

50863686-TOS/NET 09-5303

Eindrapport "Winning en opslag van CO₂ uit WKK rookgassen"

Arnhem, 24 juni 2009

Auteurs M. Huibers¹, B.A.F. in 't Groen¹, P. Geerdink², M. Linders²

¹ Team New Energy Technologies, KEMA Nederland BV.

² Afdeling scheidingstechnologie, TNO Delft.

In opdracht van het Ministerie van LNV, Productschap Tuinbouw,
in het kader van het programma Kas als Energiebron



landbouw, natuur en
voedselkwaliteit



auteur : M. Huibers
B 58 blz.

1 bijl.

09-06-24
GvW

beoordeeld : A.F. Stam
goedgekeurd : T.J. Bosma

09-06-
09-06-



© KEMA Nederland B.V., Arnhem, Nederland. Alle rechten voorbehouden.

Het is verboden om dit document op enige manier te wijzigen, het opsplitsen in delen daarbij inbegrepen. In geval van afwijkingen tussen een elektronische versie (bijv. een PDF bestand) en de originele door KEMA verstrekte papieren versie, prevaleert laatstgenoemde.

KEMA Nederland B.V. en/of de met haar gelieerde maatschappijen zijn niet aansprakelijk voor enige directe, indirecte, bijkomstige of gevolgschade ontstaan door of bij het gebruik van de informatie of gegevens uit dit document, of door de onmogelijkheid die informatie of gegevens te gebruiken.

De inhoud van dit rapport mag slechts als één geheel aan derden kenbaar worden gemaakt, voorzien van bovengenoemde aanduidingen met betrekking tot auteursrechten, aansprakelijkheid, aanpassingen en rechtsgeldigheid.

INHOUD

blz.

SAMENVATTING	5
1 Inleiding	6
1.1 Inleiding	6
1.2 Probleemstelling	6
1.3 Onderzoeksvragen	8
1.4 Werkwijze	9
1.5 Dankwoord.....	9
2 Set of Requirements	10
2.1 Inleiding	10
2.2 Bedrijfsbezoeken	10
2.3 Set of Requirements	10
3 Technieken en afbakening.....	13
3.1 Inleiding	13
3.2 Afbangstechnieken	15
3.2.1 Absorbers	15
3.2.2 Membranen.....	15
3.3 Opslagtechnieken	15
3.3.1 Compressie.....	15
3.3.2 Geologische opslag	15
3.4 Hybride technieken (afvangst en opslag)	15
3.4.1 Adsorbers	15
3.4.2 Cryogene afvangst / opslag	15
3.5 Overige technieken.....	15
3.5.1 HotCO ₂	15
3.6 Afbakening van technieken voor beschouwing in deze studie	15
4 Analyse van technieken.....	15
4.1 Inleiding	15
4.2 Afbangst: absorbers.....	15
4.2.1 Principe.....	15
4.2.2 Analyse	15
4.2.3 Discussie	15
4.2.4 Commerciële producten.....	15

4.2.5	Membraan gasabsorptie	15
4.3	Afvangst: membranen.....	15
4.3.1	Principe.....	15
4.3.2	Analyse	15
4.3.3	Discussie	15
4.4	Opslag: compressie	15
4.4.1	Principe.....	15
4.4.2	Discussie	15
4.5	Hybride: Cryogeen.....	15
4.5.1	Principe.....	15
4.5.2	Analyse	15
4.5.3	Discussie	15
4.6	Hybride: adsorbers	15
4.6.1	Principe.....	15
4.6.2	Analyse	15
4.6.3	Discussie	15
4.7	Overig: HotCO ₂	15
4.7.1	Principe.....	15
4.7.2	Analyse	15
4.7.3	Discussie	15
5	Overzicht.....	15
5.1	Inleiding	15
5.2	Discussie	15
6	Conclusies	15
6.1	Werkwijze	15
6.2	Technieken	15
6.3	Analyse	15
6.4	Perspectieven	15
7	Aanbevelingen	15
Bijlage A	resultaten bedrijfsbezoeken.....	15
REFERENTIES	15

SAMENVATTING

In de glastuinbouw vindt zowel verbruik als productie van CO₂ plaats. Door WKK rookgassen te zuiveren wordt nu al eigen CO₂ gebruikt, maar deze situatie is niet optimaal vanwege een aantal factoren, met name het fluctueren en vaak niet in overeenstemming zijn van vraag en aanbod. WKK-CO₂ afvangen (uit de rookgasstroom onttrekken), en idealiter ook opslaan voor langere tijd, zou kostenbesparing en vergroting van CO₂-leveringszekerheid kunnen opleveren. De doelstelling van deze studie is om inzicht te bieden in werking, prestaties en haalbaarheid van verschillende technieken die daarvoor gebruikt zouden kunnen worden.

De gehanteerde werkwijze is als volgt. Een verzameling eisen aan CO₂ opslag- en afvangstsystemen voor de glastuinbouw is opgesteld aan de hand van de kennis van diverse partijen, ondersteund door bedrijfsbezoeken bij tuinders. Na afbakening van de te beschouwen technieken zijn analyses uitgevoerd aan de hand van de opgestelde criteria, met tenslotte een totaaloverzicht met conclusies en aanbevelingen.

De geselecteerde en geanalyseerde technieken staan hieronder. Opslag in de bodem is potentieel zeer interessant doch om uiteenlopende redenen buiten beschouwing gelaten.

- Afvangst: absorbers, membranen
- Opslag: compressie
- Hybride (evt. gecombineerde afvangst als opslag): adsorbers, cryogene destillatie
- Overig: HotCO₂.

Afvangst met absorbers is het meest marktrijp (enkele demonstraties lopen), met enkele openstaande vragen zoals milieu-impact. CO₂-afvangst met membranen heeft interessante voordelen (b.v. klein, geen chemicaliën, energiezuinig) maar meer ontwikkeling is nodig voor commerciële toepassing. Compressie is een bekende en uitontwikkelde techniek voor CO₂ opslag, waarbij de CO₂ echter wel geconcentreerd dient te zijn ter vermijding van energie- en ruimteverspilling. Adsorbers kunnen zowel CO₂ afvangst als opslag verzorgen, echter met een (te) lage opslagdichtheid. Cryogene destillatie is waarschijnlijk niet realistisch vanwege hoge energiekosten. HotCO₂ is een innovatieve nieuwe techniek die ontkoppelde CO₂- en warmteproductie biedt (geen elektriciteit), en indirecte CO₂ opslag.

Seizoensopslag (enkele maanden) is momenteel nog niet haalbaar, korte termijn opslag wel. Afvangst is nu in principe mogelijk met meerdere technieken, waarvoor wel in verschillende mate meer onderzoek en/of praktijktests nodig zijn. Ontwikkelingsprojecten daarvoor (algemeen, en gericht op aanpassing aan de glastuinbouw) verdienen sterk de aanbeveling, evenals case studies naar de economische haalbaarheid van interessante technieken.

1 INLEIDING

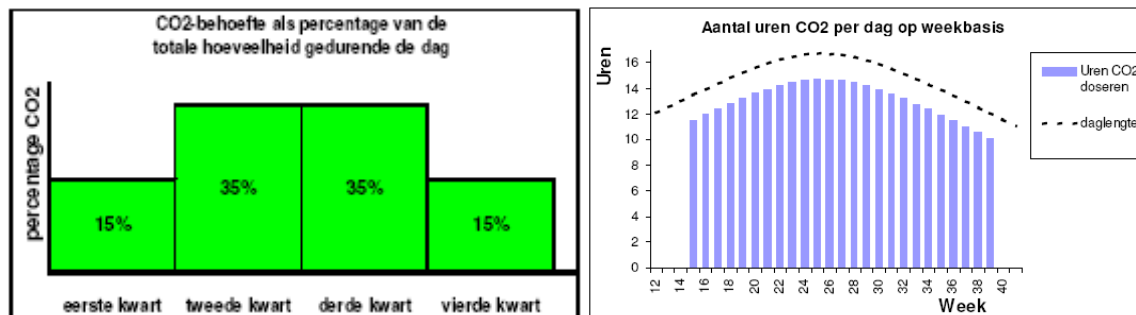
1.1 Inleiding

Gecombineerde opwekking van warmte en elektriciteit wordt warmtekrachtkoppeling (WKK) genoemd. Met WKK kan energie bespaard (c.q. CO₂-emissies gereduceerd) worden ten opzichte van gescheiden opwekking van warmte en elektriciteit. De geproduceerde CO₂ uit de WKK installatie wordt door de tuinder ingezet als belangrijke grondstof (voeding) voor planten. De Nederlandse glastuinbouw produceert dan ook op grote schaal CO₂, om planten sneller en gezonder te laten groeien. Om CO₂-productie en -gebruik beter op elkaar af stemmen dan nu het geval is, wordt in dit project de haalbaarheid van CO₂ afvangst en opslag onderzocht. Een belangrijke drijfveer hierbij is het feit dat een groot verschil bestaat tussen de behoefte aan CO₂ in de zomer (veel vraag, weinig productie) en winter (veel productie, weinig vraag), en zelfs in mindere mate om beter om te kunnen gaan met weersinvloeden over een periode van enkele dagen.

1.2 Probleemstelling

In de tuinbouw bestaat de wens om CO₂ en warmte onafhankelijk van elkaar te kunnen produceren omdat de warmte en CO₂ vraag niet op elkaar aansluiten. Zo is er overdag een sterke behoefte aan CO₂, terwijl 's nachts warmte vaak nodig is. Met warmtebuffers kunnen dag / nacht verschillen worden opgevangen, echter voor seizoeninvloeden (winter / zomer) is dit niet mogelijk. Daarnaast treden er bij het gebruik van een warmtebuffer verliezen op.

In figuur 1 is de CO₂ behoefte gedurende de dag als percentage van de totaal beschikbare hoeveelheid CO₂ bij een lichtvolgende strategie.¹ De daglengte en het aantal uren dat er aanvullend CO₂ gedoseerd worden per week van het jaar weergegeven in figuur 2.



Figuur 1 CO₂ vraag gedurende de dag

Figuur 2 CO₂ dosering gedurende het seizoen

Met een verhoogde CO₂ concentratie in de kas kan de productie van de teelt toenemen tot zo'n 140% ten opzichte van de standaard CO₂ concentratie.² Een gangbare methode voor CO₂-bemesting in de glastuinbouw is het gebruik van aardgasgestookte ketels. Door de ketel te stoken voor de CO₂ behoefte, daalt het overall rendement van de energieverbruik van de kas.

Op dit moment wordt er in de tuinbouw gewerkt met verschillende systemen om CO₂ en/of warmte te produceren, en warmte op te slaan:

- Standaard ketel
- Warmte-Kracht Koppeling (WKK)
- Warmtebuffer
- Aquifer
- Vloeibare CO₂
- Externe CO₂ aanlevering door middel van een pijpleiding (OCAP of RoCa3-CO₂).

De **standaard ketel** produceert overdag CO₂ en warm water. Dit warme water wordt opgeslagen in een warmte buffer en 's nachts gebruikt om de kas warm te houden. Dit systeem is niet erg efficiënt in vergelijking met een WKK, maar in combinatie met OCAP CO₂ is het een optie. Deze CO₂ is goedkoper dan vloeibare CO₂.

Een **WKK** is een gasmotor die werkt op aardgas en elektriciteit produceert. Naast elektrisch vermogen levert dit apparaat CO₂ en warmte. Dit apparaat draait wanneer stroom tegen een goede prijs aan het net kan worden geleverd of gebruikt kan worden voor het bijlichten van de planten (overdag is stroom duurder dan 's nachts). Warmte die wordt opgewekt met dit systeem wordt opgeslagen in een **warmtebuffer** (water) welke 's nachts wordt gebruikt om de kas te verwarmen (of soms voor langere tijd in een **aquifer**). Dit systeem is redelijk efficiënt, maar toch zijn er beperkingen.

- De kwaliteit van ongereinigde CO₂ uit dit soort installaties is niet geschikt voor dosering in de kas door o.a. de vrijkomende NO_x of C₂H₄. Aangezien de zuiverheid van CO₂ van even groot of groter belang is dan opslagmogelijkheid ervan (i.v.m. gewasschade, en bij semi-gesloten en gesloten kas ook gezondheidsredenen voor werknemers), is dure rookgasreiniging noodzakelijk voordat de CO₂ ingezet kan worden. Naast het kostenaspect kan dit tot extra storingsgevoeligheid leiden.
- De installatie kan maar op één vermogen optimaal draaien, terwijl de CO₂, elektriciteit en warmtebehoefte sterk varieert.³

Vloeibare CO₂ is het schoonst, maar erg duur (>110 euro/ton). Ook zuivere **OCAP CO₂** is goedkoper, maar alleen beschikbaar in bepaalde gebieden. De CO₂ wordt via een oude pijpleiding voor olie gedistribueerd. De pijpleiding loopt van Rotterdam naar Amsterdam. Op dit moment worden er nieuwe aftakkingen van deze leiding aangelegd, maar lang niet alle tuinders van Nederland kunnen hierop aangesloten worden. Hetzelfde geldt voor de (minder zuivere) CO₂ van E.ON's RoCa3 centrale nabij Rotterdam.

Naast de nadelen die voor de huidige energie-opweksystemen gelden, spelen er nog drie andere problemen een rol. Deze zijn:

- door de variatie in CO₂ behoefte en warmtebehoefte zijn er pieken in het aardgasgebruik. Dit leidt tot hoge kosten, omdat pieken extra belast worden door de gasleverancier
- het overschot aan CO₂ wordt uitgestoten. Ook hieraan zijn kosten in de toekomst verbonden door middel van de CO₂ emissierechten
- bij tuinders bestaat de wens om in de toekomst met biogas te werken, omdat dit (gedeeltelijk) kan worden opgewekt met het aanwezige afval (plantenresten). Het geschikt maken van de installatie voor biogas is echter zeer lastig en stelt hoge eisen aan de kwaliteit en samenstelling van het biogas.

1.3 Onderzoeksvragen

De doelstelling is om inzicht te krijgen in de technisch en economische prestatie van verschillende systemen die CO₂ zonder onzuiverheden (m.b.t. de teelt) kunnen produceren tijdens warmtebehoefte en CO₂ kunnen opslaan zodat het verstoken van aardgas voor alleen CO₂-bemesting (bijvoorbeeld in de zomer) wordt vermeden.

De volgende resultaten zijn nagestreefd:

- overzicht van vergelijkingscriteria voor afvangst- en opslagmethoden voor CO₂ in de glastuinbouw (GTB)
- overzicht van methoden voor CO₂ afvangst / opslag in GTB
- schets van perspectieven CO₂ afvangst / opslag in GTB
- suggestie voor verdiepend- / vervolgonderzoek (bv grondiger technische / economische analyse van interessante technieken, beschouwing bio-WKK, zuiveringstechnieken, en gecombineerde afvangst- en zuiveringstechnieken, etc.)

