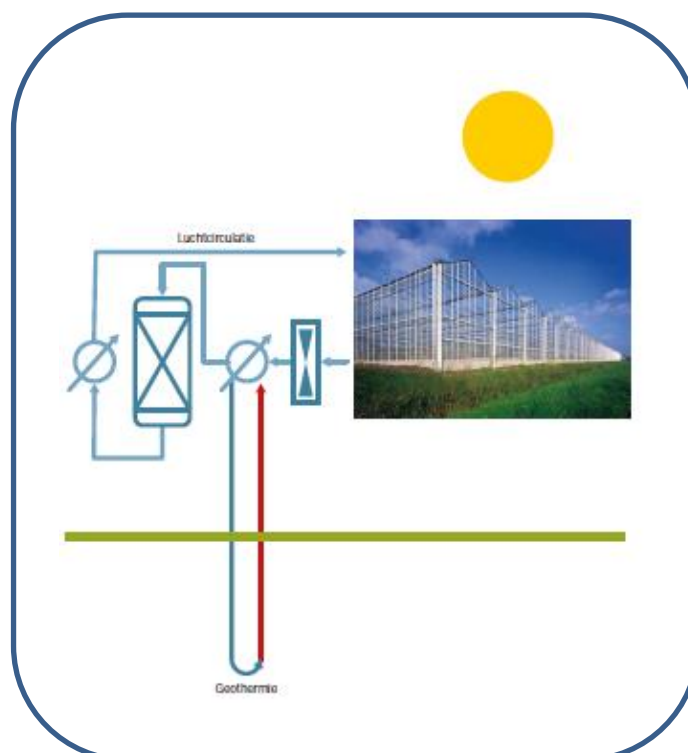


**RIJKSDIENST VOOR ONDERNEMEND  
NEDERLAND**

**Regeling Nationale EZ-Subsidies  
TSE 2017 – CCUS §4.2.5 Groen Gas Tender 2  
RVO-referentie – TCCU117014**

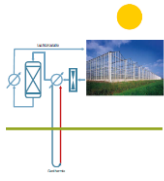


**Opwaarderen van de CO<sub>2</sub> concentratie in de  
glastuinbouw door middel van Air Capture**

**Openbare samenvatting**

**Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken en  
Klimaat, Nationale regelingen EZ-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door  
Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.**

<b>Document:</b>	Openbare samenvatting	
<b>Geschreven door:</b>	TNO: Rajat Bhardwaj, Marco Linders, Mark Roelands, Earl Goetheer Glastuinbouw Nederland: Dennis Medema	
<b>Datum:</b>	27 Februari 2020	



## Achtergrond

De glastuinbouw heeft de ambitie om in 2040 klimaat neutraal te zijn. Het aanpakken van de CO<sub>2</sub> voorziening voor de glastuinbouw is cruciaal om deze ambitie waar te maken. De glastuinbouw heeft CO<sub>2</sub> nodig om de planten optimaal te laten groeien. De belangrijkste bron voor CO<sub>2</sub> – het verbranden van aardgas – zal weg moeten vallen om de ambitie waar te maken om geen fossiele brandstoffen meer te hoeven gebruiken. De glastuinbouw is daarom hard op zoek naar alternatieven en heeft het liefst 'groene' CO<sub>2</sub>. CO<sub>2</sub> verkregen uit buitenlucht kan een belangrijke optie zijn, met name voor locaties buiten het huidige OCAP<sup>1</sup> netwerk, waarmee CO<sub>2</sub> vanuit de industrie aan de glastuinbouw in het West- en Oostland geleverd wordt.

