

LCA CCU/CCS bij ARN





CE Delft

Committed to the Environment

LCA CCU/CCS bij ARN

Dit rapport is geschreven door:
[redacted], [redacted] en [redacted]

Delft, CE Delft, februari 2025

Publicatienummer: 24.240384.112

Opdrachtgever: ARN B.V.
Uw kenmerk: 00.285.782/13.02.00

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

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

© copyright, CE Delft, Delft

CE Delft
Committed to the Environment

CE Delft draagt met onafhankelijk onderzoek en advies bij aan een duurzame samenleving. Wij zijn toonaangevend op het gebied van energie, transport en grondstoffen. Met onze kennis van techniek, beleid en economie helpen we overheden, NGO's en bedrijven structurele veranderingen te realiseren. Al sinds 1978 werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.

Inhoud

	Samenvatting	3
1	Inleiding	6
	1.1 Aanleiding en doel	6
	1.2 Levenscyclusanalyse en leeswijzer	6
2	Methodiek	7
	2.1 Doel van de studie	7
	2.2 Afbakening	8
	2.3 Systeembeschrijving CCU/CCS bij ARN	8
	2.4 Milieueffect: klimaatimpact	10
	2.5 Multifunctionaliteit	10
	2.6 Gebruikte gegevens en datakwaliteit	11
3	Inventarisatie	12
	3.1 CO_2-afvang en nabewerking	12
	3.2 Vervloeiing afgevangen CO_2	13
	3.3 Transport per vrachtwagen van ARN naar OCAP-pijpleiding	13
	3.4 Transport via OCAP-pijleiding	14
	3.5 CO_2-benutting in de glastuinbouw	14
	3.6 Carbon Capture & Storage (CCS)	16
4	Resultaten	18
	4.1 Toelichting bij de resultaten	18
	4.2 Klimaatimpact CO_2-afvang en toepassing	18
	4.3 Contributieanalyse	21
	4.4 Gevoeligheidsanalyses	21
5	Discussie en conclusie	24
	5.1 Conclusies	24
	5.2 Onzekerheden en beperkingen	25
6	Literatuur	26

Samenvatting

Afvalverwerker ARN B.V. (hierna ARN) is van plan een CO_2-afvanginstallatie te realiseren in Weurt. Voor de vergunningsaanvraag is een milieueffectrapportage (MER) nodig. Als onderdeel hiervan wil ARN inzicht in de verwachte klimaatimpactreductie van deze installatie.

CE Delft heeft de klimaatimpactreductie bepaald van de installatie van een CO_2-afvangsysteem bij ARN, waarbij de afgevangen CO_2 wordt toegepast in de glastuinbouw of opgeslagen in lege gasvelden.

Methode

In deze studie beantwoorden we de volgende vraag: *'Wat is de klimaatimpactreductie als 1 ton CO_2 uit rookgassen wordt afgevangen en vervolgens toegepast of opgeslagen, ten opzichte van de huidige situatie waarin geen CO_2 afgevangen wordt?'*

De klimaatimpactreductie is berekend met een ex-ante levenscyclusanalyse (LCA) gebaseerd op data uit een engineeringstudie van de CO_2-afvanginstallatie bij ARN.
We hanteren dezelfde methodiek als in een eerdere LCA-studie van CE Delft naar CCU in de glastuinbouw vanuit Afvalenergiecentrales[1]. De analyse is uitgevoerd voor het zichtjaar 2030.

We kijken naar twee mogelijke scenario's voor de afgevangen CO_2:
1. Alle afgevangen CO_2 wordt permanent opgeslagen (CCS).
2. De helft van de afgevangen CO_2 wordt opgeslagen (CCS), en de helft wordt ingezet in de glastuinbouw om aardgasverbranding te vermijden (CCU).

Resultaten

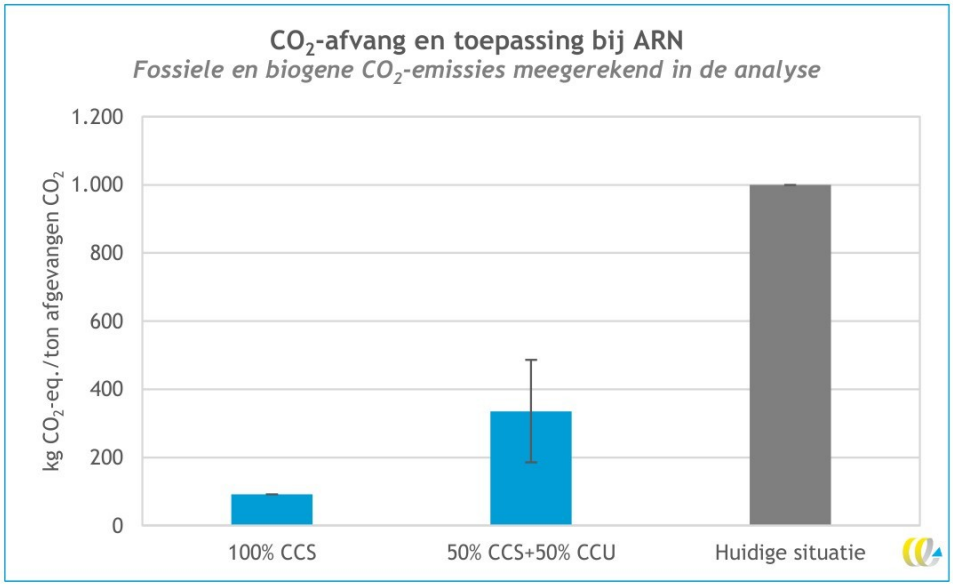
Figuur 1 geeft de klimaatimpact weer van de afvang van CO_2 bij ARN en het ondergronds opslaan (CCS) of toepassen in de glastuinbouw (CCU) van de afgevangen CO_2.

Als alle afgevangen CO_2 permanent wordt opgeslagen (100% CCS), is de klimaatimpact 909 kg CO_2-eq./ton afgevangen CO_2 lager dan in de huidige situatie waarin geen afvang van CO_2 bij ARN plaatsvindt.

Als de helft van de afgevangen CO_2 wordt opgeslagen en de helft wordt ingezet in de glastuinbouw (50% CCS + 50% CCU), is de klimaatimpact 665 kg CO_2-eq./ton afgevangen CO_2 lager dan in de huidige situatie waarin geen afvang van CO_2 bij ARN plaatsvindt.
De klimaatimpactreductie is in het geval van CCU sterk afhankelijk van de manier van toerekening van het vermijden van aardgasverbranding bij het gebruik van duurzame warmte in de glastuinbouw. De klimaatimpactreductie van 665 kg CO_2-eq. geldt voor een toerekening van 50%. Bij een toerekening van 0% of 100% is de klimaatimpactreductie respectievelijk 514 kg CO_2-eq./ton afgevangen CO_2 en 814 kg CO_2-eq./ton afgevangen CO_2.

[1] CE Delft. (2021a). *LCA CCU in de glastuinbouw vanuit Afvalenergiecentrales - Update juni 2021.*

Figuur 1 - Klimaatimpact van de afvang van CO_2 bij ARN en de toepassing van de afgevangen CO_2, waarbij zowel biogene als fossiele CO_2-emissies zijn meegenomen, in kg CO_2-eq./ton afgevangen CO_2



In de tot dusver besproken resultaten gaan we ervan uit dat de CO_2 die in de glastuinbouw gebruikt wordt gemiddeld 66,5% fossiel is in 2030. Deze aanname over de referentiesituatie bepaalt in hoeverre het gebruik van afgevangen CO_2 zorgt voor een afname in fossiele CO_2-emissies uit de glastuinbouw. Net als de toerekeningsfactor is het aandeel fossiele CO_2 in de referentiesituatie echter ook onzeker (zie ook de bespreking hieronder). Als we ervan uitgaan dat 100% fossiele CO_2-emissies worden vermeden bij CCU, dan komt de klimaatimpactreductie bij 50% CCS+50% CCU uit op 791 (±226) kg CO_2-eq. per ton afgevangen CO_2.

Onzekerheden en beperkingen

Voor de interpretatie van de resultaten zijn een aantal opmerkingen van belang:

- De procesgegevens voor CO_2-afvang en vervloeiing bij ARN geven de huidige verwachtingen op basis van de engineeringstudie uitgevoerd door Bilfinger. In de praktijk kunnen zaken zoals energieverbruik anders uitvallen (bijvoorbeeld wanneer op deellast wordt gedraaid). Deze processen hebben een beperkte invloed op de totale klimaatimpact, dus het is niet de verwachting dat afwijkingen tot grote wijzigingen in de resultaten leiden.
- De berekening van het klimaatvoordeel van het toepassen van afgevangen CO_2 in de glastuinbouw is complex, mede omdat deze studie zich richt op de situatie in 2030. Er speelt hier een aantal zaken:
  - Er is onzekerheid in de (verdeling over) motieven voor CO_2-gebruik bij de glastuinbouw.
  - De toerekening van het vermijden van aardgasverbranding bij het gebruik van duurzame warmte en afgevangen CO_2 is niet helemaal eenduidig vast te stellen.
  - De emissiereductie wordt veroorzaakt door de substitutie van de referentiesituatie, waarin met name fossiele CO_2 uit aardgasverbranding wordt toegepast voor plant-bemesting. Tuinders kunnen echter richting 2030 ook andere CO_2-bronnen gaan gebruiken, zoals uit biogas of biomassa. Hierdoor verandert de referentiesituatie en daarmee de emissiereductie die CCU bewerkstelligt. In de toekomst wordt dus

minder fossiele CO_2 vervangen dankzij CO_2 geleverd door ARN. De mate waarin de emissiereductie afneemt richting de toekomst is onzeker.