1.4 Werkwijze

De studie is als volgt opgezet:

- bedrijfsbezoeken: enkele tuinders worden bezocht en geïnterviewd, teneinde de relevante eisen en wensen van tuinders kwalitatief en kwantitatief helder te krijgen
- Set of Requirements: een verzameling eisen wordt opgesteld aan de hand van kennis en wensen uit de glastuinbouw (bedrijfsbezoeken, PT, Cogen) en ervaringen van KEMA en TNO
- afbakening technieken: er wordt bekeken welke technieken voor opslag en afvangst bestaan, en welke daarvan zullen worden beschouwd
- analyse en beschrijving per techniek: elke techniek wordt beschreven, en aan de hand van de Set of Requirements geëvalueerd op geschiktheid
- totaaloverzicht en aanbevelingen: welke conclusies kunnen uit bovenstaande analyses worden getrokken, welke technieken bieden perspectief, welke aanbevelingen kunnen gedaan worden.

Een opmerking die op dit punt gemaakt dient te worden is dat in deze studie *technieken* worden beschouwd, geen *producten*. Veel technieken zijn nog niet, of slechts in zeer beperkte mate, commercieel beschikbaar. In vele gevallen is een aanvullend onderzoek nodig naar de techniek zelf, of naar aanpassingen voor toepasbaarheid ervan in de glastuinbouw. Overigens wordt hier en daar in dit document wel degelijk melding gemaakt van commercieel beschikbare producten, waar van toepassing.

1.5 Dankwoord

De volgende bedrijven en personen worden hartelijk bedankt voor hun kleine en grote bijdragen aan deze studie:

- Porta Nova: Leon Dukker - *bedrijfsbezoek*
- Boonekamp Roses: Marcel Boonekamp - *bedrijfsbezoek*
- Van Ruijven Paprika: Michel van Ruijven - *bedrijfsbezoek*
- Zuurbier & Co: Cor Suurbier - *ter beschikking stellen eerdere studies*
- Cogen Projects: Erik Koolwijk - *informatie over technieken, hulp bij opstellen criteria*
- Lek / Habo - *informatie over technieken en producten*
- Knook Energy Solutions International - *informatie over technieken en producten*
- Productschap Tuinbouw: Dennis Medema - *inhoudelijke hulp*
- Ministerie van LNV: Leo Oprel - *inhoudelijke hulp*
- KEMA Nederland BV: Jacques de Ruijter, Joost de Wolff, Arthur Stam, Paul Raats - *inhoudelijke hulp*
- TNO: Diederik Jaspers - *inhoudelijke hulp*

2 SET OF REQUIREMENTS

2.1 Inleiding

Het vergelijken van verschillende technieken voor CO₂ afvangst en opslag kan alleen plaatsvinden als eerst wordt gedefinieerd op basis waarvan de vergelijking wordt gemaakt. Er dienen dus vergelijkingscriteria opgesteld te worden. In samenwerking met de glastuinbouw is de benodigde informatie verzameld en zo'n "Set of Requirements" vervaardigd.

2.2 Bedrijfsbezoeken

Om goed aan te sluiten bij de wensen en behoeften van de doelgroep, de tuinders, zijn bedrijfsbezoeken uitgevoerd bij verschillende glastuinbouwers. Feiten zijn geregistreerd, zoals bijvoorbeeld oppervlakte, CO₂ verbruik, elektriciteitsproductie, etcetera. Ook zijn enkele relevante meningen en schattingen in kaart gebracht, bijvoorbeeld over zaken als leveringszekerheid en relatieve belangrijkheid van criteria.

Drie tuinders zijn bezocht, in Waddinxveen, Berkel en Rodenrijs, en Steenbergen. Twee van hen zijn rozenkwekers, het andere bedrijf teelt paprika's. Eén van de bedrijven heeft een OCAP aansluiting, één werkt met vloeibare CO₂, de laatste gebruikt alleen WKK-CO₂. Ook het type en het gebruik van hun kas loopt uiteen. De bedrijven zijn voldoende verschillend om een goede basis te geven voor de Set of Requirements. Voor een statistisch verantwoorde kwantificering van parameters is de grootte van de steekproef (het aantal tuinders n) veel te klein, maar het geeft wel degelijk inzicht in de orde van grootte van relevante parameters.

Een gedetailleerd verslag met alle vragen en antwoorden zoals gesteld en verkregen bij de bedrijfsbezoeken is te vinden in bijlage A.

2.3 Set of Requirements

Aan de hand van de inzichten uit de bedrijfsbezoeken (zie bijlage A), gecombineerd met bestaande kennis van KEMA en TNO, is de Set of Requirements opgesteld (zie Tabel 1). Het Productschap Tuinbouw, LNV en Cogen hebben vervolgens hun instemming hiermee uitgesproken. De Set of Requirements geeft geen keiharde eisen weer, maar meer richtlijnen

en ordes van grootte. Veel zaken zijn immers moeilijk of niet te generaliseren voor de glastuinbouw als geheel.

Natuurlijk zijn er nog meer criteria dan welke in dit overzicht zijn samengevat. Echter, tabel 1 geeft een redelijke samenvatting van de belangrijkste. De bovenste drie criteria worden gezien als degene die het zwaarst meewegen, wat echter zeker niet betekent dat de overige onbelangrijk zijn.

Tabel 1 Set of Requirements (beoordelingscriteria)

criterium	waarde	opmerkingen
kosten CO ₂	maximaal € 0,10 per kg	ruwweg bovengrens huidige tarieven
zuiverheid CO ₂	minimaal zo zuiver als nu (WKK met ureumzuivering)	
leveringszekerheid / storingsgevoeligheid	maximaal enkele uren tot een dag uitval per jaar.	backup CO ₂ bron (b.v. ketel) nodig, en/of garantie van leverancier, indien betrouwbaarheid onbekend
productie CO ₂ ^a	± 1 ton per hectare per dag	ruim de helft van gemiddelde verbruik testgroep tuinders
opslagduur korte termijn (weersfluctuaties)	enkele dagen: ± 5 ton per hectare	
opslagduur lange termijn (seizoensopvang)	enkele maanden: ± 50-100 ton per hectare	
minimale schakelsnelheid CO ₂ (0-100% productie)	± 15 minuten tot 1 uur	

^a De totale uitstoot van WKK CO₂ bedraagt ~4 ton per ha per dag, gemiddeld over bedrijven en maanden. Dit betekent dat CO₂ voor bemesting gemiddeld slechts enkele tientallen procenten van de gemiddelde totale CO₂ uitstoot is, dus dat er in principe een ruim voldoende absolute hoeveelheid CO₂ beschikbaar is. Dat wil niet zeggen dat op elk moment de beschikbaarheid van CO₂ volstaat (dat is nu juist de aanleiding voor deze studie), maar wel dat de jaarlijkse absolute hoeveelheid CO₂ geproduceerd door een WKK ruim volstaat indien geschikte afvangst- en/of opslagmethoden worden toegepast.

De kosten van conventionele CO₂ bronnen (ketel / ureumgezuiverde WKK / OCAP / vloeibaar) verschillen sterk. Daarnaast verschillen de situaties van tuinders ook sterk, bijvoorbeeld wat betreft type kas, type WKK, elektriciteits-, CO₂- en warmtevraag, toegang tot CO₂ bronnen (b.v. OCAP), etcetera. Daardoor is het lastig om richtwaarden te geven voor enkele criteria. Verder betekent dit dat voor een nauwkeuriger beschouwing dan die in dit rapport wordt gegeven, het nodig is om een case studie uit te voeren. Hierin kan dan voor

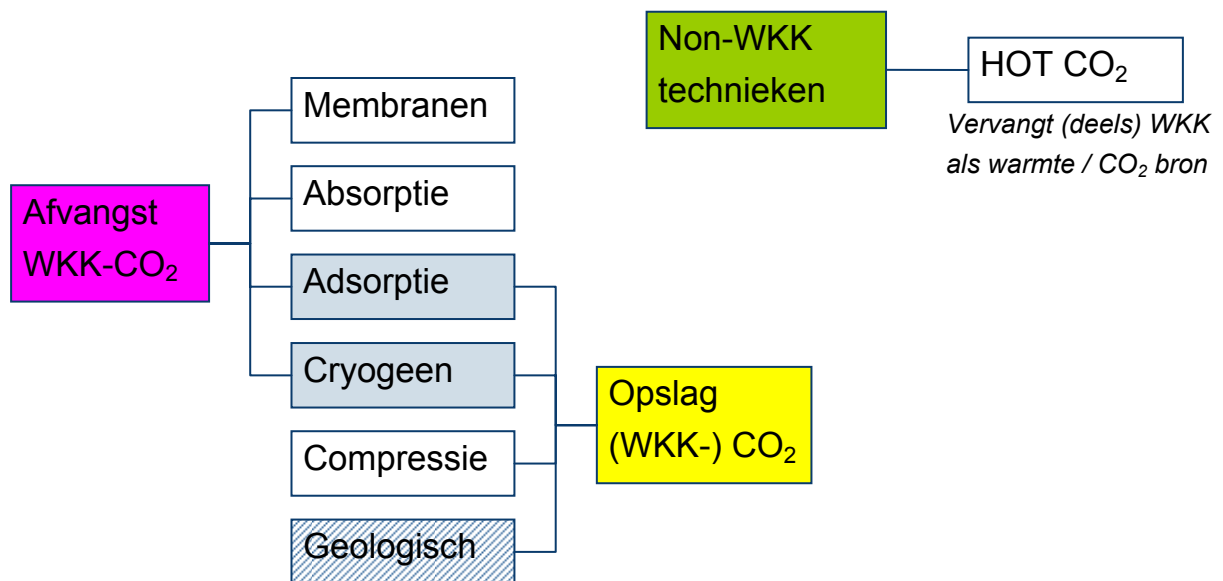
een bepaalde goed afgebakende situatie één techniek (of een groep technieken) worden beschouwd. Alleen dan kan in detail worden berekend wat zowel de streefwaarden als de geprojecteerde waarden voor de techniek(-en) in kwestie zijn.

De CO₂-kosten hebben betrekking op de totale kosten van CO₂, het gehele proces in aanmerking nemend: van opwekking via afvangst en/of opslag tot het in de kas brengen. Het is dus de totale prijs van verbruikte CO₂.

3 TECHNIEKEN EN AFBAKENING

3.1 Inleiding

Met de bewustwording van ondernemers, bedrijven, instituten en regeringen van de dreiging van klimaatverandering, is de afgelopen jaren een grote aandacht ontstaan voor de reductie van CO₂ uitstoot. Eén van de gevolgen daarvan is dat veel onderzoeksprojecten, op nationaal en internationaal niveau, zijn gestart naar reductie van CO₂ uitstoot. Aangezien CO₂ afvangst en opslag (Carbon Capture and Storage, CCS) van met name kolencentrales daarbij een belangrijk punt van aandacht is, is een grote hoeveelheid kennis vergaard. Het proces van afvangen van CO₂ zoals de glastuinbouw dat zou willen kunnen uitvoeren, en in mindere mate het opslaan van CO₂, is zodanig vergelijkbaar met tegenhangers in de Energie-sector dat de afgelopen jaren een ruime selectie technologieën beschikbaar is gekomen die mogelijk ook voor tuinders interessant kunnen zijn.

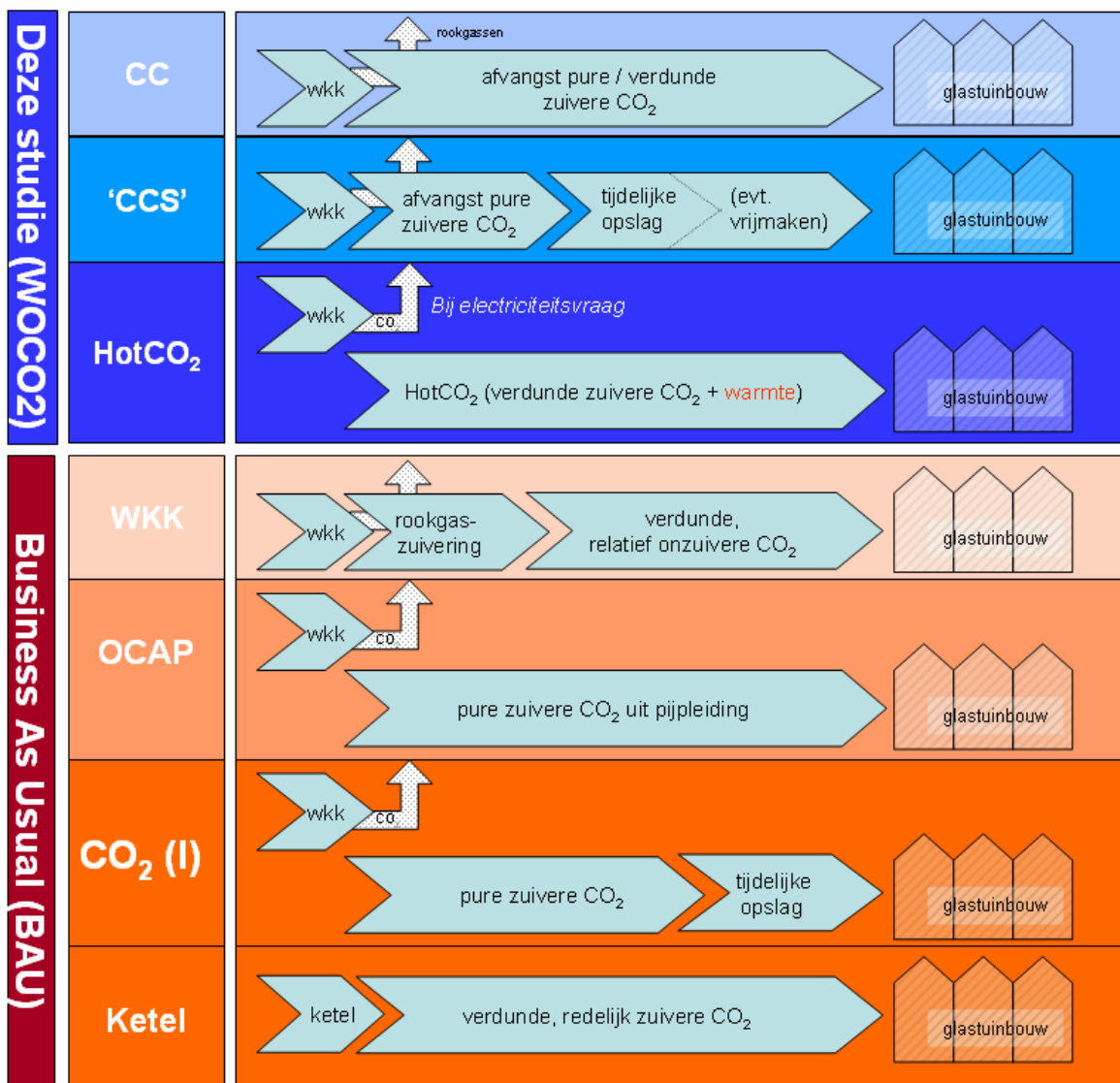


Figuur 3 Schematische categorisatie van relevante CO₂ technieken

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste van deze technologieën op een rijtje gezet (zie Figuur 3 en 4),⁴ om vervolgens te bekijken of en welke technieken beschouwd kunnen worden binnen het kader van deze studie. Hierbij is een onderverdeling in vier categorieën gemaakt.

