



LCA CCU in de
glastuinbouw vanuit
Afvalenergiecentrales



Committed to the Environment

LCA CCU in de glastuinbouw vanuit Afvalenergiecentrales

Dit rapport is geschreven door:

Isabel Nieuwenhuijse

Sanne Nusselder

Delft, CE Delft, juli 2019

Publicatienummer: 19.7T31.106

LCA / Maatschappelijke factoren / Economische factoren / Glastuinbouw / Kooldioxide / Emissies / Reductie / Hergebruik / Milieu / Effecten

Opdrachtgever: OCAP CO2 B.V.

Uw kenmerk: 8101730546

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

Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de projectleider [Sanne Nusselder](#) (CE Delft)

© copyright, CE Delft, Delft

CE Delft

Committed to the Environment

CE Delft draagt met onafhankelijk onderzoek en advies bij aan een duurzame samenleving. Wij zijn toonaangevend op het gebied van energie, transport en grondstoffen. Met onze kennis van techniek, beleid en economie helpen we overheden, NGO's en bedrijven structurele veranderingen te realiseren. Al 40 jaar werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.



Inhoud

	Samenvatting	3
1	Introductie	6
	1.1 Aanleiding	6
	1.2 Doel van de studie	6
	1.3 CCU-projecten	6
	1.4 Levenscyclusanalyse en leeswijzer	8
2	Methodiek	9
	2.1 Doelstelling en afbakening	9
	2.2 Milieueffectcategorieën	11
	2.3 Multifunctioneel systeem	12
	2.4 Gegevensgebruik en datakwaliteit	13
	2.5 Gevoeligheidsanalyse	13
3	Inventarisatie	14
	3.1 CCU-projecten	14
	3.2 CO ₂ -afvang	18
	3.3 Nabewerkingsstap afgevangen CO ₂ bij AEC	19
	3.4 Liquefactie bij OCAP	20
	3.5 Transport van AEC naar glastuinbouw	20
	3.6 CO ₂ -benutting in de glastuinbouw	21
	3.7 Carbon Capture & Storage (CCS)	24
4	Resultaten	26
	4.1 LCA-resultaten voor de verschillende AECs	26
	4.2 Contributieanalyse	35
	4.3 Gevoeligheidsanalyse	38
5	Conclusie	40
6	Bibliografie	42



Samenvatting

Aanleiding

Op dit moment wordt door de drie afvalenergiecentrales in Nederland, AEB, AVR en HVC, CO₂ geëmitteerd. Door het afvangen van CO₂ en toepassing ervan in de glastuinbouw (CCU) of opslag ervan in lege gasvelden in de Noordzee (CCS) kunnen CO₂-emissies gereduceerd worden.

In 2018 heeft CE Delft voor een consortium van 22 partijen een Screening LCA (levenscyclusanalyse) en MKBA (maatschappelijke kosten- en batenanalyse) opgesteld voor diverse CO₂-afvang en benuttingsroutes (afgekort CCU, van carbon capture and utilization). De investeringsvoorbereiding is een stap verder waarbij er voor drie afvalenergiecentrales (AECs) een voorontwerp is gemaakt voor afvangen, transport en gebruik van CO₂ in de glastuinbouw. Hiermee is de behoefte ontstaan om de studie naar maatschappelijke kosten en baten en CO₂-reductie te updaten en concretiseren op basis van projectspecifieke gegevens. Onderdeel van dit project zijn een MKBA-rapportage en een LCA-rapportage naar de CO₂-reductie per ton CO₂ toegepast in de glastuinbouw van de voorgenomen investering. Dit is de LCA-rapportage.

Doel van de studie

Doel van deze studie is inzicht krijgen in de milieu-impact (klimaatverandering) van een CCU-systeem bij verschillende AECs, met toepassing van de afgevangen CO₂ in de glastuinbouw. In deze studie beantwoorden we de volgende vraag: *‘Wat is de gemiddelde CO₂-emissiereductie als 1 ton CO₂ wordt afgevangen en toegepast, ten opzichte van de huidige situatie waarin geen CO₂ afgevangen wordt?’* Voor AVR Rijnmond, AEB Amsterdam en HVC Alkmaar is de CO₂-reductie ingeschat. De CO₂-reductie die behaald (kan) worden over de hele keten dient als input voor de MKBA-rapportage en is bepaald voor twee zichtjaren: 2024 en 2030.

Conclusies tot 2030

De CO₂ die toegevoegd wordt aan de kas leidt tot een reductie in CO₂-emissie door aardgasgebruik voor (1) CO₂ dosering in de zomer (zomerstook) en (2) het mogelijk maken van hernieuwbare warmtevoorziening. De CO₂-emissiereductie die behaald kan worden bij toepassing in de glastuinbouw komt in het geval van zomerstook volledig door het toevoegen van externe CO₂ in de glastuinbouw. In het geval dat er voor deze CO₂-emissiereductie ook hernieuwbare warmte benodigd is, kan een deel van de emissiereductie ook toegerekend worden aan het warmteproject. In laten we zien wat de CO₂-emissiereductie is bij toerekening van de reductie bij een hernieuwbaar warmteproject voor 0%, 50% of 100% aan de levering van externe CO₂.

In laat zien dat:

- Alle in dit project beschouwde CCU/CCS-routes leiden tot een reductie van CO₂-emissies, waarmee alle projectalternatieven ook leiden tot een reductie van impact op klimaatverandering, vergeleken met de situatie waarin de CO₂ niet wordt afgevangen.
- Het afvangen van 1.000 kg CO₂ bij de AECs leidt tot een netto CO₂-emissiereductie van tussen de 9 en 800 kg (bij 0% toerekening), 281 en 800 kg (bij 50% toerekening) of 553 en 800 kg (bij 100% toerekening).
- De emissiereductie bij CCS (opslag van CO₂ in de ondergrond) is hoger dan bij CCU omdat die emissiereductie volledig aan deze projecten kan worden toegerekend.



- De emissiereductie wordt veroorzaakt door de substitutie van de referentiesituatie, waarin (externe) fossiele CO₂ met name uit een aardgasketel wordt toegepast voor plantbemesting. Het feit dat in 2030 een lagere emissiereductie kan worden verkregen ten opzichte van de huidige situatie zonder CCU, komt doordat de referentie verandert in de tijd. Tuinders kunnen richting 2030 ook andere manieren vinden om hun CO₂-voorziening veilig te stellen zoals een biogasketel of een biomassaketel. In de toekomst wordt dus minder fossiele CO₂ gesubstitueerd dankzij CO₂ geleverd door de AECs dan in 2024.
- Voor afvang van CO₂ zijn grote hoeveelheden stoom vanaf hogere temperatuurniveaus nodig. Voor AEB is op dit moment nog onzeker of stoomlevering van lage druk betrokken kan worden. Daarom is aangenomen dat AEB een hogere derving van elektriciteit zal kennen dan de andere plants. Hier zal in het nadere ontwerp gekeken moeten worden of voldoende stoom op lagere druk en temperatuur uit te koppelen is op de plant. Dat kan dus tot verlaging van de dervingsfactor en verbetering van de CO₂-prestatie leiden.

Tabel 1 - Resultaten LCA - CO₂-emissiereductie door toepassing van CCU (alle AECs), CCU+CCS (AEB) en CCS (AEB) in 2024 en 2030 ten opzichte van de huidige situatie waarin geen CO₂-afvang plaatsvindt

Projectalternatief	2024 (kg CO ₂ -eq./ton afgevangen CO ₂)			2030 (kg CO ₂ -eq./ton afgevangen CO ₂)		
	0%	50%	100%	0%	50%	100%
% toerekening						
AEB CCU	75	366	658	9	281	553
AEB CCU+CCS	357	535	713	369	483	701
AEB CCS	800	800	800	800	800	800
AVR CCU	140	431	722	73	345	617
HVC CCU	121	413	704	53	327	599

Toelichting: % toerekening betreft de toerekening van CO₂-emissiereductie die is ontstaan als gevolg van inzet van hernieuwbare warmte bij kassen. De mate waarin deze wordt toegerekend aan levering van externe CO₂ is een politieke keuze omdat er al een SDE+-subsidie op diepe geothermie bestaat.

Deze conclusies gelden alleen voor het milieueffect *klimaatverandering*. Het maakt voor de berekende CO₂-emissiereductie niet uit of de afgevangen CO₂ uit de AECs afkomstig is van biogene of fossiele bronnen omdat het om een netto CO₂-emissiereductie gaat ten opzichte van de huidige situatie. Als in de huidige situatie 1 ton CO₂ wordt uitgestoten bij een AEC dan komt deze na afvang en toepassing in de glastuinbouw weer volledig vrij. Netto levert dat dan geen vermindering van CO₂-emissie naar de atmosfeer op; hierbij maakt de oorsprong van CO₂ geen verschil. De CO₂-emissiereductie komt volledig voor rekening van aardgasgebruik in de glastuinbouw dat nodig is om de CO₂ in de kas te doseren.

Vooruitblik: na 2030

De emissiereductie zal na 2030 door een toename van toepassing van CO₂ in combinatie met duurzame warmte verder afnemen. Het is dus op termijn aan te bevelen om naast toepassing in de glastuinbouw ook te gaan kijken naar alternatieve CCU-routes. Zoals toepassing van CO₂ in bouwmaterialen waarbij CO₂ voor langere tijd vastgelegd wordt, dit is vergelijkbaar met CCS maar in dit geval wordt er wel een product geproduceerd.

Aanbevelingen

- het is aan te bevelen de resultaten te updaten als er meer duidelijkheid is over de toe te passen toerekening van de CO₂-emissiereductie bij zowel toepassing van duurzame warmte en toepassen van externe CO₂ in de glastuinbouw;

- het is aan te bevelen de resultaten te updaten als er meer duidelijkheid is over de verdeling over de vier verschillende redenen om CO₂ toe te voegen in de glastuinbouw op de korte termijn (2024);
- het is aan te bevelen de resultaten te updaten als uitgebreidere engineeringstudies voor de verschillende projectalternatieven zijn uitgevoerd.



1 Introductie

1.1 Aanleiding

In 2018 heeft CE Delft voor een consortium van 22 partijen een Screening LCA (levenscyclus-analyse) en MKBA (maatschappelijke kosten- en batenanalyse) opgesteld voor een negental CO₂-afvang en -benuttingsroutes (afgekort CCU, van carbon capture and utilization) (CE Delft, 2018a) (CE Delft, 2018b). Tevens is voor vier afvalverwerkingsbedrijven een studie naar de businesscases en onrendabele top van CCU-systemen met toepassing in de glastuinbouw gedaan. Inmiddels is de investeringsvoorbereiding een stap verder en hebben drie bronnen van CO₂ (AEB, HVC en AVR) subsidie ontvangen om onderzoek te doen naar de haalbaarheid van de afvang van CO₂ en toepassing bij glastuinders in de provincies Noord-Holland en Zuid-Holland.

Hiermee is de behoefte ontstaan om de studie naar maatschappelijke kosten en baten en CO₂-reductie over de keten te updaten en te concretiseren op basis van projectspecifieke gegevens. Deze analyse is per project uitgevoerd, waarbij gebruik is gemaakt van meer specifieke gegevens over het gehele CCU-systeem van dat project. Voor AEB is tevens een scenario doorgerekend met zowel afzet in de glastuinbouw, als CO₂-afvang en -opslag (CCS) erin verwerkt, om zo de afvanginstallatie het hele jaar te kunnen laten draaien (in tegenstelling tot wat mogelijk is wanneer alleen afzet in de glastuinbouw plaatsvindt).

In het huidige project zijn een MKBA-rapportage en een LCA-rapportage gemaakt. Dit is de LCA-rapportage.

1.2 Doel van de studie

Het doel van de studie is om per project inzicht te krijgen in de klimaatimpact van afvang van CO₂ en toepassing van de afgevangen CO₂ in de glastuinbouw. De CO₂-reductie die behaald (kan) worden over de hele keten dient als input voor de MKBA-rapportage en is bepaald voor twee zichtjaren: 2024 en 2030.

1.3 CCU-projecten

AEB Amsterdam

AEB Amsterdam heeft een afvalverbrandingsinstallatie in gebruik waaruit elektriciteit aan het net en warmte aan het warmtenet in Amsterdam worden geleverd. AEB heeft nog geen praktijkervaring met CCU- of CO₂-afvang, maar heeft wel meegewerkt aan enkele onderzoeken hiernaar, in samenwerking met o.a. OCAP. AEB ligt op een gunstige locatie ten opzichte van de OCAP-pijpleiding, en kan hier dus op worden aangesloten.

AVR Rozenburg

AVR Rozenburg is een afvalcentrale met een bioenergiecentrale, waarvan de warmte uit beide processen geleverd wordt aan het warmtenet van Rotterdam; met het resterende deel wordt elektriciteit geproduceerd. Bij de andere locatie van AVR (in Duiven), wordt in 2019 een CO₂-afvanginstallatie met een capaciteit van 60 kton/jaar gebouwd, waarvan de afgevangen CO₂ vloeibaar wordt gemaakt en per vrachtwagen wordt geleverd aan de glastuinbouw. Een eventuele CO₂-afvanginstallatie bij AVR Rozenburg (onderwerp van deze studie), zal worden gekoppeld aan de OCAP-pijpleiding.

HVC Alkmaar

HVC Alkmaar is een afvalenergiecentrale (AEC) met een bioenergiecentrale (BEC), die beide elektriciteit leveren en warmte leveren aan het warmtenet in Alkmaar. Sinds 2018 is er een pilotschaal CO₂-afvanginstallatie in gebruik genomen bij de BEC. Hieruit wordt 4.000 ton biogeen CO₂/jaar (0,5 ton CO₂/uur) afgevangen. Doel is opschaling naar een demonstratie-installatie (naar 15 ton CO₂/uur, met een productie van ~75.000 ton vloeibare CO₂ per jaar) met een aansluiting vanaf zowel de BEC als Lijn 4 van de AEC. Uit resultaten van de pilot-plant en de huidige LCA/MKBA-studie zal naar voren komen of een dergelijke installatie te realiseren is. Als dit het geval is, dan is de start van operatie gepland voor 2023/2024. HVC ligt niet in de buurt van de OCAP-leiding en zal daarom glastuinbouwgebieden in het noorden van Noord-Holland voorzien van CO₂. Deze CO₂ wordt na afvang vloeibaar gemaakt in een liquefactie-installatie en vervolgens per vrachtwagen getransporteerd.

Transport naar tuinders: OCAP

De afgevangen CO₂ bij de afvalenergiecentrales (AECs) zal worden afgenomen door de OCAP (Organic CO₂ for Assimilation by Plants). Sinds 2005 wordt door OCAP CO₂ uit de industrie via een voormalige oliepijpleiding tussen Rotterdam en Amsterdam naar de glastuinbouw geleid. Vanaf 2016 wordt ook CO₂ afgevangen op enkele plekken die niet aan de OCAP-leiding liggen. Die CO₂ wordt na afvang vloeibaar gemaakt in een liquefactie-installatie en daarna met vrachtwagens getransporteerd naar waar op dat moment CO₂-vraag is. De CO₂ van OCAP wordt in de glastuinbouw gebruikt om gewassen mee te bemesten; CO₂ versnelt de groei van planten.

Op dit moment wordt CO₂ van de OCAP-pijpleiding hoofdzakelijk gasvormig geleverd aan de glastuinbouw. Het gaat dan om glastuinbouwgebieden die op korte afstand van de leiding liggen en er daarom gemakkelijk op kunnen worden aangesloten door middel van een relatief korte uitbreiding van het leidingennetwerk. OCAP heeft ook plannen om een liquefactie-installatie aan de noordkant van de pijpleiding te gaan bouwen, om zo de glastuinbouwgebieden in het noorden van Noord-Holland ook van OCAP-CO₂ te kunnen voorzien (in vloeibare vorm).

Om bedrijven ook in de winter een kans te geven hun CO₂ af te kunnen vangen, wordt gekeken naar het uitbreiden van de OCAP-leiding naar de Noordzee, om daar CO₂ op te slaan in de diepe ondergrond (carbon capture and storage, CCS). Hiervoor wordt een koppeling gerealiseerd met het Porthos-netwerk, en mogelijk ook met Athos. Havenbedrijf Rotterdam, Energie Beheer Nederland (EBN) en N.V. Nederlandse Gasunie zijn hiervoor de initiatiefnemers. Deze koppeling zal ook als projectalternatief meegenomen worden in de LCA/MKBA.

In Figuur 1 zijn de OCAP-pijpleiding en alle plannen eromheen weergegeven.



Figuur 1 - Huidige OCAP-pijpleiding (groen). AVR en AEB kunnen hierop aangesloten worden. HVC en liquefactie-installatie noordkant OCAP kunnen mogelijk glastuinbouw in noord Noord-Holland voorzien (rood). Daarnaast is er een plan voor CCS (oranje)



1.4 Levenscyclusanalyse en leeswijzer

De LCA in deze studie is uitgevoerd conform de ISO-standaarden 14040 en 14044. In lijn hiermee is de gebruikte methode transparant en onafhankelijk. De systeemgrenzen zijn *cradle-to-grave*, wat betekent dat het systeem vanaf afvang tot en met toepassing van de afgevangen CO₂ zal worden geanalyseerd. De focus van de studie ligt op de CO₂-impact van het systeem ten opzichte van een conventioneel systeem dat met CCU kan worden vervangen - dit geldt als referentiesysteem. Andere milieueffecten zullen niet worden meegenomen in deze studie, tenzij een grote lastenverschuiving van milieueffecten wordt verwacht.