Deze onzekerheden spelen alleen bij CCU/toepassing in de glastuinbouw, niet bij CCS. Het is hierbij belangrijk om te beseffen dat op de langere termijn het gebruik van fossiele brandstoffen zoals aardgas, in alle sectoren zal moeten afnemen. Hoewel het dus onduidelijk is hoe lang aardgasgebruik nog als redelijke referentie kan dienen voor de glastuinbouw en wat een redelijke verdeling van het klimaatvoordeel van aardgas-vervanging is, zal op de langere termijn het gebruik van (deels fossiele) afgevangen CO_2 uit AEC's in de glastuinbouw niet meer tot een klimaatvoordeel leiden, omdat hierbij fossiele CO_2 in de atmosfeer belandt.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding en doel

In de afvalenergiecentrale (AEC) van ARN in Weurt bij Nijmegen wordt jaarlijks zo'n 300.000 ton (niet-recyclebaar) huishoudelijk afval en bedrijfsafval verbrand. ARN is van plan een CO_2-afvanginstallatie te realiseren in Weurt. Voor de vergunningsaanvraag is een milieueffectrapportage (MER) nodig. Als onderdeel hiervan wil ARN inzicht in de verwachte klimaatimpactreductie van deze installatie.

ARN verwacht jaarlijks 200 kiloton (kton) CO_2 af te gaan vangen door middel van absorptie met een oplosmiddel. Na de CO_2-afvang wordt de CO_2 opgewaardeerd en vloeibaar gemaakt. Hierna wordt de CO_2 in vloeibare vorm per vrachtwagen naar de OCAP-pijpleiding vervoerd. De afgevangen CO_2 kan worden ingezet in de glastuinbouw (CCU[2]) of permanent worden opgeslagen in lege gasvelden (CCS[3]).

In 2018 heeft CE Delft een levenscyclusanalyse (LCA) uitgevoerd om de klimaatimpact-reductie van CO_2-afvang en toepassing bij verschillende afvalenergiecentrales (AECs) te bepalen (CE Delft, 2018a). In 2021 is die studie geüpdatet (CE Delft, 2021a). De AEC van ARN was destijds geen onderdeel van de analyse.

In deze studie voeren we een LCA uit van CO_2-afvang en toepassing bij ARN, waarbij we de methodiek uit CE Delft (2021a) volgen.

De LCA in deze studie wordt uitgevoerd conform de ISO 14040- en ISO14044-standaarden. De analyse omvat het hele systeem vanaf afvang tot en met toepassing (CCU) en/of opslag (CCS) van de afgevangen CO_2. We bepalen de klimaatimpact van het gehele systeem mét CO_2-afvang en toepassing ten opzichte van een conventioneel systeem zonder CO_2-afvang en toepassing. Andere milieueffecten zijn niet meegenomen in deze studie.

1.2 Levenscyclusanalyse en leeswijzer

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. Impactanalyse en **resultaten** (Hoofdstuk 4).
4. Interpretatie en **conclusies** (Hoofdstuk 5).

[2] Carbon Capture and Utilisation.

[3] Carbon Capture and Storage.

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 LCA in deze studie is uitgevoerd conform de ISO-standaarden 14040 en 14044.

2.1 Doel van de studie

Doel van deze studie is het kwantificeren van de klimaatimpact van de installatie van een CO_2-afvangsysteem bij ARN, waarbij de afgevangen CO_2 wordt toegepast in de glastuinbouw of opgeslagen in lege gasvelden. In deze studie beantwoorden we de volgende vraag: *'Wat is de klimaatimpactreductie als 1 ton CO_2 uit rookgassen wordt afgevangen en vervolgens toegepast of opgeslagen, ten opzichte van de huidige situatie waarin geen CO_2 afgevangen wordt?'*

In deze studie wordt met de term CO_2-emissie de totale klimaatimpact bedoeld. Dit wil zeggen dat de emissies van alle broeikasgassen zijn meegenomen in de analyse. De klimaatimpactreductie wordt uitgedrukt in CO_2-equivalenten (CO_2-eq.).

In deze studie wordt gekeken naar twee mogelijke scenario's voor de afgevangen CO_2:
1. Alle afgevangen CO_2 wordt permanent opgeslagen (CCS);
2. De helft van de afgevangen CO_2 wordt opgeslagen (CCS), en de helft wordt ingezet in de glastuinbouw om aardgasverbranding te vermijden (CCU).

De methode (hieronder verder toegelicht) is gelijk aan die van CE Delft (2021a). Wel zijn enkele updates doorgevoerd:
- Voor het elektriciteitsverbruik wordt gerekend met de verwachte klimaatimpact van elektriciteit in 2030. De klimaatimpact ligt lager dan in de eerder studie, waardoor gederfde elektriciteit en het gebruik van elektriciteit een kleinere invloed op de resultaten heeft.
- De gegevens voor CO_2-transport door pijpleidingen zijn opnieuw geverifieerd door OCAP. Het geschatte elektriciteitsverbruik voor compressie ligt 40% lager dan in de eerder studie. Dit heeft een beperkte invloed op de resultaten.
- Enkele verouderde processen uit de Ecoinvent LCA-database zijn vervangen door nieuwe processen.
- De klimaatimpact is berekend met de nieuwere IPCC 2021-methode, waarin de bevindingen van het IPCC Sixth Assessment Report (AR6) zijn verwerkt.

Functionele eenheid

Deze studie richt zich op de klimaatimpact van de afvang van 1 ton (pure) CO_2[4] en de daaropvolgende toepassing/opslag van CO_2 als functionele eenheid. Doordat bij de afvang ook energie en hulpmiddelen gebruikt worden en doordat de vervanging van CO_2 bij toepassing in de glastuinbouw niet één-op-één is, is de netto-klimaatimpactreductie niet 1 ton per ton afgevangen CO_2.

[4] De resultaten zijn dus uitgedrukt per ton 100% afgevangen CO_2 naar massa. De totale massa ligt bij het afvangen iets hoger, doordat hier ook andere stoffen, zoals waterdamp, meekomen.

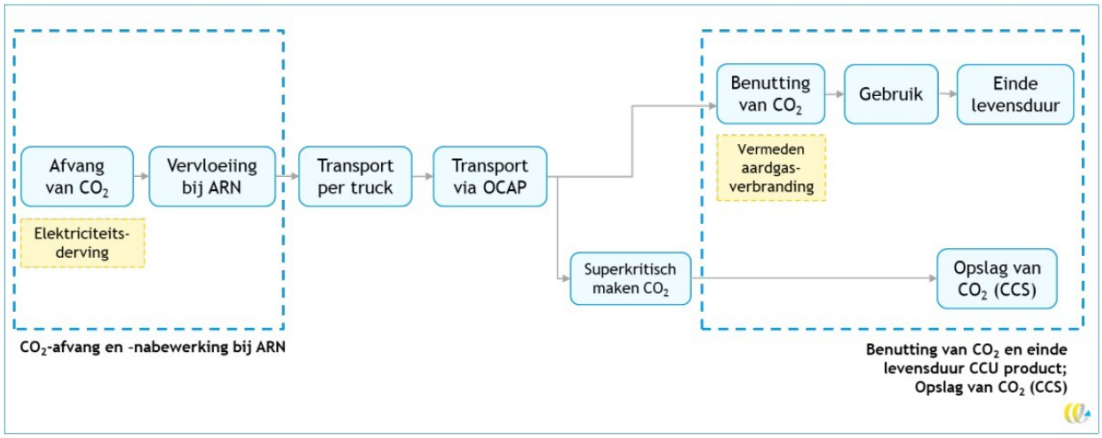
2.2 Afbakening

In Figuur 2 zijn de systeemgrenzen van de analyse weergegeven. De klimaatimpact van alle stappen vanaf de afvang tot en met de uiteindelijke bestemming van de CO_2 worden meegenomen. De analyse houdt dus rekening met de impact van afvang en vervloeiing van CO_2 bij ARN, transport per truck en OCAP, benutting in de glastuinbouw (waarbij de CO_2 weer vrijkomt) en/of permanente opslag in gasvelden. Deze stappen worden hierna uitgebreider besproken. Deze grenzen worden ook wel 'cradle-to-grave' genoemd.

De analyse wordt uitgevoerd voor het zichtjaar 2030. In dat jaar is de CO_2-afvanginstallatie bij ARN naar verwachting gerealiseerd en volledig in gebruik genomen. Dit betekent dat we gebruik maken van de verwachte nationale elektriciteitsmix in 2030.

Voor de opslag van CO_2 gaan we uit van het volgende:
- Toepassing van CO_2 in de glastuinbouw leidt niet tot klimaatimpactreductie, omdat de CO_2 slechts kortdurend wordt opgeslagen.
- Opslag van CO_2 in lege gasvelden (CCS) leidt wel tot klimaatimpactreductie, omdat het hier om langdurige opslag gaat.