- afvangst-methodes (paragraaf 3.2) dienen puur voor het afvangen van CO₂ uit de WKK-rookgasstroom

- CO₂-opslagtechnieken (paragraaf 3.3) bieden de mogelijkheid op enigerlei wijze beschikbare CO₂ op te slaan voor een bepaalde periode
- sommige technieken zijn in staat afvangst en opslag te combineren; deze technieken worden hier hybride technieken (paragraaf 3.4) genoemd
- tenslotte wordt één techniek beschouwd die, in tegenstelling tot alle andere technieken, qua CO₂ stroom los staat van WKK's, en daarom in een aparte categorie overig is ingedeeld (paragraaf 3.5).



Figuur 4 Overzicht van categorieën (potentiële) CO₂-technieken in de GTB. CC: Carbon Capture (CO₂ afvangst); CCS: Carbon Capture and Storage (CO₂ afvangst en opslag).

3.2 Afvangstechnieken

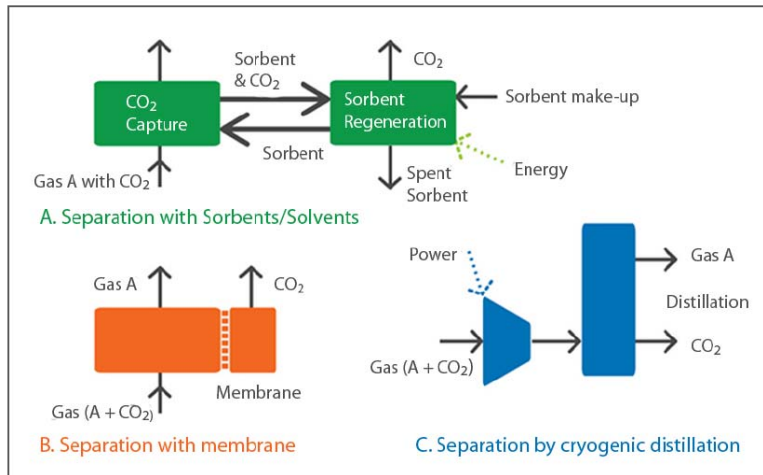
Voor het afvangen van CO₂ in de glastuinbouw, is gekeken naar ontwikkelingen op dit gebied in de elektriciteitsproductiesector, welke voorop loopt in de ontwikkelingen omtrent CO₂ afvangst (en opslag). De subset technologieën die voor de glastuinbouw interessant is, heeft betrekking op zogenaamde post-combustion afvangst: afvangst uit rookgassen na conventionele energieopwekking. Een fundamenteel andere mogelijkheid is oxyfuel energieopwekking (verbranding met pure zuurstof, met zuivere CO₂ als rookgas). Een ander alternatief is pre-combustion CO₂ afvangst, waarbij de brandstof niet direct wordt verbrand maar in twee stappen reageert tot een relatief eenvoudig scheidbaar mengsel van waterstofgas (H₂) plus CO₂. Deze twee technologieën vereisen echter een totaal andere verbrandingsmachinerie, oftewel een volkomen ander soort WKK, en zijn daarom niet van toepassing tenzij een volledig nieuw WKK systeem wordt ontwikkeld en toegepast.

CO₂-afvangstechnologieën zijn nog steeds in ontwikkeling (zie ook figuur 5). Eén techniek wordt reeds op demonstratieschaal bij enkele kolencentrales in de wereld toegepast, te weten de absorptietechniek. Deze leent zich echter slecht voor toepassing bij een gasgestookte STEG centrale. Hiernaast gebruikt een absorptietechniek veel energie. Ter vergelijking: het rendement van een moderne kolencentrale daalt bij afvang van CO₂ van 45% naar 35% tot 40%.⁵

Diverse alternatieve technieken zijn op dit moment in ontwikkeling. Naast varianten op de absorptietechniek gaat veel aandacht uit naar ontwikkeling van CO₂ selectieve membranen (NanoGLOWA,⁶ met KEMA als projectleider), maar ook aan initiatieven als HotCO₂ (TNO)⁷ en cryogene destillatie (Enecogen⁵) worden beschouwd als veelbelovende technologieën.

Voor de glastuinbouw gaat veel aandacht uit naar alternatieven voor absorptie technieken en rookgasreiniging. Het verschil daartussen is dat bij absorptie CO₂ wordt verwijderd uit het rookgas en de kas in gaat, terwijl de rest van het rookgas de schoorsteen uit kan. Bij rookgasreiniging schadelijke stoffen uit het rookgas worden verwijderd en vervolgens het rookgas de kas in gaat. In het geval van absorptie is het gehalte aan schadelijke gassen die uiteindelijk de kas in gaan lager, door in principe grotere zuiverheid van afgevangen CO₂ en/of door lagere of geen behoefte aan bijdoseren met minder zuivere CO₂. Knook levert op dit moment een rookgasreiniger die de normen van de BEES-B wetgeving haalt⁸ en kijkt samen met TNO naar de mogelijkheden van absorptie van CO₂ uit rookgas.⁹ HoSt en Imtech – Vonk hebben ook een absorptie-installatie ontwikkeld.

Three basic methods to separate gases



Figuur 5 Drie methodes om CO₂ te winnen uit (rook-)gassen: (A) absorbers en adsorbers, (B) membraan technologie, (C) cryogene destillatie¹⁰

3.2.1 Absorbers

Het afvangen van CO₂ met behulp van absorbers is gebaseerd op het principe van een oplossing die CO₂ absorbeert tijdens het passeren of doorleiden van rookgassen. Door verhitting of toepassing van vacuüm kan regeneratie plaatsvinden, waarbij puur CO₂ vrijkomt.

Er zijn grofweg twee categorieën absorbers, namelijk chemische en fysische absorbers. Chemische absorbers gaan een chemische reactie aan met CO₂. Het gaat hierbij om oplossingen van basen, meestal amines of hydroxides. Bij fysische absorbers lost het CO₂ onveranderd op; het heeft alleen fysische interacties met de oplossing. Vergeleken met chemische absorbers is minder energie vereist voor het proces (m.n. de regeneratiestap), en treedt veel minder tot geen degradatie op van de chemicaliën. Deze techniek is echter met name geschikt voor duidelijk hogere CO₂ concentraties dan in WKK-rookgassen.

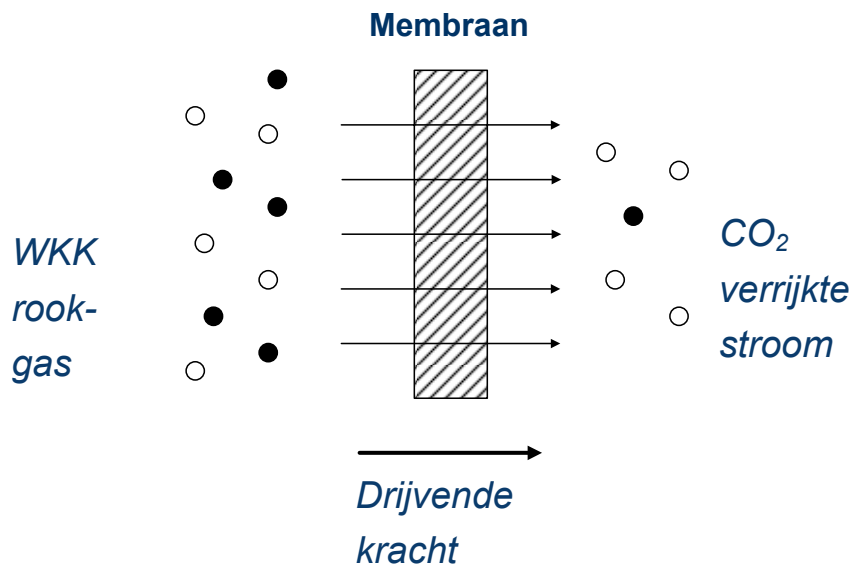
In principe zou absorbertechnologie ook voor CO₂ opslag gebruikt kunnen worden. Tot nu toe is daar echter nauwelijks naar gekeken, omdat zeer grote volumina aan oplossingen van chemicaliën nodig lijken, waardoor te veel (ruimte, financiële, milieu-, ...) bezwaren ontstaan.

Een noemenswaardige variant van absorbertechnologie is een combinatie met membraantechnologie: membraan-gasabsorptie. Hierbij is het de absorber die voor de selectieve CO₂ verwijdering verzorgt, oftewel de daadwerkelijke afvangst. Een

absorbervloeistof wordt geleid door holle membraanvezels, waarlangs de rookgasstroom wordt gevoerd. Grote uitwisselingssnelheid vanwege het grote contactoppervlak van membranen wordt dan gecombineerd met de hoge selectiviteit van de absorberoplossing. Ook is er geen absorberkolom meer nodig (spaart ruimte en mogelijk ook kosten), en is de techniek modulair. Een belangrijke uitdaging ligt in het feit dat het membraanmateriaal (naast tegen rookgascondities) bestand moet zijn tegen langdurige blootstelling aan de chemicaliën van de absorbervloeistof, en dat lekken niet mogen optreden.

3.2.2 Membranen

Membranen zijn in de afgelopen tientallen jaren een sterk in opkomst zijnde techniek voor een breed scala aan scheidingsactiviteiten, voor allerlei typen te scheiden componenten in zowel vloeibare als gasvormige media. De werking van een membraanscheidingseenheid berust op het principe dat de permeatiesnelheid (transportsnelheid) van componenten door een dunne semipermeabele laag materiaal (het membraan) onderling verschilt. Aan de andere zijde van het membraan is de verhouding van de te scheiden stoffen dus anders: de snelst permeërende component wordt geconcentreerd (zie ook figuur 6). Membranen kunnen gemaakt zijn van polymeren, keramiek, of in zeldzame toepassingen van metaal, en worden gebruikt in de vorm van holle vezels, vlakke vellen of spiralen (nauw opgerolde vlakken).



Figuur 6 Het principe van CO₂ afvangst door middel van membranen. De witte bolletjes stellen CO₂ voor, de zwarte de andere rookgascomponenten, die minder snel door het membraan permeëren en dus achterblijven in de rookgasstroom die wordt uitgestoten (niet weergegeven). De drijvende kracht is een partieel-drukverschil van CO₂ over het membraan

Voor CO₂ afscheiding uit rookgassen kunnen verschillende typen membranen gebruikt worden. De overeenkomst bij deze membranen is dat CO₂ het membraan veel sneller passeert dan N₂, het hoofdbestanddeel van rookgassen. Momenteel wordt, net als bij ab- en adsorbers, op grote schaal in internationaal verband naar CO₂ afvangst uit rookgassen van energiecentrales door middel van membranen.

3.3 Opslagtechnieken

Gezien de zeer geringe dichtheid van gassen (oftewel zeer groot volume per massa-eenheid) is de opslag van grote hoeveelheden CO₂ bovengronds niet haalbaar zonder een faseovergang naar vloeibare of vaste fase. Oplossen in een vloeistof is op het eerste gezicht een theoretische optie, maar toepassing in de praktijk wordt belemmerd door de benodigde grote hoeveelheid vloeistof, vaak opgeloste chemicaliën bevattend. Opslag ondergronds vereist geen faseovergang (alhoewel onder hoge druk wel compressie tot vloeistof kan plaatsvinden) omdat grote opslagvolumes zoals watervoerende lagen en poreus gesteente wel beschikbaar kunnen zijn.

Een belangrijk punt wat in het achterhoofd moet worden gehouden bij het beschouwen van opslagtechnieken, is dat het rechtstreeks opslaan van WKK rookgassen (al dan niet gezuiverd) zeer waarschijnlijk onaantrekkelijk is. WKK-rookgassen bevatten slechts rond de 8% CO₂, waardoor directe opslag daarvan ten opzichte van zuivere CO₂ dus ruwweg 12,5x zo veel opslagruimte kost, en daaraan gerelateerd energie en geld. Zodoende kan worden gesteld dat voorafgaande aan opslag een afvangstproces moet plaatsvinden dat zuivere of sterk geconcentreerde CO₂ oplevert, of dat een bron van zuivere CO₂ moet worden gebruikt zoals OCAP of inkoop vloeibare CO₂.

3.3.1 Compressie

Compressie is een alomtegenwoordige, ver ontwikkelde techniek voor het opslaan van gassen in een klein volume. Door middel van een compressor wordt hier CO₂ uit rookgassen op druk gebracht en opgeslagen in een tank. Als voldoende hoge druk gebruikt wordt, dan ontstaat vloeibare CO₂, een hanteerbare en ruimte-efficiënte fase.



Figuur 7 CO₂ opslagtanks

3.3.2 Geologische opslag

Gemotiveerd door de klimaatsverandering en de wereldwijd sterker wordende noodzaak om maatregelen daartegen te treffen, is er vanuit de industrie en vooral ook de energieproducerende sector de laatste jaren veel aandacht voor geologische opslag van CO₂. Deze methode is feitelijk de enige die perspectief biedt op de opslag van CO₂ (CCS: Carbon Capture and *Storage*) op een schaal die relevant is voor energiecentrales, in de orde van grootte van een miljoen ton CO₂ per jaar per locatie. Onder de Noordzee nabij Noorwegen wordt bijvoorbeeld sinds 1996 succesvol een dergelijke hoeveelheid CO₂ per jaar opgeslagen op 1000 meter diepte.^{11,12} Onwinbare kolenvelden, (lege) olie- en gasvelden en zoutkoepels zijn voorbeelden van geologische formaties die gebruikt (zouden kunnen) worden voor grootschalige CO₂ opslag.¹³ Op een wat minder grote schaal behoren onder andere aquifers tot de mogelijkheden voor de opslag van CO₂.