Een LCA wordt uitgevoerd in vier stappen. Elke stap is terug te vinden in een apart hoofdstuk:

1. Afbakening doel en reikwijdte, de **methodiek**beschrijving (Hoofdstuk 2).
2. **Inventarisatie** (Hoofdstuk 3).
3. Impact analyse en **resultaten** (Hoofdstuk 4).
4. Interpretatie en **conclusies** (Hoofdstuk 5).

2 Methodiek

Een levenscyclusanalyse (LCA) wordt gebruikt om de (milieu)impact van een product of service over de hele keten te bepalen. Het kan worden ingezet om de impact van verschillende producten met een gelijkwaardige functie te vergelijken. De ISO-standaarden 14040 en 14044 geven richtlijnen om een LCA op te zetten. Deze studie is uitgevoerd in lijn met deze richtlijnen.

2.1 Doelstelling en afbakening

2.1.1 Doel van de studie

Doel van deze studie is inzicht krijgen in de milieu-impact (klimaatverandering) van een CCU-systeem bij verschillende AECs, met toepassing van de afgevangen CO₂ in de glastuinbouw. In deze studie beantwoorden we de volgende vraag: *‘Wat is de CO₂-emissiereductie als 1 ton CO₂ wordt afgevangen en toegepast, ten opzichte van de huidige situatie waarin geen CO₂ afgevangen wordt?’*

2.1.2 Afbakening van de studie

Functionele eenheid

In een LCA wordt gewerkt met een functionele eenheid om verschillende systemen met elkaar te kunnen vergelijken. In deze studie is de functionele eenheid als volgt gedefinieerd: De afvang van 1 ton CO₂¹ en de daaropvolgende toepassing van CO₂. Het gaat dus om de afvang van 1 ton CO₂ (bruto CO₂-emissiereductie). Doordat er ook energie gebruikt wordt in de keten en doordat de vervanging van CO₂ bij toepassing niet 1-op-1 is, is de netto CO₂-emissiereductie niet 1 ton per ton afgevangen CO₂.

Omdat het doel van deze studie is om de milieu-impact van het gehele CCU-systeem in kaart te brengen, is een functionele eenheid nodig die zowel de service van het voorkomen van de emissie van CO₂ bij de AECs als de toepassing van die CO₂ in de glastuinbouw en/of het opslaan van CO₂ (CCS) kan beschrijven. Dat is het geval bij de hierboven geformuleerde definitie van de functionele eenheid.

In deze studie wordt gekeken naar CCU-projecten bij drie afvalenergiecentrales (AECs), waarbij een aantal alternatieven gelden. De verschillende CCU-projecten en hun alternatieven worden weergegeven in Tabel 2. Voor een specifieke beschrijving van de verschillende CCU-projecten en de alternatieven per project zie Paragraaf 3.1.

¹ 100% massa CO₂ afgevangen.

Tabel 2 - CCU-projecten en alternatieven bekeken in deze studie

AEC	Alternatieven
AEB	<ul style="list-style-type: none"> – CCU: Afvang van CO₂ in het groeiseizoen en toepassing in de glastuinbouw. – CCU + CCS: Afvang van CO₂ en toepassing in de glastuinbouw (in het groeiseizoen) en CO₂-opslag in de diepe ondergrond (CCS) in de rest van het jaar. – CCS: Afvang van CO₂ en CO₂-opslag in de diepe ondergrond.
AVR	<ul style="list-style-type: none"> – CCU: Afvang van CO₂ in het groeiseizoen en toepassing in de glastuinbouw.
HVC	<ul style="list-style-type: none"> – CCU: Afvang van CO₂ in het groeiseizoen en toepassing in de glastuinbouw.

Systemegrenzen

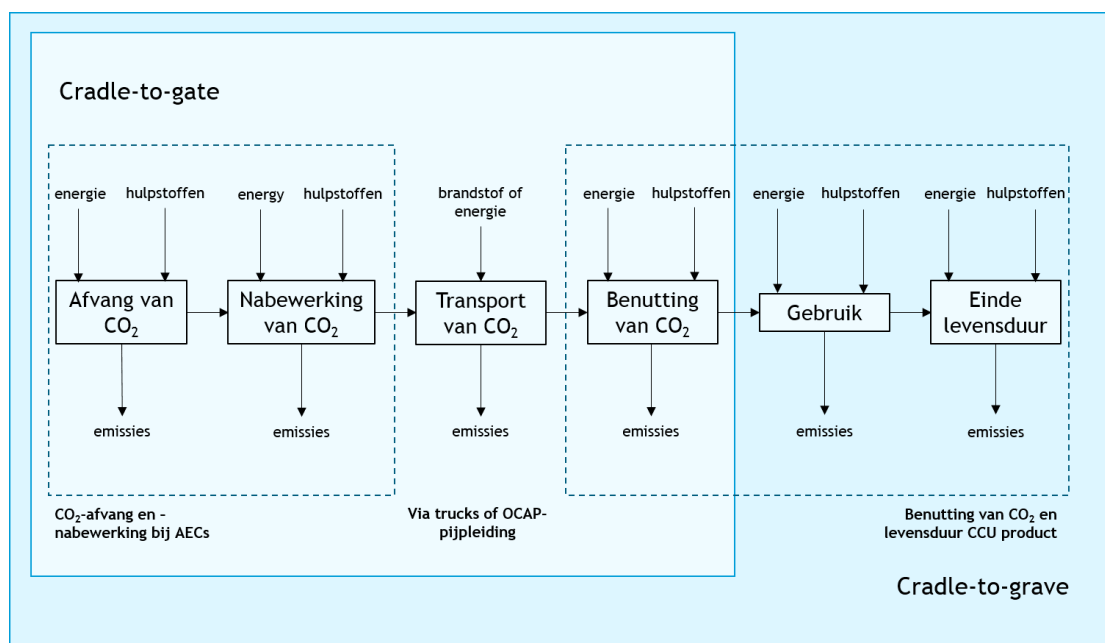
Bij een LCA-studie kan met verschillende systemegrenzen worden gewerkt.

De meest gebruikte zijn:

- Cradle-to-gate: Door deze systemegrenzen te gebruiken wordt de productketen geanalyseerd vanaf het moment van extractie van de grondstof (in dit geval de afvang van CO₂) tot en met het verwerken van die grondstof tot een product (in dit geval de benutting (utilization) van de afgevangen CO₂ in de glastuinbouw).
- Cradle-to-grave: Door deze systemegrenzen te gebruiken wordt de productketen geanalyseerd vanaf het moment van extractie van de grondstof (in dit geval de afvang van CO₂) tot en met het afvalscenario van het product wat met de grondstof is geproduceerd (in dit geval tot en met de consumptie van het gewas dat de CO₂ heeft opgenomen).

In Figuur 2 zijn de algemene systemegrenzen weergegeven zoals deze gehanteerd zijn in deze studie.

Figuur 2 - Systemegrenzen CO₂-afvang en -benutting



In deze studie gaan we uit van cradle-to-grave, dit betekent dat we de CO₂ volgen tot en met het einde van de levensduur. De reden hiervoor is dat in dit project wordt gekeken

naar zowel CCU in de glastuinbouw en CCS. Tussen deze twee technieken zit een verschil in CO₂-reductie in de fase na 'benutting van CO₂': bij CCU in de glastuinbouw komt de CO₂ weer vrij, terwijl bij CCS de CO₂ permanent wordt opgeslagen. Ook als de uitkomsten van de CCU-toepassing hier zouden worden vergeleken met andere CCU-routes, is het nodig om de einde levensduur mee te nemen - er bestaan CCU-routes waarbij de CO₂ langdurig wordt opgeslagen. Voor een specifieke beschrijving van de verschillende CCU-projecten en de alternatieven per project zie Paragraaf 3.1.

Technologische en tijdsafbakening

Technologische aspecten

De CO₂-afvangtechnologie die is voorzien bij AEB, AVR en HVC is absorptie. Na de CO₂-afvang, zal de CO₂ worden opgewaardeerd en gecomprimeerd óf vloeibaar worden gemaakt. Via oftewel de OCAP-pijpleiding oftewel transport met een vrachtwagen zal de CO₂ naar glastuinbouw worden geleid.

Voor een specifieke beschrijving van de verschillende CCU-projecten en de alternatieven per project zie Paragraaf 3.1.

Tijdsaspecten

Het jaar waarover de levenscyclusanalyse zal worden uitgevoerd, is 2024. Kentallen die met de tijd veranderen (bijvoorbeeld de elektriciteitsmix, de vraag naar externe CO₂ vanuit de glastuinbouw), zullen voor dat jaar worden gekozen. Er zal een doorkijkje gemaakt worden naar 2030.

In lijn met de ILCD-richtlijnen zullen twee tijdsperiodes voor CO₂-opslag door de toepassing in de glastuinbouw worden meegenomen in de analyse:

- ≤100 jaar opgeslagen CO₂ leidt niet tot CO₂-emissiereductie.
- >100 jaar opgeslagen CO₂ leidt wel tot CO₂-emissiereductie.

2.2 Milieueffectcategorieën

Het is in een LCA mogelijk om de effecten van een keten op meerdere milieucategorieën in kaart te brengen. In deze studie ligt de focus op klimaatverandering (uitgedrukt in kg CO₂-eq.). Dit is in lijn met wat een aantal recente Europese studies als richtlijn geven voor LCAs over CCU, bijvoorbeeld: (Technische Universität Berlin, RWTH Aachen University, The University of Sheffield, IASS Potsdam, 2018), hoewel er wordt aangegeven dat een bredere studie nodig is wanneer lastenverschuiving wordt verwacht (SAPEA, 2018).

Lastenverschuiving van milieueffecten betekent dat een actie (hier: CCU toepassen) in vergelijking tot het nulalternatief leidt tot een reductie van milieu-impact in de ene milieucategorie (bijvoorbeeld: klimaatverandering), maar tegelijkertijd leidt tot een verhoging van milieu-impact in een andere categorie (bijvoorbeeld: er wordt meer fijnstof uitgestoten of meer emissies door de solvent gebruik). Dan moet worden gekeken of het voordeel wel opweegt tegen het nadeel.

Zoals gezegd wordt hier alleen naar klimaatverandering (uitgedrukt in kg CO₂-eq.) gekeken.

Biogeen en fossiel CO₂

Een deel van de afgevangen CO₂ is van biogene oorsprong. Het is belangrijk om te weten wat de grootte van dit biogene deel is. De reden hiervoor is dat volgens de LCA-standaarden (zoals bijvoorbeeld de EN16760 norm) zowel fossiele als biogene CO₂ uit alle ketenstappen van een proces moeten worden meegenomen om de impact ervan op klimaatverandering te bepalen.

In de afbakening van deze studie wordt opname van CO₂ in de biogene producten die worden verwerkt in de verschillende AECs echter niet meegenomen, maar wordt gefocust op de CO₂ uit afval. Daarom worden de resultaten in deze studies gepresenteerd volgens twee verschillende beoordelingsmethoden:

1. Er wordt geen verschil gemaakt tussen de milieu-impact van biogeen en fossiel CO₂ in het CCU-systeem: alle CO₂-eq.-emissies zorgen voor klimaatverandering. Deze methode voorkomt dubbeltelling van biogene CO₂-opname, die ook al kan zijn meegenomen in de footprint van het product voordat het eindigt in de afvalenergiecentrale (bijvoorbeeld bij de productie van een voedselgewas) of in de hernieuwbare energieproductie van de AECs.
2. Er wordt verschil gemaakt tussen de milieu-impact van biogeen en fossiel CO₂ in het CCU-systeem: alleen fossiele CO₂-emissies zorgen voor klimaatverandering. Hier heeft kortcyclische, biogene CO₂ geen effect op klimaatverandering, alleen CO₂-eq.-emissies van fossiele oorsprong hebben dit effect.

De CO₂-emissiereductie per ton afgevangen CO₂ in vergelijking met geen afvang zal niet verschillen tussen de twee analysemethoden.

2.3 Multifunctioneel systeem

Carbon capture and utilization is een multifunctioneel systeem, in het geval van benutting in de glastuinbouw, ziet dat er als volgt uit:

- het levert een dienst: het voorkomen van CO₂-emissie;
- het levert een product, in deze studie bemesting voor gewassen in de glastuinbouw.

Er bestaan verschillende methodes om multifunctionaliteit van een systeem in een LCA te verwerken, waaronder het alloceren van milieueffecten over de verschillende producten/ services (dit kan zowel op basis van fysische als economische eigenschappen), systeem-uitbreiding en substitutie. Volgens ISO14044 heeft het de voorkeur om te voorkomen dat allocatie moet worden gebruikt. De reden hiervoor is dat dit onzekerheden in de LCA-studie introduceert. Systeemuitbreiding is in het geval van CCU ook ongewenst, omdat het een te groot systeem zou worden. In deze studie wordt daarom substitutie gebruikt om met de multifunctionaliteit van het systeem om te gaan.

Het gebruik van substitutie betekent dat in deze studie het CCU-systeem (benutting van bij verschillende afvalenergiecentrales afgevangen CO₂ in de glastuinbouw) wordt vergeleken met CO₂-gebruik in de glastuinbouw die via een conventionele methode is geproduceerd.



2.4 Gegevensgebruik en datakwaliteit

In een LCA zijn voor- en achtergrondprocessen. De herkomst van data van de voor- en achtergrond is verschillend. De voorgrondprocessen zijn de volgende, met daarbij aangegeven waar de gebruikte data voor die processen op is gebaseerd:

- CO₂-afvang en - nabewerking bij AEB. AEB heeft met behulp van Linde Engineering, die de engineeringstudie voor het systeem bij AEB heeft uitgevoerd, data over het beoogde proces aangeleverd.
- CO₂-afvang en - nabewerking bij AVR. Data is geleverd door AVR op basis van de voor hen gemaakte engineeringstudie van Linde. De afvang en nabewerking zijn samengetrokken.
- CO₂-afvang en - nabewerking bij HVC. HVC heeft data aangeleverd.
- Transport over OCAP-pijpleiding: Data verkregen van OCAP.
- Benutting van CO₂ in de glastuinbouw.
- Opslag van CO₂ (CCS): Op basis van eerdere LCA Smart Grid-studie (CE Delft, 2018a). Deze gegevens zijn deels geverifieerd door OCAP.

Het detailniveau van de geleverde data door de afvalenergiebedrijven is niet gelijk en is gebaseerd op initiële engineerstudies met in de meeste gevallen jaargemiddelde gegevens (die niet helemaal in lijn zullen zijn met de realiteit wanneer bijvoorbeeld op deellast wordt gedraaid - dit geldt onder andere bij energiegebruik). De datakwaliteit laat daarom in alle gevallen nog te wensen over, maar is voor een eerste-orde-LCA prima. De resultaten moeten als gevolg hiervan gezien worden als eerste inschattingen die bij beschikbaar komen van betere informatie verder verfijnd dienen te worden.

Voor de achtergrondprocessen is gebruikgemaakt van de Ecoinvent v3.4 LCA-database (Ecoinvent, 2017), met de versie 'cut off by classification'.

2.5 Gevoeligheidsanalyse

Er is altijd sprake van een bepaald niveau van onzekerheid voor data die wordt gebruikt in een LCA. Ook hier is dat het geval - het gaat dan ook om toekomstige processen. Daarom worden aannames gedaan en bepaalde keuzes gemaakt in de data-inventarisatiefase. De resultaten van de LCA zijn mede daarop gebaseerd, en kunnen gevoelig zijn voor deze aannames en keuzes. Voordat op basis van de eerste resultaten conclusies worden getrokken, is het daarom belangrijk om te kijken hoe groot die gevoeligheid voor bepaalde keuzes is. Daarom worden gevoeligheidsanalyses uitgevoerd voor data met (grote) onzekerheden, om te laten zien of de resultaten heel anders worden als andere aannames waren gedaan/keuzes waren gemaakt. De uitgevoerde gevoeligheidsanalyses zijn beschreven in Paragraaf 4.3.



3 Inventarisatie

Dit hoofdstuk begint met een specifieke beschrijving van de verschillende CCU-projecten en hun alternatieven Paragraaf 3.1.

Na deze beschrijving worden daarna de geïnventariseerde data per stap in het CCU-systeem beschreven. De verschillende stappen zijn:

- CO₂-afvang bij AEC (Paragraaf 3.2) ;
- nabewerking bij AEC - zowel liquefactie als opwaardering/compressie (Paragraaf 3.3);
- liquefactie bij OCAP (Paragraaf 3.4);
- transport (Paragraaf 3.5);
- benutting van CO₂ in de glastuinbouw (Paragraaf 3.6);
- benutting van CO₂ voor opslag (Paragraaf 3.7).

Bedrijfsgevoelige informatie van de afvang en nabewerking bij de AECs is niet beschreven in dit hoofdstuk, maar is beschikbaar in een losse bijlage per bedrijf.