Figuur 2 - Systeemgrenzen CO_2-afvang bij ARN en verdere benutting of opslag



2.3 Systeembeschrijving CCU/CCS bij ARN

Afvang van CO_2 bij ARN

In de afvalenergiecentrale van ARN in Weurt bij Nijmegen wordt jaarlijks zo'n 300.000 ton (niet-recyclebaar) huishoudelijk- en bedrijfsafval verbrand. De koolstof in dit afval is deels fossiel (circa 36,4%; bijvoorbeeld kunststoffen) en deels biogeen (circa 63,6%; bijvoorbeeld voedselresten of papier). De energie die vrijkomt bij de verbranding wordt gebruikt voor de productie van elektriciteit die aan het openbare net wordt geleverd, en de productie van warmte die wordt geleverd aan de waterzuiveringsinstallatie en woningen in Nijmegen.

ARN verwacht jaarlijks 200 kiloton (kton) CO_2 af te gaan vangen. De CO_2 wordt afgevangen met absorptie door een oplosmiddel (solvent). Het afvangproces gebruikt daarnaast warmte, die wordt gewonnen uit de stoom die wordt opgewekt na afvalverbranding. Doordat er meer stoom wordt afgetapt, kan er minder elektriciteit worden opgewekt ten opzichte van de situatie waarin geen CO_2 wordt afgevangen. Deze gederfde elektriciteit

door CO_2-afvang wordt meegenomen in de LCA (omdat hierdoor andere elektriciteits-centrales meer energie moeten opwekken). Ook worden bij de CO_2-afvang enkele andere hulpmiddelen gebruikt.

Na de CO_2-afvang wordt de CO_2 opgewaardeerd om de concentratie te verhogen en vloeibaar gemaakt.

Transport per vrachtwagen/OCAP

Hierna wordt de CO_2 als vloeistof vanaf ARN per vrachtwagen naar de OCAP-pijpleiding vervoerd (op 115 km van ARN). Via de OCAP-pijpleiding wordt de CO_2 óf naar de glas-tuinbouw óf naar een CCS-locatie vervoerd.

Sinds 2005 wordt door OCAP (Organic CO_2 for Assimilation by Plants) CO_2 uit de industrie via een voormalige oliepijpleiding tussen Rotterdam en Amsterdam naar de glastuinbouw geleid. Vanaf 2016 wordt ook CO_2 afgevangen op enkele plekken die niet aan de OCAP-leiding liggen. Die CO_2 wordt na afvang vloeibaar gemaakt in een liquefactie-installatie en daarna met vrachtwagens getransporteerd naar waar op dat moment CO_2-vraag is. De CO_2 van OCAP wordt in de glastuinbouw gebruikt om gewassen mee te bemesten; CO_2 versnelt de groei van planten.

CO_2 van de OCAP-pijpleiding wordt voornamelijk 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.

Om bedrijven ook in de winter een kans te geven om hun CO_2 af te kunnen vangen, wordt gekeken naar het uitbreiden van de OCAP-leiding naar de Noordzee, om daar CO_2 op te slaan in de diepe ondergrond (Carbon Capture and Storage: CCS). Hiervoor worden koppelingen gerealiseerd met CCS-locaties.

Benutting/opslag van CO_2

We analyseren twee scenario's voor toepassing van de CO_2:

1. **100% CCS.**
   Alle bij ARN afgevangen CO_2 wordt via het OCAP-netwerk getransporteerd naar een CCS-locatie en daar permanent opgeslagen in lege gasvelden.
2. **50% CCS en 50% CCU.**
   De helft van de bij ARN afgevangen CO_2 wordt via het OCAP-netwerk getransporteerd naar een CCS-locatie en daar permanent opgeslagen in lege gasvelden. De helft van de bij ARN afgevangen CO_2 wordt via het OCAP-netwerk naar de glastuinbouw getransporteerd en daar ingezet.

De CO_2 die via het OCAP-netwerk naar de glastuinbouw gaat, wordt gasvormig geleverd (direct via het netwerk). De CO_2 die in de glastuinbouw wordt ingezet, zorgt er deels voor dat er minder aardgas wordt verbrand of andere fossiele CO_2 wordt ingezet. Dit effect wordt meegenomen in de LCA.

2.4 Milieueffect: klimaatimpact

In deze studie wordt de klimaatimpact, oftewel de bijdrage aan globale klimaatverandering door de uitstoot van broeikasgassen, gekwantificeerd. Andere milieueffecten zijn niet meegenomen. De klimaatimpact is berekend met de beoordelingsmethode IPCC 2021 GWP100 V1.03.

Biogene koolstof

Een deel van de afgevangen CO_2 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 CO_2 uit alle ketenstappen van een proces moeten worden meegenomen om de impact ervan op klimaatverandering te bepalen.

Deze studie neemt de opname van CO_2 in biogene producten die worden verwerkt door ARN niet mee, maar start vanaf de afvang van CO_2 uit rookgas van afvalverbranding. 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 CO_2 in het CCU/CCS-systeem: alle CO_2-eq.-emissies zorgen voor klimaatverandering. Deze methode voorkomt dubbeltelling van biogene CO_2-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 AEC.
2. Er wordt verschil gemaakt tussen de milieu-impact van biogeen en fossiel CO_2 in het CCU/CCS-systeem: alleen fossiele CO_2-emissies zorgen voor klimaatverandering. Hier heeft kortcyclische, biogene CO_2 geen effect op klimaatverandering, alleen CO_2-eq.-emissies van fossiele oorsprong hebben dit effect.

De klimaatimpactreductie per ton afgevangen CO_2 in vergelijking met de situatie zonder CO_2-afvang en toepassingen is hetzelfde bij beide methodes.

2.5 Multifunctionaliteit

Carbon Capture and Utilisation 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 CO_2-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), systeemuitbreiding 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 CO_2 in de glastuinbouw) wordt vergeleken met CO_2-gebruik in de glastuinbouw die via een conventionele methode is geproduceerd.

2.6 Gebruikte gegevens en datakwaliteit

Een LCA-model bestaat uit 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 zijn gebaseerd:

- CO_2-afvang en -nabewerking bij ARN. Data is aangeleverd door ARN op basis van een engineeringsstudie uitgevoerd door Bilfinger.
- Vervloeiing van CO_2 bij ARN. Data is afkomstig uit de engineeringsstudie uitgevoerd door Bilfinger en geverifieerd door OCAP.
- Transport over OCAP-pijpleiding: data verkregen van OCAP.
- Benutting van CO_2 in de glastuinbouw: op basis van de eerdere studie van CE Delft naar CCU in de glastuinbouw (CE Delft, 2021a).
- Opslag van CO_2 (CCS): data verkregen van OCAP.

Voor de achtergrondprocessen is gebruikgemaakt van de ecoinvent v3.10 LCA-database (ecoinvent, 2024) met de versie ‘cut-off by classification’.

3 Inventarisatie

In dit hoofdstuk wordt de geïnventariseerde data per stap in het CCS/CCU-systeem beschreven. De verschillende stappen zijn:
- CO_2-afvang en nabewerking bij ARN (Paragraaf 3.1);
- vervloeiing bij ARN (Paragraaf 3.2);
- transport van ARN naar OCAP (Paragraaf 3.3)
- transport via OCAP-pijpleiding (Paragraaf 3.4)
- benutting van CO_2 in de glastuinbouw (Paragraaf 3.5)
- benutting van CO_2 voor opslag (Paragraaf 3.6).

Bedrijfsgevoelige informatie van de afvang en nabewerking bij ARN is niet beschreven in dit hoofdstuk.

3.1 CO_2-afvang en nabewerking

De geplande CO_2-afvanginstallatie bij ARN gebruikt absorptie als afvangtechniek. De CO_2-rijke productstroom bevat na de afvangstap nog onzuiverheden, met name water. De productstroom wordt in de nabewerkingsstap verder gezuiverd en gecomprimeerd. In de door ARN aangeleverde data zijn de data voor de afvang- en de nabewerkingsstap gecombineerd.

In Tabel 1 zijn de gegevens en de bijpassende ecoinvent-processen gegeven voor onderdelen van de CO_2-afvang. De hoeveelheden per gebruikt onderdeel zijn te vinden in de losse bedrijfsbijlage. Het warmtegebruik bij de CO_2-afvang gaat ten koste van de hoeveelheid elektriciteit die ARN produceert. Deze elektriciteitsderving is meegenomen in de analyse.

ARN wint warmte terug uit de CO_2-afvanginstallatie. Deze warmte wordt geleverd aan het warmtenet. Als er geen warmteterugwinning bij de CO_2-afvang plaats zou vinden, wordt een even grote hoeveelheid warmte aan het warmtenet geleverd (door een contractuele verplichting). De productie van deze warmte gaat dan ten koste van de elektriciteitsproductie. Er is dan dus sprake van een grotere elektriciteitsderving door CO_2-afvang.
In een gevoeligheidsanalyse bekijken we de klimaatimpact van CO_2-afvang bij ARN zonder warmteterugwinning.