3.4 Hybride technieken (afvangst en opslag)

3.4.1 Adsorbers

Adsorptie is het verschijnsel waarbij moleculen van een vloeistof- of gasfase aan het oppervlak hechten van een vaste stof – het adsorbens. Er zijn vele typen adsorbentia die CO₂ kunnen afvangen. Klassieke adsorbentia zijn bijvoorbeeld zeolieten en actieve kolen. De

zogenaamde 'metal organic frameworks' (MOFs) en 'zeolitic imidazolate frameworks' (ZIFs) zijn voorbeelden van nieuw in ontwikkeling zijnde adsorbentia. Daarnaast wordt veel onderzoek verricht naar adsorbentia die zijn gefunctionaliseerd met aminegroepen (-NH₂ bevattende verbindingen). Doordat het CO₂ adsorbeert totdat regeneratie plaatsvindt, kunnen adsorbers met voldoende capaciteit ook als opslagmedium dienst doen.

3.4.2 Cryogene afvangst / opslag

Bij cryogeen afscheiden van CO₂ worden de rookgassen sterk afgekoeld, waarbij rijping (vast worden van CO₂) plaatsvindt bij een temperatuur onder -78 °C. Als een druk boven ongeveer 5 bar treedt in plaats daarvan condensatie op. Het vaste of vloeibare CO₂ kan worden afgevoerd uit de gasvormige rookgasstroom.

Cryogeen scheiden is economisch rendabel, wanneer gebruikt gemaakt kan worden van een overschot aan koude. Zodra de rookgasstroom actief gekoeld dient te worden, verstoort dit de energiebalans in negatieve zin (hoge energiekosten). Een overschot aan diepe koude kan gevonden worden in bepaalde takken van industrie, waarbij dus wel geldt dat de tuinder zich hierbij in de buurt moet vestigen, wil hij gebruik kunnen maken van dit koude overschot.

Voor de glastuinbouw sector (WKK) zijn nog geen grootschalige onderzoeken gevonden op het gebied van cryogene destillatie. Omdat het een technologie is die in de belangstelling staat bij de elektriciteitsproductiesector voor vergelijkbare doeleinden, wordt deze techniek wel beschreven en op haalbaarheid beoordeeld.

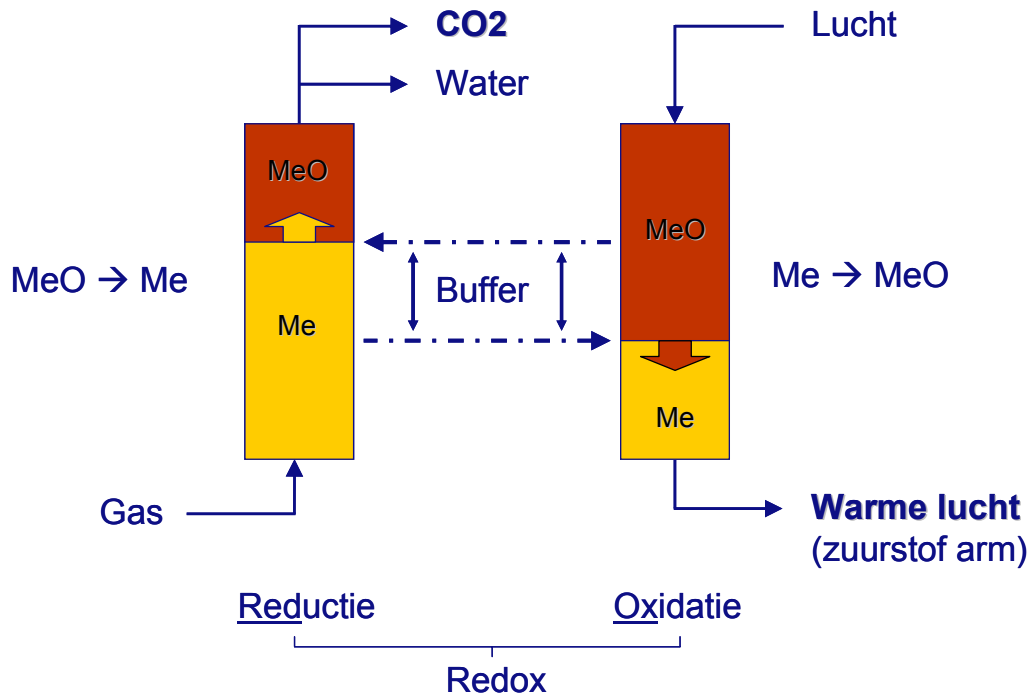
3.5 Overige technieken

Wat hier genoemd wordt is fundamenteel verschillend van de boven beschreven techniek. Het gaat hierbij niet om afvangst- en opslag van WKK-CO₂, maar om een parallel systeem, wat (deels) een WKK vervangt voor warmte- en CO₂ productie.

3.5.1 HotCO₂

Het HotCO₂ concept⁷ werkt als volgt: een holle buis gevuld met metaalkorrels, bijvoorbeeld koper, wordt aangestroomd met lucht. Hierbij reageert het metaal tot metaaloxide en geeft hierbij veel warmte af. In een tweede stap wordt het bed aangestroomd met aardgas. Hierbij

reageert het metaaloxide weer tot metaal en als bijproduct wordt CO₂ gevormd. Hierna kan het proces weer van voren beginnen. Dit proces is schematisch weergegeven in figuur 8.



Figuur 8 Schematische weergave van het HotCO₂ concept

Bij het HotCO₂ proces is het niet noodzakelijk dat het volledige bed wordt gebruikt bij de reactie. Halverwege kan het proces ook gewisseld worden, waarbij een deel van het metaal als “buffer” in een andere toestand verkeerd (bijvoorbeeld als metaaloxide) dan de rest van het metaal. Dit kan op een later tijdstip, wanneer CO₂ nodig is, alsnog in contact worden gebracht met aardgas om de gewenste hoeveelheid CO₂ te produceren. Ook kunnen de verschillende buizen onafhankelijk van elkaar worden gebruikt voor warmte of CO₂ productie, waardoor deze tegelijkertijd kunnen worden geproduceerd. Het streven zal zijn een buffer voor drie weken te realiseren, waarin warmte of CO₂ op wordt geslagen. Hiermee kunnen de grootste schommelingen in temperatuur en instraling van zonlicht worden opgevangen.

3.6 Afbakening van technieken voor beschouwing in deze studie

De hiervoor genoemde technieken zijn in verschillende mate interessant, in elk geval zodanig dat een nadere beschouwing nuttig is. Echter, geologische opslag wordt bij deze

studie buiten beschouwing gelaten. Er zijn momenteel nog te veel onduidelijkheden en moeilijkheden verbonden aan deze methode:

- hoewel beperkte ervaring bestaat met geologische CO₂ opslag, gaat het daarbij om *permanente* opslag (CCS), niet om tijdelijk opslag met geplande herwinning. Over het eerste type opslag is al weinig bekend, over het tweede nog minder
- geologische opslag zal waarschijnlijk zeer afhankelijk zijn van het lokale voorkomen van bepaalde geologische formaties, en dus niet overal beschikbaar. Ook kan de prijs van benodigde boringen een hoge drempel vormen. Over dit alles is momenteel onvoldoende informatie beschikbaar
- indien in een gasveld opgeslagen wordt, zal er een niet te verwaarlozen hoeveelheid methaan in de teruggewonnen CO₂ terechtkomen, wat ongewenst is
- vergunningen en wetgeving kunnen een struikelblok zijn, bijvoorbeeld met betrekking tot eigendom van de opslagformatie en de verantwoordelijkheid bij eventuele ongelukken en schades. De situatie voor geologische CO₂ opslag is gecompliceerder dan voor warmteopslag, waarbij water wat toch al in de bodem aanwezig is wordt gebruikt. Kooldioxide is een verstikkend gas waardoor plotseling vrijkomen van opgeslagen gas ernstige gevolgen kan hebben, iets wat met natuurlijk voorkomend (Nyosmeer en Monounmeer in Kameroen, 1984¹⁴ resp. 1986¹⁵) en kunstmatig (Mönchengladbach in Duitsland, 2008¹⁶) CO₂ al is voorgekomen.

Ondanks bovenstaande complicaties is deze techniek interessant voor de glastuinbouw om te evalueren, met name vanwege het feit dat de potentiële opslagcapaciteit enorm is, ordes van grootte meer dan andere technieken. Binnen de mogelijkheden van deze studie (in tijd en kennis) zijn op dit moment teveel echter te veel onbekenden om een voldoende beargumenteerde analyse van deze techniek te doen. Het verdient echter de aanbeveling om meer onderzoek naar deze technologie te doen.

4 ANALYSE VAN TECHNIEKEN

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt elke CO₂-techniek beschouwd die genoemd is in het voorgaande hoofdstuk. De werking wordt (uitgebreider) uitgelegd, de karakteristieke eigenschappen worden naast de opgestelde eisen / wensen (Set of Requirements) gelegd, en opvallende punten worden besproken.

Wat betreft de Set of Requirements is opslagcapaciteit natuurlijk niet van toepassing voor afvangstechnieken. Bij opslagtechnieken moet worden vermeld dat met “kosten CO₂” bedoeld wordt op de kosten van slechts het opslaan van het CO₂, dus zonder de waarschijnlijk voorafgaande afvangst.

Tenslotte moet gezegd worden dat in veel gevallen een beschouwde techniek bestaat uit een aantal gerelateerde mogelijkheden. Onder membranen bijvoorbeeld vallen honderden – zo niet duizenden – uiteenlopende typen en subtypen van materialen die op verschillende wijzen in modules en systemen toegepast kunnen worden. Het is daarom vaak slecht mogelijk om schattingen van prestaties en kosten in getallen weer te geven, nog afgezien van het feit dat voor een dergelijke kwantificering voorbeeldsituaties van tuinders (type kas, grootte, type WKK, etc.) gedefinieerd moeten worden. In de overzichtstabellen wordt daarom gebruikt gemaakt van een mintekens en plustekens om de eigenschappen van technieken mee aan te duiden. Hierbij dient onderstaande tabel 2 als legenda.

Tabel 2 Legenda bij overzichtstabellen techniekeigenschappen

symbool	betekenis
--	techniekeigenschap is zeer slecht, factoren verschil met streefwaarde
-	techniekeigenschap is duidelijk slechter dan streefwaarde, komt er niet bij in de buurt
±	techniekeigenschap is slechter dan streefwaarde maar zou deze kunnen benaderen in bepaalde gevallen
+	techniekeigenschap in dezelfde orde van grootte als streefwaarde
++	techniekeigenschap is duidelijk beter dan streefwaarde
?	prestatieniveau onduidelijk / twijfelachtig
+/-	prestatieniveau ligt tussen “+” en “-” in, sterk afhankelijk van de precieze omstandigheden (case), grootte, en doorontwikkelingen van de techniek

4.2 **Afvangst: absorbers**

4.2.1 **Principe**

Kooldioxide is met ongeveer 8% slechts een klein bestanddeel van WKK-rookgassen, wat afvangst compliceert. Het heeft gelukkig een aantal eigenschappen die sterk afwijken van de andere rookgasbestanddelen, met name stikstof en zuurstof. Absorbertechnologie maakt gebruik van de veel grotere oplosbaarheid van kooldioxide in speciale oplossingen.

Absorbersystemen werken doorgaans als volgt. Rookgassen worden in contact gebracht met een absorberoplossing, door in een (tientallen) meters hoge wastoren de vloeistof naar beneden te laten stromen over een pakkingmateriaal van kleine korrels, terwijl gas daartussendoor omhoog wordt geleid. Op deze manier wordt een groot contactoppervlak tussen vloeistof en rookgassen bereikt, en dientengevolge vindt oplossen van CO₂ in de vloeistof relatief gemakkelijk plaats. De oplossing wordt vervolgens in een andere kolom geregenereerd: door verhitting en/of drukverlaging wordt het CO₂ weer vrijgemaakt. Dit is de voornaamste energieverbruikende stap van het proces.

De eigenschappen van de oplossingen zijn natuurlijk essentieel. Een absorberoplossing moet een zeer hoge capaciteit voor CO₂ hebben, anders is het systeem niet technisch en economisch rendabel. Twee typen absorberoplossingen worden gebruikt: *fysische* en *chemische* absorbers.

Fysische absorbers binden slechts op fysische wijze CO₂, wat inhoudt dat het kooldioxide onveranderd, zonder een chemische reactie aan te gaan, oplost in de oplossing. Om deze reden kost het vaak ook minder energie om het CO₂ in de regeneratiestap weer vrij te maken. Ook enigszins ermee samenhangend is het feit dat de componenten van fysische solvents doorgaans veel minder degraderen. Een belangrijk nadeel is echter dat voor efficiënte toepassing een rookgasstroom onder hoge druk nodig is (\pm 20-100 bar), wat toepassing in de glastuinbouw belemmert. Voorbeelden van fysische solvents zijn Selexol (dimethylethers van polyethyleenglycol) en Rectisol (een sterk gekoelde methanoloplossing). Deze laatste is goedkoper dan Selexol, maar het proces is weer duurder door de benodigde koeling tot ongeveer -40 °C.

Chemische absorbers laten CO₂ oplossen door middel van een chemische reactie. In veruit de meeste gevallen gaat het hierbij om amines (meestal 10-30% in water). Door het alkalisch karakter van zulke oplossingen treedt een reactie op waarbij CO₂ wordt omgezet in het zeer goed oplopende HCO₃⁻ (bicarbonaat) ion, en amines (-NH₂ bevattende chemicaliën) in

ammoniumgroepen ($-NH_3^+$). Deze reactie is reversibel; bij regeneratie wordt warmte toegevoerd en komt zuivere CO_2 vrij, terwijl de amines ook worden teruggevormd.

Het gebruik van chemische absorbers is een bewezen techniek. Op verschillende plaatsen worden voor het verwijderen van CO_2 uit ruw aardgas (op commerciële schaal) of uit rookgasen van energiecentrales (op pilotschaal) amineprocessen gebruikt, met name gebaseerd op de verbindingen MEA, DEA en MDEA (respectievelijk monoethanolamine, diethanolamine en methyldiethanolamine). Gebruik van NaOH is ook mogelijk, maar geeft doorgaans wat lagere prestaties. In geoptimaliseerde processen is een zeer hoge terugwinning van CO_2 mogelijk, bijvoorbeeld 95% van alle CO_2 uit de aanvoergasstroom, met een productzuiverheid van 99% of hoger (de rest is voornamelijk stikstof).

Een belangrijk aandachtspunt bij gebruik van amines is dat ongewenste irreversibele nevenreacties kunnen optreden, met als gevolg dat chemische degradatie plaatsvindt, en per ton afgevangen CO_2 een aantal kilo amines verbruikt wordt. Ook kunnen corrosieve zouten gevormd worden. Om deze effecten zo veel mogelijk te beperken dienen vooraf NO_x en SO_x afgevangen te worden.