3.1 CCU-projecten

3.1.1 Overzicht CCU-projecten

Omdat er niet het hele jaar door vraag is naar externe CO₂ vanuit de glastuinbouw, zullen de afvalenergiebedrijven niet het hele jaar op vollast kunnen draaien. Er zijn twee manieren om hiermee om te gaan meegenomen in deze studie: óf de CO₂-afvanginstallatie is niet het hele jaar operationeel, óf de CO₂ die wordt afgevangen wordt ondergronds opgeslagen (carbon capture and storage, CCS). Er moet hier worden opgemerkt dat CCU in de glastuinbouw en CCS maar twee van de vele mogelijkheden voor toepassing van CO₂ zijn: CO₂ kan ook op andere manieren worden benut als grondstof. Deze andere CCU-routes zijn in sommige gevallen al op grote schaal toepasbaar; een voorbeeld is de Compensatiesteen (RuwBouwGroep, sd). Daarnaast is de verwachting dat daar komende jaren nog meer CCU-technieken op hogere TRL-niveaus komen.

In Tabel 3 zijn de meegenomen CCU-projecten en de alternatieven per project beschreven. HVC heeft geen plannen voor CCS en zal niet op vollast draaien. CCS is hierbij wel mogelijk met behulp van trucktransport naar het OCAP-netwerk maar is in deze studie niet meegenomen omdat HVC dit niet als een realistisch projectalternatief beschouwt. Bij AEB en AVR is, door de aansluiting aan de OCAP-leiding, direct via de OCAP-leiding de mogelijkheid voor CCS. Door de AVR wordt dit niet als realistisch projectalternatief gezien. Voor AEB wordt zowel een alternatief mét en zonder CCS meegenomen.

Verder is per AEC het biogene CO₂-aandeel in de geleverde CO₂ weergegeven gegeven in Tabel 3. Zoals te zien geldt voor het aandeel biogeen CO₂ van HVC een range. Dit komt omdat de afvanginstallatie wordt verbonden aan zowel de BEC- als AEC-lijn, waarin het aandeel biogeen afval respectievelijk 100 en 63,6% is. Naar verwachting wordt CO₂ 50/50 aangeleverd vanuit de twee verschillende lijnen. Dit zou leiden tot een biogeen aandeel van 82%. In deze LCA-studie is ervoor gekozen om voor zowel 100% als 63,6% de resultaten te presenteren, omdat de verdeling niet met zekerheid kan worden vastgesteld maar de resultaten altijd binnen deze range zullen liggen. Voor de overige AECs ligt het aandeel biogeen CO₂ ook op 63,6%, conform (RIVM, 2018).



Tabel 3 - CCU-projecten meegenomen in LCA

CCU-projectalternatief	Draaiuren per jaar	Hoeveelheid geleverde nabewerkte CO ₂ per jaar	Aandeel biogeen CO ₂
AEB CCU	-5.000 uur	275 kton nabewerkte CO ₂	63,6 gewichts%
AEB CCU+CCS	-8.182 uur	CCU: 275 kton nabewerkte CO ₂ CCS: 175 kton nabewerkte CO ₂	63,6 gewichts%
AEB CCS	-8.182 uur	450 kton nabewerkte CO ₂	63,6 gewichts%
AVR CCU	-5.000 uur	250 kton nabewerkte CO ₂	63,6 gewichts%
HVC CCU	-5.000 uur	75 kton nabewerkte CO ₂	63,6-100 gewichts%

Toelichting: De hoeveelheid geleverde CO₂ is leidend, de draaiuren zijn een inschatting en niet per se gelijk aan vollasturen.

Naast de hoeveelheid geleverde CO₂ per jaar en het aandeel biogeen CO₂ is er ook een verschil in nabewerkingsstappen en dus in het type geleverde CO₂. Bij HVC wordt de afgevangen CO₂ vervloeid en opgewaardeerd, waarna het aan de glastuinbouw wordt geleverd per vrachtwagen². Bij AEB en AVR wordt de afgevangen CO₂ bij de AEC opgewaardeerd en gecompriemd tot de gewenste zuiverheid en druk voor het OCAP-netwerk (99,5% resp. 20 Bar). De CO₂ van AEB en AVR wordt vervolgens via het OCAP-netwerk, op twee verschillende manieren aan de glastuinbouw geleverd: gasvormig (direct via het netwerk) en vloeibaar (met behulp van een liquefactie-unit aan het OCAP-netwerk). Het deel van de CO₂ dat door AEB en AVR wordt geleverd dat na levering aan het OCAP-netwerk wordt vervloeid, is gelijk aan het deel van de totale CO₂ bij OCAP die vloeibaar wordt gemaakt, namelijk 18,75%³. Met andere woorden, van elke ton CO₂ op de OCAP-leiding wordt 0,1875 ton vervloeid. Van elke ton die de AECs aan OCAP leveren wordt dus ook 0,1875 ton vervloeid. Per projectalternatief is het type CO₂ en waarvandaan deze geleverd wordt, getoond in Tabel 4.

Tabel 4 - Aandeel CCU gasvormig, CCU vloeibaar en CCS per ton geleverde CO₂ per CCU-projectalternatief

CCU-projectalternatief	Aandeel geleverde CO ₂ gasvormig naar glastuinbouw	Aandeel geleverde CO ₂ vloeibaar naar glastuinbouw	Aandeel geleverde CO ₂ gasvormig naar CCS
AEB CCU	81,25%	18,75%	N.v.t.
AEB CCU + CCS	49,65%	11,44%	38,89%
AEB CCS	N.v.t.	N.v.t.	100%
AVR CCU	81,25%	18,75%	N.v.t.
HVC CCU	N.v.t.	100%	N.v.t.

3.1.2 AEB

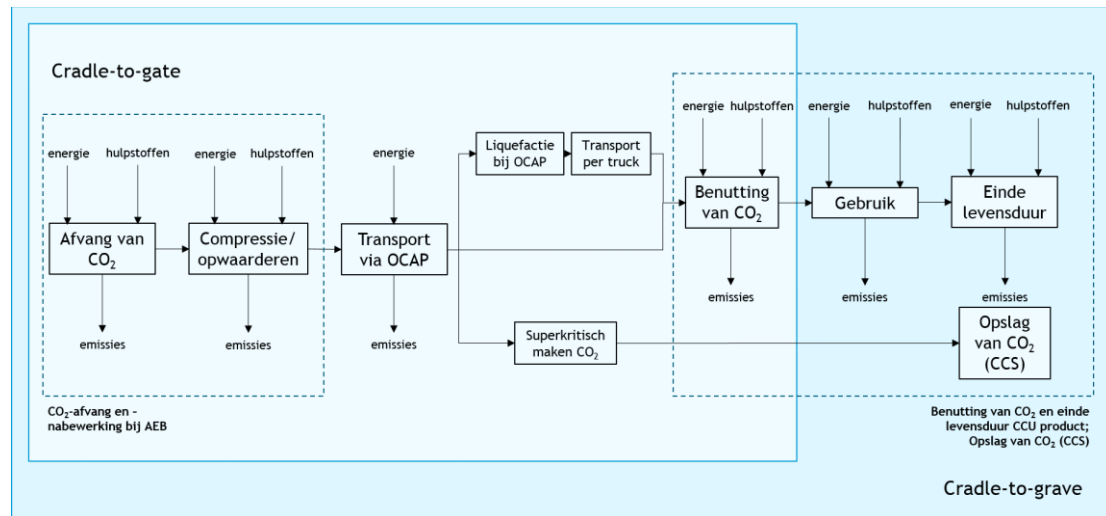
AEB Amsterdam is een afvalverbrandingsinstallatie waaruit warmte aan het warmtenet in Amsterdam wordt geleverd. AEB ligt op een gunstige locatie ten opzichte van de OCAP-pijpleiding, en kan hierop dus worden aangesloten. De inschatting is dat het biogene CO₂-aandeel van de af te vangen CO₂ bij AEB ongeveer 63,6% is. De systeemgrenzen van CO₂-afvang en -benutting bij AEB zijn weergegeven in Figuur 3.

² Het gaat hierbij om de glastuinbouwgebieden Alton, Agriport en Grootslag in Noord-Holland.

³ 0,15 Mton vloeibaar op een totaal van 0,8 Mton CO₂.



Figuur 3 - Systeemgrenzen CO₂-afvang en -benutting bij AEB



Voor AEB worden drie varianten bekeken, die we hieronder elk kort omschrijven:

1. CCU

In het projectalternatief CCU kijken we naar CO₂ afgevangen in het groeiseizoen en volledige toepassing in de glastuinbouw. Het gaat hierbij om een afzet van 275 kiloton vloeibare en gasvormige CO₂ per jaar, bij ongeveer 5.000 draaiuren. 81,25% van de afgezette CO₂ wordt gasvormig afgezet via het OCAP-netwerk en de rest wordt vloeibaar gemaakt in de OCAP-liquefactie-installatie en daarna getransporteerd per truck.

2. Gecombineerde CCU en CCS

In het projectalternatief waarin CCU en CCS gecombineerd worden kijken we naar de afzet van 450 kiloton vloeibare en gasvormige CO₂ per jaar bij ongeveer 8.182 draaiuren. Hiervan wordt 275 kiloton afvangen en toegepast in het groeiseizoen in de glastuinbouw, de rest wordt superkritisch gemaakt en opgeslagen. 49,65% van de afgezette CO₂ wordt gasvormig afgezet via het OCAP-netwerk en de overige CO₂ die niet opgeslagen wordt via CCS (11,44%) wordt vloeibaar gemaakt in de OCAP-liquefactie-installatie en daarna getransporteerd per truck.

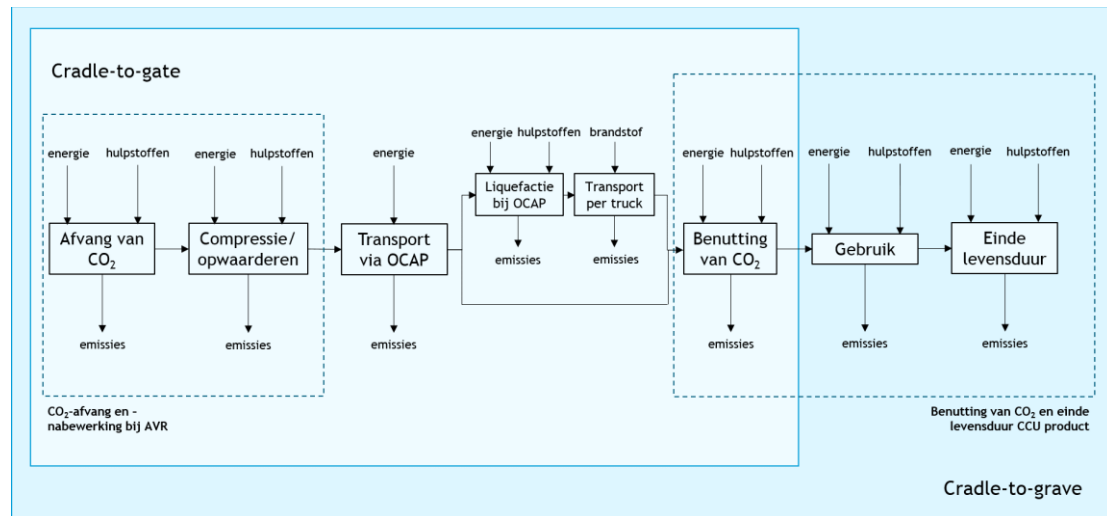
3. CCS

In het projectalternatief CCS kijken we naar de afzet van 450 kiloton gasvormige CO₂ per jaar voor CO₂-opslag.

3.1.3 AVR

AVR Rozenburg is een afvalcentrale met een bioenergiecentrale, waarvan de warmte uit beide processen geleverd wordt aan het warmtenet van Rotterdam; met het resterende deel wordt elektriciteit geproduceerd. Een eventuele CO₂-afvanginstallatie bij AVR Rozenburg (onderwerp van deze studie), zal worden gekoppeld aan de OCAP-pijpleiding. De inschatting is dat het biogene CO₂-aandeel van de af te vangen CO₂ bij AVR ongeveer 63,6% is. De systeemgrenzen van CO₂-afvang en -benutting bij AVR zijn weergegeven in Figuur 4.

Figuur 4 - Systeemgrenzen CO₂-afvang en -benutting bij AVR

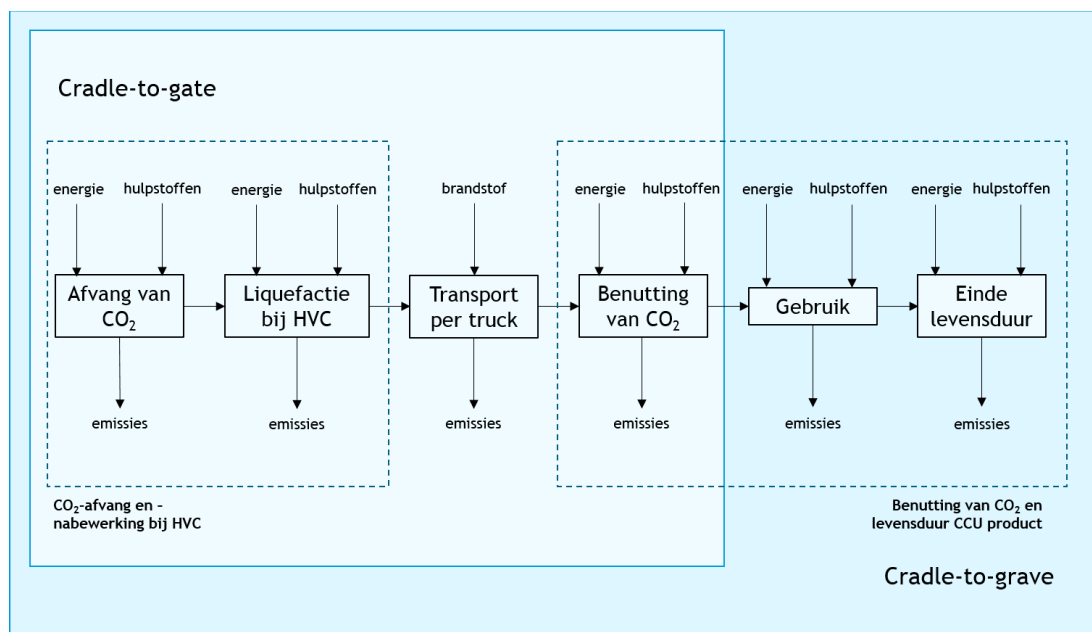


Voor AVR kijken we naar CCU. In het projectalternatief CCU kijken we naar CO₂ afgevangen in het groeiseizoen en volledige toepassing in de glastuinbouw. Het gaat hierbij om een afzet van 250 kiloton vloeibare en gasvormige CO₂ per jaar, bij ongeveer 5.000 draaiuren. 81,25% van de afgezette CO₂ wordt gasvormig afgezet via het OCAP-netwerk en de rest wordt vloeibaar gemaakt in de OCAP-liquefactie-installatie en daarna getransporteerd per truck.

3.1.4 HVC

HVC Alkmaar is een AEC met een bioenergiecentrale (BEC), die beide elektriciteit leveren en warmte leveren aan het warmtenet in Alkmaar. Sinds 2018 is er een pilotschaal CO₂-afvanginstallatie in gebruik genomen bij de BEC. Hieruit wordt 4.000 ton biogeen CO₂/jaar (0,5 ton CO₂/uur) afgevangen. Doel is opschaling naar een demonstratie-installatie (naar 15 ton CO₂/uur, met een productie van ~75.000 ton vloeibare CO₂ per jaar) met een aansluiting vanaf zowel de BEC als Lijn 4 van de AEC. De inschatting is dat het biogene CO₂-aandeel van de af te vangen CO₂ bij HVC daarom tussen de 63,6 en 100% kan liggen. De systeemgrenzen van CO₂-afvang en -benutting bij HVC zijn weergegeven in Figuur 5.

Figuur 5 - Systeemgrenzen CO₂-afvang en -benutting bij HVC



Voor HVC bekijken we één projectalternatief. Waarin HVC glastuinbouwgebieden in het noorden van Noord-Holland van CO₂ voorziet, deze CO₂ wordt per vrachtwagen getransporteerd. Het gaat hierbij om een afzet van 75 kiloton vloeibare CO₂ per jaar bij ongeveer 5.000 draaiuren.

3.2 CO₂-afvang

De geplande CO₂-afvanginstallaties bij alle drie de AECs gebruiken absorptie als afvangtechniek. De capaciteit van de installaties verschilt per bedrijf, alsmede het aantal draaiuren waarop deze actief zullen zijn. Dit laatste is afhankelijk van of er gepland is om niet alleen CCU maar ook CCS toe te passen (zie Tabel 3 en de rest van Paragraaf 3.1.1).

De CO₂-rijke productstroom na de afvangstap zal nog onzuiverheden bevatten, met name water. De productstroom zal in de nabewerkingsstap verder worden gezuiverd (zie Paragraaf 3.3). Voor AEB en HVC is in de aangeleverde data gegeven wat het verschil is tussen afvang en levering. Bij deze centrales is het daarom mogelijk om onderscheid te maken tussen 'Afgevangen CO₂' en 'Geleverde CO₂'. Dit is nuttig, omdat de afvangtechniek voor alle installaties in de basis gelijk is, maar de nabewerking anders vanwege de verschillen in transport (gasvormig via pijpleiding of vloeibaar per vrachtwagen). Waar mogelijk, is dit onderscheid daarom meegenomen. Voor AVR zijn alle gegevens een combinatie van afvang en nabewerking.