We nemen aan dat het aandeel biogene CO_2 in de af te vangen CO_2 bij ARN 63,6% is. Deze waarde is gelijk aan de waarde die is gebruikt in CE Delft (2021a) waardoor de resultaten goed te vergelijken zijn. Daarnaast is deze waarde in lijn met het aandeel biogene CO_2 berekend door ARN (62,2%) en het aandeel biogene CO_2 uit afvalverbranding dat RVO rapporteert (64%) (RVO, 2024).

Tabel 1 - Data-inventarisatie van CO_2-afvang

Input	**Methode modellering** *ecoinvent v 3.10-datasets schuingedrukt*
Solvent	*Monoethanolamine {GLO}|*
Elektriciteit	Model van de gemiddelde Nederlandse elektriciteitsmix in 2030 (CE Delft, 2023)
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 {RER}|*
Zwavelzuur	*Sulfuric acid {RER}|*

Input	Methode modellering *ecoinvent v 3.10-datasets schuingedrukt*
Antischuimmiddel	*Non-ionic surfactant {GLO}|*
Koelwater	Water uit een rivier of kanaal (input uit de natuur). ARN gebruikt effluent van de aangrenzende rioolwaterzuiveringsinstallatie (RWZI), dat anders terug zou vloeien naar het oppervlaktewater.
Demiwater	*Water, deionised {Europe without Switzerland}|*
Outputs	**Methode modellering** *ecoinvent v 3.10-datasets schuingedrukt*
Actief koolafval	*Hard coal ash {NL}|, residual material landfill*
Afvalwater	*Wastewater from glass production {RoW}| treatment of wastewater*
Solvent (naar verbranding)	CO_2-emissies bij verbranding: 1,44 kg CO_2-eq./kg (op basis van molecuulformule monoethanolamine)

3.2 Vervloeiing afgevangen CO_2

Na het opwerken van de CO_2 wordt deze vloeibaar gemaakt bij ARN. Tabel 2 geeft de gegevens en de bijbehorende ecoinvent-processen voor vervloeiing van de CO_2 bij ARN weer. De hoeveelheden per gebruikt onderdeel zijn te vinden in de losse bedrijfsbijlage.

Tabel 2 - Data-inventarisatie van vervloeiing van CO_2 bij ARN

Input	Methode modellering *ecoinvent v 3.10-datasets schuingedrukt*
Silicagel	*Sodium silicate, solid {RER}|*
Elektriciteit	Model van de gemiddelde Nederlandse elektriciteitsmix in 2030 (CE Delft, 2023)
Koelwater	Water uit een rivier of kanaal (input uit de natuur)
Outputs	**Methode modellering** *ecoinvent v 3.10-datasets schuingedrukt*
Silicagel	*Municipal solid waste {NL}| treatment of municipal solid waste*
Afvalwater	Gaat terug het proces in en heeft dus geen klimaatimpact

3.3 Transport per vrachtwagen van ARN naar OCAP-pijpleiding

Er is aangenomen dat het type vrachtwagen dat wordt gebruikt een trekker-oplegger (zwaar, EURO 6) is. Deze vrachtwagen rijdt op diesel. De transportafstand tussen ARN en de pijpleiding is 115 km (enkele reis). Zowel de heenweg (beladen) als de terugweg (onbeladen) worden meegenomen in de LCA. De klimaatimpact van vrachtwagen-transport is gemodelleerd op basis van STREAM Goederenvervoer (CE Delft, 2021b).

Tabel 3 - Data-inventarisatie van transport van CO_2 van ARN naar de OCAP-pijpleiding

Inputs	Hoeveelheid (per ton CO_2 vervloeid)	Methode modellering *ecoinvent v 3.10-datasets schuingedrukt*
Vrachtwagentransport (tkm)	164 tkm	Model gebaseerd op STREAM (CE Delft, 2021b). Het STREAM model gaat uit van 70% belading, terwijl het in het geval van het transport van CO_2 gaat om 50% belading (gemiddeld over de heen- en terugweg). We corrigeren voor dit verschil.

3.4 Transport via OCAP-pijleiding

Voor transport van gasvormig CO_2 per pijpleiding is energie nodig. In Tabel 4 zijn de gebruikte data en ecoinvent-processen te vinden. Het elektriciteits- en warmteverbruik is door OCAP aangeleverd per jaar. We hebben het energieverbruik/ton CO_2 daarom berekend door het elektriciteits- en aardgasverbruik/jaar te delen door 600.000 ton CO_2; de huidige hoeveelheid CO_2 op de OCAP-pijpleiding.

Tabel 4 - Data-inventarisatie van transport per OCAP-pijpleiding

Inputs	**Hoeveelheid (per ton CO_2 op de OCAP-pijpleiding)**	**Methode modellering** *ecoinvent v 3.10-datasets schuingedrukt*
Elektriciteit (kWh)	0,065 kWh	Model van de gemiddelde Nederlandse elektriciteitsmix in 2030 (CE Delft, 2023)
Aardgasverbruik (m^3)	0,286 m^3	*Natural gas, high pressure {NL}|*
Outputs	**Hoeveelheid (per ton CO_2 op de OCAP-pijpleiding)**	**Methode modellering** *ecoinvent v 3.10-datasets schuingedrukt*
CO_2-emissie door aardgasverbranding (kg)	0,509 kg	Emissie naar de lucht

3.5 CO_2-benutting in de glastuinbouw

In de glastuinbouw wordt CO_2 als bemesting voor gewassen toegepast om snellere groei van planten te stimuleren. Afgevangen CO_2 kan hiervoor worden gebruikt. Het is belangrijk om op te merken dat de CO_2-reductie door het CCU-systeem met deze toepassing niet plaats-vindt omdat de gewassen CO_2 opnemen; deze opslag is immers slechts van korte duur (tot consumptie van het gewas). De afgevangen CO_2 die door de gewassen wordt opgenomen komt na consumptie weer vrij in de atmosfeer. De milieuwinst zit hier in de substitutie van het referentiesysteem.

Referentiesysteem

Op dit moment wordt op verschillende manieren voorzien in de CO_2-vraag van de glastuin-bouw. Een deel van de CO_2 wordt geproduceerd uit eigen gasbranders of wkk's; 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 verstookt in de kassen.

Er zijn vier redenen voor de glastuinbouw om externe CO_2 in de zetten:

1. Wanneer er geen warmtevraag is (bijvoorbeeld in de zomermaanden) – hiermee wordt voorkomen dat er aardgas wordt verbrand voor alleen CO_2-productie (dat gebeurt in de huidige situatie, *zomerstook* genoemd).
2. Wanneer er gebruik wordt gemaakt van alternatieve warmtebronnen waaruit geen CO_2 vrijkomt, zoals geothermie of warmte van een warmtenet.
3. Wanneer er sprake is van gevoelige gewassen die alleen met CO_2 met een hoge zuiver-heid kunnen worden bemest (zoals bloemen).
4. Wanneer er boven op de CO_2 uit aardgasgebruik, extra CO_2 wordt toegevoegd om de plantgroei nog meer te stimuleren.

Omdat de externe CO_2 die op dit moment wordt toegepast voor Reden 3 en 4 in de glastuinbouw een voornamelijk **fossiele** oorsprong heeft, kan gebruik van externe CO_2 van ARN die fossiele emissies (voor een deel) reduceren in het geval van Reden 3 en 4. Daarnaast leidt het gebruik van externe CO_2 van ARN in het geval van Reden 1 tot minder aardgasverbranding.

Een lastig te modelleren situatie is wanneer CO_2 wordt toegepast bij een alternatieve warmtebron (Reden 2). Wanneer er externe CO_2 moet worden toegepast omdat er hernieuwbare warmte wordt gebruikt in de kas, moet het klimaatvoordeel van het gebruik van externe CO_2 in combinatie met hernieuwbare warmtebronnen worden toegerekend aan zowel de productie van hernieuwbare warmte als de levering van externe CO_2. Het gaat hier alleen om CO_2 die moet worden toegevoegd op de momenten dat er warmtebehoefte is, anders gaat het om vervanging van zomerstook (Reden 1). Omdat zowel hernieuwbare warmtebronnen als de levering van externe CO_2 nodig zijn voor CO_2-reductie ten opzichte van de huidige situatie, rekenen we 50% van het klimaatvoordeel van een vermindering in aardgasgebruik toe aan het gebruik van de bij ARN afgevangen CO_2. In de resultaten laten we ook het toerekenen van zowel 0 als 100% van het milieuvoordeel aan het gebruik van bij ARN afgevangen CO_2 zien door middel van foutbalken (zie Hoofdstuk 4).

Tot slot is de vraag of de referentie voor de geleverde CO_2 in 2030 voor Reden 1 en 2 inderdaad CO_2 uit aardgasverbranding en voor Reden 3 en 4 extern geleverde **fossiele** CO_2 blijft. De vraag is dus eigenlijk: ‘Hoelang kun je aan blijven geven dat er bij een ton geleverde CO_2 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 klimaatimpactreductie per ton geleverde CO_2 afneemt met het WLO-scenario (CPB & PBL, 2015). We gaan in deze studie uit van een klimaatimpactreductie per ton geleverde CO_2 van 66,5% in 2030 op basis van het WLO-scenario Laag.

