontstaat doordat de emissies in de end-of-life (na eenmaal te worden gebruikt) weer teruggaan naar de atmosfeer. Voor de OCAP keten geldt ook dat het gebruik van een groene CO₂ bron zorgt voor sterke verbetering van de CO₂ prestatie van de CCU-keten.

Referentie



Figuur 13 Bandbreedte van ketenemissies per ketenelement en totalen volgens relatief en absoluut perspectief (respectievelijk met en zonder vermeden emissies huidige situatie) voor de referentie keten CCS.

CO₂-afvang en opslag (Carbon Capture & Storage CCS, Figuur 13) reduceert daadwerkelijk de CO₂-emissies volgens het relatieve perspectief in alle scenario's en volgens het absolute perspectief in veel scenario's. Het verschil in CO₂ reductie in beide perspectieven wordt veroorzaakt door de variant waarin groene CO₂ in het bronproces wordt gebruikt en vervolgens opgeslagen. Ten opzichte van de huidige grijze situatie wordt dan twee keer CO₂ uitgespaard (bij biogene opname van CO₂ uit de atmosfeer en bij opslag in plaats van emissie) en volgens het absolute perspectief maar één keer, namelijk bij de biogene opname van CO₂ uit de atmosfeer.

De CO₂ prestatie van CCU per ketenstap

Bijna alle CCU-ketens in het fossiele scenario gaan gepaard met hoge CO₂-emissies. Op een paar CCU uitzonderingen na, is het op dit moment nog niet CO₂ efficiënt om CCU toe te passen om zo de CO₂-emissies van zowel producten als het volledige systeem omlaag te brengen. Op dit moment heeft de huidige conventionele productie van de meeste producten nog een veel lagere CO₂ footprint dan de CCU route. De oorzaak hiervan ligt voornamelijk bij de hoge energievraag die nodig is voor zowel afvangen van de CO₂ als het omzetten naar de CCU producten. Deze energie (elektriciteit, warmte en/of waterstof) is in de huidige situatie nog fossiel, waarbij veel CO₂ wordt geëmitteerd. Als de energie keten wordt verduurzaamd, dan komt dit alle CCU-ketens zeer ten goede en wordt de CO₂-emissie in alle gevallen sterk naar beneden gebracht. Vergroening van de energie keten is een belangrijke voorwaarde voordat CCU grootschalig CO₂ kan uitsparen. Met een fossiele keten wordt CCU niet houdbaar in een CO₂ neutrale toekomst; de emissies zijn hiervoor te hoog en zal meer bijdrage aan de footprint dan dat het doet afnemen.

Niet alleen bij energie maar ook bij de materiaalketen zijn er veel emissies zichtbaar. Dit wordt deels veroorzaakt door het materiaalgebruik van afvang en omzetting naar producten, zoals water, oplosmiddelen, en materialen voor de bouw van infrastructuur. Daarnaast vindt emissie plaats door verliezen in de keten; CO₂-afvang heeft een efficiëntie van 90%, waardoor er per ton afgevangen CO₂ altijd 100 kg CO₂ de lucht in gaat. Daarnaast zorgt fossiele CO₂ voor uitstoot bij

de End-of-Life als deze niet wordt vastgelegd in producten. Om de CO₂-emissies van de materiaal keten te verbeteren, dient de bron niet meer fossiel te zijn maar groen (biomassa) of zelfs direct uit de atmosfeer met Direct Air Capture. Ook het verbeteren van de End-of-life, door opslag van de CO₂ in producten in plaats van verbranding, draagt bij in specifieke CCU-ketens (methanol(grondstof) en Koolstofmonoxide).

Echter, voor zowel het absolute als het relatieve perspectief wordt de grootste reductie bereikt door huidige grijze processen te verduurzamen met behulp van biomassa (groter dan door DAC toe te passen).

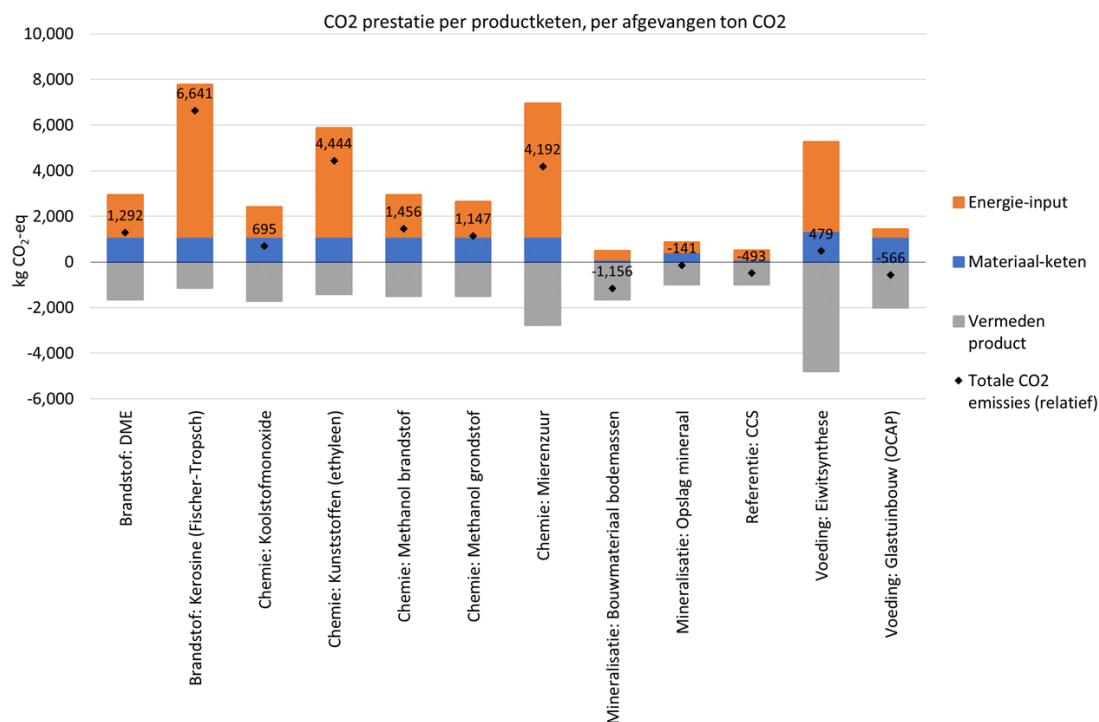
De CO₂ prestatie per productketen vergeleken