In Tabel 5 zijn de gegevens en de bijpassende Ecoinvent-processen gegeven voor onderdelen voor de CO₂-afvang. De hoeveelheden per gebruikt onderdeel zijn te vinden in de losse bedrijfsbijlages. De CO₂-footprint van de solvent is bij geen van de bedrijven bekend, daarom is voor alle bedrijven dezelfde benadering van type solvent gebruikt: monoethanolamine (MEA). Tot slot is het mogelijk dat warmtegebruik ten koste gaat van in het nulalternatief al nuttig gebruikte warmte (zoals bijvoorbeeld in een warmtenet of voor

elektriciteitsopwekking); deze zogenaamde warmte- en elektriciteitsderving is ook meegenomen in de analyse.

Tabel 5 - Data-inventarisatie van CO₂-afvang

Input	Ecoinvent v 3.4-proces/Methode modellering
Solvent	Monoethanolamine {GLO} market for
Elektriciteit	Niet op Ecoinvent gebaseerd. CO ₂ -kental van gemiddelde Nederlandse elektriciteitsmix van (CO ₂ emissiefactoren.nl, 2017)
Warmte	Elektriciteitsderving (x MJe/MJth), zie 'elektriciteit'
Actief kool	Activated carbon, granular {GLO} market for activated carbon, granular
Natronloog	Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {GLO} market for
Instrumentgas	Nitrogen, liquid {RER} market for
Koelwater	Tap water {Europe without Switzerland} market for
Demiwater	Water, deionised, from tap water, at user {Europe without Switzerland} market for water, deionised, from tap water, at user
Outputs	Ecoinvent v 3.4-proces/Methode modellering
Actief koolafval	Hard coal ash {NL} treatment of, residual material landfill
Afvalwater	Wastewater from glass production {RoW} treatment of, capacity 1.1E10l/year

3.3 Nabewerkingsstap afgevangen CO₂ bij AEC

Comprimeren en opwaardering CO₂ (AEB en AVR)

AEB Amsterdam en AVR Rozenburg zullen worden aangesloten aan de OCAP-pijpleiding. Om te voldoen aan de specificaties van het CO₂ in de pijpleiding, wordt de afgevangen CO₂ gecompriemd en opgewaardeerd. Hier wordt vooral water uit het afgevangen CO₂ gehaald en wordt het gas op de juiste druk gebracht. Na opwaardering is het aandeel CO₂ in het product als volgt (de rest is vooral water):

- AEB: 99,97 massa% CO₂;
- AVR: >99 massa% CO₂.

Liquefactie (HVC)

HVC Alkmaar ligt niet aan de OCAP-pijpleiding, en de afgevangen CO₂ zal daarom worden getransporteerd naar de glastuinbouw in vrachtwagens. Om dit te kunnen doen, wordt de CO₂ met behulp van liquefactie vloeibaar gemaakt. Na liquefactie zal de geleverde CO₂ van HVC 99 massa% CO₂ bevatten.

Voor liquefactie en compressie/opwaardering zijn de processen gebruikt zoals weergegeven in Tabel 6. De hoeveelheden per gebruikt onderdeel zijn te vinden in de losse bedrijfsbijlages. Het is mogelijk dat warmtegebruik ten koste gaat van in het nulalternatief al nuttig gebruikte warmte (zoals bijvoorbeeld in een warmtenet of voor elektriciteitsopwekking); deze zogenaamde warmte- en elektriciteitsderving is ook meegenomen in de analyse.

Tabel 6 - Data-inventarisatie van nabewerking van afgevangen CO₂

Inputs	Ecoinvent v 3.4-proces/Methode modellering
Afgevangen CO ₂ -gas	Niet van toepassing, gemodelleerd door CE Delft zoals beschreven in Paragraaf 3.2.
Elektriciteit	Niet op Ecoinvent gebaseerd. CO ₂ -kental van gemiddelde Nederlandse elektriciteitsmix van (CO ₂ emissiefactoren.nl, 2017)
Warmte	Elektriciteitsderving (x MJe/MJth), zie 'elektriciteit'
Instrumentgas	Nitrogen, liquid {RER} market for
Silicagel	Sodium silicate, solid {GLO} market for
Koelwater	Tap water {Europe without Switzerland} market for
Demiwater	Water, deionised, from tap water, at user {Europe without Switzerland} market for water, deionised, from tap water, at user
Outputs	Ecoinvent v 3.4-proces/Methode modellering
CO ₂ -emissie naar lucht	Geen, is een emissie naar lucht
Silicagel-afval	Municipal solid waste {NL} treatment of, incineration
Afvalwater	Wastewater from glass production {RoW} treatment of, capacity 1.1E10l/year

3.4 Liquefactie bij OCAP

Een deel van de aan het OCAP-netwerk geleverde CO₂ zal niet (gelijk) kunnen worden afgezet in de glastuinbouw die aan het netwerk ligt. Daarom is OCAP van plan een liquefactie-unit te bouwen aan het OCAP-netwerk; zo kan overvloedige CO₂ vloeibaar worden gemaakt en naar de noordelijke tuinbouwgebieden in Noord-Holland worden gebracht om daar in de CO₂-vraag te voorzien waar HVC niet aan kan voldoen.

In Paragraaf 3.1.1 en Tabel 4 is beschreven welk aandeel van de CO₂ op de OCAP-pijpleiding zal worden vervloeid, en wat dat voor ieder doorgerekend scenario betekent (per ton geleverde CO₂). In Tabel 7 is de data-inventarisatie van liquefactie bij OCAP te zien.

Tabel 7 - Data-inventarisatie van vervloeiing van CO₂ uit OCAP-netwerk

Inputs	Hoeveelheid (per ton vloeibare CO ₂)	Ecoinvent v 3.4-proces/Methode modellering
Elektriciteit	75 kWh	Niet op Ecoinvent gebaseerd. CO ₂ -kental van gemiddelde Nederlandse elektriciteitsmix van (CO ₂ emissiefactoren.nl, 2017)

3.5 Transport van AEC naar glastuinbouw

De door AEB en AVR geleverde CO₂ wordt op twee manieren getransporteerd door OCAP: het gasvormige deel via de OCAP-pijpleiding, en het vloeibare deel per vrachtwagen. De door HVC geleverde CO₂ wordt na vervloeiing per vrachtwagen naar de glastuinbouw getransporteerd.

3.5.1 Transport via OCAP-pijpleiding (AEB en AVR)

Voor transport van gasvormig CO₂ per pijpleiding is energie nodig. In Tabel 8 zijn de gebruikte data en Ecoinvent-processen te vinden. Het elektriciteits- en warmteverbruik is door OCAP aangeleverd per jaar. We zijn ervan uitgegaan dat deze gegevens betrekking hebben op de huidige situatie, en hebben het energieverbruik/ton CO₂ daarom berekend door het elektriciteits- en aardgasverbruik/jaar te delen door 600.000 ton CO₂; de huidige hoeveelheid CO₂ op de OCAP-pijpleiding.



Tabel 8 - Data-inventarisatie van transport per OCAP-pijpleiding

Inputs	Hoeveelheid (per ton CO ₂ op de OCAP-pijpleiding)	Ecoinvent v 3.4-proces/ Methode modellering
Elektriciteit (kWh)	0,065 kWh	Niet op Ecoinvent gebaseerd. CO ₂ -kental van gemiddelde Nederlandse elektriciteitsmix van (CO ₂ emissiefactoren.nl, 2017)
Aardgasverbruik (m ₃)	0,286 m ³	Natural gas, high pressure {NL} market for
Outputs	Hoeveelheid (per ton CO ₂ op de OCAP-pijpleiding)	Ecoinvent v 3.4-proces/ Methode modellering
CO ₂ -emissie door aardgasverbranding (kg)	0,177 kg	Geen, is een emissie naar lucht

3.5.2 Transport met vrachtwagens (HVC en OCAP)

Voor zowel OCAP als HVC geldt dat is aangenomen dat het type vrachtwagen dat wordt gebruikt een trekker-oplegger (zwaar, EURO 6) is. Deze vrachtwagen rijdt op diesel. Zowel de heenweg (beladen) als de terugweg (onbeladen) worden meegenomen in de LCA. De CO₂-impact van vrachtwagentransport is gemodelleerd op basis van het emissiekental uit STREAM Goederenvervoer (CE Delft, 2017).

Bij het wegtransport zullen ook andere emissies vrijkomen: NO_x, fijnstof en SO₂ bijvoorbeeld. Dit zijn geen broeikasgassen en worden dus niet in de CO₂-eq.-footprint meegenomen. In deze LCA zijn deze stoffen niet meegenomen, maar het is belangrijk om op te merken dat de emissie van deze stoffen zal veranderen ten opzichte van het nulalternatief.

Tabel 9 - Data-inventarisatie van vrachtwagentransport

Inputs	Hoeveelheid (per ton CO ₂ vervloeid)	Ecoinvent v 3.4-proces/ Methode modellering
Vrachtwagentransport (tkm)	40 tkm (HVC) 60 tkm (OCAP)	Niet van toepassing, gebaseerd op (CE Delft, 2017) zoals beschreven in Paragraaf 3.5.2.

3.6 CO₂-benutting in de glastuinbouw

In de glastuinbouw wordt CO₂ als bemesting voor gewassen toegepast om snellere groei van planten te stimuleren. Daarom wordt CO₂ vaak als bemesting in kassen toegevoegd. Afgevangen CO₂ kan hiervoor worden gebruikt. Het is belangrijk om op te merken dat de CO₂-reductie door het CCU-systeem met deze toepassing niet plaatsvindt omdat de gewassen CO₂ opnemen; deze opslag is immers slechts van korte duur (tot consumptie van het gewas). De milieuwinst zit hier in de substitutie van het referentiesysteem.

Referentiesysteem

Op dit moment wordt op verschillende manieren voorzien in de CO₂-vraag van de glastuinbouw. Een deel van de CO₂ wordt geproduceerd uit eigen gasbranders of WKKs, een ander deel is afkomstig van externe bronnen. In de komende jaren zullen naar verwachting steeds meer glastuinbouwers overstappen op alternatieve warmtebronnen, en zal er dus minder aardgas worden verstoekt in de kassen.

Er zijn op dit moment vier redenen voor de glastuinbouw om externe CO₂ in te zetten:

1. Wanneer er gebruik wordt gemaakt van alternatieve warmtebronnen waaruit geen CO₂ vrijkomt, zoals bijvoorbeeld geothermie of warmte van een warmtenet.
2. Wanneer er geen warmtevraag is (bijvoorbeeld in de zomermaanden) - hiermee wordt voorkomen dat er aardgas wordt verbrand voor alleen CO₂-productie (dat gebeurt in huidige situatie, zomerstook genoemd).
3. Wanneer er sprake is van gevoelige gewassen die alleen met CO₂ met een hoge zuiverheid kunnen worden bemest (zoals bloemen).
4. Wanneer erbovenop de CO₂ uit aardgasgebruik, extra CO₂ wordt toegevoegd om de plantgroei nog meer te stimuleren.

Omdat de externe CO₂ die op dit moment wordt toegepast voor Reden 3 en 4 in de glastuinbouw een voornamelijk **fossiele** oorsprong heeft, kan gebruik van externe CO₂ van de AECs die fossiele emissies (voor een deel) reduceren in het geval van Reden 3 en 4. Daarnaast leidt het gebruik van externe CO₂ van de AECs in het geval van Reden 2 tot minder aardgasverbranding.

Een lastig te modelleren situatie is wanneer CO₂ wordt toegepast bij een alternatieve warmtebron (Reden 1). Wanneer er externe CO₂ moet worden toegepast omdat er hernieuwbare warmte wordt gebruikt in de kas, moet het klimaatvoordeel van het gebruik van externe CO₂ in combinatie met hernieuwbare warmtebronnen worden toegerekend aan zowel de productie van hernieuwbare warmte als de levering van externe CO₂. Het gaat hier alleen om CO₂ die moet worden toegevoegd op de momenten dat er warmtebehoefte is, anders gaat het om vervanging van zomerstook (Reden 2). Omdat zowel hernieuwbare warmtebronnen als de levering van externe CO₂ nodig zijn voor CO₂-reductie ten opzichte van de huidige situatie, rekenen we in zowel 2024 en 2030 50% van het klimaatvoordeel van een vermindering in aardgasgebruik toe aan het gebruik van in de AECs afgevangen CO₂. Er is meer onderzoek nodig om deze allocatieverdeling definitief vast te stellen⁴. In de resultaten laten we het toerekenen van zowel 0 als 100% van het milieuvoordeel aan het gebruik van in de AECs afgevangen CO₂ zien door middel van voetbalken (zie Hoofdstuk 4).

Tot slot is de vraag of de referentie voor de geleverde CO₂ voor Reden 1 en 2 inderdaad extern geleverde **fossiele** CO₂ blijft in 2030 en voor Reden 3 en 4 CO₂ uit aardgasverbranding blijft. De vraag is dus eigenlijk: 'Hoe lang kun je aan blijven geven dat er bij een ton geleverde CO₂ aardgasverbranding vermeden wordt, en op welk moment is het logischer om bijvoorbeeld aan te nemen dat er gebruik van biogas vermeden wordt?' Dit hangt volledig van de marktsituatie af in de toekomst, en is moeilijk te voorspellen. Omdat de gehele economie decarboniseert door de tijd heen nemen we aan dat de CO₂-emissiereductie per ton geleverde CO₂ afneemt met het WLO-scenario, zie voor een toelichting hierop de MKBA-studie. We gaan in deze studie uit van een CO₂-emissiereductie per ton geleverde CO₂ van 66,5% in 2030 en van 76,0% in 2024 op basis van het WLO-scenario Laag.

Verdeling over de vier redenen - lange termijn

In een studie die CE Delft uitvoert in combinatie met WEER, is een verdeling bepaald over de vier redenen voor het toedienen van CO₂ in de glastuinbouw in 2030. Deze verdeling is weergegeven in Tabel 10.

⁴ Op dit moment werkt CE Delft samen met WEER aan een onderzoek naar deze verdeling.

Tabel 10 - (Reden voor) CO₂-vraag in glastuinbouw in 2030 in Nederland

Reden voor CO ₂ -vraag	Nederlands gemiddelde 2030
CO ₂ -gebruik in de zomer	11,2%
Hernieuwbare warmtebron - warmteallocatie	36,3%
Hernieuwbare warmtebron - externe CO ₂ -allocatie	36,3%
Gevoelige gewassen en extra stimuleren plantgroei	16,1%
TOTALE AARDGASREDUCTIE	47,5% * 66,5% = 31,6%
TOTALE FOSSIELE CO ₂ -REDUCTIE UIT ANDERE EXTERNE BRON	16,1% * 66,5% = 10,7%

Toelichting: Gemiddelde over redenen is bepaald door een gewogen gemiddelde te maken tussen de minimale en maximale inzet van externe CO₂.

Verdeling over de vier redenen - korte termijn

Er is geen informatie bekend over de verdeling over de redenen van gebruik van externe CO₂ in het OCAP-gebied en de glastuinbouw in het noorden van Noord-Holland óf een gemiddelde van Nederland op de korte termijn (2024). Naar deze verdeling wordt nog onderzoek verricht⁵. Daarom maken we hier gebruik van een voorlopige inschatting over de vier redenen op basis van gegevens over:

- De ontwikkeling van duurzame energievraag in de glastuinbouw tussen 2010 (WECR, 2018) en 2030 (WECR, 2016).
- De CO₂-vraag in de glastuinbouw in 2008 die onafhankelijk is van een hernieuwbare warmtebron (LEI, 2010) en de CO₂-vraag in 2030 (studie CE Delft en WECR). Dit is dus CO₂ die gebruikt wordt in een van de drie andere redenen, dan voor hernieuwbare warmte.

Door beiden lineair door te trekken tussen 2008/2010 en 2030 kan een inschatting gemaakt worden naar de verdeling over de redenen voor vraag naar externe CO₂ in het kortetermijn-scenario. De inschatting is weergegeven in Tabel 11.

Tabel 11 - (Reden voor) CO₂-vraag in glastuinbouw in 2024 in Nederland

Reden voor CO ₂ -vraag	Nederlands gemiddelde 2024
CO ₂ -gebruik in de zomer	13,2%
Hernieuwbare warmtebron - warmteallocatie	34,0%
Hernieuwbare warmtebron - externe CO ₂ -allocatie	34,0%
Gevoelige gewassen en extra stimuleren plantgroei	18,9%
TOTALE AARDGASREDUCTIE	47,2% * 76,0% = 35,9%
TOTALE FOSSIELE CO ₂ -REDUCTIE UIT ANDERE EXTERNE BRON	18,9% * 76,0% = 14,4%

⁵ Op dit moment werkt CE Delft samen met WECR aan een onderzoek naar de reden voor CO₂-vraag in de glastuinbouw in heel Nederland omstreeks 2024.