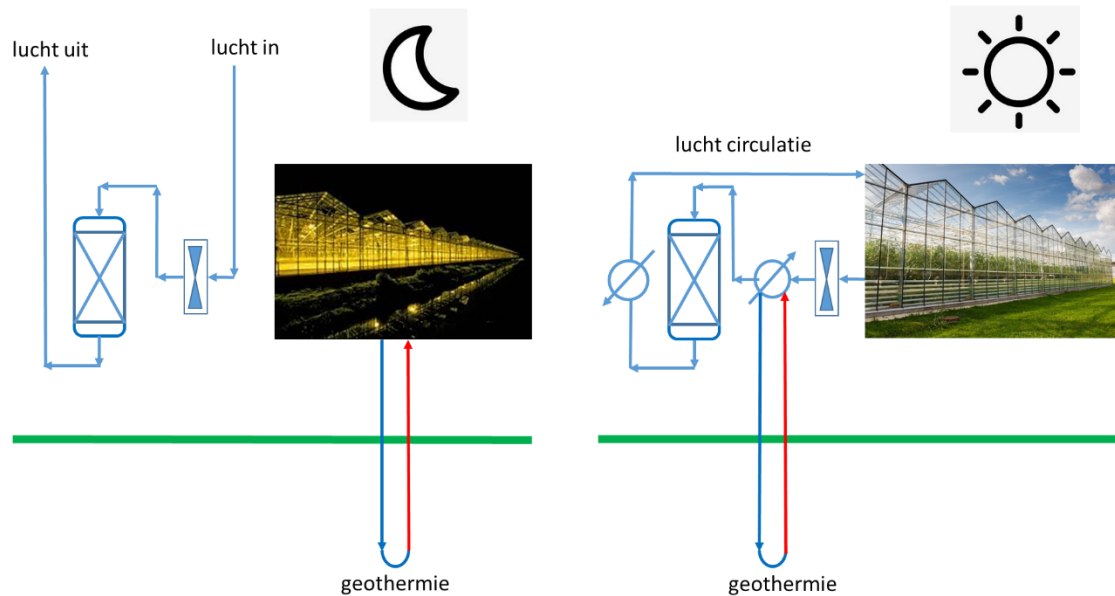
Een duurzame CO<sub>2</sub> voorziening is een voorwaarde voor het bereiken van energiebesparing en toepassen van duurzame energie (restwarmte, geothermie en biomassa). Zonder externe CO<sub>2</sub> geen verduurzamingslag en dan kunnen de ambities niet waargemaakt worden. Dit is met name relevant voor tuinbouwgebieden buiten het bestaande OCAP netwerk.

Het doel van dit project is het bieden van een kosteneffectieve oplossing voor een duurzame CO<sub>2</sub> voorziening in de glastuinbouw.

De tuinders buiten het leveringsgebied van OCAP produceren veelal hun eigen CO<sub>2</sub> door het verbranden van aardgas of krijgen de CO<sub>2</sub> aangeleverd per as (truck). Het opwaarderen van de CO<sub>2</sub> concentratie in de glastuinbouw door middel van Air Capture is een nieuw concept.

**Nacht: beladen van sorbent bed met CO<sub>2</sub> uit lucht**

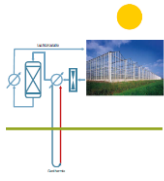
**Dag: verrijken van circulatie lucht met CO<sub>2</sub> uit sorbent bed**



*Figuur 1: nieuw concept voor de verrijking van kaslucht met CO<sub>2</sub>*

Figuur 1 toont een nieuw concept voor de verrijking van kaslucht met CO<sub>2</sub> zonder dat er fossiele brandstoffen voor hoeven te worden verbrand. Het concept kan worden geïntegreerd met koeling van de kaslucht. Hiermee is in het zomerseizoen overdag een gesloten lucht systeem in de kas te realiseren – met een verhoogd gehalte aan non-fossiele CO<sub>2</sub> in de kas om de groei van de planten te bevorderen.

<sup>1</sup> OCAP is een bedrijf dat sinds 2005 CO<sub>2</sub> levert aan de glastuinbouw via een pijpleiding netwerk. De CO<sub>2</sub> is afkomstig van twee industriële bronnen.



Het concept is gebaseerd op gebruik van selectieve sorbents die bij lage temperatuur (ongeveer 20°C) CO<sub>2</sub> binden en bij verhoging van de temperatuur (in de range van 60° tot 110°C) weer CO<sub>2</sub> afstaan. Dit type sorbents wordt reeds in de literatuur beschreven voor de volgende toepassingen:

1. afvangen van CO<sub>2</sub> uit rookgassen van kolencentrales met als doel om een geconcentreerde CO<sub>2</sub> stroom te verkrijgen t.b.v. ondergrondse opslag (ref: Veneman<sup>2</sup>),
2. afvangen van CO<sub>2</sub> uit lucht met als doel om een geconcentreerde CO<sub>2</sub> stroom te verkrijgen t.b.v. utilisatie (ref: Climeworks<sup>3</sup>).

Verschillende types gefunctionaliseerde sorbents worden hiervoor gebruikt: geïmpregneerde of oppervlakte gemodificeerde silica, actief kool, zeoliet of resin die een verschillende capaciteit en snelheid van adsorptie / desorptie vertonen. Het gebruik van dit soort sorbents om kaslucht te verrijken met CO<sub>2</sub> afkomstig uit de lucht (niet-fossiele oorsprong) is een nieuwe toepassing.