In de figuren hieronder zijn de ketens van de 12 producten weergegeven, opgedeeld per type impact. De som van de drie typen impacts komt uit op de totale impact.

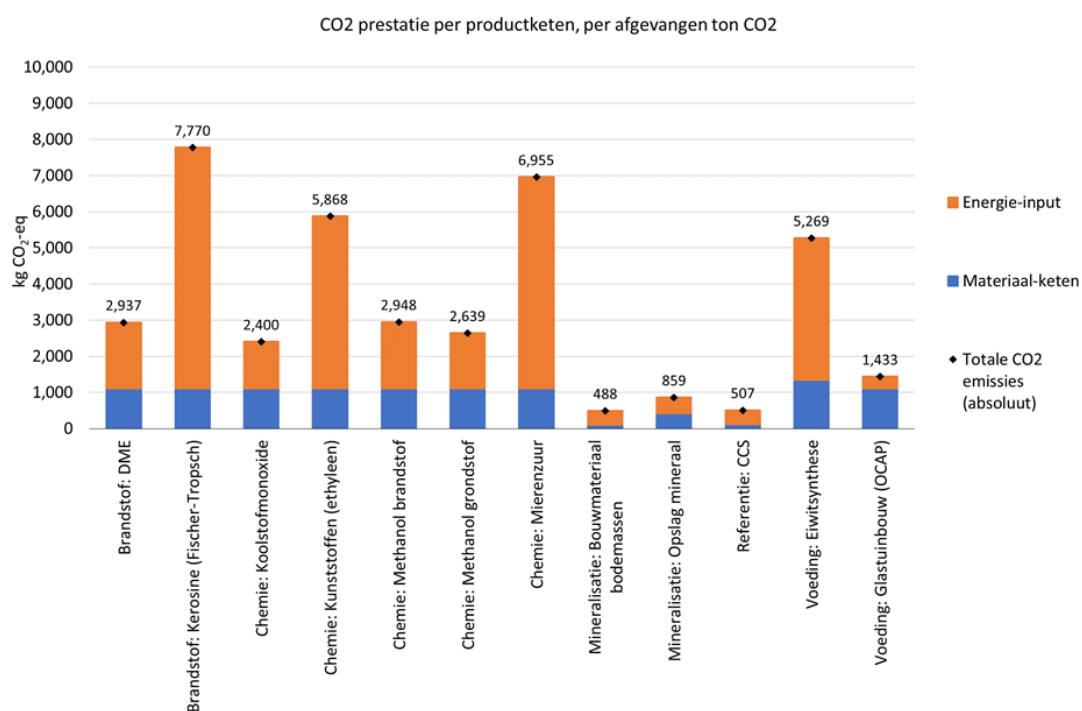
Figuur 14A laat de relatieve CO₂-emissies (t.o.v. de huidige situatie) van het fossiele scenario zien van alle 12 de CCU-ketens, van cradle-to-grave. Hierin wordt ook de vermeden impact meegenomen, dat wil zeggen de vermeden emissies bij de centrale en de vermeden emissies van de conventionele productie. Ondanks dat, hebben vrijwel alle CCU-ketens een hoge CO₂-emissie. Het overgrote deel wordt veroorzaakt door emissies van energieverbruik. Alleen mineralisatieprocessen, glastuinbouw (OCAP) en CCS scoren een CO₂ uitstoot onder nul, en reduceren dus de CO₂-emissies ten opzichte van de huidige situatie. Dit komt omdat deze ketens een relatief lage energievraag hebben in vergelijking met de slechter presterende CCU opties en het helpt dat bij bijna al deze opties CO₂ wordt vastgelegd in het product (behalve bij glastuinbouw). De betere CCU-ketens hebben een negatieve emissie van respectievelijk -567 en -1156 kg CO₂ per ton afgevangen CO₂. Na deze twee best presterende CCU-ketens, presteert de referentieketen (CCS) ook goed op CO₂ uitstoot (met -493 kg CO₂ per ton afgevangen CO₂).

In Figuur 14B worden voor hetzelfde fossiele scenario de absolute emissies gepresenteerd, de emissies naar de atmosfeer. Hierbij worden de vermeden emissies niet meegenomen, wat voor een CO₂ neutrale toekomst het meest relevant en realistisch is. Alle 12 CCU-ketens laten een netto emissie naar de atmosfeer zien, grotendeels als gevolg van de grote hoeveelheid benodigde elektriciteit, warmte en/of waterstof.