4.2.2 Analyse

op basis van opgestelde vergelijkingscriteria:

criterium	waarden bij techniek: absorbers	streefwaarde volgens SoR
kosten CO_2	±	maximaal € 0,10 per kg
zuiverheid CO_2	+?	minimaal zo zuiver als nu gezuiverd uit WKK
leveringszekerheid / storingsgevoeligheid	+	maximaal enkele uren tot een dag uitval per jaar.
productie CO_2	+	± 1 ton per hectare per dag
minimale schakelsnelheid CO_2 (0-100% productie)	+	± 15 minuten tot 1 uur

4.2.3 Discussie

Zoals voor meer technieken is gebleken, is het moeilijk om energieverbruik en daarmee samenhangende kosten te berekenen zonder een specifieke case gedefinieerd te hebben. Kosten van CO_2 capture op grote schaal zijn bekend, maar hangen natuurlijk ook af van de specifieke details van situatie en proces. De orde van grootte die meestal gehanteerd wordt

daarbij is enkele tientallen euro's per ton CO₂, wat overeen zou komen met de opgestelde eisen. Toepassing op WKK's betekent een schaalverkleining van ruwweg een factor 100, wat normaliter de prijs enigszins zal verhogen. Verder zal het vermoedelijke hogere kwaliteitseisen vanwege de samenstelling van de CO₂ ook een dergelijk gevolg hebben. Een gunstig effect op de kosten is echter dat minder hoge percentages voor terugwinning en samenstelling nagestreefd hoeven te worden wat in de E-sector gehanteerd wordt. Als geen opslag plaatsvindt, dan zal namelijk slechts zoveel CO₂ uit de rookgasstroom gehaald hoeven te worden als dat er op dat moment verbruikt wordt in de kas, wat een aantal malen lager is dan de in de E-sector gebruikelijke 90-95% (soms zelfs rond 99%), en een reductie in energie en kosten betekent.

Een aspect van deze techniek dat voor gebruik in kassen beslist de aandacht verdient is het gebruik van chemicaliën. Een wastoren met amines betekent het gebruik, en deels ook verbruik, van aanzienlijke hoeveelheden chemicaliën. Locale vergunningsregelingen zullen hier een complicerende factor kunnen spelen. Bovendien zal door verdamping en verneveling een bepaald klein van de componenten en bijproducten in de CO₂ stroom terecht kunnen komen. Het effect daarvan op gewassen is momenteel nog redelijk onbekend en moeilijk te voorspellen, en kan liggen tussen verwaarloosbaar en desastreus. Denk hierbij ter vergelijking aan de minieme hoeveelheden CO, NO_x, methaan en met name etheen die al voldoende zijn voor een significant negatief effect op plantengroei en soms ook arbeidsomstandigheden. Wel dient opgemerkt te worden dat CO₂ wat door middel van chemische absorptie afgevangen wordt bij enkele energiecentrales 'food grade' kwaliteit heeft (geschikt voor levensmiddelen). Het is echter nog niet voldoende bewezen of deze hoge CO₂ kwaliteit ook gehaald wordt door voor gebruik in de glastuinbouw aangepaste absorbersystemen. Tenslotte kunnen ARBO-richtlijnen een belemmerende rol spelen bij het omgaan met en bijvullen van de installatie. Het is duidelijk dat verdere studie naar deze aspecten essentieel is.

Onder andere vanwege de (potentiële) toxiciteit en de beperkte chemische stabiliteit van de standaard gebruikte amines zijn de afgelopen jaren alternatieven gezocht. Hoopgevende verbindingen zijn bijvoorbeeld aminozuren, non-toxisch en niet vluchtig, en vaak bioafbreekbaar. De prestaties en prijzen hiervan zijn vaak minder gunstig. Verder zal ook hier grondig onderzoek gedaan moeten worden naar de aanwezigheid en invloed van verontreinigingen in de CO₂-stroom op de teelt.

4.2.4 **Commerciële producten**

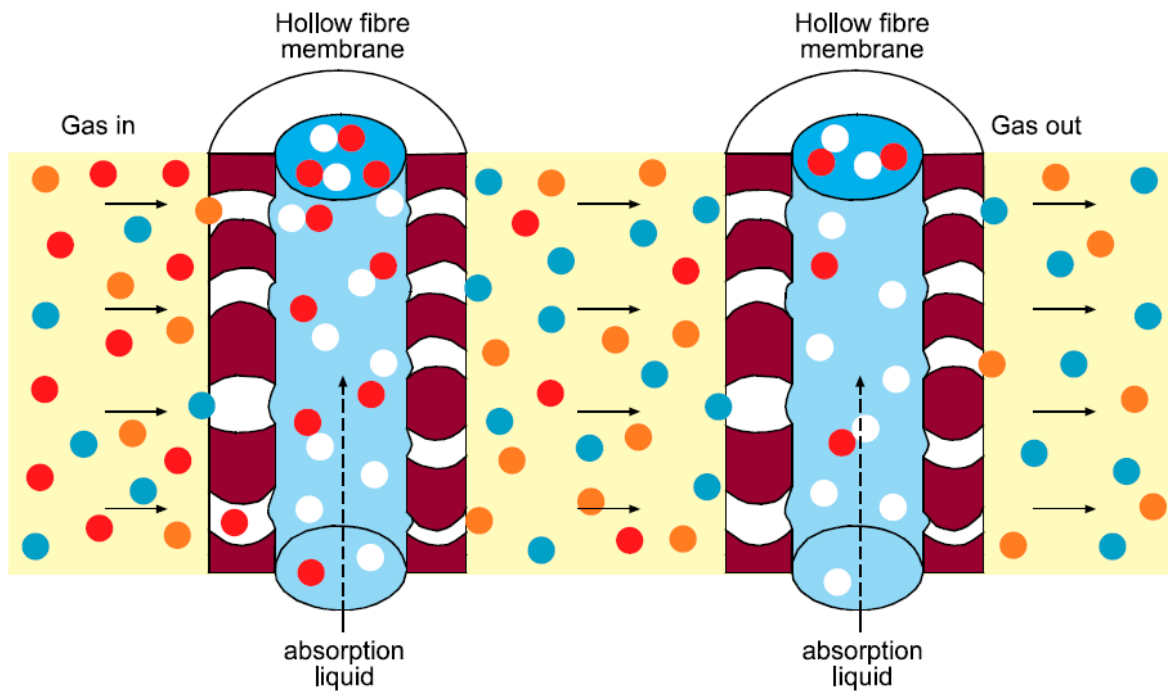
Recentelijk is een op absorbertechnologie gebaseerd product commercieel beschikbaar geworden. Het bedrijf Knook Energy Solutions heeft in samenwerking met TNO de ECOO Box ontwikkeld. De Knook ECOO box bestaat uit een wastoren die achter een rookgasreiniger wordt geplaatst. De vloeistof in de toren absorbeert CO₂ uit het rookgas. In een tweede toren kan de CO₂ in geconcentreerde zuivere vorm weer worden teruggewonnen (regeneratie). De keuze voor absorbers als CO₂-afvangsttechnologie voor dit commerciële product is gedreven door het feit dat dit deze techniek het verst ontwikkeld is richting toepassing in de praktijk. Een andere werkende CO₂ afvangstinstallatie is in bedrijf bij paprikateler Vink Sion in Berlicum. Daar wordt een door HoSt en Imtech – Vonk ontwikkelde CO₂ afvangst installatie gedemonstreerd, aangesloten op een houtgestookte WKK. De gebruikte technologie is wederom absorbers, om dezelfde reden als bij de installatie van Knook.

4.2.5 **Membraan gasabsorptie**

TNO onderzoekt voor de energiesector membraan gasabsorptie. Hierbij wordt getracht de voordelen van absorptie en membranen te combineren in één techniek. In het zogenaamde “onderzeeboot-project” heeft TNO aangetoond dat deze technologie een aanzienlijk deel van de CO₂ kan verwijderen uit de lucht in een onderzeeboot. Daarnaast heeft TNO met verschillende membranen en de speciaal ontwikkelde vloeistof Coral™ voor de energiesector in het CATO-project experimenten gedaan. Hierbij is gezocht naar optimale condities voor een zo energetisch mogelijke verwijdering van CO₂ uit rookgassen van energiecentrales. In de Amerikaanse Power plant in Esbjerg (Denemarken) is dit systeem op pilot schaal getest. Rookgas van WKK installaties bevat minder CO₂ dan het rookgas van kolencentrales, echter het onderzeebootproject heeft aangetoond dat zelfs nog veel lagere CO₂ concentraties geen principiële belemmering vormen om membraan-gas-absorptie toe te passen.

Deze technologie heeft een aantal voordelen ten opzichte van reguliere absorptietechnieken. Investeringskosten zijn waarschijnlijk lager doordat de adsorptiekolom (doorgaans ongeveer tweederde van de investeringskosten) wordt vervangen door een minder duur membraansysteem. Daarnaast is de installatie compacter doordat membranen meer contactoppervlak tussen gas en vloeistof bieden. In tegenstelling tot absorptie met een kolom is membraan-gas-absorptie flexibel in operatie. Het proces verliest weinig in efficiëntie wanneer op een lagere CO₂ productie wordt gedraaid, in tegenstelling tot traditionele absorptie. De zuiverheid en de productie van CO₂ zijn gelijk aan absorptie, omdat het

achterliggende principe hetzelfde is, slechts met een ander procesontwerp. Tenslotte is de installatie modulair en daarom flexibeler in opbouw. Een extra module kan gemakkelijk worden geïnstalleerd wanneer een uitbreiding van de capaciteit gewenst is.



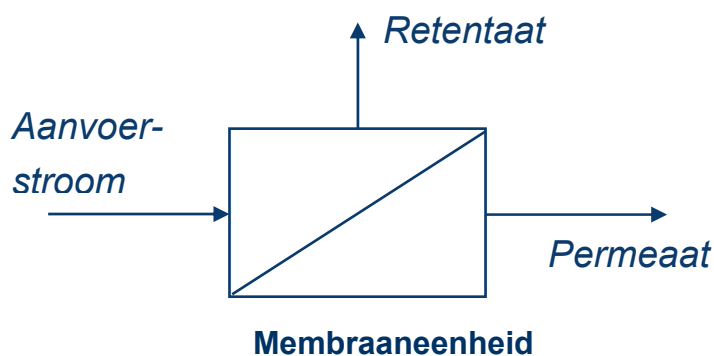
Figuur 9 Membraan-gasabsorptie. Rookgas stroomt van links naar rechts, waarbij CO₂ (rode bolletjes) selectief door het membraan permeëert en oplost in de absorbervloeistof (blauw, met witte absorberbolletjes)

De algemene nadelen van absorbers, met name die samenhangend met het gebruik van chemicaliën (zie paragraaf 4.2.3), blijven echter aanwezig. Daarnaast kan lekkage door defecte membranen of membraanmodules een groot probleem vormen, evenals de resistentie van het membraanmateriaal tegen langdurige blootstelling aan de chemische componenten van de absorbervloeistof. De techniek is nog in het ontwikkelingsstadium. Er is gekozen om in dit rapport de analyse van deze 'sub-techniek' te laten vallen onder absorbers (dus niet een apart overzicht).

4.3 Afvangst: membranen

4.3.1 Principe

Het principe van membraanwerking is scheiding door middel van verschillen in permeatiesnelheden van componenten door een semi-permeabel materiaal, het membraan. In het geval van CO₂ afvangst betekent dit dat rookgassen langs een dun (orde van grootte: micrometers) materiaal worden geleid, waarbij CO₂ relatief snel door het materiaal (doorgaans een speciaal 'slim' polymeer) getransporteerd wordt, en stikstof en andere componenten grotendeels achterblijven (zie ook figuur 10). De drijvende kracht achter deze gasscheiding is een voldoende groot partiële drukverschil van CO₂, in de vorm van het op druk brengen van de rookgasstroom, of het aanbrengen van een vacuüm aan de andere kant van het membraan. Dit is het onderdeel van het proces dat energie verbruikt.



Figuur 10 Schematische werking van een membraaneenheid. In het geval van CO₂-afscheiding uit rookgassen is rookgas de aanvoerstream, CO₂ het permeaat, en CO₂-arm rookgas het retentaat

De belangrijkste eigenschappen van CO₂ afvangst door middel van membranen worden hieronder opgesomd.

- Ruimte-efficiëntie
 - membraansystemen zijn doorgaans klein, dus geen hoge torens of grote volumes nodig
- Eenvoud (geen bewegende delen)
 - een membraansysteem bestaat in principe slechts uit modules (onafhankelijke sets membranen) en een pomp voor het genereren van over- / onderdruk
 - afgezien van de overbekende betrouwbare technologie van de te gebruiken compressoren zijn geen bewegende delen aanwezig
 - dit alles verlaagt de storingsgevoeligheid sterk

- Energie-efficiëntie
 - de energie-efficiëntie van een membraangebaseerd CO₂-afscheidingsproces is sterk afhankelijk van het aangelegde drukverschil en de hoeveelheid afgevangen CO₂. Indien voldoende selectieve en permeabele membranen beschikbaar zijn, dan kosten dergelijke scheidingsprocessen relatief weinig energie
- Chemicaliënloos
 - aangezien gasscheidingsmembranen puur werken op basis van permeatie van CO₂, worden chemicaliën gebruikt noch verbruikt
 - dus: geen (giftige) grondstoffen nodig in het systeem
 - geen problemen met vergunningen
 - geen effecten op mens en plant (geen lekken mogelijk in CO₂-stroom of het systeem zelf)
- Regeneratie onnodig
 - in tegenstelling tot bijvoorbeeld ab- en adsorbers is geen regeneratie van systeemcomponenten nodig, wat in principe ruimte, energie en / of chemicaliën bespaart
 - het is overigens wel mogelijk dat periodiek schoonmaken (b.v. verstoppingen, aangekoekte stoffen) van het membraanmateriaal nodig is. Dit wordt soms ook regeneratie genoemd, maar dit is onderhoud, een wezenlijk verschil met boven beschreven regeneratie die essentieel is voor tweestaps functioneren
- Deeltjesgevoeligheid
 - algemeen gesproken is de aanwezigheid van deeltjes in de rookgasstroom een punt van aandacht. Bij normale gasgestookte WKK's is dit waarschijnlijk nauwelijks een probleem
 - Indien deeltjes toch storend aanwezig zijn, is een voorbehandelingsstap nodig, bijvoorbeeld een filter
- Bewezen technologie (bij aardgaswinning)
 - CO₂-scheiding uit methaan (afvangst uit aardgas) is een op grote schaal toegepaste bewezen technologie
 - membraangebaseerde CO₂-afvangst uit rookgassen is nog relatief nieuw, maar wordt intensief en succesvol onderzocht en getest in meerdere grote internationale onderzoeksprojecten

- Prijs en beschikbaarheid

- de prijs van CO₂-afvangstmembranen loopt sterkt uiteen van acceptabel tot extreem duur, afhankelijk van prestaties, complexiteit en nieuwheid
- een behoorlijke verscheidenheid aan membranen wordt momenteel ontwikkeld voor CO₂ afvangst in kolencentrales. Membraanprijs is voor die toepassing een kritieke parameter, waardoor de prijs / kwaliteitsverhouding van membranen in hoog tempo verbetert
- commerciële beschikbaarheid is beperkt, met name van membranen met een hoge prestatieniveau, maar dit kan snel gaan veranderen.