Het innovatieve idee is om in de nacht de sorbent te beladen met CO<sub>2</sub> uit de koude omgevingslucht. Overdag wordt een luchtstroom uit de kas eerst opgewarmd met behulp van geothermie, of restwarmte al dan niet in combinatie met zonnecollectoren, en vervolgens wordt met deze verwarmde lucht de CO<sub>2</sub> weer van de sorbent vrijgemaakt. De luchtstroom is daarmee verrijkt met CO<sub>2</sub>. Deze warme, met CO<sub>2</sub> verrijkte, luchtstroom wordt vervolgens gekoeld naar een temperatuur die voor optimale groei van de planten benodigd is voordat de luchtstroom naar de kas wordt teruggevoerd.

Merk op dat er niet beoogd wordt om zo veel mogelijk CO<sub>2</sub> uit de lucht te vangen en ook niet om een zo geconcentreerd mogelijke CO<sub>2</sub> stroom te genereren – voor de tuinbouw is het voldoende om de CO<sub>2</sub> concentratie in de kas met ongeveer een factor twee te vergroten (van 400 ppm naar 800 ppm). Dit is dus een geheel andere aanpak dan de twee toepassingen zoals boven beschreven en dit geeft ruimte voor nieuwe innovaties.

Voor de start van het project is een eerste ruwe schatting gemaakt van de CO<sub>2</sub> kostprijs bij het gebruik van geothermie voor regeneratie en deze bedroeg 40 euro/ton CO<sub>2</sub>. Er is een grote onzekerheid in de schatting van deze kostenbijdrage die wordt veroorzaakt door de grote onzekerheid met betrekking tot de prestaties van de sorbent onder de beoogde condities. Dit betreft zowel onzekerheid op materiaal niveau als op proces niveau. Beide onzekerheden zijn onderzocht in dit project met als doel een nauwkeurigere schatting van de proceskosten en daarmee de CO<sub>2</sub>-kosten te bepalen.

De **doelstelling** van dit project was om te komen tot een met de kas geïntegreerd CO<sub>2</sub> afvang- en doseer-systeem dat de CO<sub>2</sub> concentratie in de kas kan verhogen tot de gewenste concentratie gebruikmakend van CO<sub>2</sub> uit de lucht en tegen 40 euro per ton CO<sub>2</sub> (CAPEX en OPEX).

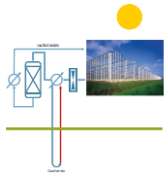
## Resultaten

### *Adsorbentia testen*

Verschillende adsorptiematerialen werden geselecteerd en getest op CO<sub>2</sub>-afvang uit lucht. Dit waren koolstofdeeltjes, koolstofmonolieten en Lewatit (een amine gefunctionaliseerd resin). De koolstofdeeltjes en koolstofmonolieten werden geïmpregneerd met polyethylenimine (PEI) – dat een polymeer is met repeterende amine eenheden. De screening-testen toonden aan dat de met PEI gecoate monoliet goede resultaten toonde met betrekking tot de CO<sub>2</sub> capaciteit en drukval. De configuratie met PEI gecoate koolstofdeeltjes was ook veelbelovend, maar resulteerde in een aanzienlijke drukval, wat niet wenselijk is vanwege de hogere ventilator- of elektriciteitscapaciteit. Het gebruik van Lewatit-adsorbens had slechts een beperkt effect op de CO<sub>2</sub>-concentraties (gemiddeld effect van +/- 50 ppm). De lage adsorptie-desorptiekenmerken van Lewatit in vergelijking met PEI-gecoate monolieten kunnen worden toegeschreven aan een barrière voor de CO<sub>2</sub>-stroom als gevolg van de hoge hoeveelheid co-adsorptie van water. Deze hoge adsorptie van water is ook gerapporteerd in de literatuur (Veerman et al, 2014). Koolstofmonolieten werden geselecteerd voor verdere ontwikkeling, zowel als het materiaal dat gebruikt is in de proof of concept lab-testen, als ook het materiaal dat als basis gebruikt is in de verschillende ontwerpconcepten (scenario's) die werden geëvalueerd in de techno-economische analyse.