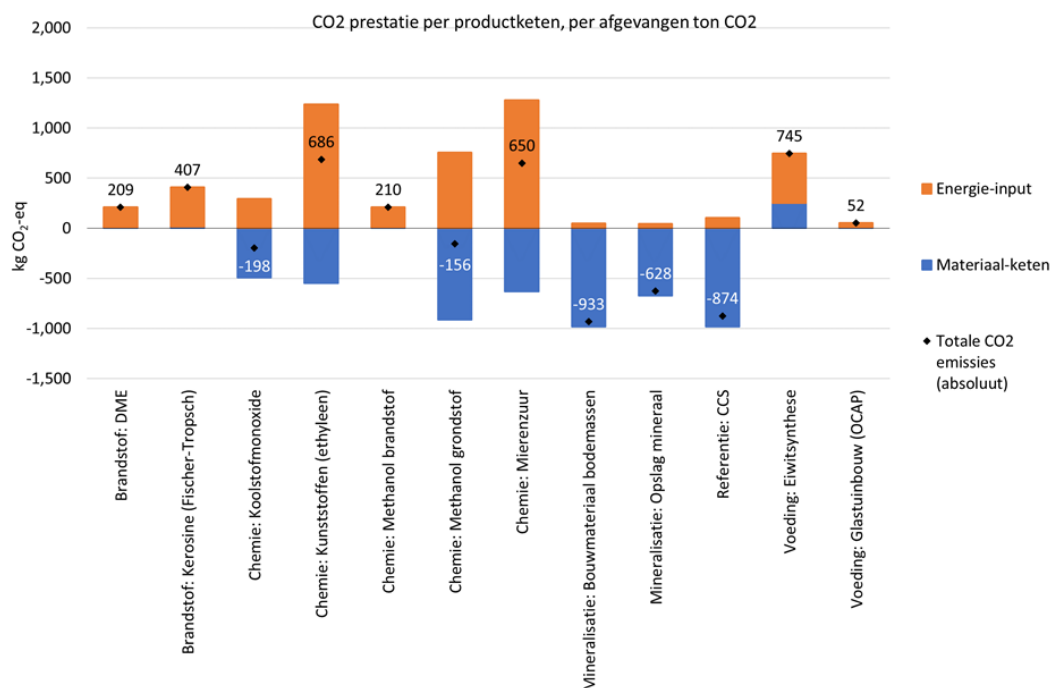
In Figuur 14C worden de absolute CO₂-emissies naar de atmosfeer getoond voor het hernieuwbare scenario. Naast de ketens die relatief ten opzichte van de huidige situatie goed presteerden (mineralisatie en CCS) zijn er negatieve emissies naar de atmosfeer van bepaalde chemische producten (koolmonoxide en methanol als grondstof). Dit geldt voor producten die de CO₂ voor langere tijd kunnen opslaan. Het gaat om een aantal ketens in de chemie (methanol and grondstof en koolstofmonoxide, respectievelijk -598 en -277 kg CO₂ ton afgevangen CO₂) en bouwmaterialen en mineralen (respectievelijk -895 -589 en kg CO₂ ton afgevangen CO₂). Ook de referentie (CCS) blijft goed presteren, met een footprint van -892 kg CO₂ ton afgevangen CO₂. Voor ethyleenproductie, zorgt de lagere efficiëntie van het productie proces en de hoge energiebehoefte ervoor dat deze CCU-keten positief blijft. Brandstoffen en voedingsproducten leiden bij de end-of-life tot CO₂-emissie naar de atmosfeer. Dit betekent dat de materiaalketen op zijn best CO₂ neutraal wordt (als een hernieuwbare CO₂ bron is gebruikt). Met een fossiele restemissie van duurzame energie ontstaat er voor dit type ketens dus altijd een positieve CO₂ footprint.



Figuur 14 A CO₂-emissies relatief ten opzichte van de huidige situatie volgens het fossiele scenario.



Figuur 14 B Absolute CO₂-emissies naar de atmosfeer volgens het fossiele scenario.



Figuur 14 C Absolute CO₂-emissies naar de atmosfeer volgens het hernieuwbare scenario.

Figuur 14 A= fossiele scenario (relatief), B = fossiele scenario (absoluut), C = hernieuwbare scenario (absoluut).

Als we de CCU-ketens vergelijken, kan worden geconcludeerd dat in het fossiele emissie scenario (vergelijkbaar met de situatie nu) de glastuinbouw en bouwmaterialen van bodemassen de beste CCU opties zijn om CO₂ te reduceren ten opzichte van de huidige situatie. Deze CCU-ketens kunnen daarom nu al worden ingezet om CO₂ te besparen. Ook CCS bespaart CO₂ en kan daarom een robuuste (afvang en transport) technologische brugfunctie vervullen richting CCU.

Echter, in een toekomst waar er wordt gestreefd naar een CO₂ neutrale samenleving, kan er niet meer worden vergeleken met de huidige situatie. Het absolute perspectief, waarin wordt gekeken hoeveel CO₂ er daadwerkelijk in en uit de atmosfeer gaat, is dan relevanter. In het fossiele scenario laten alle 12 CCU-ketens een netto emissie naar de atmosfeer zien, grotendeels als gevolg van de grote hoeveelheid energie. Dit betekent dat als deze energie fossiel is, CCU nooit CO₂ neutraal wordt.

Als we deze energie hernieuwbaar weten te maken, worden de uitkomsten anders. In het hernieuwbare scenario bereiken een aantal ketens in de chemie (methanol and grondstof en koolstofmonoxide) en bouwmaterialen en mineralen wel een negatieve emissie. Ook de referentie (CCS) blijft goed presteren. Met deze CCU producten kan een CO₂ neutrale toekomst bereikt worden.

Aangetekend dient te worden dat de niet CO₂ neutrale ketens mogelijk toch interessant zijn als deze producten onmisbaar geacht worden en er geen alternatief is dat een betere CO₂ prestatie levert. Hierbij kan men denken aan bepaalde voeding of vliegtuigbrandstoffen.