Figuur 11 Testopstelling met CO₂-selectieve membranen (holle vezels)

4.3.2 Analyse

op basis van opgestelde vergelijkingscriteria:

criterium	waarden bij techniek: membranen	streefwaarde volgens SoR
kosten CO ₂	-/+	maximaal € 0,10 per kg
zuiverheid CO ₂	+?	minimaal zo zuiver als nu gezuiverd uit WKK
leveringszekerheid / storingsgevoeligheid	+?	maximaal enkele uren tot een dag uitval per jaar.
productie CO ₂	+	± 1 ton per hectare per dag
minimale schakelsnelheid CO ₂ (0-100% productie)	+	± 15 minuten tot 1 uur

4.3.3 Discussie

In dit stadium van ontwikkeling van membraantechniek voor CO₂-afscheiding uit rookgassen, en zonder gedetailleerde verdere gegevens zoals CO₂-verbruik en WKK grootte van een specifieke (al dan niet hypothetische) tuinder, is vrijwel geen energie- en kostenverbruik te geven voor een afvangstelsysteem. Ervaringen en voorspellingen uit de energiesector, waar momenteel op grote schaal onderzoek naar deze techniek plaatsvindt, leren dat onder zorgvuldig geoptimaliseerde condities een drie- tot viervoudige besparing van energieverbruik (compressie / vacuüm energie) mogelijk is ten opzichte van standaard amine-absorptieprocessen, die qua prestaties als haalbaar gezien kunnen worden voor toepassing in de glastuinbouw (zie paragraaf 4.2). Verder worden kosten genoemd van een paar tientallen euro's per ton CO₂. Cruciaal verschil voor membraantoepassingen is hierbij wel dat de CO₂-concentratie in rookgassen van WKK's wat lager is dan bijvoorbeeld bij kolencentrales, wat een grote invloed kan hebben op de prestaties en dus kosten.

De zuiverheid van afgevangen CO₂ is naar verwachting zeer goed, hoewel moeilijk te voorspellen is wat de permeabiliteit (doorlaatbaarheid) van vervuilingen zal zijn. Sporen van NO_x en dergelijke zullen mogelijk ook door (bepaalde) membranen kunnen diffunderen. Het is in ieder geval zo dat geen al in de rookgasstroom aanwezige componenten in het permeaat (de afgevangen stroom) terecht zullen komen, aangezien membraanscheiding volledig chemicaliënloos opereert.

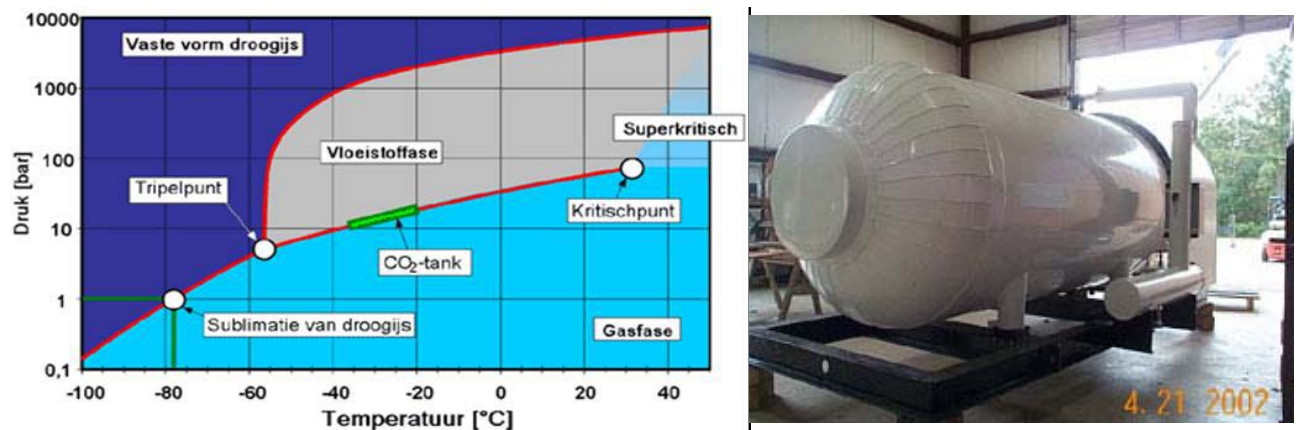
Het vraagteken bij leveringszekerheid in bovenstaande tabel is gerelateerd aan het feit dat membraangebaseerde CO₂-afvangst uit rookgassen nog niet volledig uitontwikkeld is, en dus ook onvoldoende gegevens en ervaring beschikbaar zijn om een stellige uitspraak over betrouwbaarheid en te kunnen doen. Wel kan gezegd worden, uit inschattingen gebaseerd op prestatie van vergelijkbare membraansystemen in CO₂-afvangst uit ruw aardgas, en een beschouwing van (de componenten van) de techniek in het algemeen, dat de verwachting goed is. Aandachtspunten hierbij zijn met name de chemische resistentie van de membraanmaterialen tegen zure sporenc componenten (b.v. HCl), en accumulerende verstopping door fijne deeltjes en/of aankoekende verbindingen.

4.4 Opslag: compressie

4.4.1 Principe

Voor de glastuinbouwsector is de optie van CO₂-opslag in tanks een geschikte mogelijkheid. Diverse tuinders maken hier reeds gebruik van, bijvoorbeeld indien de CO₂ geleverd wordt via tankwagens (zie ook figuur 4).

CO₂-opslag in tanks gebeurt in de vloeibare fase. Om gasvormig CO₂ (vrijgemaakt uit de rookgassen) naar een vloeibare vorm over te zetten, dienen deze te worden gecomprimeerd (druk verhogen) en/of de temperatuur te verlagen (zie ook Figuur 12). In de praktijk wordt deze CO₂-tank ingezet bij een temperatuur van -20 tot -35°C bij een druk van 10-20 bar.



Figuur 12 Opslag van gecomprimeerd CO₂. Links: fase-diagram CO₂: CO₂ opslagtank: -20 tot -35°C / 10-20 bar; rechts: opslagtank¹⁷

Analyse

op basis van opgestelde vergelijkingscriteria:

criterium	waarden bij techniek: compressie	streefwaarde volgens SoR
kosten CO ₂	+/- (afh. van CO ₂ -gehalte opgeslagen gas)	maximaal € 0,10 per kg
zuiverheid CO ₂	Gelijk aan zuiverheid opgeslagen CO ₂	minimaal zo zuiver als nu gezuiverd uit WKK
leveringszekerheid / storingsgevoeligheid	+	maximaal enkele uren tot een dag uitval per jaar.
productie CO ₂	+	± 1 ton per hectare per dag
opslagduur korte termijn (weersfluctuaties)	+	enkele dagen: ± 5 ton per hectare
opslagduur lange termijn (seizoensopvang)	+/- (afh. van CO ₂ -gehalte opgeslagen gas)	enkele maanden: ± 50-100 ton per hectare
minimale schakelsnelheid CO ₂ (0-100% productie)	+	± 15 minuten tot 1 uur

4.4.2 Discussie

Het voordeel van opslag in een tank is de hoge leveringszekerheid en snelle schakelsnelheid. Een nadeel van opslag in een tank is de beperkte capaciteit, en het feit dat de CO₂ na afvangst gecompriëerd dient te worden. Compressie is een proces dat afhankelijk van temperatuur en druk een niet onaanzienlijke energie-inspanning vraagt, die maar ten dele terug kan worden gewonnen bij decompressie voor gebruik.

Opslagtanks hebben een capaciteit van 6 - 54 ton vloeibare CO₂,¹⁷ en sluiten dus prima aan bij de behoefte van een tuinder voor korte termijn opslag (weersfluctuaties). Voor deze korte termijnopslag heeft een tuinder ongeveer 5 ton per hectare nodig (verbruik is ongeveer 1 ton / ha / dag). Voor seizoensopvang (langere termijn van enkele maanden (50-100 ton / hectare) zijn grotere en/of meerdere opslagtanks nodig.

In vergelijking met centrale compressie (wat in feite plaatsvindt bij de levering van vloeibare CO₂), geeft de hier optredende decentrale compressie (op kleinere schaal, bij de tuinder zelf) waarschijnlijk hogere kosten per ton. Aspecten zoals de gekoppelde afvangtechnologie en het percentage afgevangen CO₂ spelen hierbij een grote rol. De haalbaarheid voor decentrale kleinschalige compressie is per case sterk verschillend en dient in op case-niveau uitgewerkt te worden alvorens een kwantitatieve vergelijking gedaan kan worden.

4.5 Hybride: Cryogeen

4.5.1 Principe

Bij cryogene destillatie wordt de gehele rookgasstroom afgekoeld, waardoor CO₂ condenseert en teruggewonnen kan worden middels een destillatie proces. Binnen de glastuinbouwsector is hiermee nog geen ervaring, maar binnen de energiesector in Nederland ontwikkelt Enecogen op dit moment zijn eigen cryogene destillatie technologie. Deze zal gebruikmaken van de koude uit de naast gelegen LNG (Liquified Natural Gas, vloeibaar aardgas) terminal van LionGas (de terminal is nog in ontwikkeling, zie ook figuur 13). Hiermee wordt het nadeel van een hoog energieverbruik van koelen van CO₂ stromen vermeden.⁵

Door de fysische eigenschap van CO₂ dat het bij een temperatuur van -78°C overgaat van gasfase naar vaste fase, kan het op deze manier worden teruggewonnen uit de rookgasstroom (zie ook Figuur 12). Een LNG terminal heeft een temperatuur van -162°C, en dient opgewarmd te worden, om het LNG in aardgas om te zetten. Dit overschot aan koude kan dus uitstekend gebruikt worden voor het afkoelen van de rookgassen totdat het CO₂ zijn vaste vorm aanneemt. Cryogene destillatie is hiermee het meest geschikt voor stromen met hoge CO₂ concentraties (typisch >90%; dit kan voorkomen in precombustion en oxyfuel CO₂ capture processen), maar minder geschikt voor meer verdunde CO₂ stromen.¹⁰ Bij het Enecogen initiatief komt CO₂ verdund in de rookgassen voor, waardoor deze moeten worden afgekoeld tot -130 °C om circa 90% van de CO₂ te vangen.⁵ Voor de WKK van een tuinder gelden ongeveer dezelfde omstandigheden, met als belangrijkste verschillen dat een minder hoge terugwinning ook kan voldoen, en dat de concentratie CO₂ doorgaans nog lager is.

Bij afkoelen van de rookgassen tot -130°C, worden naast het CO₂ ook het water, de laatste resten NO_x en eventuele onverbrande brandstoffen verwijderd. Hierna dient de overgebleven rookgasstroom (zuurstofarme, iets verrijkt met de nog niet verwijderde CO₂) herverhit te worden tot ongeveer buitentemperatuur, waarna het door de schoorsteen wordt afgevoerd.⁵



Figuur 13 (a) Voorbeeld van een LNG terminal, (b) mogelijke locaties LNG terminal Maasvlakte

4.5.2 Analyse

op basis van opgestelde vergelijkingscriteria:

criterium	waarden bij techniek: cryogeen	streefwaarde volgens SoR
kosten	--	maximaal € 0,10 per kg
zuiverheid CO ₂	+	minimaal zo zuiver als nu gezuiverd uit WKK
leveringszekerheid / storingsgevoeligheid	+/-	maximaal enkele uren tot een dag uitval per jaar.
productie CO ₂	+	± 1 ton per hectare per dag
opslagduur korte termijn (weersfluctuaties)	+	enkele dagen: ± 5 ton per hectare
opslagduur lange termijn (seizoensopvang)	+/-	enkele maanden: ± 50-100 ton per hectare
minimale schakelsnelheid CO ₂ (0-100% productie)	+/-?	± 15 minuten tot 1 uur

4.5.3 Discussie

Doordat voor de afvangst middels cryogene destillatie een aantal randvoorwaarden gelden waaraan voor de glastuinbouw op dit moment nog niet aan voldaan wordt, is deze techniek

nog niet op grotere schaal industrieel voor de glastuinbouw inzetbaar. Bottlenecks bij de ontwikkeling van deze techniek zijn onder andere:

- verbinding met koudebron: er dient een mogelijkheid te zijn om de kas te verbinden met een koudebron, zoals een verbinding tussen een kas met de toekomstige LNG terminal Rotterdam (zie ook *Figuur 13*)
- leveringszekerheid CO₂: bij een bestaande koudebron, zoals de LNG terminal, is de beschikbaarheid van de koude batchgewijs, namelijk gekoppeld met aanvoer van/via schepen. Daardoor kan, afhankelijk van opslag- en transportmogelijkheden van gas en koude, mogelijk niet altijd aan de hoge gevraagde leveringszekerheid van de tuinder voldaan worden
- extra energie voor koudeproductie: een grotere leveringszekerheid voor de tuinder wordt bereikt, indien deze zelf zijn koude opwekt voor cryogene destillatie van de rookgasstroom en het hierbij afvangen van CO₂ (g). Dit vergroot het energieverbruik voor de tuinder, omdat extra koeling gevraagd wordt
- verwijderen van overige rookgasdelen: bij meer vervuilde rookgasstromen dienen bepaalde bestanddelen verwijderd te worden voordat de rookgasstroom wordt afgekoeld, om blokkades te voorkomen
- vorming vast CO₂: bij sommige processen kan vast CO₂ ontstaan, wat technische uitdagingen oplevert met betrekking tot verstoppingen, warmtewisselaar ontwerp en CO₂ afvoer.

Zoals vermeld, is deze technologie nog niet commercieel verkrijgbaar voor de glastuinbouwsector.