Tabel 12 - Data-inventarisatie van benutting van afgevangen, vloeibaar CO₂ in de glastuinbouw

Inputs	Hoeveelheid 2024 (per ton vloeibaar CO ₂ benut in de glastuinbouw)	Hoeveelheid 2030 (per ton vloeibaar CO ₂ benut in de glastuinbouw)	Ecoinvent v 3.4-proces/ Methode modellering
Vloeibaar CO ₂ (ton)	1 ton (waarvan een deel biogeen)	1 ton (waarvan een deel biogeen)	Niet van toepassing, gemodelleerd door CE Delft zoals beschreven in Paragraaf 3.3.
Outputs	Hoeveelheid 2024 (per ton vloeibaar CO ₂ benut in de glastuinbouw)	Hoeveelheid 2030 (per ton vloeibaar CO ₂ benut in de glastuinbouw)	Ecoinvent v 3.4-proces/ Methode modellering
CO ₂ -emissies bij einde levensduur (ton)	1 ton (waarvan een deel biogeen)	1 ton (waarvan een deel biogeen)	Geen, het is een emissie naar lucht
Referentie	Hoeveelheid 2024 (per ton vloeibaar CO ₂ benut in de glastuinbouw)	Hoeveelheid 2030 (per ton vloeibaar CO ₂ benut in de glastuinbouw)	Ecoinvent v 3.4-proces/ Methode modellering
Vermeden CO ₂ -emissies door aardgastoevoer (ton)	(-)150 m ³	(-)132 m ³	Natural gas, high pressure {NL} market for
Vermeden CO ₂ -emissies door aardgasverbranding (ton)	(-)0,359 ton	(-)0,316 ton	Geen, is een emissie naar lucht
Vermeden CO ₂ -emissies van ander fossiel CO ₂ -gebruik (ton)	(-)0,144 ton	(-)0,107 ton	Geen, is een emissie naar lucht

3.7 Carbon Capture & Storage (CCS)

Naast CCU is er ook de mogelijkheid om CO₂ af te vangen en ondergronds op te slaan (CCS). Omdat de OCAP-pijpleiding gunstig ligt ten opzichte van de Noordzee, wordt gepland om de OCAP-pijpleiding te voorzien van een verbinding met een offshore netwerk ten behoeve van CCS, om daar CO₂ in lege gasvelden op te slaan. Hiervoor wordt een koppeling gerealiseerd met het Porthos-netwerk. Havenbedrijf Rotterdam, Energie Beheer Nederland (EBN) en N.V. Nederlandse Gasunie zijn de initiatiefnemers. Het is op deze manier mogelijk voor de OCAP-bedrijven om het hele jaar door CO₂ te leveren, niet alleen tijdens het seizoen waarin er vraag vanuit de glastuinbouw is. Bij AEB zit CCS in de plannen voor CO₂-afvang. De 450 kton geleverde CO₂ zal dan ook voor een deel naar de glastuinbouw gaan, en voor een deel worden opgeslagen.

Voor CO₂-opslag door Porthos is van het volgende uitgegaan. Voor CCS zal CO₂ moeten worden afgevangen, gecomprimeerd en opgewaardeerd voor levering aan OCAP, getransporteerd worden over de OCAP-pijpleiding en in een compressor worden gecomprimeerd tot de superkritische fase. Daarna kan de superkritische CO₂ worden geïnjecteerd in het gasveld en zo worden opgeslagen. Het verschil met toepassing in de glastuinbouw zijn de compressiestap en de injectie, waarvoor extra energie nodig is. Daarnaast zal de afgevangen CO₂ bij CCS niet meer geëmitteerd worden - in tegenstelling tot de CCU-route in de glastuinbouw. Doordat een deel van het afval en daarmee een deel van de CO₂ een biogene oorsprong heeft en daarom niet altijd wordt meegenomen in de emissiebalansen, kan worden gesteld dat de opslag van deze CO₂ leidt tot negatieve fossiele CO₂-emissies. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat dit biogene voordeel nu wordt toegerekend aan de verbranding in de AEC en de CO₂-kwaliteit van de elektriciteit en warmte die daar uitkomen. Bij het toerekenen aan eventuele CO₂-projecten zou de elektriciteit en warmte niet meer groen en CO₂-neutraal genoemd mogen worden.

Daarnaast zal er een drukverschil tussen beide leidingennetten overbrugd moeten worden. Het energiegebruik voor de opwerking van CO₂ van 20 bar (OCAP) naar 40 bar (Porthos) is verkregen van OCAP. Het energieverbruik van de CCS-stap is gebaseerd op de eerdere LCA-studie van CE Delft voor het CO₂-SmartGrid (CE Delft, 2018a) van 40 bar naar 130 bar en is gepresenteerd in Tabel 13.

Tabel 13 - Data-inventarisatie van CCS-toepassing van CO₂ op de OCAP-pijpleiding

Inputs	Hoeveelheid (per ton CO ₂ op de OCAP- pijpleiding)	Ecoinvent v 3.4-proces/ Methode modellering
Elektriciteitsgebruik om van 20 naar 40 bar te gaan	25 kWh	Niet op Ecoinvent gebaseerd. CO ₂ -kental van gemiddelde Nederlandse elektriciteitsmix van (CO ₂ emissiefactoren.nl, 2017)
Elektriciteit voor compressie tot superkritische fase (MJ)	100 MJ	Niet op Ecoinvent gebaseerd. CO ₂ -kental van gemiddelde Nederlandse elektriciteitsmix van (CO ₂ emissiefactoren.nl, 2017)
Elektriciteit voor injectie (kWh)	7 kWh	Niet op Ecoinvent gebaseerd. CO ₂ -kental van gemiddelde Nederlandse elektriciteitsmix van (CO ₂ emissiefactoren.nl, 2017)
Outputs	Hoeveelheid (per ton CO ₂ op de OCAP- pijpleiding)	Ecoinvent v 3.4-proces/ Methode modellering
CO ₂ door lekken compressor (kg)	0,0003 kg	Geen, is emissie naar lucht
Opslag biogeen CO ₂ (ton)	(-) 1 ton waarvan; - AEB: 63,6% biogeen	Geen, is opslag van CO ₂

4 Resultaten

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de levenscyclusanalyse van CCU in de glastuinbouw per AEC weergegeven.

4.1 LCA-resultaten voor de verschillende AECs

Om de resultaten van de LCA inzichtelijk te maken, is het mogelijk deze op verschillende manieren te presenteren. Omdat er nog geen algemene methode bestaat voor de milieu-effectbeoordeling van CCU (zoals in Hoofdstuk 2 al kort benoemd), is het daarnaast ook nuttig om de resultaten iets breder te duiden. Een belangrijk aspect hierin is de omgang met biogeen en fossiel CO₂: wordt dit wel of niet meegerekend als een milieu-impact? Daarom zullen de resultaten hier op twee manieren worden gepresenteerd:

1. Alle CO₂-emissies zorgen voor milieu-impact. Hier zorgen zowel biogene als fossiele CO₂-eq.-emissies voor klimaatverandering.
2. Alleen fossiele CO₂-emissies zorgen voor milieu-impact. Hier heeft kortcyclische, biogene CO₂ geen effect op klimaatverandering, alleen CO₂-eq.-emissies van fossiele oorsprong hebben dit effect.

Een ander aspect dat veel invloed heeft op de resultaten is het referentiesysteem (bij CCU in de glastuinbouw: CO₂-voeding van andere (fossiele) oorsprong). In de in deze studie gepresenteerde resultaten zal de substitutie van het referentiesysteem zorgen voor negatieve emissies (en dus een positiever eindresultaat voor de CCU-route). Zoals eerder beschreven in Paragraaf 3.6 is er discussie mogelijk over de allocatie van de CO₂-reductie in de glastuinbouw als zowel externe CO₂-levering als een duurzame warmtebron nodig is om CO₂-emissiereductie te bewerkstelligen. In de basisanalyse hebben we de CO₂-emissiereductie voor 50% toegerekend aan de inzet van externe CO₂, deze is in de resultatenfiguren te zien als een gekleurde balk. Toekomstig onderzoek zal de daadwerkelijke verdeling moeten bepalen. Omdat dit percentage nog onzeker is, laten we door middel van fout-balken de invloed op de resultaten zien van een toerekening van 0 en van 100% aan de inzet van externe CO₂. Dit zijn de uitersten waartussen de verdeling zou kunnen liggen. In de contributieanalyse in Paragraaf 4.2 is zichtbaar wat de bijdrage van dit referentiesysteem aan de totale CO₂-footprint is, maar er zullen in deze studie geen resultaten worden gepresenteerd waarin het referentiesysteem buiten beschouwing wordt gelaten.

Er wordt geen expliciete vergelijking gemaakt tussen de afvang bij de verschillende AECs omdat de data gebruikt in deze studie per AEC verschilt in kwaliteit. En omdat het in alle gevallen gaat om een initiële engineeringstudie per AEC, kunnen de resultaten nog flink veranderen.

4.1.1 Overzicht resultaten

Tabel 14 geeft de resultaten weer voor alle projectalternatieven, waarbij in de meest rechtse kolom antwoord gegeven wordt op vraag: *‘Wat is de CO₂-emissiereductie als 1 ton CO₂ wordt afgevangen en toegepast, ten opzichte van de huidige situatie waarin geen CO₂ afgevangen wordt?’* De resultaten in deze tabel geven de CO₂-emissie(reductie) weer bij toerekening van 50% van de reductie bij levering aan glastuinbouw met een hernieuwbare warmtebron.

Tabel 14 - Overzicht resultaten per projectalternatief - 50% toerekening van CO₂-emissiereductie bij levering aan glastuinbouw met hernieuwbare warmtebron

Projectalternatief	Zichtjaar	CO ₂ -eq.-emissies projectalternatief	CO ₂ -emissies huidige situatie, zonder afvang	CO ₂ -emissiereductie
		<i>(kg CO₂-eq./ton afgevangen CO₂)</i>		
AEB CCU	2024	Fossiele CO ₂ : -2 Alle CO ₂ : 634 kg	Fossiele CO ₂ : 364 kg Alle CO ₂ : 1.000 kg	366
	2030	Fossiele CO ₂ : 83 Alle CO ₂ : 719 kg	Fossiele CO ₂ : 364 kg Alle CO ₂ : 1.000 kg	281
AEB CCU+CCS	2024	Fossiele CO ₂ : -171 Alle CO ₂ : 465 kg	Fossiele CO ₂ : 364 kg Alle CO ₂ : 1.000 kg	535
	2030	Fossiele CO ₂ : -119 Alle CO ₂ : 517 kg	Fossiele CO ₂ : 364 kg Alle CO ₂ : 1.000 kg	483
AEB CCS	2024/2030	Fossiele CO ₂ : -436 Alle CO ₂ : 200 kg	Fossiele CO ₂ : 364 kg Alle CO ₂ : 1.000 kg	800
AVR CCU	2024	Fossiele CO ₂ : -67 Alle CO ₂ : 569 kg	Fossiele CO ₂ : 364 kg Alle CO ₂ : 1.000 kg	431
	2030	Fossiele CO ₂ : 19 Alle CO ₂ : 655 kg	Fossiele CO ₂ : 364 kg Alle CO ₂ : 1.000 kg	345
HVC CCU	2024	Fossiele CO ₂ : -49 Alle CO ₂ : 587 kg	Fossiele CO ₂ : 364 kg Alle CO ₂ : 1.000 kg	413
	2030	Fossiele CO ₂ : 37 Alle CO ₂ : 673 kg	Fossiele CO ₂ : 364 kg Alle CO ₂ : 1.000 kg	327

Tabel 15 laat het verschil tussen de emissiereducties zien wanneer 0 of 100% wordt toegerekend aan de AECs, in het geval van levering aan glastuinbouw met een hernieuwbare warmtebron. De verschillen die we zien komen als volgt tot stand:

- 2024: Een extra reductie van 291 kg CO₂-eq. per ton afgevangen CO₂ bij een toerekening van 100% als alle CO₂ toegepast wordt voor CCU;
- 2024: Een afname van de CO₂-emissiereductie met 291 kg CO₂-eq. per ton afgevangen CO₂ bij een toerekening van 0% als alle CO₂ toegepast wordt voor CCU;
- 2030: Een extra reductie van 272 kg CO₂-eq. per ton afgevangen CO₂ bij een toerekening van 100% als alle CO₂ toegepast wordt voor CCU;
- 2030: Een afname van de CO₂-emissiereductie met 272 kg CO₂-eq. per ton afgevangen CO₂ bij een toerekening van 0% als alle CO₂ toegepast wordt voor CCU.

De afname en toename zijn lager als slechts een deel van de CO₂ gebruikt wordt voor CCU en de rest voor CCS.

We kunnen uit de resultaten voor de ondergrens (0% toerekening) concluderen dat in vergelijking met de huidige situatie - het niet afvangen van CO₂ - er nog steeds een kleine CO₂-emissiereductie behaald wordt, ook al wordt 0% van de toegepaste CO₂ in combinatie met externe warmtevoorziening toegerekend aan de geleverde CO₂.

In het geval van een 100% toerekening aan de geleverde CO₂ kan een emissiereductie behaald worden die in de buurt komt van toepassing van CO₂ voor CCS. Kortom, bij AEB kan een verandering in toerekening leiden tot een verschil in CO₂-emissiereductie tussen de projectalternatieven CCU-CCU/CCS en CCS; hoe lager de toerekening hoe aantrekkelijker de CCS-route wordt.

Tabel 15 - Resultaten bij verschillende toerekening CO₂-emissiereductie aan inzet externe CO₂ - 0%/50%/100%

Projectalternatief	2024			2030		
	(kg CO ₂ -eq./ton afgevangen CO ₂)			(kg CO ₂ -eq./ton afgevangen CO ₂)		
% toerekening	0%	50%	100%	0%	50%	100%
AEB CCU	75	366	658	9	281	553
AEB CCU+CCS	357	535	713	369	483	701
AEB CCS	800	800	800	800	800	800
AVR CCU	140	431	722	73	345	617
HVC CCU	121	413	704	53	327	599

Toelichting: De resultaten voor het projectalternatief AEB CCS veranderen niet en de tabel geeft dus ook geen veranderingen weer.

In de volgende paragrafen gaan we verder in op de resultaten voor de drie verschillende AECs, de resultaten voor AEB zijn beschreven in Paragraaf 4.1.2, voor AVR in Paragraaf 4.1.3, en voor HVC in Paragraaf 4.1.4.

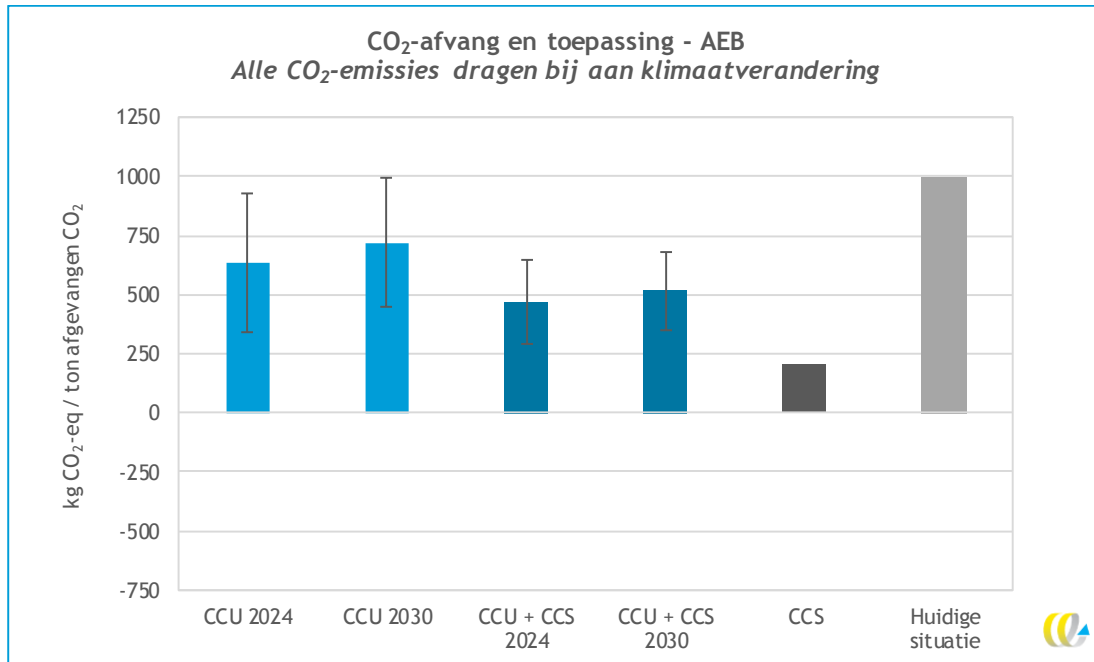
4.1.2 AEB

Figuur 6 laat de resultaten van de LCA voor CCU, CCU+CCS en CCS bij AEB zien van de beoordelingsmethode waarbij alle CO₂-emissies bijdragen aan klimaatverandering (biogene emissies worden meegeteld). In de figuur is te zien dat in al deze projectalternatieven CO₂-reductie plaatsvindt ten opzichte van de huidige situatie. Zoals al eerder genoemd, wordt deze veroorzaakt door de substitutie van de referentie (zie Paragraaf 3.6). Er zullen nog steeds emissies zijn in de projectalternatieven, vanwege emissies uit het CO₂-afvang en -opwaarderingsproces en de CO₂-emissies die vrijkomen in de glastuinbouw. Van de resultaten van de twee projectalternatieven CCU en CCU+CCS komt de laatste iets positiever naar voren omdat een deel van de emissies hier wordt opgeslagen in plaats van geëmitteerd in de glastuinbouw.