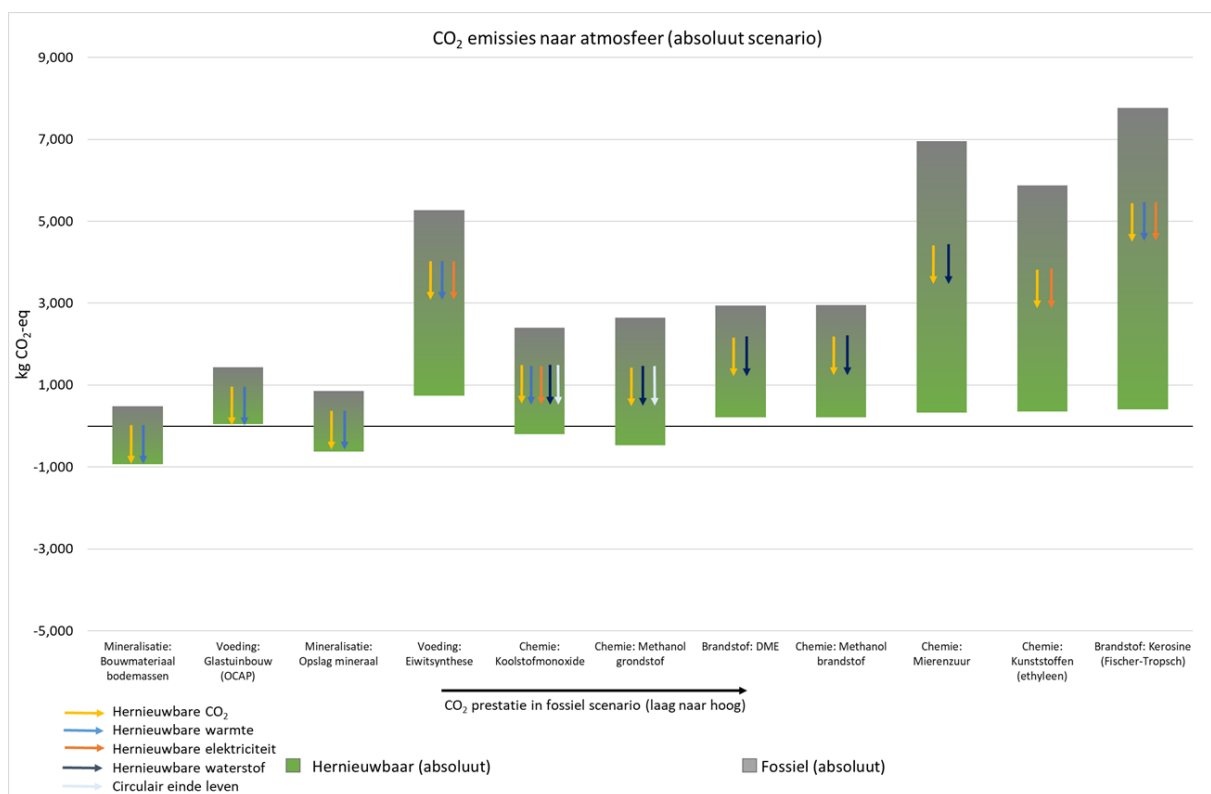
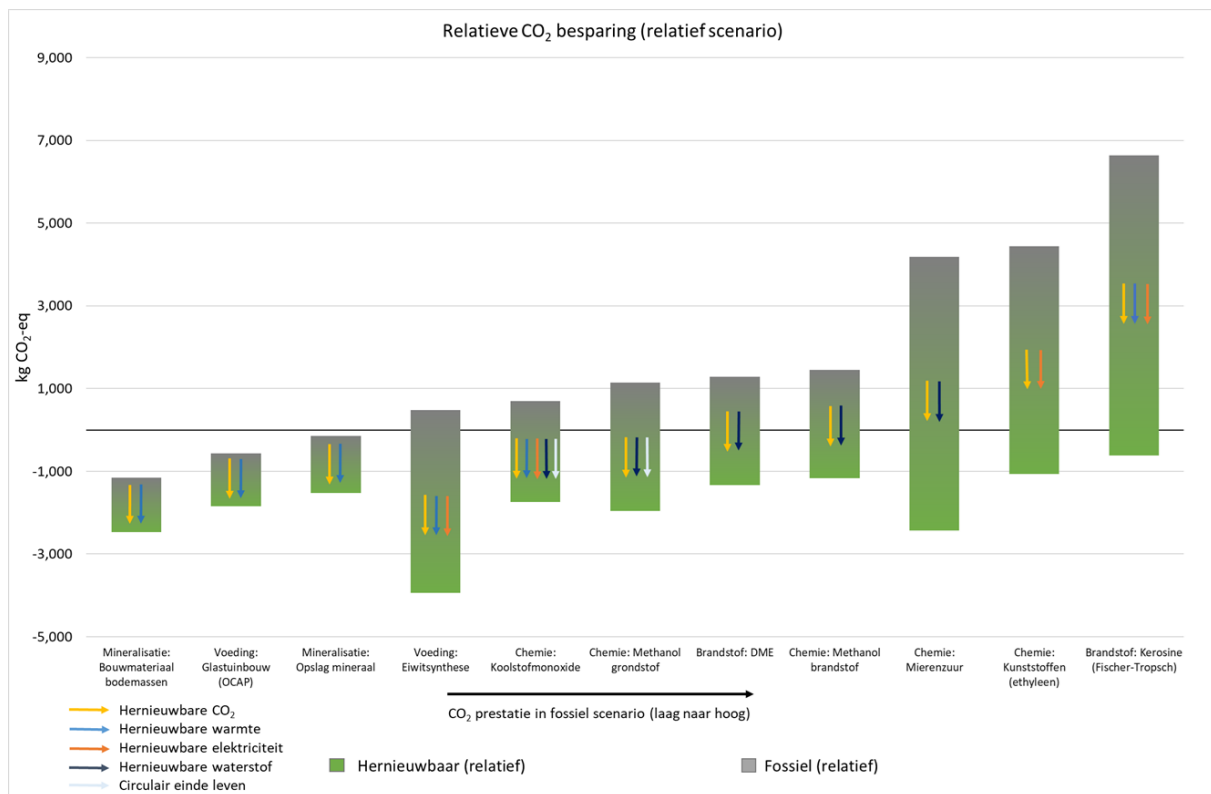
Karakterisering en prioritering van CCU productketens