<sup>2</sup> R. Veneman, 2015, Adsorptive systems for post-combustion CO<sub>2</sub> capture, PhD thesis

<sup>3</sup> Climeworks – Capturing CO<sub>2</sub> from air - <http://www.climeworks.com/>



### *Procesconfiguraties*

Verschillende ontwerpconcepten werden geëvalueerd voor CO<sub>2</sub>-afvang uit de lucht. De ontwerpconcepten verschillen alleen wat betreft de desorptie van CO<sub>2</sub>. Het basisscenario waarvan werd uitgegaan voor CO<sub>2</sub>-afvang uit lucht, is het gebruik van warme lucht (60 – 70°C) voor desorptie van CO<sub>2</sub>. Het tweede scenario is het gebruik van lage druk stoomproductie door gebruik van geothermische warmte en een warmtepomp. Het derde scenario is het gebruik van waterdamp ('vacuümstoom') gegenereerd met aardwarmte onder vacuümomstandigheden.

### *Kostenschattingen*

Er zijn kostenschattingen gemaakt voor het basisscenario en de scenario variaties. De algemene conclusies van de techno-economische evaluatie zijn:

- De kosten van CO<sub>2</sub> afvang uit lucht zijn nog steeds hoog (100 - 170 euro/ton CO<sub>2</sub>) bij gebruik van de beschikbare "gratis" aardwarmte.
- Opschaling van CAPEX van 5 naar 50 hectare verbetert de kosten per ton CO<sub>2</sub>, wat leidt tot maximaal 50 euro per ton CO<sub>2</sub> bij gebruik van de beschikbare "gratis" geothermische warmte.
- De voorkeursopties zijn om aardwarmte te gebruiken om circulatielucht op te warmen tot T ~ 60 - 70°C voor het desorberen van de CO<sub>2</sub> of om water onder vacuüm te verdampen om waterdamp te produceren voor het desorberen van de CO<sub>2</sub>.

Opschaling van de CAPEX van 5 naar 50 hectare zal de kosten per ton CO<sub>2</sub> verbeteren. Voor een eerste schatting is de oppervlakte berekend die nodig is voor de CO<sub>2</sub>-afvang eenheid om 50 hectare kas te bedienen. Op basis van literatuurramingen van 0,5 km<sup>2</sup> / Mta CO<sub>2</sub>-afvang (Faishi et al, 2019), zou voor een plant van 21 Kta (grootte 50 hectare) een oppervlakte van 10.800 m<sup>2</sup> of ongeveer 1,1 hectare vereist zijn, wat overeenkomt met 2% van het kasoppervlak dat nodig zou zijn voor de CO<sub>2</sub> uit lucht afvang eenheid.

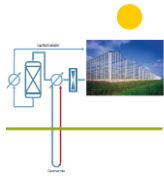
### *Beschouwingen over de procesconfiguraties en kostenschattingen*

Voor alle gevallen wordt opgemerkt dat de luchtstroom die tijdens de adsorptie van CO<sub>2</sub> uit omgevingslucht over het adsorptiemiddel moet passeren veel groter zal zijn dan de stromen warme lucht of stoom, vereist voor de desorptie van CO<sub>2</sub>. Dit vormt een technische uitdaging voor het ontwerp van de adsorptiestructuur voor de adsorptie fase: een lage drukval is vereist, evenals een hoge capaciteit en snelle massaoverdracht en kinetiek.

Ook kan in alle gevallen de co-adsorptie van waterdamp uit omgevingslucht tijdens de nachtelijke adsorptiefase de effectiviteit en efficiëntie van het sorptiemiddel beïnvloeden. De langetermijneffecten van co-adsorptie van water moeten verder worden bestudeerd en ook de mogelijkheden om wateradsorptie te verminderen. Responsieve materialen die minder water afgeven wanneer ze worden opgewarmd voor de desorptie stap (waardoor de luchtstroom minder nadroging nodig heeft), kunnen aantrekkelijk zijn.

Voor het geval waar warme lucht wordt toegepast voor desorptie, is afbraak van het polymere-aminesorptiemiddel als gevolg van oxidatie bij verhoogde temperatuur een punt van zorg. Dit kan verdere ontwikkeling vereisen van een specifieke formulering van aminegroep bevattende sorptiemiddelen met stabiliserende agentia om afbraak te verminderen (bijvoorbeeld toevoeging van metaalvangende verbindingen). Hierbij moet worden opgemerkt dat in geval van regeneratie met stoom, de aminen geen probleem vormen met betrekking tot afbraak, aangezien het afbraakprobleem gepaard gaat met de zuurstof uit lucht.