De daadwerkelijke broeikasgasemissiereductie bij toepassing van afgevangen CO_2 in de glastuinbouw in 2030 is onzeker. We voeren daarom een gevoeligheidsanalyse uit, waarin we de reductiefactor variëren. Als ondergrens nemen we een reductiefactor van 42% aan. Volgens de KEV zou de glastuinbouw in 2030 een maximale broeikasgasemissiereductie van 58% moeten kunnen behalen ten opzichte van de broeikasgasuitstoot in 1990 (PBL, 2023).
Als bovengrens nemen we een reductiefactor van 100%. In een analyse van de WUR van het effect van extra CO_2-inkoop op de broeikasgasemissies van de glastuinbouw in 2030, wordt helemaal geen reductiefactor meegenomen om te corrigeren voor een groter aanbod aan biogene CO_2 in 2030 (Smit, 2023).

Verdeling over de vier redenen in 2030

In CE Delft (2021a) is een verdeling opgenomen over de vier redenen voor het toedienen van CO_2 in de glastuinbouw in 2030. Tabel 5 geeft deze verdeling weer. Om de resultaten van deze analyse vergelijkbaar te maken met de resultaten van CE Delft (2021a), houden we hier dezelfde verdeling aan.

Tabel 5 - (Reden voor) CO_2-vraag in glastuinbouw in 2030 in Nederland

Reden voor CO_2-vraag	**Nederlands gemiddelde 2030**
CO_2-gebruik in de zomer (1)	11,2%
Hernieuwbare warmtebron (2)	72,6%
Gevoelige gewassen en extra stimuleren plantgroei (3 en 4)	16,1%
Totale aardgasreductie	**(11,2% + 50% * 72,6%) * 66,5% = 31,6%**
Totale fossiele CO_2-reductie uit andere externe bron	**16,1% * 66,5% = 10,7%**

Toelichting: Gemiddelde over de redenen is bepaald door een gewogen gemiddelde te maken tussen de minimale en maximale inzet van externe CO_2. Bij de toepassing van externe CO_2 in het geval van een hernieuwbare warmtebron, wordt in de basisanalyse 50% van de reductie toegerekend aan de externe CO_2.

Tabel 6 geeft de data-inventarisatie weer van het toepassen van afgevangen CO_2 in de glastuinbouw. De input is gelijk aan de output (1 ton afgevangen CO_2). Dit komt doordat de CO_2 slechts kortdurend in de gewassen wordt opgeslagen. Bij de referentie worden de vermeden aardgasproductie en CO_2-emissies weergegeven bij toerekening van 50% van de reductie bij levering aan glastuinbouw met een hernieuwbare warmtebron en een broeikasgasemissiereductie van 66,5%.

Tabel 6 - Data-inventarisatie van benutting van afgevangen CO_2 in de glastuinbouw

Inputs	**Hoeveelheid (per ton CO_2 benut in de glastuinbouw)**	**Methode modellering** *ecoinvent v 3.10-datasets schuingedrukt*
CO_2 (ton)	0,636 ton biogeen CO_2 0,364 ton fossiel CO_2	Gemodelleerd door CE Delft zoals beschreven in Paragraaf 3.4
Outputs	**Hoeveelheid (per ton CO_2 benut in de glastuinbouw)**	**Methode modellering** *ecoinvent v 3.10-datasets schuingedrukt*
CO_2-emissies bij einde levensduur (ton)	0,636 ton biogeen CO_2 0,364 ton fossiel CO_2	Emissie naar lucht
Referentie	**Hoeveelheid (per ton CO_2 benut in de glastuinbouw)**	**Methode modellering** *ecoinvent v 3.10-datasets schuingedrukt*
Vermeden CO_2-emissies door aardgastoevoer (ton)	(-)178 m^3	*Natural gas, high pressure {NL}|*
Vermeden CO_2-emissies door aardgasverbranding (ton)	(-)0,316 ton	Emissie naar lucht. Bij toerekening van 50% van de reductie bij levering aan glastuinbouw met een hernieuwbare warmtebron.
Vermeden CO_2-emissies van ander fossiel CO_2-gebruik (ton)	(-)0,107 ton	Emissie naar lucht. Bij toerekening van 50% van de reductie bij levering aan glastuinbouw met een hernieuwbare warmtebron.

3.6 Carbon Capture & Storage (CCS)

Naast CCU is er ook de mogelijkheid om CO_2 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 CO_2 in lege gasvelden op te slaan. Hiervoor wordt een koppeling gerealiseerd met CCS-netwerken. Het is op deze manier mogelijk voor de OCAP-bedrijven om het hele

jaar door CO_2 te leveren, dus niet alleen tijdens het seizoen waarin er vraag vanuit de glastuinbouw is.

Voor CO_2-opslag is van het volgende uitgegaan. De CO_2 uit de OCAP-pijpleiding moet worden gecomprimeerd tot de superkritische fase. Daarna kan de superkritische CO_2 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 CO_2 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 CO_2 een biogene oorsprong heeft en daarom niet altijd wordt meegenomen in de emissiebalansen, kan worden gesteld dat de opslag van deze CO_2 leidt tot negatieve fossiele CO_2-emissies. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat dit biogene voordeel nu wordt toegerekend aan de verbranding in de AEC en de CO_2-kwaliteit van de elektriciteit en warmte die daar uitkomen. Bij het toerekenen aan eventuele CO_2-projecten zou de elektriciteit en warmte niet meer groen en CO_2-neutraal genoemd mogen worden.

Het energiegebruik van de CCS-processen en de diffuse emissies die plaatsvinden tijdens het transport en de compressie is verkregen van OCAP en wordt gepresenteerd in Tabel 7.

Tabel 7 - Data-inventarisatie van CCS-toepassing van CO_2 op de OCAP-pijpleiding

Inputs	**Hoeveelheid (per ton CO_2 op de OCAP-pijpleiding)**	**Methode modellering** *ecoinvent v 3.10-datasets schuingedrukt*
Elektriciteitsgebruik voor compressie van 20 bar naar 33 bar (kWh)	15 kWh	Model van de gemiddelde Nederlandse elektriciteitsmix in 2030 (CE Delft, 2023)
Elektriciteitsgebruik voor compressie van 33 bar naar 180 bar (MJ)	122 MJ	Model van de gemiddelde Nederlandse elektriciteitsmix in 2030 (CE Delft, 2023)
Elektriciteit voor het wegkoelen van de condensatie enthalpie (kWh)	4,3 kWh	Model van de gemiddelde Nederlandse elektriciteitsmix in 2030 (CE Delft, 2023)
Outputs	**Hoeveelheid (per ton CO_2 op de OCAP-pijpleiding)**	**Methode modellering** *ecoinvent v 3.10-datasets schuingedrukt*
Diffuse CO_2-emissies pijpleiding (kg)	2 kg	Emissie naar lucht
Diffuse CO_2-emissies compressie (kg)	1 kg	Emissie naar lucht
Opslag biogeen CO_2 (ton)	(-)1 ton, waarvan 63,6% biogeen	Opslag van CO_2

4 Resultaten

In dit hoofdstuk geven we de resultaten weer van de levenscyclusanalyse van CO_2-afvang en -benutting bij ARN.

4.1 Toelichting bij de resultaten

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 Paragraaf 3.5 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 CO_2: wordt biogene CO_2 wel of niet meegenomen in de analyse? Daarom presenteren we de resultaten hier op twee manieren:

1. Alle CO_2-emissies zijn meegenomen in de analyse. De uitstoot van zowel biogene als fossiele CO_2-emissies is meegenomen in de analyse.
2. Alleen fossiele CO_2-emissies zijn meegenomen in de analyse. De uitstoot van biogene CO_2-emissies zijn niet meegenomen.

Of de biogene CO_2-emissies wel of niet worden meegenomen in de analyse, heeft alleen invloed op de absolute klimaatimpact van de CO_2-afvang. Voor de broeikasgasemissie-reductie ten opzichte van de huidige situatie maakt het niet uit of biogene CO_2-emissies wel of niet worden meegenomen.

Een ander aspect dat veel invloed heeft op de resultaten, is het referentiesysteem (bij CCU in de glastuinbouw: CO_2-voeding van andere (fossiele) oorsprong). In de in deze studie gepresenteerde resultaten zal de substitutie van het referentiesysteem zorgen voor vermeden emissies (en dus een positiever eindresultaat voor de CCU-route). Zoals eerder beschreven in Paragraaf 3.5, is er discussie mogelijk over de allocatie van de CO_2-reductie in de glastuinbouw als zowel externe CO_2-levering als een duurzame warmtebron nodig is om klimaatimpactreductie te bewerkstelligen. In de basisanalyse hebben we de klimaat-impactreductie voor 50% toegerekend aan de inzet van externe CO_2; deze is in de resultatenfiguren te zien als een gekleurde balk. We laten door middel van foutbalken de invloed op de resultaten zien van een toerekening van 0 en van 100% aan de inzet van externe CO_2. Dit zijn de uitersten waartussen de verdeling zou kunnen liggen. In de contributieanalyse in Paragraaf 4.3 is zichtbaar wat de bijdrage van dit referentiesysteem aan de totale CO_2-footprint is, maar in deze studie presenteren we geen resultaten waarin het referentiesysteem buiten beschouwing wordt gelaten.