In Figuur 15 zijn de CCU productketens met de bandbreedtes overzichtelijk bij elkaar gezet, zoals CO₂-ketenemissie en de hernieuwbaar inputs die noodzakelijk zijn om de emissies naar de atmosfeer nabij 0 te krijgen. De bovenkant van de bandbreedtes correspondeert met het fossiele scenario, terwijl de onderkant van de bandbreedte correspondeert met het volledig hernieuwbare scenario. Uit de analyse is gebleken dat niet alle CCU productketens een even goede CO₂ prestatie leveren. Per productketen is gekozen voor de huidige meest volwassen CCU productieprocessen, wat niet noodzakelijk de beste hoeven te zijn. Alle processen bevinden zich nog in een (vroeg) ontwikkelstadium, waardoor de onzekerheden rond de technologieprestatie nog groot zijn. De CO₂ prestatie hangt mede af van het perspectief dat men kiest: of CO₂-emissies reduceren ten opzichte van de huidige situatie of een productiesysteem dat CO₂ neutraal is in de zin van netto 0 of minder emissies naar de atmosfeer emitteren.

Ook al presteren alle CCU-ketens beter in het hernieuwbare scenario dan het fossiele scenario, de bijdrage van de verschillende aspecten van de keten verschillen per CCU route. Hierdoor verschilt ook per CCU-keten wat de belangrijkste voorwaarden zijn voor een duurzame CCU-keten met lage CO₂-emissies. Voor alle ketens is het een voorwaarde dat de CO₂ bron niet fossiel is, maar ofwel afgevangen van de verbranding van (secundaire) biogene stromen, ofwel via Direct Air Capture (gele pijl). Primaire biomassa-stromen zullen voor verbetering zorgen in de emissies van de keten, maar blijft een hoge impact hebben door alle CO₂-emissies van binnen de keten van de primaire biomassa-stroom (denk aan landbouw, transport, versnipperen). Groene warmte (bijv. van biogene reststromen, blauwe pijl) is vooral van belang bij mineralisatie en voedselproducten, terwijl elektriciteit en waterstof bij de chemische producten en brandstoffen een grote rol speelt (oranje resp. donkerblauwe pijl). Een circulaire end-of-life (witte pijl), waardoor CO₂ vastlegging plaats kan vinden, is van belang voor de productie van koolstofmonoxide en methanol als grondstof. Alleen voor duurzame koolstofmonoxide is vergroening nodig van alle ketenstappen.

Een logische aanpak is om te beginnen met het eerste (op korte termijn emissies reduceren) en vervolgens te streven naar het tweede (op langere termijn een CO₂ neutraal systeem). Daarom zijn de CCU productketens in de figuren gesorteerd op volgorde van CO₂-ketenemissies ten opzichte van de huidige situatie. Op moment dat de bandbreedte een groene kleur krijgt, wordt de keten duurzamer zoals in het hernieuwbare scenario. De grijze kleuren duiden de hoge kant van de emissies aan, zoals in het fossiele scenario. Hieruit blijkt dat mineralisatie en glastuinbouw CCU productketens zijn die op korte termijn CO₂ reduceren ten opzichte van de huidige situatie (Figuur A), ook in de fossiele scenario's. Het verdient aanbeveling om CCU hier mee te beginnen en om deze goed presterende ketens te stimuleren.

Om deze CCU productketens niet alleen in de huidige fossiele (Figuur 15A) maar ook in een CO₂ neutrale samenleving te laten bijdragen (Figuur 15B), dienen deze ketens hernieuwbaar te worden. Geen enkele fossiele productketen, gaat leiden tot een absolute daling van CO₂ in de atmosfeer (Figuur 15B). Voor alle ketens geldt, inclusief voor deze geprioriteerde ketens, dat de koolstofbron hernieuwbaar moet worden. Andere voorwaarde is dat de energie in de vorm van proceswarmte ook hernieuwbaar dient te worden. Het is voor deze ketens niet noodzakelijk om hernieuwbare elektriciteit of warmte beschikbaar te hebben.



Figuur 15. A) Totale CO₂-emissies relatief ten opzichte van de huidige emissies en mogelijkheden voor verduurzaming van de keten en 15. B) Totale absolute CO₂-emissies naar de atmosfeer en mogelijkheden voor verduurzaming van de keten. De bovenkant van de bandbreedte geeft het fossiele scenario weer, en de onderkant van de bandbreedte het volledig hernieuwbare scenario. Een pijl in de bandbreedte staat voor meer dan 10% bijdrage van het betreffende ketenelement aan de totale CO₂-emissies.