4.6 Hybride: adsorbers

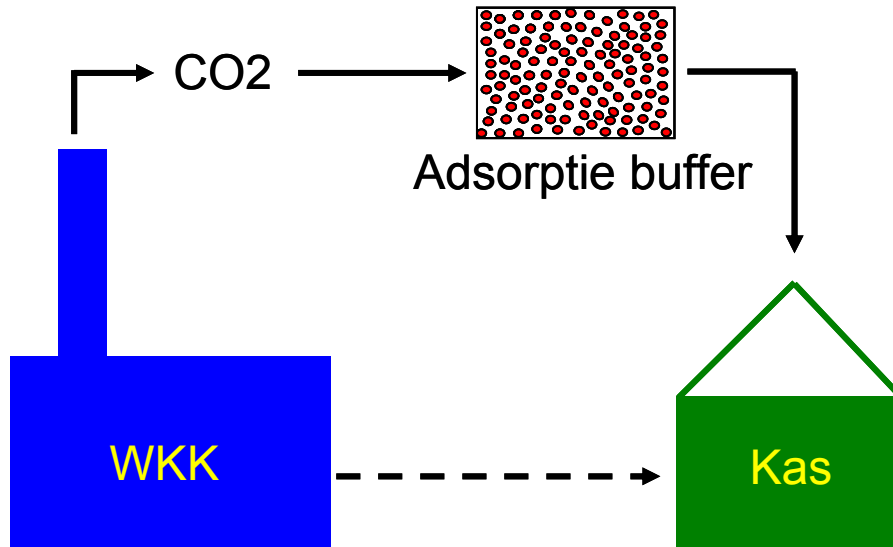
4.6.1 Principe

Adsorptie is het verschijnsel waarbij moleculen van een vloeistof- of gasfase aan het oppervlak hechten van een vast stof – het adsorbens (zie Figuur 14). Er zijn vele typen adsorbentia die CO₂ kunnen afvangen. De eigenschappen van adsorbentia zijn zeer divers en daarom kan een adsorbent worden geselecteerd met specifieke eigenschappen welke ideaal passen bij de specifieke eigenschappen van het rookgas van bijvoorbeeld een WKK. Aspecten waarmee rekening gehouden moet worden zijn bijvoorbeeld:

- capaciteit – zeolieten hebben in de regel een hogere capaciteit voor CO₂ dan actieve kool
- regeneratie – hoewel adsorptie van CO₂ op zowel zeolieten als actieve kool een reversibel proces is, kost het energie om CO₂ weer vrij te krijgen. Door het aanleggen van een concentratiegradiënt, bijvoorbeeld door te spoelen met lucht, komt (een deel van) de CO₂ vrij. Indien dit niet voldoende is, kan de hoeveelheid vrijkomende CO₂ worden verhoogd door middel van temperatuurverhoging (temperature swing) of drukverlaging
- kinetiek – de opnamesnelheid van CO₂ is voldoende groot, dit vormt geen belemmering
- vochtgevoeligheid – waterdamp is een belangrijk bestanddeel van rookgassen. Zowel zeolieten als actieve kolen adsorberen water, waarbij zeolieten in de regel beduidend meer en/of bij lagere concentraties water opnemen. Dit betekent dat een droogstap (of andere waterverwijderingsstap) in het proces moet worden opgenomen
- verontreinigingen – niet alleen CO₂ kan zich binden aan het adsorbens; verontreinigingen die zich in de rookgassen bevinden kunnen zich ophopen in adsorbentia.



Figuur 14 Labopstelling met adsorberkorrels



Figuur 14 Schematische weergave van een adsorptiebuffer

4.6.2 Analyse

op basis van opgestelde vergelijkingscriteria:

criterium	waarden bij techniek: adsorbers	streefwaarde volgens SoR
kosten CO ₂	-	maximaal € 0,10 per kg
zuiverheid CO ₂	+	minimaal zo zuiver als nu gezuiverd uit WKK
leveringszekerheid / storingsgevoeligheid	+	maximaal enkele uren tot een dag uitval per jaar.
productie CO ₂	+	± 1 ton per hectare per dag
opslagduur korte termijn (weersfluctuaties)	+	enkele dagen: ± 5 ton per hectare
opslagduur lange termijn (seizoensopvang)	-	enkele maanden: ± 50-100 ton per hectare
minimale schakelsnelheid CO ₂ (0-100% productie)	+	± 15 minuten tot 1 uur

4.6.3 Discussie

Door lucht over het adsorptiebed te stromen komt CO₂ vrij, typisch met dezelfde concentratie waarbij de adsorptie plaatsvond (dus ongeveer 8-10%). De hoeveelheid CO₂ die desorbeert kan worden verhoogd door bijvoorbeeld een hogere temperatuur. De zuiverheid van de CO₂ hangt af van de mate waarin andere verontreinigingen adsorberen en desorberen. Dit is te sturen door het juiste adsorbens te kiezen en daarnaast de condities goed af te stellen waarbij adsorptie en desorptie plaatsvindt. Met een adsorptiebed kan makkelijk geschakeld worden tussen adsorptie van CO₂ (buffering) en desorptie van CO₂ (regeneratie of productie). Indien met meerdere bedden wordt gewerkt, is de flexibiliteit nog groter. De opslagduur die haalbaar is hangt af van de totale hoeveelheid CO₂ die moet worden opgeslagen (buffercapaciteit: ± 100 kg CO₂ per ton materiaal) en dus in feite van de CO₂ behoefte van de betreffende kas. Een buffer van redelijke omvang moet CO₂ op kunnen slaan voor een periode van een weekend of een week. Langere periodes zijn op zich ook mogelijk, maar het is de vraag of het praktisch haalbaar vanwege de vereiste buffergrootte en kosten van het systeem.

Het ontwikkelingsstadium bevindt zich in de onderzoeksfase.

4.7 Overig: HotCO₂

4.7.1 Principe

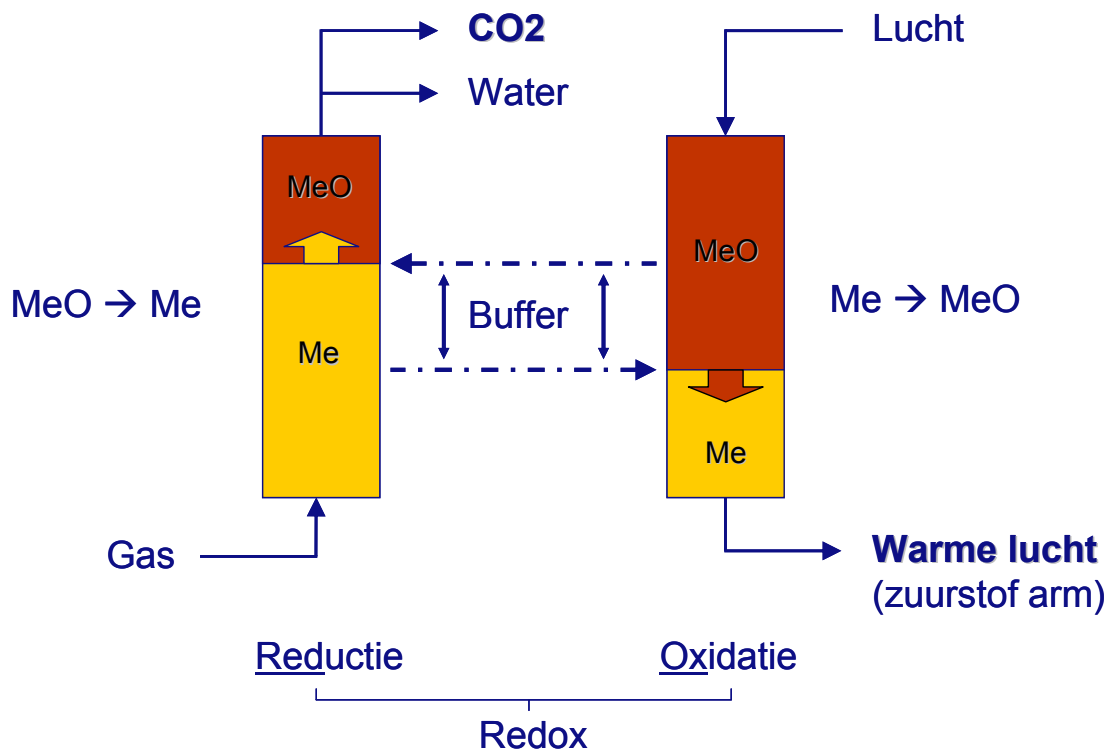
Het HotCO₂ proces is afgeleid van proces dat is ontwikkeld in het kader van een Europees project voor energiecentrales.¹⁸ Hierbij diende het proces warmte en CO₂ te produceren in twee afzonderlijke stappen, zodat warmte gebruikt kan worden om een turbine aan te drijven en de CO₂ in een andere stap vrijkomt en hierbij gemakkelijk opgevangen kan worden. In het kader van energieopwekking blijkt een gepakt bed niet het beste concept. De grote volumes gas die



Figuur 15 HotCO₂ labopstelling: een holle buis met metaalkorrels

door het bed moeten worden geblazen ondervinden teveel weerstand. Daarentegen is dit in de glastuinbouw een eigenschap welke geen belemmering hoeft te zijn, de behoeftes met betrekking tot warmte en CO₂ liggen hier immers veel lager in piekbelasting.

Het HotCO₂ concept werkt als volgt: een holle buis gevuld met metaalkorrels, bijvoorbeeld nikkel, wordt aangestroomd met lucht. Hierbij reageert het metaal tot metaaloxide en geeft hierbij veel warmte af. In een tweede stap wordt het bed aangestroomd met aardgas. Hierbij reageert het metaaloxide weer tot metaal en als bijproduct wordt CO₂ gevormd. Hierna kan het proces weer van voren beginnen. Dit proces is schematisch weergegeven in figuur 17.



Figuur 16 Schematische weergave van het HotCO₂ concept

Bij het HotCO₂ proces is het niet noodzakelijk dat het volledige bed wordt gebruikt bij de reactie. Halverwege kan het proces ook gewisseld worden, waarbij een deel van het metaal als “buffer” in een andere toestand verkeerd (bijvoorbeeld als metaaloxide) dan de rest van het metaal. Dit kan op een later tijdstip, wanneer CO₂ nodig is, alsnog in contact worden gebracht met aardgas om de gewenste hoeveelheid CO₂ te produceren. Het streven zal zijn om in deze buffer voor drie weken warmte of CO₂ op te slaan, zodat de grootste schommelingen van het weer kunnen worden opgevangen.

Naast het voordeel van buffering van zowel warmte als CO₂, geeft HotCO₂ meer bewegingsvrijheid. Het regenereren van het bed in de winter kan op momenten worden uitgevoerd waarop de gasprijs laag is en pieken in het gasverbruik kunnen worden opgevangen door het bufferend vermogen van het systeem.

Het HotCO₂ concept is een modulair ontwerp, waarbij het metaal aanwezig is in buizen die los van elkaar kunnen worden aangestroomd. Hierdoor is het mogelijk om CO₂ en warmte op hetzelfde moment te genereren.

Het HotCO₂ proces kan de kas verwarmen met de hete lucht die vrijkomt bij het proces. Deze lucht heeft een temperatuur van 800°C en kan bij wijze van luchtverwarming de kas in worden geblazen nadat het tot een acceptabele temperatuur is afgekoeld door vermenging met kaslucht en/of buitenlucht. Hierbij kan het verwarmen van de kas bijdragen aan het verlagen van de vochtigheid in de kas. Daarnaast kan deze hete lucht ook gebruikt worden om het verwarmingssysteem van de kas mee te verhitten.

De levensduur van het metaalbed zal niet oneindig zijn, maar zal waarschijnlijk door een speciale behandeling weer kunnen worden ontdaan van vervuilende componenten, stof en cokes zodat het materiaal weer geschikt is om gebruikt te worden in het proces. Vanwege de modulaire constructie van HotCO₂, is het mogelijk om zonder de machine uit te schakelen het onderhoud uit te laten voeren.

4.7.2 Analyse

op basis van opgestelde vergelijkingscriteria:

criterium	waarden bij techniek: HotCO ₂	streefwaarde volgens SoR
kosten CO ₂	+	maximaal € 0,10 per kg
zuiverheid CO ₂	++	minimaal zo zuiver als nu gezuiverd uit WKK
leveringszekerheid / storingsgevoeligheid	+?	maximaal enkele uren tot een dag uitval per jaar.
productie CO ₂	++	± 1 ton per hectare per dag
opslagduur korte termijn (weersfluctuaties)	+	enkele dagen: ± 5 ton per hectare
opslagduur lange termijn (seizoensopvang)	+/- ^a	enkele maanden: ± 50-100 ton per hectare
minimale schakelsnelheid CO ₂ (0-100% productie)	+	± 15 minuten tot 1 uur

^a Afhankelijk van buffergrootte; 1.6 m³ materiaal per ton CO₂ nodig. Verder kan bijna 9 GJ warmte per m³ worden opgeslagen.

4.7.3 Discussie

De HotCO₂ installatie bevat geen bewegende delen en zal daarom niet snel slijten. De leveringszekerheid is daarom hoog en ook zal er weinig onderhoud nodig zijn. Het uiteindelijke apparaat zal een modulair ontwerp betreffen, dat wil zeggen dat het bestaat uit identieke parallele kanalen welke afzonderlijk aan en uitgeschakeld kunnen worden. Op deze manier kan de CO₂ levering worden afgestemd op de benodigde hoeveelheid en kan daarnaast tegelijkertijd warmte worden geproduceerd als de behoefte daarvoor bestaat. Uiteindelijk zal de installatie op maat zuivere CO₂ leveren met als voordeel dat in een gesloten kassysteem geen CO₂ meer wordt uitgestoten en daardoor geen emissierechten gekocht hoeven te worden.

Het ontwikkelingsstadium betreft op dit moment de onderzoeksfase.

5 OVERZICHT

5.1 Inleiding

Om helderder de verschillende technieken met elkaar te kunnen vergelijken wordt hier een totaaloverzicht gepresenteerd van alle beschouwde technieken in één tabel (tabel 3). Opmerkingen en conclusies worden verwoord in de volgende paragraaf.

Tabel 3 Kwalitatief overzicht van technieken vergeleken met de SoR

criterium	afvangst		opslag	hybride		overig
	absorbers	membranen	compressie	adsorbers	cryogeen	HotCO ₂
kosten CO ₂	±	-/+	+/-	-	--	+
zuiverheid CO ₂	+?	+?	*	+	+	++
leveringszekerheid / storingsgevoeligheid	+	+?	+	+	+/-	+?
productie CO ₂	+	+	+	+	+	++
opslagduur korte termijn (weersfluctuaties)	nvt	nvt	+	+	+	+
opslagduur lange termijn (seizoensopvang)	nvt	nvt	+/-	-	+/-	+/-
minimale schakelsnelheid CO ₂ (0-100% productie)	+	+	+	+	+/-?	+

* afhankelijk van zuiverheid afgevangen CO₂

5.2 Discussie

In voorgaand hoofdstuk en bovenstaande tabel zijn een zestal technieken met elkaar vergeleken. Het is belangrijk om bij een onderlinge vergelijking daarvan in het achterhoofd te houden dat in bijna alle technieken weer een onderverdeling gemaakt kan worden in categorieën (of producten); verschillende typen membranen, soorten oplosmiddelen etc. Bij de kwalitatieve beoordeling die hier wordt gegeven is uitgegaan van een goede inschatting van de naar onze mening meest interessante manier van gebruik (type, materiaal, configuratie, etc.) van de techniek.