4.2 Klimaatimpact CO_2-afvang en toepassing

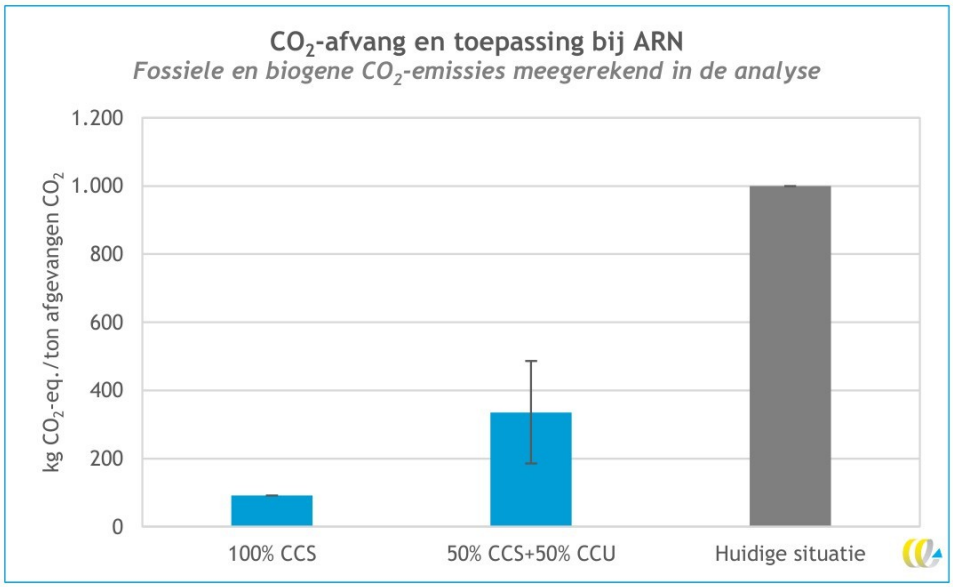
Figuur 3 en Figuur 4 geven de klimaatimpact weer van de afvang van CO_2 bij ARN en het ondergronds opslaan (CCS) of toepassen in de glastuinbouw (CCU) van de afgevangen CO_2. In Figuur 3 zijn zowel de fossiele als de biogene CO_2-emissies meegenomen, in Figuur 4 alleen de fossiele CO_2-emissies.

De gekleurde balken in de figuren, die het scenario met 50% CCS en 50% CCU weergeven, geven de emissie weer wanneer 50% van emissiereductie die wordt behaald wanneer de CO_2 wordt geleverd aan glastuinbouw met hernieuwbare warmtebron, wordt toegerekend aan ARN. De foutbalken geven de bandbreedte van de resultaten weer bij een toerekening van

0-100%. Hoe lager de kg CO_2-eq. per ton afgevangen CO_2, hoe hoger de klimaatimpact-reductie ten opzichte van de huidige situatie.

Als zowel fossiele als biogene CO_2-emissies worden meegenomen (Figuur 3) is de klimaat-impact van CO_2-afvang bij ARN 91 kg CO_2-eq./ton afgevangen CO_2 als alle CO_2 ondergronds wordt opgeslagen (100% CCS). In het scenario dat 50% van de CO_2 wordt opgeslagen en 50% wordt toegepast in de glastuinbouw, is de klimaatimpact 335 kg CO_2-eq./ton afgevangen CO_2, als 50% van de emissiereductie die wordt behaald bij toepassing in glastuinbouw met duurzame warmte wordt toegerekend aan de afgevangen CO_2. Als die toerekeningsfactor 0% (negatieve foutmarge) is, is de klimaatimpact 186 kg CO_2-eq./ton afgevangen CO_2. Bij een toerekeningsfactor van 100% (positieve foutmarge) is de klimaatimpact 486 kg CO_2-eq./ton afgevangen CO_2.

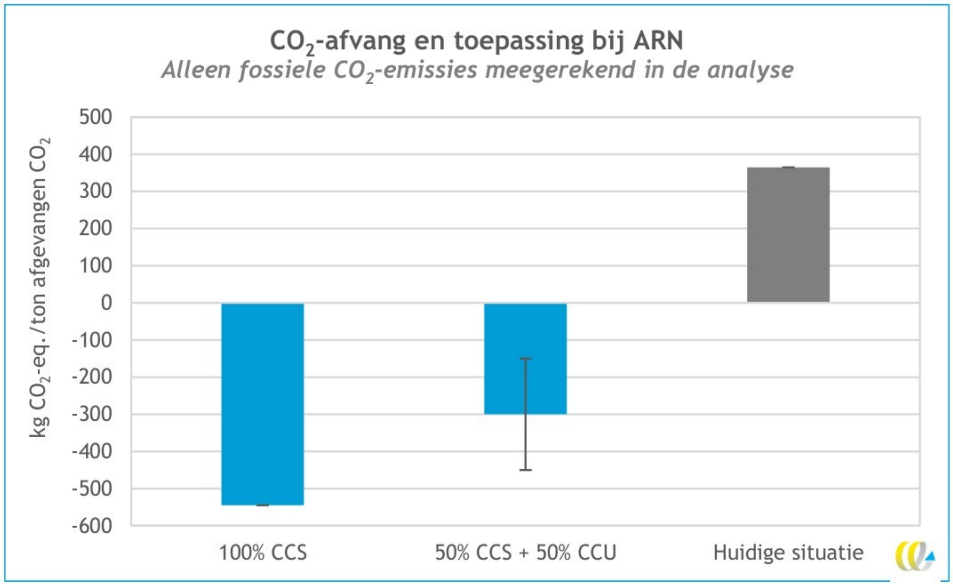
Figuur 3 - Klimaatimpact van de afvang van CO_2 bij ARN en de toepassing van de afgevangen CO_2, waarbij zowel biogene als fossiele CO_2-emissies zijn meegenomen, in kg CO_2-eq./ton afgevangen CO_2



Als alleen fossiele CO_2-emissies worden meegenomen in de analyse (Figuur 4), is de klimaat-impact van CO_2-afvang bij ARN -545 kg CO_2-eq./ton afgevangen CO_2 als alle CO_2 ondergronds wordt opgeslagen (100% CCS). In het scenario dat 50% van de CO_2 wordt opgeslagen en 50% wordt toegepast in de glastuinbouw, is de klimaatimpact -301 kg CO_2-eq./ton afgevangen CO_2, als 50% van de emissiereductie die wordt behaald bij toepassing in glastuinbouw met duurzame warmte wordt toegerekend aan de afgevangen CO_2. Als die toerekeningsfactor 0% (negatieve foutmarge) is, is de klimaatimpact -150 kg CO_2-eq./ton afgevangen CO_2. Bij een toerekeningsfactor van 100% (positieve foutmarge) is de klimaatimpact -450 kg CO_2-eq./ton afgevangen CO_2. In de huidige situatie zonder CO_2-afvang is de klimaatimpact 364 kg CO_2-eq./ton CO_2, omdat alleen het fossiele deel (36,4%) van de CO_2-uitstoot wordt mee-genomen.

De negatieve klimaatimpact in Figuur 4 betekent dat er netto CO_2 uit de atmosfeer wordt gehaald. Dit komt door de opslag van biogene CO_2. De emissies van biogene CO_2 worden in deze analyse niet meegenomen, de opslag ervan wel. Deze opslag is groter dan de emissies van fossiele CO_2 die vrijkomen bij de afvang en het transport van CO_2.

Figuur 4 - Klimaatimpact van de afvang van CO_2 bij ARN en de toepassing van de afgevangen CO_2, waarbij alleen fossiele CO_2-emissies zijn meegenomen, in kg CO_2-eq./ton afgevangen CO_2



Broeikasgasemissiereductie

De broeikasgasemissiereductie is het verschil tussen de klimaatimpact in de huidige situatie en de klimaatimpact van het CO_2-afvangscenario. Het wel of niet meenemen van de biogene CO_2-emissies heeft geen invloed op de broeikasgasemissiereductie. Tabel 8 geeft de broeikasgasemissiereductie weer voor de afvang van CO_2 bij ARN en opslag (CCS) en toepassing (CCU) van de afgevangen CO_2. Het '% toerekening' geeft weer welk deel van de emissiereductie bij levering aan glastuinbouw met een hernieuwbare warmtebron wordt toegerekend aan de afgevangen CO_2.

Bij het scenario waarin 100% van de afgevangen CO_2 naar CCS gaat, wordt een emissiereductie van 909 kg CO_2-eq./ton afgevangen CO_2 bereikt. Het percentage toerekening heeft hier geen invloed op de resultaten, omdat dit alleen van toepassing is op CO_2 die geleverd wordt aan de glastuinbouw.

Bij het scenario met 50% CCS en 50% CCU ligt de broeikasgasemissiereductie tussen de 514 kg CO_2-eq./ton afgevangen CO_2 (bij 0% toerekening) en 814 kg CO_2-eq./ton afgevangen CO_2 (bij 100% toerekening). De behaalde emissiereductie hangt in dit scenario dus in grote mate af van de toerekening van de emissiereductie bij levering aan glastuinbouw met een hernieuwbare warmtebron. Ook als deze toerekening 0% is, wordt nog steeds een relatief grote emissiereductie behaald door de 50% CCS. In alle gevallen is de emissiereductie in het scenario van 50% CCS en 50% CCU wel lager dan bij 100% CCS.