In een CO₂-neutrale samenleving (Figuur 15B) is de keten van glastuinbouw niet meer CO₂ neutraal, ook niet na verduurzaming. Dit geldt ook voor onder andere de brandstoffen (kerosine, methanol en DME), maar ook voor een aantal chemicaliën (ethyleen, mierenzuur). Dit komt onder andere doordat is aangenomen dat een restemissie naar de atmosfeer blijft bestaan als gevolg van fossiele technologische infrastructuur. Om deze CO₂ neutraal te maken moet er ook in de hernieuwbare toekomst buiten de keten elders CO₂ worden gecompenseerd. Toch zouden ook deze CCU productketens ook op lange termijn gestimuleerd en ontwikkeld kunnen worden als geconstateerd wordt dat er geen beter alternatief beschikbaar is. Om deze ketens zo min mogelijk CO₂ naar de atmosfeer te laten uitstoten is het noodzakelijk om in aanvulling op de eerder ontwikkeling van hernieuwbare koolstof en proceswarmte ook hernieuwbare waterstof beschikbaar te maken en opslag in duurzame producten te waarborgen. Voor methanol als grondstof levert dit dan zelfs negatieve CO₂-emissies op. Opvallend is dat hernieuwbare elektriciteit als zodanig niet noodzakelijk is voor deze drie geprioriteerde CCU productketens.

De hierboven genoemde strategische stappen voor verduurzaming van de CCU-keten zijn puur gebaseerd op de CO₂ prestatie van de CCU-ketens. Hierbij is geen rekening gehouden met beschikbaarheid en kosten van hernieuwbare ingrediënten voor de ketens. Ook maken we hier geen onderscheid tussen bijv. verschillende hernieuwbare varianten van koolstofbronnen zoals biogeen of Direct Air Capture of energiebronnen zoals wind, zon, water of biomassa.

De potentie van de keten (grootte van de markt) zal ook een significante rol in de keuze voor een CCU route en zal daarom ook een rol spelen in de keuze voor een product. Een eerste analyse liet zien dat er voor alle routes wel potentieel van enkele miljoenen tonnen beschikbaar lijkt te zijn maar dat de data waar op dit gebaseerd is soms aanbod van CO₂ en soms het huidige dan wel verwachte product volume betreffen. Kortom, de onzekerheden hieromtrent zijn groot.

Appendix

Inventory

CO₂ bron

Voor de bron van CO₂, ofwel oorsprong, zijn 5 bronnen onderscheiden. Er is gekozen voor de benadering dat fossiele CO₂ in principe vrij van impact de keten in komt, omdat deze CO₂ een afvalproduct is. De netto emissie van 1 kilogram fossiel CO₂ is daarom nul. Bij Direct Air Capture (atmosferische CO₂) en biogeen CO₂ wordt er aangenomen dat er CO₂ uit de biosfeer wordt onttrokken. De netto emissie van 1 kg atmosferische CO₂ is daarom -1 kg CO₂. Voor biogene stromen wordt, ten opzichte van atmosferische CO₂, ook de impact van het verkrijgen van de CO₂ meegenomen en afgetrokken van de emissie. De netto emissie is daarom lager dan per kg biogene CO₂ dan -1 kg CO₂. Voor de AVI is een mix aangehouden van biogeen CO₂ (secundair) en fossiele brandstoffen¹. De volgende CO₂ kentallen zijn daar aan gehangen:

	CO ₂ -emissiefactor
Oorsprong koolstof	kg CO ₂ /ton CO ₂
Fossiel	0
Biogeen primair	-444
Biogeen secundair	-965
Atmosfeer	-1,000
Atmosfeer, toekomst	-1,000
AEC mix	-595

Vermeden emissies bij de centrale (relatief perspectief)

In het relatieve perspectief worden ook de vermeden emissies van het proces dat als CO₂ bron fungeert meegerekend in de keten. Dit betekent dat voor elk scenario waarin CO₂ wordt gegenereerd (alle bronnen behalve DAC), in het relatieve perspectief een vermeden emissie wordt gerekend van -1000 kg CO₂.

	CO ₂ -uitparing
Oorsprong koolstof	kg CO ₂ /ton CO ₂
Fossiel	-1,000
Biogeen primair	-1,000
Biogeen secundair	-1,000
Atmosfeer	0
Atmosfeer, toekomst	0
AVI mix	-1,000

Afvang

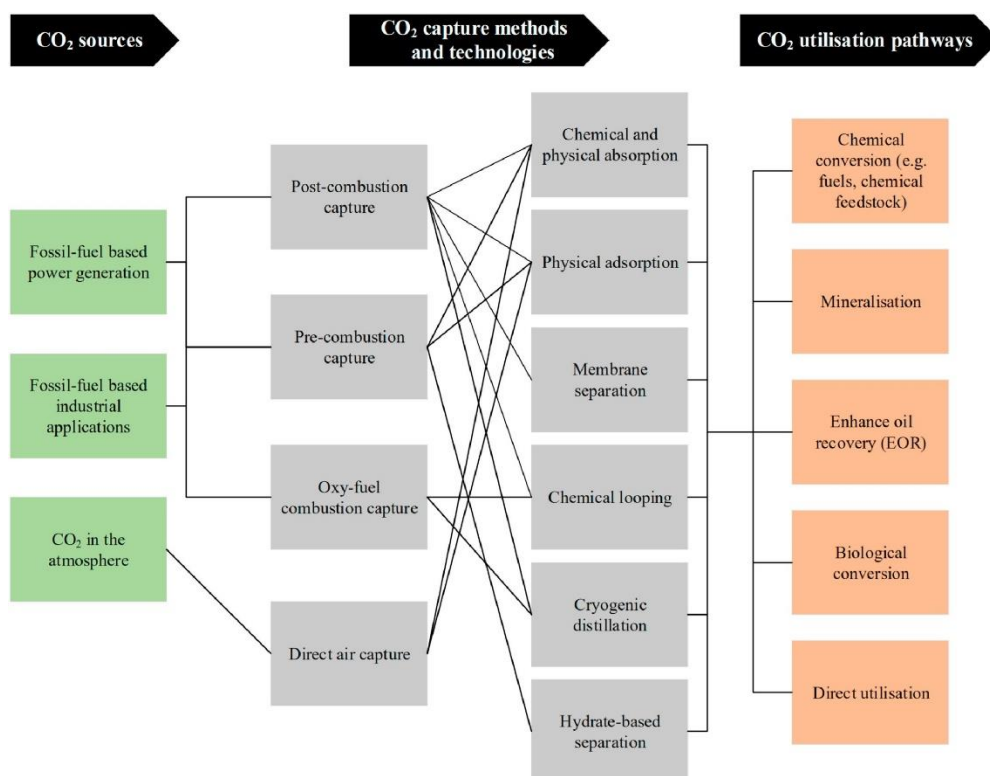
Onder afvang valt zowel het afvangen als het scheiden en compressie van de CO₂ (voor vervoer). Hiervoor is gekeken naar 2 voornaamste technologieën: post-combustion afvang door middel van het oplosmiddel mono ethanolamine (MEA), en Direct Air Capture (DAC). MEA, samen met andere CO₂ absorptieprocessen met oplosmiddelen, is op dit moment de meest marktklare technologie die wordt ingezet om CO₂ af te vangen. Daarnaast zit er nog verschil in concentratie CO₂ en de energie die nodig is voor de afvang. Hiervoor is een splitsing gemaakt tussen rookgassen uit energie en rookgassen uit de afvangverbranding. Daarnaast zijn er 2 toekomstscenario's gemaakt,