De configuratie met warme lucht voor desorptie kan mogelijk worden geïntegreerd in een gesloten circuit voor airconditioning van de kas, inclusief temperatuur- en vochtigheidsregeling. Dit zou een systeem mogelijk maken waarbij verliezen van CO<sub>2</sub> veroorzaakt door het openen van ramen van de kas (om de temperatuur en de vochtigheid te controleren) worden verminderd.



Verder wordt opgemerkt dat in dit onderzoek de eisen aan ontvochtiging (nadroging) van de CO<sub>2</sub>-dragende lucht terug naar de kas strenger zijn geweest dan in praktijk vereist is. Een hogere luchtvochtigheid in de lucht die terugkeert naar de kas, in combinatie met een sorptiewiel voor ontvochtiging, kan leiden tot een significant lagere kostenschattning voor de CO<sub>2</sub> dan berekend in deze studie. Het in het sorptiewiel aangebrachte sorptiemiddel wordt geregenereerd door water er van af te strippen met omgevingslucht die weer wordt opgewarmd met geothermische warmte.

### *Proof-of-concept lab testen*

Op basis van de adsorbentia screening en de techno-economische evaluatie zijn monolieten geselecteerd als het veelbelovende materiaal om te gebruiken voor CO<sub>2</sub>-afvang uit de lucht. De proces configuratie die is gebruikt voor de proof of concept lab-test: 16 blokken monoliet geïmpregneerd met PEI en stoom voor de desorptie van de CO<sub>2</sub>. De belangrijkste resultaten van deze test waren dat monolietmateriaal met 18% PEI-impregnering de meeste CO<sub>2</sub>-capaciteit per eenheid van drukval vertoonde<sup>4</sup>.

### *Tot slot*

Technisch is het mogelijk om het CO<sub>2</sub> gehalte in de kas te verhogen tot de gewenste concentratie met CO<sub>2</sub> uit buitenlucht. Het materiaal dat was geselecteerd voor het CO<sub>2</sub> adsorptie/desorptieproces was een met amine geïmpregneerde koolstofmonoliet. Hiervoor zijn verschillende technologische procesconfiguraties ontwikkeld, mede gebaseerd op de beschikbaarheid van geothermische warmte. De voorkeursopties waarbij tevens gebruik wordt gemaakt van geothermische warmte, zijn ofwel om circulatielucht op te warmen tot een temperatuur van ongeveer 70°C dat gebruikt wordt voor het strippen van de CO<sub>2</sub> uit het adsorptiemiddel of om water te verdampen onder vacuüm-omstandigheden bij 70°C om waterdamp te produceren dat gebruikt wordt voor het strippen van de CO<sub>2</sub> uit het sorptiemiddel. Uit kostenschattningen blijkt dat de prijs kan oplopen tot 200 – 300 euro per ton CO<sub>2</sub> wanneer de kosten voor aardwarmte vergelijkbaar zijn als de kosten voor aardgas (5 Euro/ GJ is gebruikt in deze studie). De kosten kunnen aanzienlijk dalen tot waarden lager dan 100 Euro per ton CO<sub>2</sub> bij een schaalvergroting en wanneer wordt aangenomen dat aardwarmte zonder (of geringe) kosten beschikbaar is. Het wordt daarom aanbevolen om situaties te vinden waarin de warmtebron beschikbaar is tegen lage (of geen) kosten en/of uit te gaan van een systeem dat is ontworpen voor een grotere CO<sub>2</sub>-productie schaal, bijvoorbeeld 50 hectare in vergelijking met de veronderstelde 5 hectare in het basisscenario.

---

<sup>4</sup> Tijdens het veranderen van de adsorptie bed configuraties van monoliet naar vast bed neemt de obstructie voor de luchtstroom toe. Dit heeft twee gevolgen. Ten eerste neemt de drukval toe, wat een lagere luchtstroom veroorzaakt, wat resulteert in een negatief effect op de hoeveelheid lucht die erdoorheen stroomt. Ten tweede neemt de concentratieverandering van CO<sub>2</sub> in de luchtstroom toe, wat een positief effect heeft op de effectiviteit van het materiaal. Over het algemeen bepaalt de luchtstroom en de verandering van concentratie de effectiviteit van de materiaalconfiguratie. In onze testen werd de absolute CO<sub>2</sub>-verandering per eenheid van drukval het beste bereikt voor de monolieten.