Tabel 8 - Reductie van de broeikasgasemissies per ton afgevangen CO_2 bij ARN ten opzichte van de situatie zonder afvang van CO_2

Scenario	Broeikasgasemissiereductie (kg CO_2-eq./ton afgevangen CO_2)		
% toerekening	*0%*	*50%*	*100%*
100% CCS	909	909	909
50% CCS/50% CCU	514	665	814

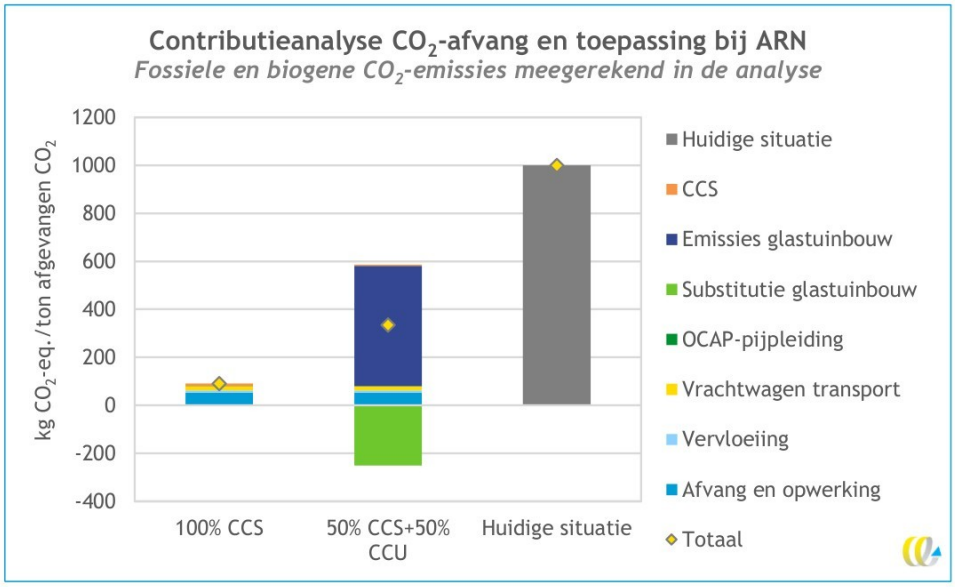
4.3 Contributieanalyse

Het resultaat in deze paragraaf geeft weer wat de bijdrage van verschillende processtappen is aan de totale klimaatimpact van de afvang en benutting of opslag van een ton CO_2. Dit geeft inzicht in hoe de CO_2-reductie ten opzichte van de huidige situatie, zoals gepresenteerd in Paragraaf 4.2 tot stand is gekomen.

Figuur 5 geeft de contributieanalyses van de twee scenario's voor CO_2-afvang bij ARN weer. Bij 100% CCS worden de CO_2-emissies voornamelijk veroorzaakt door de afvang- en opwerkprocessen bij ARN. De klimaatimpact van de overige processen (vervloeiing, transport en CCS) is beperkt.

Bij het scenario met 50% CCS en 50% CCU zijn er twee posten die de grootste impact hebben op het totaal: emissies glastuinbouw en substitutie glastuinbouw. De eerste zorgt voor uitstoot van CO_2, 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.

Figuur 5 - Contributieanalyse van de klimaatimpact van de afvang van CO_2 bij ARN en de toepassing van de afgevangen CO_2, waarbij alle zowel biogene als fossiele CO_2-emissies zijn meegenomen, in kg CO_2-eq./ton afgevangen CO_2



4.4 Gevoeligheidsanalyses

Onzekerheden in de resultaten zitten vooral in de onzekerheden over toepassing in de glastuinbouw – het belangrijkste voorbeeld is de gevoeligheid van resultaten voor toerekening van de klimaatimpactreductie bij toepassing in glastuinbouw als de reden voor CO_2-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.

4.4.1 Klimaatimpactreductiefactor toepassing glastuinbouw

Naast de hierboven beschreven toerekeningsvraag is ook de emissiereductiefactor bij het toepassen van CO_2 in de glastuinbouw onzeker. In de basisanalyse zijn we ervan uitgegaan dat het toepassen van CO_2 in de glastuinbouw zorgt voor een emissiereductie van 66,5%. Deze waarde is gebaseerd op het WLO-scenario Laag uit 2015 en gaat ervan uit dat er in 2030 ook zonder levering van CO_2 uit AEC's al meer biogene CO_2 toegepast gaat worden (33,5% in dit geval).

Inmiddels lijkt de emissiereductie in 2030 een stuk hoger uit te gaan vallen. In de glastuinbouw is een emissiereductie van 58% ten opzichte van 1990 mogelijk (PBL, 2023). Dit betekent dat de emissiereductie van het toepassen van externe CO_2 in de glastuinbouw slechts 42% zou zijn. Aan de andere kant zijn er ook studies naar de emissiereductie van het toepassen van afgevangen CO_2 in de glastuinbouw, die helemaal geen correctiefactor voor verduurzaming van de toegepaste CO_2 meenemen (Smit, 2023). De emissiereductie van het toepassen van externe CO_2 in de glastuinbouw is dan 100%. In deze gevoeligheidsanalyse bekijken we het effect van een broeikasgasemissiereductie van 42% en 100%.

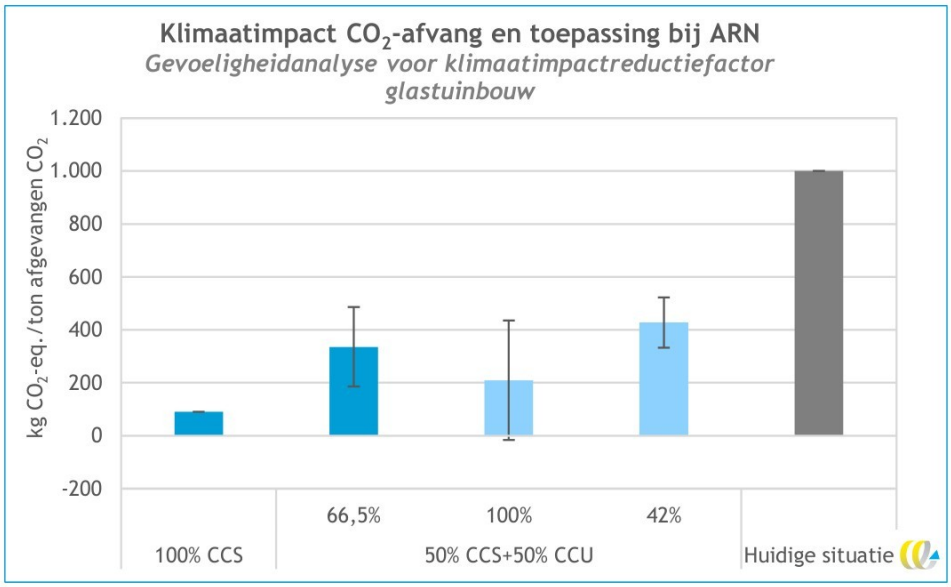
Figuur 6 laat het resultaat zien van de gevoeligheidsanalyse. De donkerblauwe balken en de grijze balk zijn hetzelfde als in Figuur 3, de lichtblauwe balken geven de klimaatimpact van de afgevangen CO_2 weer bij een emissiereductiefactor van respectievelijk 100% en 42%.

Bij een emissiereductiefactor van 100% neemt de klimaatimpact van de afvang en toepassing van CO_2 af met zo'n 40% ten opzichte van de klimaatimpact bij een reductiefactor van 66,5%. De foutmarge wordt ook groter, doordat het bij de toerekening van de emissiereductie om een grotere hoeveelheid gaat, die voor 0%, 50% of 100% kan worden toegerekend. Als de volledige emissiereductie van toepassing van CO_2 in glastuinbouw met duurzame warmte wordt toegerekend aan de afgevangen CO_2 (onderste uiterste van de foutmarge) dan ligt de klimaatimpact van 50% CCU + 50% CCS lager dan de klimaatimpact van 100% CCS.

Bij een emissiereductiefactor van 42% neemt de klimaatimpact van de afvang en toepassing van CO_2 met ongeveer 30% toe ten opzichte van de klimaatimpact bij een reductiefactor van 66,5%. De foutmarge wordt in dit geval kleiner.

Deze gevoeligheidsanalyse laat zien dat de emissiereductiefactor bij toepassing van CO_2 in de glastuinbouw een grote invloed heeft op de klimaatimpact van afgevangen CO_2 in het scenario 50% CCS + 50% CCU.

Figuur 6 - Klimaatimpact van CO_2-afvang en toepassing bij ARN, gevoeligheidsanalyse voor de broeikasgas-emissiereductiefactor; zowel fossiele als biogene CO_2-emissies zijn meegenomen in de resultaten, in kg CO_2-eq./ton afgevangen CO_2



4.4.2 Warmteterugwinning bij de CO_2-afvang

Bij de CO_2-afvanginstallatie van ARN wordt warmte teruggewonnen, die aan een warmtenet wordt geleverd. De teruggewonnen warmte zorgt ervoor dat de elektriciteitsderving lager is dan bij CO_2-afvang zonder warmteterugwinning. In deze gevoeligheidsanalyse berekenen we de klimaatimpact van CO_2-afvang en toepassing bij ARN zonder warmteterugwinning.