¹ https://ce.nl/wp-content/uploads/2021/03/CE_Delft_200151_Methodiek_duurzaam_aanbesteden_afval_update_2021_DEF.pdf

om zo de impact van de toekomstige installaties in te schatten. Er is bij het toekomstperspectief uitgegaan dat de technologie zich nog zal verbeteren en energiezuiniger kan worden. Daarnaast is het toekomstproces volledig geëlektrificeerd. De volgende getallen zijn gebruikt voor de afvangtechnologie. Deze getallen zijn verzameld uit de literatuur en inhoudelijk beoordeeld door specialisten op gebied van CO₂ afvang binnen TNO:

Per ton afgevangen CO ₂	Efficiëntie	Warmte input	Elektricit eit input	Materiaa l input	
Technologie	ton CO ₂	MJ	kWh/	kg CO ₂	Bron
MEA rookgassen AVI	1.10	3,365	166	4.1	Gemiddelden van meerdere studies
MEA rookgassen energie	1.10	4,000	166	2.4	Gemiddelden van meerdere studies
MEA rookgassen energie, toekomst	1.10	0	894	2.4	Aanname: minder energieverbruik: ~70%, 100% elektrisch
Direct Air Capture	1.00	5,505	383	7	Gemiddelden van meerdere studies
Direct Air Capture, toekomst	1.00	0	1,073	7	Aanname: minder energieverbruik: ~70%, 100% elektrisch

Er zijn nog vele andere opties en technologieën waarbij CO₂ kan worden afgevangen. Er is gekozen om deze buiten beschouwing gelaten om de complexiteit te beperken. Daarnaast is het overgrote deel van deze technologieën nog niet markt klaar. Zie figuur hieronder voor een samenvatting van andere technologieën²:



Producten en processen

In de literatuur is een grote lijst met producten te vinden die gemaakt kunnen worden met CO₂. Uit deze producten is in de introductie een selectie gemaakt, om zo een representatief beeld te krijgen van zowel de diverse productmogelijkheden als de generieke richting van eindproducten (chemie, brandstof, etc.). Voor het omzetten van CO₂ naar producten is data uit recente literatuur gebruikt. Er is aangenomen dat deze getallen gelden voor zowel nu als in de toekomst. Echter is het

² Ghiat et al., 2021

aannemelijk dat bepaalde processen op grotere schaal efficiënter worden en hierdoor bijvoorbeeld minder materiaal of energie zullen kosten. Dit is niet meegenomen, wederom om de complexiteit te beperken en de transparantie te vergroten.

CCU proces	Opbrengst	Opbrengst	Warmte input	Elektriciteit input	Waterstof input	Materiaal input	Emissies/ verliezen	Carbon Efficiency
Producten & processen (per ton CO ₂)	kg of m ³ product	kg CO ₂	MJ	kWh	Kg	kg CO ₂	kg CO ₂	%
Mineralisatie: Opslag mineraal	2,650	0	1840	0	0	316	0	100
Mineralisatie: Bouwmateriaal bodemassen	3,750	644	0	82	0	9.07	0	100
Voeding: Glastuinbouw (OCAP)	245	462	0	0	0	0.00	437.3	56
Voeding: Eiwitsynthese	961	3,790	5,952	5,824	0	243	0	100
Chemie: Kunststoffen (ethyleen)	219	424	571	8,470	0	0.42	412.1	59
Chemie: Methanol	690	492	0	14	131	0.07	30.0	97
Brandstof: DME	500	645	0	15	130	0.10	18.3	98
Brandstof: Kerosine (Fischer-Tropsch)	146	61	88,589	1,900	0	6.41	0	100
Chemie: Koolstofmonoxide	630	705	1617	974	42	0.00	0	100
Chemie: Mierenzuur	709	1,763	18,440	8,511	0	0.19	326.7	67
Referentie: CCS	1,000	0	0	0	0	0	0	100

End-of-life

Voor alle producten zijn verschillende end-of-life scenario's mogelijk. Deze zijn daarnaast ook variabel over de toekomst, hierbij aangenomen dat er in de toekomst de economie steeds duurzamer en meer circulair wordt. Daarnaast is het ook aannemelijk dat voor de end-of-life in de toekomst ook CO₂ afvang plaats zal vinden. Binnen een circulaire economie worden meerdere cycli van producten uitgespaard of als er afvang plaats vindt, waardoor er CO₂-opslag plaatsvindt. Dit is bijvoorbeeld niet het geval bij voedselproducten of bij brandstoffen. Producten waarbij dit wel (kan) gelden zijn chemische producten en mineralisatieproducten. Zie onderstaande tabel voor de End-of-life aannames in meerdere End-of-life scenario's.