Door de CO₂-emissies per projectalternatief te verminderen met de emissies in de huidige situatie waarin CO₂ niet wordt afgevangen (de grijze balk in de figuren) kan antwoord gegeven worden op de hoofdvraag: 'Wat is de CO₂-emissiereductie als 1 ton CO₂ wordt afgevangen en toegepast, ten opzichte van de huidige situatie waarin geen CO₂ afgevangen wordt?' De CO₂-emissiereductie door de gehele keten in 2024 is voor CCU ongeveer 366 kg CO₂-eq. per ton afgevangen CO₂ (of 75 en 658 kg CO₂-eq./ton afgevangen bij resp. 0% en 100%), voor CCU+CCS ongeveer 535 kg CO₂-eq. per ton afgevangen CO₂ (of 357 en 713 kg CO₂-eq./ton afgevangen bij resp. 0% en 100%) en voor CCS ongeveer 800 kg CO₂-eq. per ton afgevangen CO₂ ten opzichte van de huidige situatie waarin geen CO₂ wordt afgevangen en wanneer voor de emissiereductie voor levering van CO₂ aan glastuinbouw met hernieuwbare warmte een toerekening van 50% aan AEB wordt gehanteerd. In de foutbalken in de figuur is de bandbreedte tussen 0-100% toerekening te zien.

In 2030 is de CO₂-emissiereductie lager en komt de reductie door de hele keten uit op 281 kg CO₂-eq. per ton afgevangen CO₂ voor CCU (of 9 en 553 kg CO₂-eq./ton afgevangen bij resp. 0 en 100%), voor CCU+CCS ongeveer 483 kg CO₂-eq. per ton afgevangen CO₂ (of 369 en 701 kg CO₂-eq./ton afgevangen bij resp. 0% en 100%) en voor CCS ongeveer 800 kg CO₂-eq. per ton afgevangen CO₂ ten opzichte van de huidige situatie waarin geen CO₂ wordt afgevangen en wanneer voor de emissiereductie voor levering van CO₂ aan glastuinbouw met hernieuwbare warmte een toerekening van 50% aan AEB wordt gehanteerd. In de foutbalken in de figuur is de bandbreedte tussen 0-100% toerekening te zien.

Figuur 6 - Klimaatimpact CO₂-afvang bij AEB en toepassing van CO₂ in glastuinbouw en/of CCS per ton afgevangen CO₂, inclusief biogene CO₂-emissies

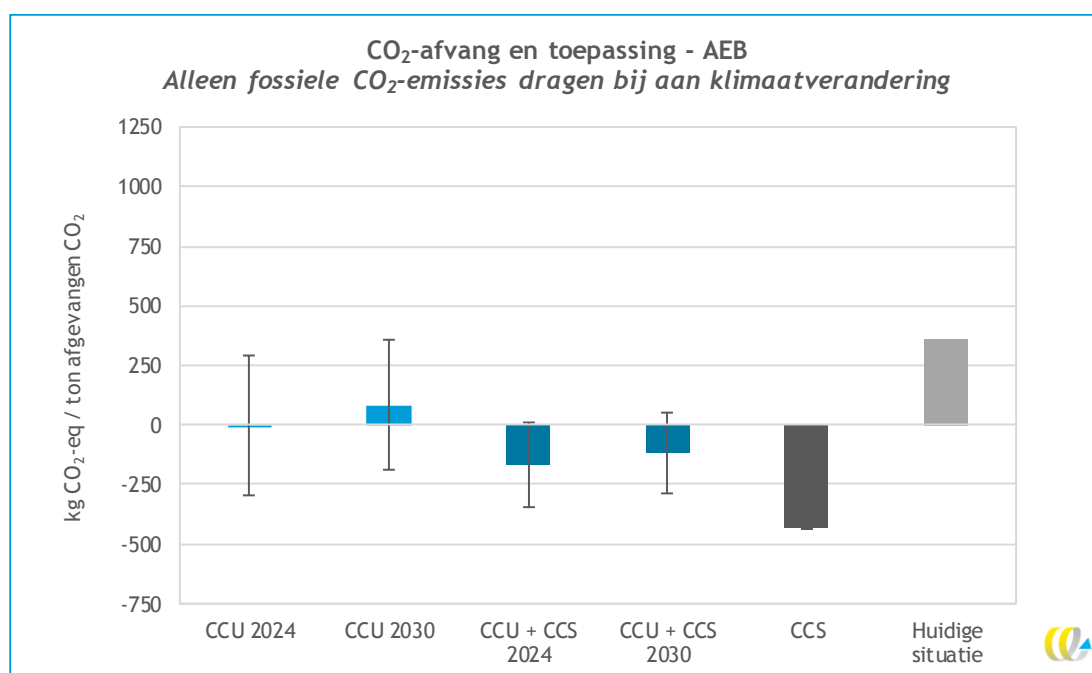


- Let op: Deze figuur geeft alle CO₂-emissies weer, ook biogene CO₂-emissies.
- Toelichting 1: Hoe lager de kg CO₂-eq. per ton afgevangen CO₂, hoe hoger de CO₂-emissiereductie ten opzichte van de huidige situatie.
- Toelichting 2: De gekleurde balken in de figuur die een projectalternatief weergeven met CCU als optie, geven de emissie weer wanneer 50% van emissiereductie die wordt behaald wanneer de CO₂ wordt geleverd aan glastuinbouw met hernieuwbare warmtebron, wordt toegerekend aan de AEC. De foutbalken geven de bandbreedte van de resultaten weer bij een toerekening van 0-100%.

Figuur 7 laat de resultaten van de LCA voor CCU, CCU+CCS en CCS bij AEB zien van de beoordelingsmethode waarbij alleen fossiele CO₂-emissies bijdragen aan klimaatverandering (biogene emissies worden **niet** meegeteld). Door deze manier van omgang met de resultaten, leiden CCU in 2024, CCU+CCS (beide jaren) en CCS tot netto negatieve CO₂-emissies. Dit komt omdat er tijdens de afvang, opwerking en toepassing van CO₂ minder fossiele CO₂-emissies vrijkomen dan vermeden worden door toepassing van deels biogene externe CO₂ in de glastuinbouw. Er kan immers minder aardgas gebruikt worden in de glastuinbouw, die volledig leidt tot fossiele CO₂-emissies. Toepassen van CCU in 2030 leidt tot een CO₂-emissiereductie ten opzichte van de huidige situatie, maar niet tot netto negatieve emissies.

De emissiereducties per ton afgevangen CO₂ ten opzichte van de huidige situatie zijn gelijk aan die beschreven boven Figuur 6. De manier van toerekenen van biogene CO₂-emissies maakt dus niet uit voor de CO₂-emissiereductie ten opzichte van de huidige situatie.

Figuur 7 - Klimaatimpact CO₂-afvang bij AEB en toepassing van CO₂ in glastuinbouw en/of CCS per ton afgevangen CO₂, exclusief biogene CO₂-emissies en inclusief langetermijnopslag biogene CO₂



Let op: Deze figuur geeft alleen geëmitteerde fossiele CO₂-emissies weer, dit is exclusief biogene CO₂-emissies en inclusief opslag van biogene CO₂.

Toelichting 1: Hoe lager de kg CO₂-eq. per ton afgevangen CO₂, hoe hoger de CO₂-emissiereductie ten opzichte van de huidige situatie.

Toelichting 2: De gekleurde balken in de figuur die een projectalternatief weergeven met CCU als optie, geven de emissie weer wanneer 50% van emissiereductie die wordt behaald wanneer de CO₂ wordt geleverd aan glastuinbouw met hernieuwbare warmtebron, wordt toegerekend aan de AEC. De foutbalken geven de bandbreedte van de resultaten weer bij een toerekening van 0-100%.

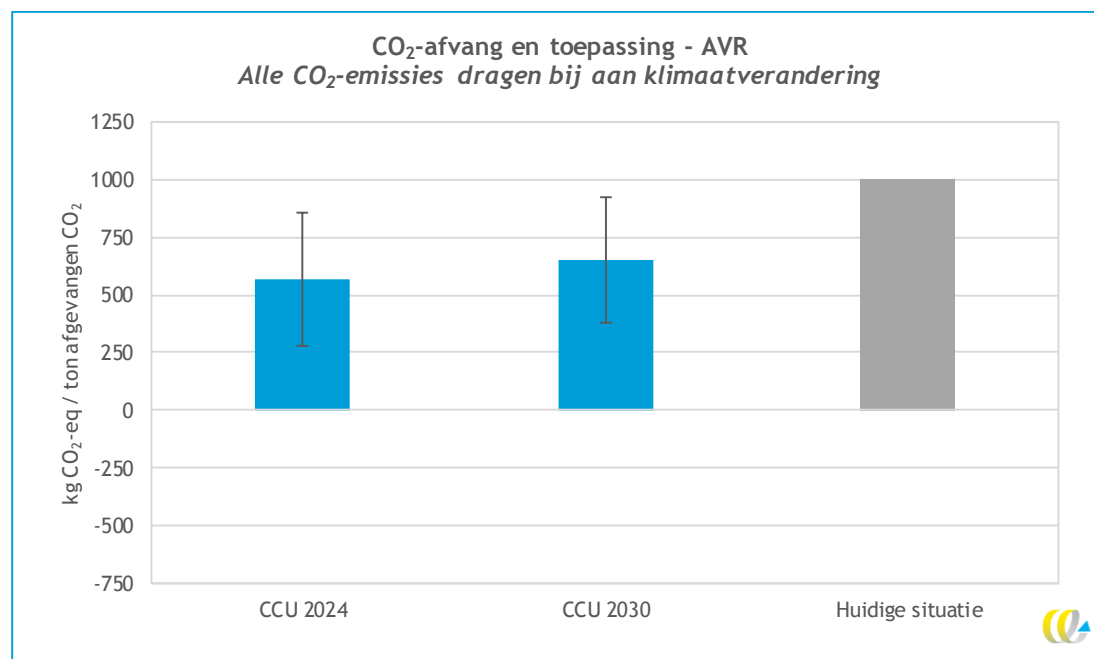
4.1.3 AVR

Figuur 8 laat de resultaten van de LCA voor CCU bij AVR zien van de beoordelingsmethode waarbij alle CO₂-emissies bijdragen aan klimaatverandering (biogene emissies worden meegeteld). Er vindt CO₂-reductie ten opzichte van de huidige situatie plaats. Zoals al eerder genoemd, wordt deze CO₂-reductie veroorzaakt door de substitutie van de referentie (zie Paragraaf 3.6). Er zullen nog steeds emissies zijn bij toepassing van CCU, vanwege emissies uit het CO₂-afvang en -opwaarderingsproces.

Door de CO₂-emissies per projectalternatief te verminderen met de emissies in de huidige situatie waarin CO₂ niet wordt afgevangen (de grijze balk in de figuren) kan antwoord gegeven worden op de hoofdvraag: 'Wat is de CO₂-emissiereductie als 1 ton CO₂ wordt afgevangen en toegepast, ten opzichte van de huidige situatie waarin geen CO₂ afgevangen wordt?' De CO₂-emissiereductie door de gehele keten bij toepassing van CCU in 2024 is ongeveer 431 kg CO₂-eq. per ton afgevangen CO₂ (of 140 en 722 kg CO₂-eq./ton afgevangen bij resp. 0 en 100%) ten opzichte van de huidige situatie waarin geen CO₂ wordt afgevangen en wanneer voor de emissiereductie voor levering van CO₂ aan glastuinbouw met hernieuwbare warmte een toerekening van 50% aan AVR wordt gehanteerd. In de foutbalken in de figuur is de bandbreedte tussen 0-100% toerekening te zien.

In 2030 is de CO₂-emissiereductie lager en komt de reductie door de hele keten uit op 345 kg CO₂-eq. per ton afgevangen CO₂ (of 73 en 617 kg CO₂-eq./ton afgevangen bij resp. 0% en 100%) ten opzichte van de huidige situatie waarin geen CO₂ wordt afgevangen en wanneer voor de emissiereductie voor levering van CO₂ aan glastuinbouw met hernieuwbare warmte een toerekening van 50% aan AVR wordt gehanteerd. In de foutbalken in de figuur is de bandbreedte tussen 0%-100% toerekening te zien.

Figuur 8 - Klimaatimpact CO₂-afvang bij AVR en toepassing van CO₂ in glastuinbouw per ton afgevangen CO₂, inclusief biogene CO₂-emissies



Let op: Deze figuur geeft alle CO₂-emissies weer, ook biogene CO₂-emissies.

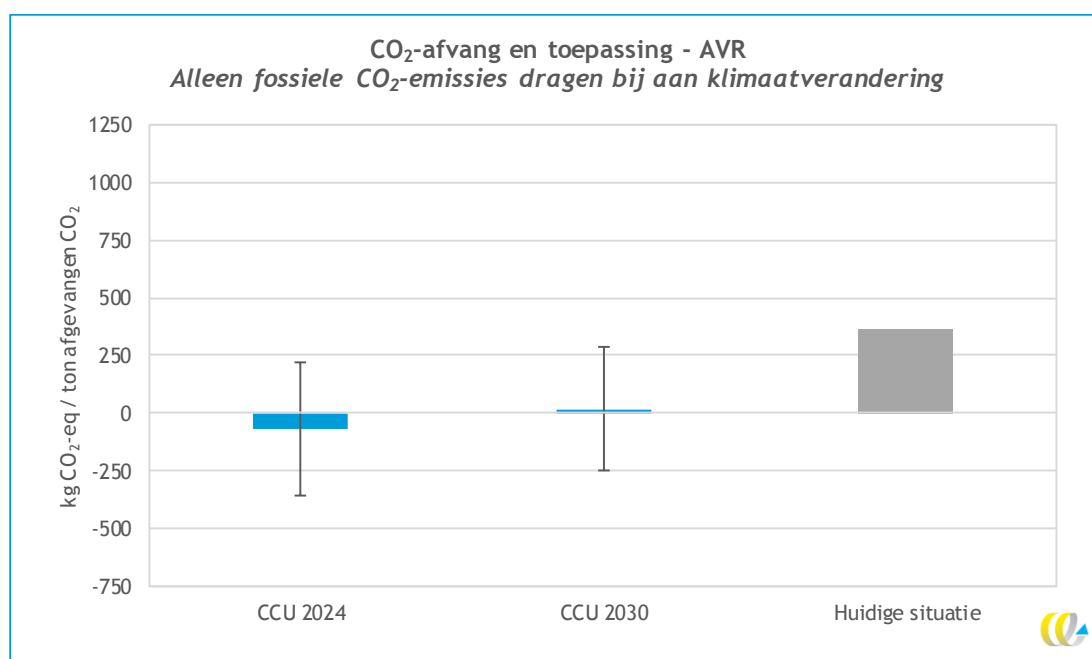
Toelichting 1: Hoe lager de kg CO₂-eq. per ton afgevangen CO₂, hoe hoger de CO₂-emissiereductie ten opzichte van de huidige situatie.

Toelichting 2: De gekleurde balken in de figuur die een projectalternatief weergeven met CCU als optie, geven de emissie weer wanneer 50% van emissiereductie die wordt behaald wanneer de CO₂ wordt geleverd aan glastuinbouw met hernieuwbare warmtebron, wordt toegerekend aan de AEC. De foutbalken geven de bandbreedte van de resultaten weer bij een toerekening van 0-100%.

Figuur 9 laat de resultaten van de LCA voor CCU bij AVR zien van de beoordelingsmethode waarbij alleen fossiele CO₂-emissies bijdragen aan klimaatverandering (biogene emissies worden niet meegeteld). Door deze manier van omgang met de resultaten, leidt toepassing van CCU in 2024 tot netto negatieve CO₂-emissies. Dit komt omdat er tijdens de afvang, opwerking en toepassing van CO₂ minder fossiele CO₂-emissies vrijkomen dan vermeden worden door toepassing van deels biogene externe CO₂ in de glastuinbouw. Er kan immers minder aardgas gebruikt worden in de glastuinbouw, die volledig leidt tot fossiele CO₂-emissies. Toepassen van CCU in 2030 leidt tot een CO₂-emissiereductie ten opzichte van de huidige situatie, maar niet tot netto negatieve emissies.

De emissiereducties per ton afgevangen CO₂ ten opzichte van de huidige situatie zijn gelijk aan die beschreven boven Figuur 8. De manier van toerekenen van biogene CO₂-emissies maakt dus niet uit voor de CO₂-emissiereductie ten opzichte van de huidige situatie.

Figuur 9 - Klimaatimpact CO₂-afvang bij AVR en toepassing van CO₂ in glastuinbouw per ton afgevangen CO₂, exclusief biogene CO₂-emissies en inclusief langetermijnopslag biogene CO₂



- Let op: Deze figuur geeft alleen geëmitteerde fossiele CO₂-emissies weer, dit is exclusief biogene CO₂-emissies en inclusief opslag van biogene CO₂.
- Toelichting 1: Hoe lager de kg CO₂-eq. per ton afgevangen CO₂, hoe hoger de CO₂-emissiereductie ten opzichte van de huidige situatie.
- Toelichting 2: De gekleurde balken in de figuur die een projectalternatief weergeven met CCU als optie, geven de emissie weer wanneer 50% van emissiereductie die wordt behaald wanneer de CO₂ wordt geleverd aan glastuinbouw met hernieuwbare warmtebron, wordt toegerekend aan de AEC. De foutbalken geven de bandbreedte van de resultaten weer bij een toerekening van 0-100%.