Tabel 9 laat de klimaatimpact van CO_2-afvang en toepassing bij ARN zien met warmte-terugwinning (bovenste rij) en zonder warmteterugwinning (onderste rij). Het gaat hier om de resultaten waarbij zowel de fossiele als de biogene CO_2-emissies zijn meegenomen.

Zonder warmteterugwinning is de klimaatimpact 12 kg CO_2-eq. per ton afgevangen CO_2 hoger dan met warmteterugwinning. Het effect is beperkt doordat het wel of niet terug-winnen van warmte alleen invloed heeft op de elektriciteitsproductie. Doordat de klimaat-impact van conventionele elektriciteitsproductie in 2030 beperkt is, heeft een iets lagere elektriciteitsproductie ook weinig invloed op de klimaatimpact van de CO_2-afvang.

Tabel 9 - Klimaatimpact van CO_2-afvang en toepassing bij ARN, met en zonder warmteterugwinning bij CO_2-afvang; zowel fossiele als biogene CO_2-emissies zijn meegenomen in de resultaten, in kg CO_2-eq./ton afgevangen CO_2

	100% CCS	50% CCS + 50% CCU	Huidige situatie
CO_2-afvang met warmteterugwinning	91	335	1.000
CO_2-afvang zonder warmteterugwinning	103	347	1.000

5 Discussie en conclusie

Afvalverwerker ARN B.V. (hierna ARN) is van plan een CO_2-afvanginstallatie te realiseren in Weurt. Deze studie kwantificeert de klimaatimpact van de installatie van een CO_2-afvangsysteem bij ARN, waarbij de afgevangen CO_2 wordt toegepast in de glastuinbouw (CCU) of opgeslagen in lege gasvelden (CCS).

De klimaatimpact is bepaald door middel van een ex ante levenscyclusanalyse (LCA) gebaseerd op data uit een engineeringstudie van de CO_2-afvanginstallatie bij ARN en data uit een eerdere analyse van CE Delft (CE Delft, 2021a). De analyse is uitgevoerd voor het zichtjaar 2030.

In deze studie wordt gekeken naar twee mogelijke scenario's voor de afgevangen CO_2:
1. Alle afgevangen CO_2 wordt permanent opgeslagen (CCS).
2. De helft van de afgevangen CO_2 wordt opgeslagen (CCS) en de helft wordt ingezet in de glastuinbouw om aardgasverbranding te vermijden (CCU).

5.1 Conclusies

Als alle afgevangen CO_2 permanent wordt opgeslagen, is de klimaatimpact 909 kg CO_2-eq./ton afgevangen CO_2 lager dan in de huidige situatie waarin geen afvang van CO_2 bij ARN plaatsvindt. De klimaatimpact wordt voornamelijk veroorzaakt door de afvang- en opwerkprocessen bij ARN.

Als de helft van de afgevangen CO_2 wordt opgeslagen en de helft wordt ingezet in de glastuinbouw, is de klimaatimpact 665 kg CO_2-eq./ton afgevangen CO_2 lager dan in de huidige situatie waarin geen afvang van CO_2 bij ARN plaatsvindt. Er zijn twee posten die de grootste impact hebben op het totaal: emissies uit de glastuinbouw en substitutie van emissies uit de glastuinbouw. De eerste zorgt voor de uitstoot van de afgevangen CO_2, en dankzij de tweede vindt er reductie plaats ten opzichte van de huidige situatie.

De klimaatimpactreductie is in het geval van CCU sterk afhankelijk van de manier van toerekening van het vermijden van aardgasverbranding bij het gebruik van duurzame warmte in de glastuinbouw. De klimaatimpactreductie van 665 kg CO_2-eq. geldt voor een toerekening van 50%; bij een toerekening van 0% of 100% is de klimaatimpactreductie respectievelijk 514 kg CO_2-eq./ton afgevangen CO_2 en 814 kg CO_2-eq./ton afgevangen CO_2.

Ten opzichte van de eerdere analyse van CE Delft (2021a) over CO_2-afvang bij andere AEC's zijn een aantal methodologische updates doorgevoerd:
- Voor het elektriciteitsverbruik wordt gerekend met de verwachte klimaatimpact van elektriciteit in 2030. De klimaatimpact ligt lager dan in de eerder studie, waardoor gederfde elektriciteit een kleinere invloed op de resultaten heeft.
- De gegevens voor CO_2-transport door pijpleidingen zijn opnieuw geverifieerd door OCAP. Het geschatte elektriciteitsverbruik voor compressie ligt 40% lager dan in de eerder studie. Dit heeft een beperkte invloed op de resultaten.
- Enkele verouderde processen uit de Ecoinvent LCA-database zijn vervangen door nieuwe processen.
- De klimaatimpact is berekend met de nieuwere IPCC 2021-methode, waarin de bevindingen van het IPCC Sixth Assessment Report (AR6) zijn verwerkt.

5.2 Onzekerheden en beperkingen

Voor de interpretatie van de resultaten zijn een aantal opmerkingen van belang:

- De procesgegevens voor CO_2-afvang en vervloeiing bij ARN geven de huidige verwachtingen op basis van de engineeringstudie uitgevoerd door Bilfinger. In de praktijk kunnen zaken zoals energieverbruik anders uitvallen (bijvoorbeeld wanneer op deellast wordt gedraaid). Deze processen hebben een beperkte invloed op de totale klimaatimpact, dus het is niet de verwachting dat afwijkingen tot grote wijzigingen in de resultaten leiden.

- De berekening van het klimaatvoordeel van het toepassen van afgevangen CO_2 in de glastuinbouw is complex, mede omdat deze studie zich richt op de situatie in 2030. Er speelt hier een aantal zaken:
  - Er is onzekerheid in de (verdeling over) motieven voor CO_2-gebruik bij de glastuinbouw.
  - De toerekening van het vermijden van aardgasverbranding bij het gebruik van duurzame warmte en afgevangen CO_2 is niet helemaal eenduidig vast te stellen.
  - De emissiereductie wordt veroorzaakt door de substitutie van de referentiesituatie, waarin fossiele CO_2 met name uit een aardgasketel wordt toegepast voor plantbemesting. Tuinders kunnen echter richting 2030 ook andere CO_2-bronnen gaan gebruiken, zoals een biogasketel of een biomassaketel. Hierdoor verandert de referentiesituatie, en daarmee de emissiereductie die CCU bewerkstelligt. In de toekomst wordt dus minder fossiele CO_2 gesubstitueerd dankzij CO_2 geleverd door ARN. De mate waarin de emissiereductie afneemt richting de toekomst is onzeker.

  Deze onzekerheden spelen alleen bij CCU/toepassing in de glastuinbouw, niet bij CCS. Het is hierbij belangrijk om te beseffen dat op de langere termijn het gebruik van fossiele brandstoffen zoals aardgas in alle sectoren zal moeten afnemen. Hoewel het dus onduidelijk is hoe lang aardgasgebruik nog als redelijke referentie kan dienen voor de glastuinbouw en wat een redelijke verdeling van het klimaatvoordeel van aardgasvervanging is, zal op de langere termijn het gebruik van (deels fossiele) afgevangen CO_2 uit AEC's in de glastuinbouw niet meer tot een klimaatvoordeel leiden, omdat hierbij fossiele CO_2 in de atmosfeer belandt.

- Bij de absolute klimaatimpact van de afgevangen CO_2 wordt onderscheid gemaakt tussen een waarde waarin de uitstoot van zowel biogene en fossiele CO_2 zijn meegenomen en een waarde waarin alleen de uitstoot van fossiele CO_2 is meegenomen. Bij het gebruik van die laatste waarde is het van belang dat het voordeel van biogene emissies niet ook wordt meegerekend bij het bepalen van de klimaatimpact van bijvoorbeeld de energie die door ARN wordt opgewekt.

- In deze studie wordt alleen gekeken naar de klimaatimpact van CO_2-afvang. Andere milieueffecten zijn niet onderzocht.

6 Literatuur

CE Delft. (2018a). *LCA CCU in de glastuinbouw vanuit Afvalenergiecentrales*.
CE Delft. (2018b). *Screening LCA for CCU routes connected to CO2 Smart Grid*.
CE Delft. (2021a). *LCA CCU in de glastuinbouw vanuit Afvalenergiecentrales - Update juni 2021*.
CE Delft. (2021b). *STREAM Goederenvervoer 2020 (versie 2)*.
CE Delft. (2023). *Ketenemissies elektriciteit, actualisatie elektriciteitsmix 2021*.
CPB, & PBL. (2015). *Nederland in 2030 en 2050: Twee referentiescenario's. Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving (WLO)*.
ecoinvent. (2024). *ecoinvent v3.10*. ecoinvent. https://support.ecoinvent.org/ecoinvent-version-3.10
PBL. (2023). *Klimaat- en Energieverkenning (KEV) 2023: Ramingen van broeikasgasemissies, energiebesparing en hernieuwbare energie op hoofdlijnen*.
RVO. (2024). *Nederlandse lijst van energiedragers en standaard CO2 emissiefactoren, versie januari 2024*.
Smit, P. (2023). *Energiemonitor van de Nederlandse glastuinbouw 2022*.