CCU proces	End-of-life technologie Huidige	End-of-life technologie Circulair	End-of-life technologie Afvang
Producten & processen	type	type	type
Mineralisatie: Opslag mineraal	CO ₂ -vastlegging	CO ₂ -vastlegging	CO ₂ -vastlegging
Mineralisatie: Bouwmateriaal bodemassen	CO ₂ -vastlegging	CO ₂ -vastlegging	CO ₂ -vastlegging
Voeding: Glastuinbouw (OCAP)	CO ₂ -emissie	CO ₂ -emissie	CO ₂ -emissie
Voeding: Eiwitsynthese	CO ₂ -emissie	CO ₂ -emissie	CO ₂ -emissie
Chemie: Kunststoffen (ethyleen)	AVI	Circulair	CO ₂ afvang
Chemie: Methanol brandstof	CO ₂ -emissie	CO ₂ -emissie	CO ₂ -emissie
Chemie: Methanol grondstof	AVI	Circulair	CO ₂ afvang
Brandstof: DME	CO ₂ -emissie	CO ₂ -emissie	CO ₂ -emissie
Brandstof: Kerosine (Fischer-Tropsch)	CO ₂ -emissie	CO ₂ -emissie	CO ₂ -emissie
Chemie: Koolstofmonoxide	50% AVI / 50% emissie	50% circulair / 50% emissie	50% CO ₂ -afvang / 50% emissie
Chemie: Mierenzuur	AVI	Circulair	CO ₂ -afvang
Referentie: CCS	CO ₂ -opslag	CO ₂ -opslag	CO ₂ -opslag

De emissies die vrijkomen in deze scenario's zijn gekwantificeerd door middel van kwantificering van de koolstofketen. Deze worden verrekend met de CO₂-efficiëntie van de processen.

	CO ₂ -emissiefactor	Elektriciteit
End-of-life	kg CO ₂ /ton CO ₂	kWh/ton CO ₂
CO ₂ -emissie	1,000	0
CO ₂ -vastlegging	0	0
CO ₂ -afvang	100	375
CO ₂ -opslag	10	115
AVI	1,000	-833.4
Circulair	50	1,000
50% AVI / 50% emissie	1,000	-416.7
50% CO ₂ afvang / 50% emissie	550	85.3
50% circulair / 50% emissie	500	83.3

Emissiefactoren processen

Emissiefactoren Brandstoffen:

Brandstof	kg CO ₂ /MJ	MJ/ eenheid	eenheid	Bron
Aardgas	0.060	31.65	m ³	https://www.co2emissiefactoren.nl/liijst-emissiefactoren/
Kolen	0.104	23	kg	https://www.co2emissiefactoren.nl/liijst-emissiefactoren/
Biomassa secundair	0.002	15	kg	https://www.co2emissiefactoren.nl/liijst-emissiefactoren/
Biomassa primair	0.037	15	kg	https://www.co2emissiefactoren.nl/liijst-emissiefactoren/

Emissiefactoren Elektriciteit:

Elektriciteit	kg CO ₂ /kWh	Bron
Huidige mix	0.556	RVO website
Duurzame mix	0.075	RVO website

Emissiefactoren Waterstof:

Waterstof	kg CO ₂ /kg	Bron
Grijs: Stoom Methaan Reformer op aardgas	11.5	Salhuyeh et al., 2017
Blauw: Stoom Methaan Reformer op aardgas met CO ₂ opslag	3.5	Salhuyeh et al., 2017
Groen: Electrolyse met groene stroom	1.2	NA

Emissiefactoren Conventionele producten:

Producten & processen	kg CO ₂ /ton product	Bron
Mineralisatie: Opslag mineraal	0	Ecoinvent 3.6
Mineralisatie: Bouwmateriaal bodemassen	0.17	Ecoinvent 3.6
Voeding: Glastuinbouw (OCAP)	1.88	https://www.co2emissiefactoren.nl/liijst-emissiefactoren/
Voeding: Eiwitsynthese	3.94	Ecoinvent 3.6

Chemie: Kunststoffen (ethyleen)	1.51	Industry 2.0
Chemie: Methanol	0.67	Ecoinvent 3.6
Brandstof: DME	1.24	Ecoinvent 3.6
Brandstof: Kerosine (Fischer-Tropsch)	0.42	https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/Study%20on%20Actual%20GHG%20Data%20Oil%20Gas%20Final%20Report.pdf
Chemie: Mierenzuur	2.17	Ecoinvent 3.6
Chemie: Koolstofmonoxide	1.1	Ecoinvent 3.6
Referentie: CCS	1	

Emissiefactoren overige materialen (per kg):

Water	0.0002245	Ecoinvent 3.6
Water ultra puur	0.0026793	Ecoinvent 3.6
Afvalwater	0.0001779	Ecoinvent 3.6
Sojaboon	3.9439336	Ecoinvent 3.6
Olivijn	0.1193840	Ecoinvent 3.6
Staalslakken	0.0024199	Ecoinvent 3.6
Sand lime brick	0.1716686	Ecoinvent 3.6
Biomethanol	0.6372678	Ecoinvent 3.6
Nafta	0.3029561	Ecoinvent 3.6
Monoethanolamide	3.096579	Ecoinvent 3.6
Calcium Carbonaat	1.368649	Ecoinvent 3.6
Actief Carbon	3.315595	Ecoinvent 3.6
Sodium Hydroxide 50%	1.1985911	Ecoinvent 3.6