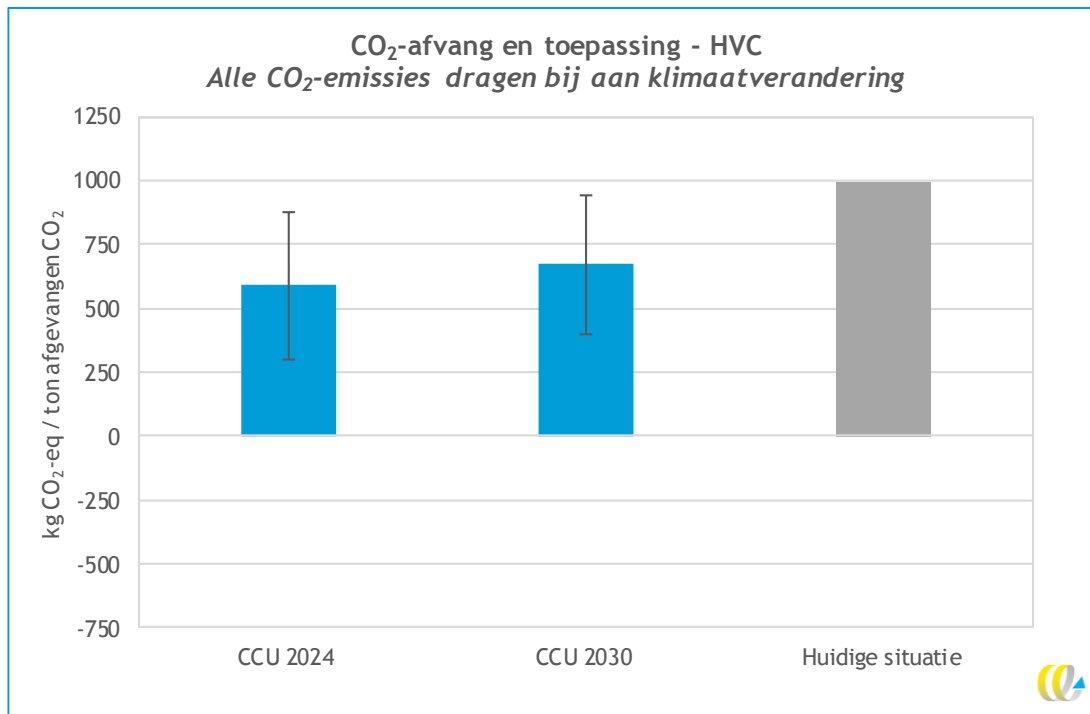
4.1.4 HVC

Figuur 10 laat de resultaten van de LCA voor CCU bij HVC zien van de beoordelingsmethode waarbij alle CO₂-emissies bijdragen aan klimaatverandering (biogene emissies worden meegemeld). Er vindt CO₂-reductie ten opzichte van de huidige situatie plaats. Zoals al eerder genoemd, wordt deze CO₂-reductie veroorzaakt door de substitutie van de referentie (zie Paragraaf 3.6). Er zullen nog steeds emissies zijn bij toepassing van CCU, vanwege emissies uit het CO₂-afvang en -opwaarderingsproces.

Door de CO₂-emissies per projectalternatief te verminderen met de emissies in de huidige situatie waarin CO₂ niet wordt afgevangen (de grijze balk in de figuren) kan antwoord gegeven worden op de hoofdvraag: 'Wat is de CO₂-emissiereductie als 1 ton CO₂ wordt afgevangen en toegepast, ten opzichte van de huidige situatie waarin geen CO₂ afgevangen wordt?' De CO₂-emissiereductie door de gehele keten in 2024 is ongeveer 413 kg CO₂-eq. per ton afgevangen CO₂ (of 121 en 704 kg CO₂-eq./ton afgevangen bij resp. 0 en 100%) ten opzichte van de huidige situatie waarin geen CO₂ wordt afgevangen en wanneer voor de emissiereductie voor levering van CO₂ aan glastuinbouw met hernieuwbare warmte een toerekening van 50% aan HVC wordt gehanteerd. In de foutbalken in de figuur is de bandbreedte tussen 0-100% toerekening te zien.

In 2030 is de CO₂-emissiereductie lager en komt de reductie door de hele keten uit op 327 kg CO₂-eq. per ton afgevangen CO₂ (of 53 en 599 kg CO₂-eq./ton afgevangen bij resp. 0% en 100%) ten opzichte van de huidige situatie waarin geen CO₂ wordt afgevangen en wanneer voor de emissiereductie voor levering van CO₂ aan glastuinbouw met hernieuwbare warmte een toerekening van 50% aan HVC wordt gehanteerd. In de foutbalken in de figuur is de bandbreedte tussen 0%-100% toerekening te zien.

Figuur 10 - Klimaatimpact CO₂-afvang bij HVC en toepassing van CO₂ in glastuinbouw per ton afgevangen CO₂, inclusief biogene CO₂-emissies



Let op: Deze figuur geeft alle CO₂-emissies weer, ook biogene CO₂-emissies.

Toelichting 1: Hoe lager de kg CO₂-eq. per ton afgevangen CO₂, hoe hoger de CO₂-emissiereductie ten opzichte van de huidige situatie.

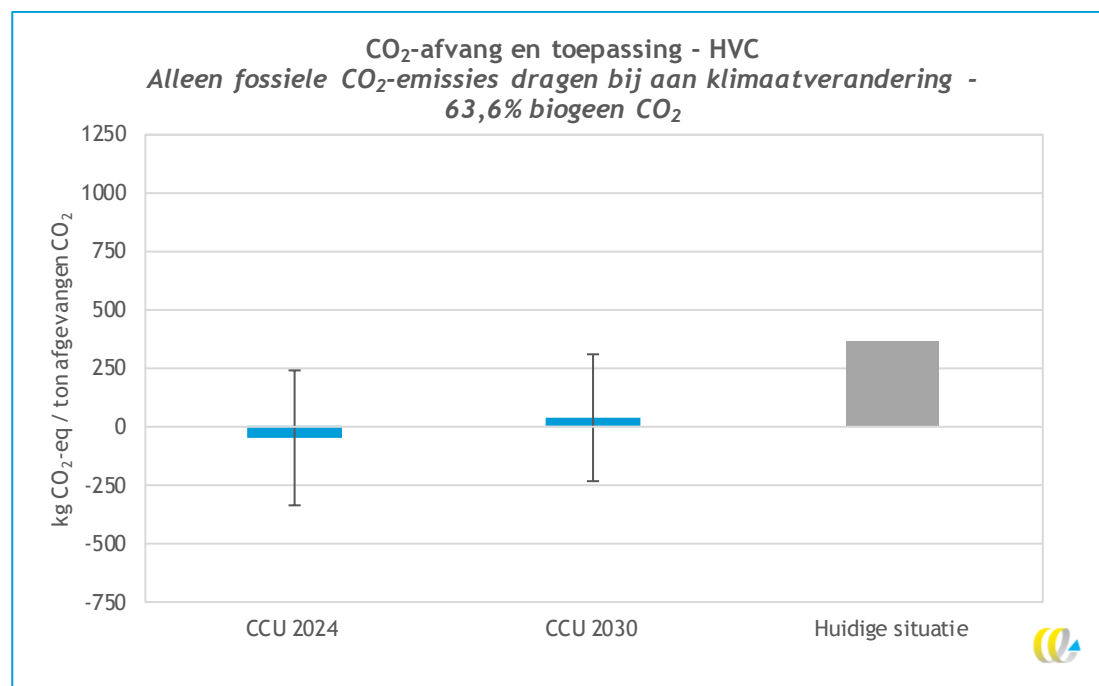
Toelichting 2: De gekleurde balken in de figuur die een projectalternatief weergeven met CCU als optie, geven de emissie weer wanneer 50% van emissiereductie die wordt behaald wanneer de CO₂ wordt geleverd aan glastuinbouw met hernieuwbare warmtebron, wordt toegerekend aan de AEC. De foutbalken geven de bandbreedte van de resultaten weer bij een toerekening van 0-100%.

Figuur 11 en Figuur 12 laat de resultaten van de LCA voor CCU bij HVC zien van de beoordelingsmethode waarbij alleen fossiele CO₂-emissies bijdragen aan klimaatverandering (biogene emissies worden niet meegeteld). Door deze manier van omgang met de resultaten, leidt toepassing van CCU in 2024 tot netto negatieve CO₂-emissies. Dit komt omdat er tijdens de afvang, opwerking en toepassing van CO₂ minder fossiele CO₂-emissies vrijkomen dan vermeden worden door toepassing van deels biogene externe CO₂ in de glastuinbouw. Er kan immers minder aardgas gebruikt worden in de glastuinbouw, die volledig leidt tot fossiele CO₂-emissies. Figuur 11 geeft de resultaten weer voor de situatie waarin het aandeel biogeen 63,6% is (alle CO₂ komt uit de AEC). Toepassen van CCU in 2030 leidt daarbij tot een CO₂-emissiereductie ten opzichte van de huidige situatie, maar niet tot netto negatieve emissies. Figuur 12 laat de situatie zien waarin het aandeel biogeen 100% is (alle CO₂ komt uit de BEC). Wanneer wordt bijgemengd met CO₂ uit de BEC (oplopend tot

alleen CO₂ uit de BEC), levert dit ook in 2030 al snel negatieve CO₂-emissies op (mits het aandeel CO₂ uit de BEC groot genoeg is).

De emissiereducties per ton afgevangen CO₂ ten opzichte van de huidige situatie zijn gelijk aan die beschreven boven Figuur 10. De manier van toerekenen van biogene CO₂-emissies maakt dus niet uit voor de CO₂-emissiereductie ten opzichte van de huidige situatie.

Figuur 11 - Klimaatimpact CO₂-afvang bij HVC en toepassing van CO₂ in glastuinbouw per ton afgevangen CO₂, exclusief biogene CO₂-emissies en inclusief langetermijnsopslag biogene CO₂ bij 63,6% biogeen CO₂

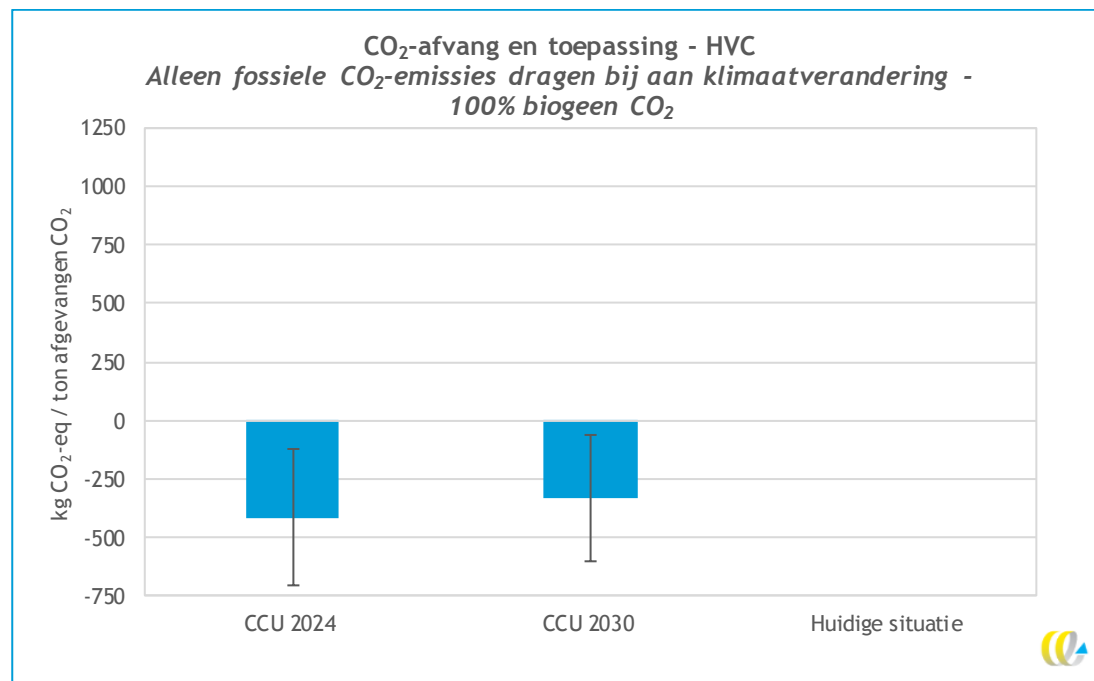


Let op: Deze figuur geeft alleen geëmitteerde fossiele CO₂-emissies weer, dit is exclusief biogene CO₂-emissies en inclusief opslag van biogene CO₂.

Toelichting 1: Hoe lager de kg CO₂-eq. per ton afgevangen CO₂, hoe hoger de CO₂-emissiereductie ten opzichte van de huidige situatie.

Toelichting 2: De gekleurde balken in de figuur die een projectalternatief weergeven met CCU als optie, geven de emissie weer wanneer 50% van emissiereductie die wordt behaald wanneer de CO₂ wordt geleverd aan glastuinbouw met hernieuwbare warmtebron, wordt toegerekend aan de AEC. De foutbalken geven de bandbreedte van de resultaten weer bij een toerekening van 0-100%.

Figuur 12 - Klimaatimpact CO₂-afvang bij HVC en toepassing van CO₂ in glastuinbouw per ton afgevangen CO₂, exclusief biogene CO₂-emissies en inclusief langetermijnopslag biogene CO₂ bij 100% biogeen CO₂



- Let op: Deze figuur geeft alleen geëmitteerde fossiele CO₂-emissies weer, dit is exclusief biogene CO₂-emissies en inclusief opslag van biogene CO₂.
- Toelichting 1: Hoe lager de kg CO₂-eq. per ton afgevangen CO₂, hoe hoger de CO₂-emissiereductie ten opzichte van de huidige situatie.
- Toelichting 2: De gekleurde balken in de figuur die een projectalternatief weergeven met CCU als optie, geven de emissie weer wanneer 50% van emissiereductie die wordt behaald wanneer de CO₂ wordt geleverd aan glastuinbouw met hernieuwbare warmtebron, wordt toegerekend aan de AEC. De foutbalken geven de bandbreedte van de resultaten weer bij een toerekening van 0-100%.

4.2 Contributieanalyse

In de resultaten in deze paragraaf wordt weergegeven wat de bijdrage van verschillende processtappen aan de totale CO₂-footprint van de afvang en benutting van een ton CO₂ in de glastuinbouw, per afvalenergiecentrale. Dit geeft inzicht in hoe de CO₂-reductie ten opzichte van de huidige situatie, zoals gepresenteerd in Paragraaf 4.1, tot stand zijn gekomen.

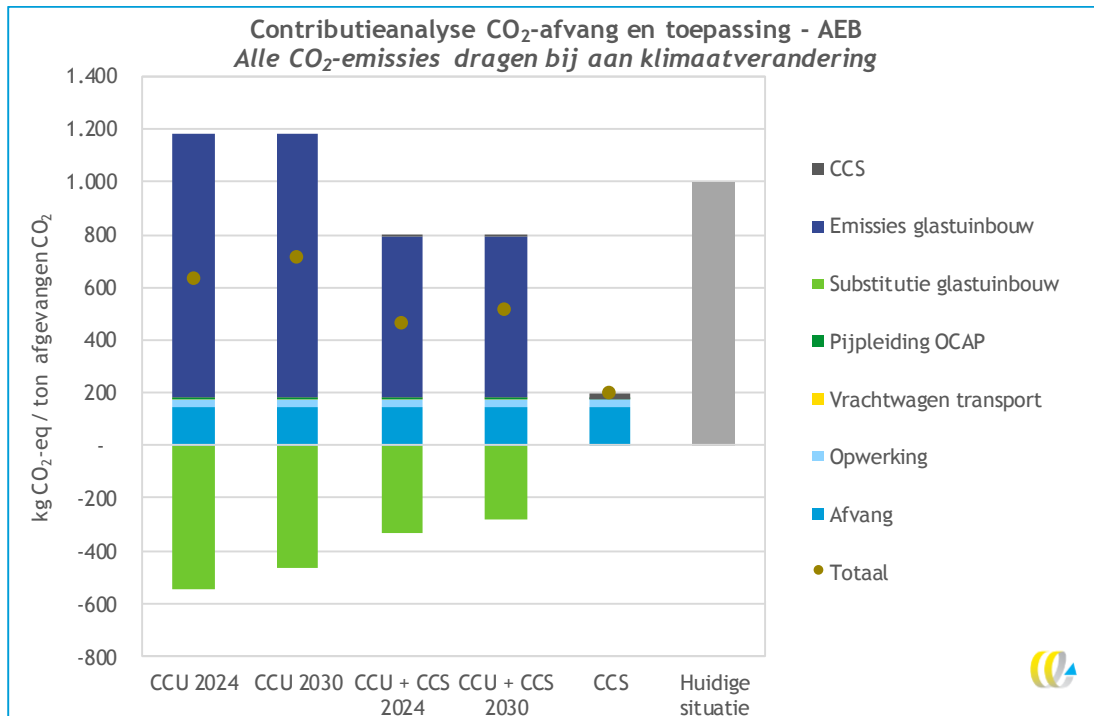
4.2.1 AEB

In Figuur 13 zijn de contributieanalyses van de projectalternatieven bij AEB gepresenteerd. Hierin is te zien dat er bij de projectalternatieven met CCU twee posten zijn die de grootste impact hebben op het totaal: emissies glastuinbouw en substitutie glastuinbouw - de eerste zorgt voor uitstoot van CO₂, en dankzij de tweede vindt er reductie plaats ten opzichte van de huidige situatie. Daarnaast is het opvallend dat transport (via pijpleiding of vrachtwagen) geen significante invloed heeft op het totaal.

In de figuur wordt daarnaast inzichtelijk gemaakt dat de hogere klimaatimpact van CCU in 2030 ten opzichte van 2024 wordt veroorzaakt door het verschil in de post 'Substitutie glastuinbouw'.

Voor CCS is te zien dat de emissies vooral uit het afvangproces bij AEB komen, en in mindere mate door de twee opwaarderingsstappen daarna.

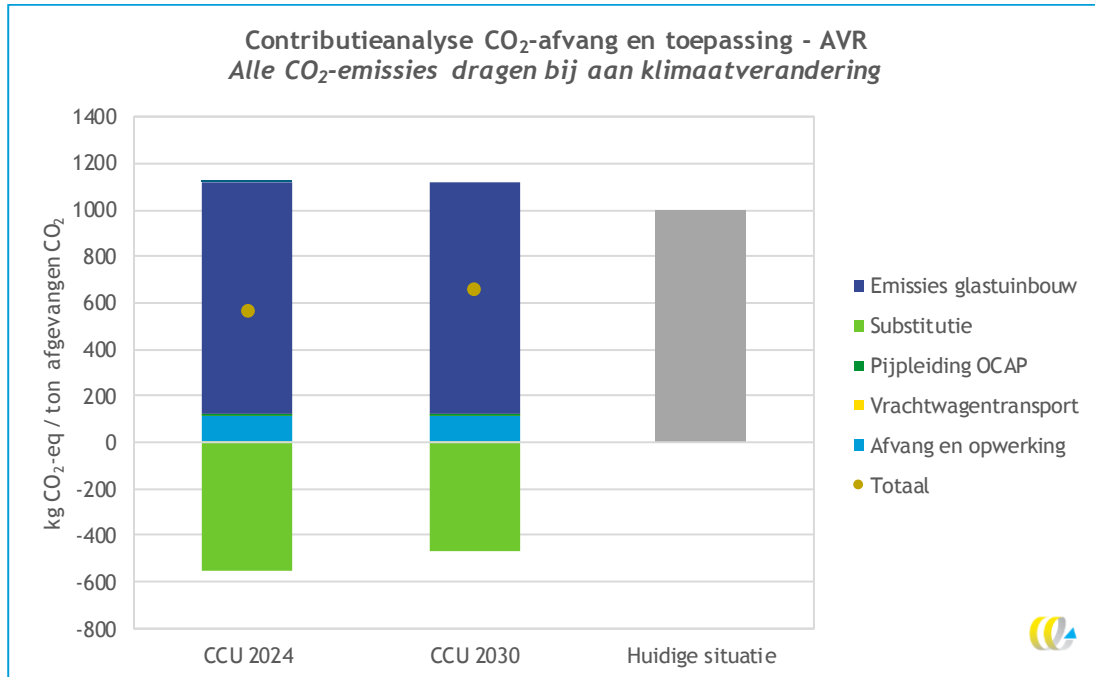
Figuur 13 - Contributieanalyse CO₂-afvang en -toepassing AEB



4.2.2 AVR

In Figuur 14 zijn de contributieanalyses van de projectalternatieven bij AVR gepresenteerd. Hierin is te zien dat er bij CCU twee posten zijn die de grootste impact hebben op het totaal: emissies glastuinbouw en substitutie glastuinbouw - de eerste zorgt voor uitstoot van CO₂, en dankzij de tweede vindt er reductie plaats ten opzichte van de huidige situatie. Daarnaast is het opvallend dat transport (via pijpleiding of vrachtwagen) geen significante invloed heeft op het totaal. In de figuur wordt tot slot inzichtelijk gemaakt dat de hogere klimaatimpact van CCU in 2030 ten opzichte van 2024 wordt veroorzaakt door het verschil in de post 'Substitutie glastuinbouw'. Afvang en opwerking van CO₂ zijn bij AVR samen gepresenteerd.

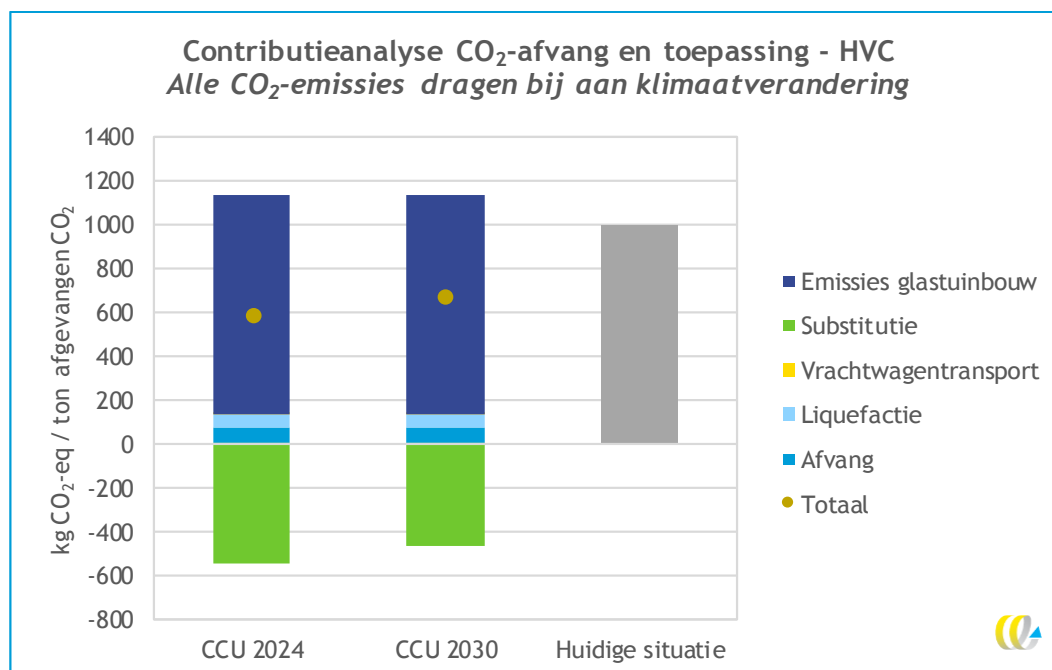
Figuur 14 - Contributieanalyse CO₂-afvang en -toepassing AVR



4.2.3 HVC

In Figuur 15 zijn de contributieanalyses van de projectalternatieven bij HVC gepresenteerd. Hierin is te zien dat er bij CCU twee posten zijn die de grootste impact hebben op het totaal: emissies glastuinbouw en substitutie glastuinbouw - de eerste zorgt voor uitstoot van CO₂, en dankzij de tweede vindt er reductie plaats ten opzichte van de huidige situatie. Daarnaast is het opvallend dat transport (via pijpleiding of vrachtwagen) geen significante invloed heeft op het totaal. In de figuur wordt tot slot inzichtelijk gemaakt dat de hogere klimaatimpact van CCU in 2030 ten opzichte van 2024 wordt veroorzaakt door het verschil in de post 'Substitutie glastuinbouw'.

Figuur 15 - Contributieanalyse CO₂-afvang en -toepassing HVC



4.3 Gevoeligheidsanalyse

Onzekerheden in de resultaten zitten 'm vooral de onzekerheden over toepassing in de glastuinbouw - het belangrijkste voorbeeld is de gevoeligheid van resultaten voor toerekening van de CO₂-emissiereductie bij toepassing in glastuinbouw als de reden voor CO₂-vraag een duurzame warmtebron is. Deze onzekerheid is al in de hoofdresultaten meegenomen door het laten zien van een bandbreedte bij toerekening van de emissiereductie aan de AEC van 0-100%, met behulp van foutbalken.

Naast de bovenstaande onzekerheid, heeft een ander energieverbruik mogelijk een invloed op de CO₂-emissiereductie per ton afgevangen en toegepaste ton CO₂ ten opzichte van de huidige situatie waarin geen CO₂ wordt afgevangen.

We voeren daarom de volgende gevoeligheidsanalyse uit:

Energiegebruik afvang en opwerking CO₂

In deze gevoeligheidsanalyses kijken we naar de invloed op de resultaten van een verdubbeling van het energieverbruik voor afvang en opwerking van CO₂ ten opzichte van de basisanalyse. De resultaten van deze analyse zijn weergegeven in Tabel 16. De verdubbeling van energiegebruik zorgt voor een lagere CO₂-emissiereductie van tussen de 113 en 209 kg CO₂-eq. per ton afgevangen CO₂. Dit heeft dus een substantiële invloed op de resultaten. Toch leveren alle bekeken CCU-projectalternatieven nog een CO₂-emissiereductie ten opzichte van geen afvang en toepassing van CO₂.

Tabel 16 - Gevoeligheid resultaten voor energiegebruik afvang en opwerking CO₂

Projectalternatief	2024 (kg CO ₂ -eq./ton afgevangen CO ₂)	2030 (kg CO ₂ -eq./ton afgevangen CO ₂)
AEB CCU	Basisanalyse: 366 Verdubbeling energiegebruik: 192	Basisanalyse: 281 Verdubbeling energiegebruik: 106
AEB CCU+CCS	Basisanalyse: 535 Verdubbeling energiegebruik: 350	Basisanalyse: 483 Verdubbeling energiegebruik: 298
AEB CCS	Basisanalyse: 800 Verdubbeling energiegebruik: 590	Basisanalyse: 800 Verdubbeling energiegebruik: 590
AVR CCU	Basisanalyse: 431 Verdubbeling energiegebruik: 318	Basisanalyse: 345 Verdubbeling energiegebruik: 232
HVC CCU	Basisanalyse: 413 Verdubbeling energiegebruik: 278	Basisanalyse: 327 Verdubbeling energiegebruik: 192

5 Conclusie

Op dit moment wordt door de drie afvalenergiecentrales AEB, AVR en HVC CO₂ geëmitteerd. Door het afvangen van CO₂ en toepassing ervan in de glastuinbouw (CCU) of opslag ervan in lege gasvelden in de Noordzee (CCS) kunnen CO₂-emissies gereduceerd worden. Door de verschillende AECs kunnen de in Tabel 17 gepresenteerde CO₂-emissiereducties (in 2024 en 2030) ten opzichte van de huidige situatie worden behaald. De emissiereducties gelden voor zowel de situatie waarin biogene CO₂ wordt meegeteld voor klimaatimpact (1 ton CO₂/ton CO₂-emissie), als voor de situatie waarin deze niet wordt meegeteld (0,364 fossiele ton CO₂/ton CO₂-emissie).

In Tabel 17 is te zien dat alle in dit project beschouwde CCU/CCS-routes leiden tot een reductie van CO₂-emissies, waarmee alle projectalternatieven ook leiden tot een reductie van impact op klimaatverandering, vergeleken met de situatie waarin de CO₂ niet wordt afgevangen.

Het afvangen van 1.000 kg CO₂ bij de AECs leidt tot een netto CO₂-emissiereductie van tussen de 9 en 800 kg, 281 en 800 kg of 553 en 800 kg. Hierbij worden de verschillen veroorzaakt door een verschil in toerekening van de CO₂-emissiereductie bij levering van CO₂ aan glastuinbouw met een hernieuwbare warmtebron (resp. 0%, 50% en 100% toerekening aan de AEC). De emissiereductie bij CCS (opslag in de ondergrond) is hoger en stabiel omdat die emissiereductie volledig aan deze projecten kan worden toegerekend. De CO₂-emissiereductie die behaald kan worden bij toepassing in de glastuinbouw wordt gedeeltelijk toegerekend aan het toevoegen van externe CO₂ in de glastuinbouw. In het geval dat er voor deze CO₂-emissiereductie ook hernieuwbare warmte benodigd is, wordt een deel van de emissiereductie ook toegerekend aan het warmteproject.

De emissiereductie wordt veroorzaakt door de substitutie van de referentiesituatie, waarin (externe) fossiele CO₂ met name uit een aardgasketel wordt toegepast voor plantbemesting. Het feit dat in 2030 een lagere emissiereductie kan worden verkregen ten opzichte van de huidige situatie zonder CCU, komt doordat de referentie verandert in de tijd. Tuinders kunnen richting 2030 ook andere manieren vinden om hun CO₂-voorziening veilig te stellen zoals een biogasketel of een biomassaketel. In de toekomst wordt dus minder fossiele CO₂ gesubstitueerd dankzij CO₂ geleverd door de AECs dan in 2024.

Tabel 17 - Resultaten LCA, input MKBA - CO₂-emissiereductie door toepassing van CCU (alle AECs), CCU+CCS (AEB) en CCS (AEB) in 2024 en 2030, ten opzichte van huidige situatie (bij verschillende toerekening van CO₂-emissiereductie bij levering aan glastuinbouw met hernieuwbare warmtebron)

Projectalternatief	2024 (kg CO ₂ -eq./ton afgevangen CO ₂)			2030 (kg CO ₂ -eq./ton afgevangen CO ₂)		
	0%	50%	100%	0%	50%	100%
% toerekening	0%	50%	100%	0%	50%	100%
AEB CCU	75	366	658	9	281	553
AEB CCU+CCS	357	535	713	369	483	701
AEB CCS	800	800	800	800	800	800
AVR CCU	140	431	722	73	345	617
HVC CCU	121	413	704	53	327	599

Toelichting: De resultaten voor het projectalternatief AEB CCS veranderen niet en de tabel geeft dus ook geen veranderingen weer.

Omdat niet genoeg informatie beschikbaar is over de solvent, kon geen uitspraak gedaan worden over overige milieueffecten die samenhangen met het gebruik van en de productie van solvents. De conclusies gelden daarmee alleen voor het milieueffect klimaatverandering.

Gevoeligheidsanalysen

Het energiegebruik is belangrijk gebleken in de resultaten. Vanuit een klimaat oogpunt is het essentieel om het energiegebruik zo laag mogelijk te houden. Het is verder aan te bevelen om zodra verdere engineeringstudies uitgevoerd zijn voor de drie AECs, om de bepaalde energiegebruiken mee te nemen in toekomstige LCA en MKBA-studies.

Na 2030

De emissiereductie zal na 2030 door een toename van toepassing van CO₂ in combinatie met duurzame warmte verder afnemen. Het is dus aan te bevelen om naast toepassing in de glastuinbouw ook te gaan kijken naar alternatieve CCU-routes. Zoals toepassing van CO₂ in bouwmaterialen waarbij CO₂ voor langere tijd vastgelegd wordt, dit is vergelijkbaar met CCS maar in dit geval wordt er wel een product geproduceerd.

Aanbevelingen

- het is aan te bevelen de resultaten te updaten als er meer duidelijkheid is over de toe te passen toerekening van de CO₂-emissiereductie bij zowel toepassing van duurzame warmte en toepassen van externe CO₂ in de glastuinbouw;
- het is aan te bevelen de resultaten te updaten als er meer duidelijkheid is over de verdeling over de vier verschillende redenen om CO₂ toe te voegen in de glastuinbouw op de korte termijn (2024);
- het is aan te bevelen de resultaten te updaten als uitgebreidere engineeringstudies voor de verschillende projectalternatieven zijn uitgevoerd.

6 Bibliografie

CE Delft, 2017. *STREAM Goederenvervoer 2016 Versie 2*, Delft: CE Delft.

CE Delft, 2018a. *Screening LCA for CCU routes connected to CO2 Smart Grid*, Delft: CE Delft.

CE Delft, 2018b. *MKBA CCU Smart Grid*, Delft: CE Delft.

CO2emissiefactoren.nl, 2017. *Lijst emissiefactoren*. [Online]
Available at: <https://www.co2emissiefactoren.nl/lijs-emissiefactoren/>
[Geopend 17 April 2019].

Ecoinvent, 2017. *Ecoinvent v3.4 database*, Zurich, Zwitserland: sn

LEI, 2010. *CO2-voorziening glastuinbouw 2008-2020. Vooruitbrlik bij toepassing 20% duurzame energie*, Den Haag: LEI, Wageningen UR.

RIVM, 2018. *Greenhouse gas emissions in the Netherlands 1990-2016 - National Inventory Report 2018*, Bilthoven: RIVM.

RuwBouwGroep, sd *Compensatiesteen: een revolutie op het gebied van vermindering van het broeikas-effect*. [Online]
Available at: <https://www.ruwbouw.nl/product/compensatiesteen-2/>
[Geopend 13 Mei 2019].

SAPEA, 2018. *Novel carbon capture and utilisation technologies - Research and climate aspects*, Berlin: SAPEA.

Technische Universität Berlin, RWTH Aachen University, The University of Sheffield, IASS Potsdam, 2018. *Techno-Economic Assessment & Life Cycle Assessment Guidelines for CO2 Utilization*, Berlin, Sheffield, Aachen, Potsdam: CO2Chem Media and Publishing Ltd.

WEER, 2016. *Prognose CO2-emissie glastuinbouw 2020*, Wageningen: Wageningen Economic Research.

WEER, 2018. *Prognoses CO2-emissie glastuinbouw 2030*, Wageningen: Wageningen Economic Research.