Wat niet meegenomen is in bovenstaand overzicht is de milieudruk van de technieken. Bij alle technieken wordt een zekere hoeveelheid energie verbruikt, wat in principe een belasting is. Met name cryogene afvangst en opslag (als niet gebruikt gemaakt kan worden van een bestaande koudebron) kost veel energie. Alle technieken voorkomen in principe echter ook CO₂ emissie, wat weer een positief effect is. Wat dat betreft zal de voor de GTB meest interessante techniek qua kosten per ton CO₂, waarschijnlijk ook de minst milieubelastende zijn, omdat zo efficiënt mogelijk CO₂ wordt gebruikt in plaats van uitgestoten. Het grootste verschil op milieugebied zit in het al dan niet gebruiken / verbruiken van chemicaliën. Absorbers vallen in dit opzicht op. De uiteindelijke milieudruk van deze techniek is sterk afhankelijk van specifiek welke chemicaliën onderdeel zijn van het afvangstproces. In elk geval staat vast dat een significante hoeveelheid chemicaliën gebruikt en deels verbruikt zullen worden, wat een punt van aandacht kan zijn in verband met vergunningsregelingen.

Een interessante relatie bestaat tussen afvangst, en opslag door compressie. De efficiëntie (in energie en kosten) van opslag gaat omlaag met een lager CO₂-gehalte in het gas dat wordt opgeslagen. Hoe lager het percentage, hoe meer onnuttig gas (b.v. stikstof) wordt gecomprimeerd en opgeslagen in een vast en beperkt volume, dus hoe hoger de kosten per hoeveelheid CO₂. Echter, de efficiëntie van afvangst gaat *omhoog* als een lager CO₂ percentage gehaald hoeft te worden in het afgevangen gas. Uiteindelijk zal hier een optimum in gezocht moeten worden. Waar dat ligt is zeer sterk afhankelijk van de precieze specificaties van technieken, de bedrijfsvoering van de tuinder, etc. Modellerwerk kan hierbij uitkomst bieden.

Een andere belangrijke conclusie die getrokken kan worden is dat opslag met een korte duur haalbaar is. Wat echter moeilijk of praktisch niet te realiseren is met huidige technieken is opslag op lange termijn (maanden). Er zijn wel mogelijkheden om dit te bereiken, maar deze vereisen zodanig veel materiaal (qua volume, gewicht, prijs) dat praktische toepassing vooralsnog beperkt lijkt. Op het gebied van zuiverheid van afgevangen CO₂ kan gezegd worden dat daar veel perspectief ligt, bij verschillende methodes. Ook productie(-snelheid) en de schakelsnelheid van de technieken lijkt geen probleem.

Tenslotte volgen hier enkele gedachten over de kosten van verschillende technieken. Voorzover daar zonder verdere details (het vaststellen van een case, en van alle specificaties binnen een techniek) iets over gezegd kan worden, is de conclusie nu al dat cryogene afvangst / opslag waarschijnlijk af zal vallen vanwege een te hoge prijs, behalve in het zeldzame geval dat een voldoende grote koudebron beschikbaar is. Een aantekening hierbij is dat technologische ontwikkelingen, zoals met name nieuwe procesontwerpen die de afzetting van vast CO₂ op onder andere de warmtewisselaar voorkomen, het energieverbruik

(de voornaamste kostencomponent) van cryogene afvangst significant terug zouden kunnen dringen. Adsorbers kunnen aan de dure kant zijn wanneer veel materiaal nodig is voor opslag; wanneer voornamelijk gericht wordt op afvangst dan is de prijs per ton adsorbers een kleinere factor. Absorbers en membranen zouden prijstechnisch zeker aantrekkelijk moeten kunnen zijn bij enige doorontwikkeling. Tenslotte geldt dat alle technieken minder interessant worden voor de glastuinbouw bij een lager CO₂ verbruik, aangezien dan de benodigde vaste (ontwikkelings- en) investeringskosten relatief groter worden ten opzichte van de intrinsieke gebruikskosten per ton CO₂.

6 CONCLUSIES

6.1 Werkwijze

Beschikbaarheid van CO₂ is een uiterst belangrijk punt voor de glastuinbouw, en afvangst en opslag zouden beslist meerwaarde hebben.

Een samenstel eisen aan CO₂-afvangst- / opslagmethoden is opgesteld: de Set of Requirements. Aan de hand hiervan kunnen technieken beoordeeld worden op geschiktheid voor toepassing in de glastuinbouw.

6.2 Technieken

Vanwege de huidige aandacht voor klimaatsverandering en daarbij benodigde CO₂-emissie-reductie van energiecentrales, zijn er veel technieken voor CO₂-afvangst (soms gepaard gaand met opslag) ontwikkeld voor die sector. Dit zorgt voor een relatief breed spectrum aan potentiële toepassing in de glastuinbouw. In veel gevallen dient nog (in verschillende mate) onderzoek en ontwikkeling vooraf te gaan aan commerciële toepassing. Wel kan gesteld worden dat er in potentie vele technieken geschikt lijken voor het voorzien (afvangst, opslag, alternatieve wijze) van de benodigde CO₂ stroom voor de GTB. Een enkel eerste daadwerkelijke initiatief voor de GTB richt zich op absorbers.

Niet beschouwde technieken zijn fysische absorbers (te hoge druk en te hoge concentraties CO₂ vereist), en opslag in de bodem (teveel onzekerheden met betrekking tot grote complicaties). Deze laatste techniek is wel degelijk interessant om te laten onderzoeken, aangezien het de enige is die een reëel perspectief biedt op lange termijn opslag.

6.3 Analyse

Voor grondige kwantitatieve economische / energetische analyse van alle mogelijkheden is de vraag en het doelgebied nu te breed: de gehele GTB, te veel / veelomvattende technieken. Voor dat doel zullen case studies gedaan moeten worden met (een aantal) gedefinieerde situaties, qua tuinder en qua techniek.

CO₂ afvangst: membranen zijn veelbelovend, maar vereisen verder onderzoek en ontwikkeling. Absorbers zijn interessant, er bestaat praktijkervaring mee op grote schaal, maar het gebruik van chemicaliën vraagt om zorgvuldige analyse van mogelijke gevolgen

(met name sporen chemicaliën in CO₂, maar ook vereiste vergunningen, kans en gevolgen van lekkages, ...).

CO₂ opslag: adsorbers zijn interessant en bieden ook de mogelijkheid voor afvangst, maar de hoeveelheid materiaal benodigd per hoeveelheid CO₂ is een belemmering. Cryogene afvangst en opslag is technisch haalbaar maar kost zodanig veel energie dat de praktijk is voorbehouden aan zeldzame plaatsen waar een koudebron beschikbaar is. Compressie, opslag in tanks, is een volwassen en betrouwbare techniek, waarbij de efficiëntie en effectiviteit sterk afhangen van de concentratie van CO₂ in de toegevoerde stroom.

HOTCO₂ is een origineel concept vanwege de ontkoppeling van warmte- en CO₂-productie, met daarnaast opslagmogelijkheid, maar een nadeel is het feit dat het naast een bestaande WKK moet worden gebruikt in plaats van erop aangesloten (dus geen electriciteitsproductie).

6.4 **Perspectieven**

Welke techniek biedt het meeste perspectief? Het is beter om te stellen dat meerdere zeer interessante oplossingen in ontwikkeling zijn. Absorbers, adsorbers en membraantechnologie bieden perspectief, afhankelijk van hoe deze technieken verder ontwikkeld kunnen worden en aangepast aan de wensen en eisen van de glastuinbouw.

Voor de eerstvolgende paar jaar wordt geen grootschalige commerciële toepassing voorzien van de beschouwde technieken. Echter, zoals gezegd afhankelijk van verdere technische ontwikkelingen en prestatieverbeteringen (waarvoor investeringen nodig zijn), liggen daarna zeker meerdere mogelijkheden open.

7 AANBEVELINGEN

Zoals al duidelijk werd in vorige hoofdstukken, is de voornaamste en krachtigste aanbeveling die gedaan moet worden het doen van case studies. De conclusies van deze studie zijn dat een aantal technieken mogelijk interessant is, met name voor afvangst van CO₂. Echter, zonder het vastleggen en kwantificeren van een aantal parameters met tussen verschillende tuinders sterk uiteenlopende waarden zijn getallen voor bv kosten niet te geven, en valt niet te zeggen hoe een bepaalde techniek eventueel in te passen zou zijn in de bedrijfsvoeringen van bepaalde tuinders.

Een voorbeeld van parameters voor mogelijke case studies wordt hieronder gegeven.

- Rozenteler (4 ha) (of paprika, ...)
- Semi-gesloten kas (of gesloten, ...)
- 1,5 MW WKK, ureumzuivering (of andere grootte, geen zuivering, ...)
- Geen OCAP, ketel als backup (of vloeibaar, ...)
- Streefniveau 1000 ppm (of x ppm)

- Doorrekenen:
 - *Business as usual*, vergeleken met membraan X, absorber Y, opslag Z, met specificaties A, B, C.....,
 - Investeringskosten
 - Energie / kosten
 - Hoeveel winst / verlies?
 - Etc.

Wat betreft de timing van vervolgonderzoek kan gezegd worden dat het heden een uitermate interessant tijdstip is. In en voor de energiesector is in de afgelopen paar jaar veel onderzoek gedaan naar CO₂ afvangst, transport en (permanente) opslag. Juist nu is dus bijzonder veel kennis beschikbaar, die slechts wacht om aangepast en toegepast te worden op de specifieke situaties en wensen van de glastuinbouw. Enkele jaren wachten totdat alle conclusies zijn getrokken en de technieken zijn uitontwikkeld lijkt ook een optie, maar het betekent dat toepassing van de perspectief biedende technieken enkele jaren vertraagd wordt; jaren waarin mogelijkveel CO₂ bespaard had kunnen worden. Nu meeliften met de wetenschap, techniek en politiek, en onderzoek doen naar aanpassing van voor de E-sector in ontwikkeling zijnde / ontwikkelde systemen naar gebruik in de glastuinbouw, is een advies dat serieuze overweging waard is.

Met andere woorden, het verdient de aanbeveling pilot studies / doorontwikkeltrajecten te starten met enkele technologieën om deze geschikt te maken voor de eisen van de GTB, liefst bij tuinders en met echt rookgas. Een aantal voorbeelden wordt hieronder gegeven:

- aanpassing / ontwikkeling van een membraansysteem voor GTB-CO₂-capture aan de hand van ontwerpen, materialen en ervaringen die zijn ontwikkeld / opgedaan voor en in de energiesector
- opstellen van een adsorptiebed gekoppeld aan een (eventueel van de rest van de kas geïsoleerd) kasdeel, waarbij - al dan niet uit eigen WKK afgevangen - CO₂ wordt opgeslagen en wordt gekeken naar de werking en voor- en nadelen van opslag onder reële omstandigheden, en eventuele benodigde aanpassingen aan GTB-gebruik
- studie en praktijktests om de optimale ratio absorber afvangst (tot welk CO₂ percentage) ten opzichte van compressie te bepalen
- kleine schaal tests met één of meerdere van bovengenoemde systemen of het HOTCO₂ systeem, waarbij gekeken wordt naar (o.a.) de (energie-)kosten, prestaties, CO₂ zuiverheid, integratie in de kas / WKK systemen, onderhoud, etc.

Op deze manier kunnen belangrijke gegevens worden verkregen (b.v. details over investeringen en operationele kosten, prestaties, duurzaamheid etc in specifieke gevallen, zoals hierboven in het voorbeeld al kort geschetst), en wordt draagvlak gecreëerd voor zowel de GTB als de politiek.

Verder is het mogelijk dat de komende jaren een aantal CO₂ afvangst en (in mindere mate) – opslagtechnieken commercieel beschikbaar komen. Voorwaarde voor een afzienbare termijn lijkt wel te zijn dat dit proces gekatalyseerd wordt door middel van onderzoeken specifiek gericht op toepassing van CO₂ afvangst- en opslagtechnieken in de GTB. In het stadium dat er een aantal oplossingen aangeboden gaan worden – iets wat nu langzaam lijkt te gaan beginnen – lijkt het verstandig, of wellicht essentieel, om de dan nog in de praktijk nog onbekende technieken te onderwerpen aan praktijktests, bijvoorbeeld met betrekking tot de parameters die gedefinieerd zijn in de SoR van deze studie.

Opslag van CO₂ in de bodem is een techniek die bewust buiten beschouwing is gelaten in deze studie vanwege een te groot aantal complicerende factoren. Wel is geconcludeerd dat er een aantal zeer interessante aspecten aan de techniek zitten. Wil men een compleet en duidelijk oordeel vellen over CO₂-opslag voor de GTB, dan moet hier onderzoek naar gaan plaatsvinden. Een van de conclusies van deze studie is dat opslag op een grotere schaal dan een paar dagen niet haalbaar is met andere technieken, en opslag in de bodem is nota bene de enige techniek die mogelijk wel perspectief biedt hierop. De in paragraaf 3.6 genoemde problemen zullen met name onder de loep moeten worden genomen.

BIJLAGE A RESULTATEN BEDRIJFSBEZOEKEN

Bezochte bedrijven (22-09-2008, Martijn Huibers (KEMA) en Peter Geerdink (TNO)):

- Porta Nova (Leon Dukker), Waddinxveen; rozen
- Boonekamp Roses (Marcel Boonekamp), Berkel en Rodenrijs; rozen
- Van Ruijven Paprika (Michel van Ruijven), Steenbergen; gele paprika's.

Alle bedrijven hebben geen bezwaar dat hun naam en gegevens worden genoemd in het rapport.

Algemeen			
<i>Bedrijf</i>	Porta Nova	Boonekamp Roses	van Ruijven Paprika
<i>Gewas</i>	Roos	Roos	Gele paprika
<i>Type kas</i>	Semi-gesloten / traditioneel	Traditioneel	Traditioneel
<i>Oppervlakte kas</i>	6,4 hectare / ??	2,3 hectare	6,0 hectare
<i>Belichting</i>	20 uur per dag	20 uur per dag	Geen
CO₂ - huidige situatie			
<i>CO₂ bron zomer</i>	inkoop vloeibaar / WKK	OCAP + WKK	WKK
<i>CO₂ bron winter</i>	inkoop vloeibaar / WKK	OCAP (anders te veel onzuiverheden door dichte ramen).	WKK + inkoop vloeibaar (anders te veel onzuiverheden door dichte ramen; eigenlijk te duur).
<i>Backup bron</i>	?	Ketel (± 1 dag per jaar gebruikt)	Ketel
<i>Streefconcentratie CO₂</i>	800-1200 ppm	800-1000 ppm	1000-1200 ppm

<i>Verbruik CO₂</i>	± 60 ton per week / onbekend	± 32 ton per week	tot ± 60 ton per week
<i>Verbruik CO₂ / ha / dag</i>	± 1,3 ton per hectare per dag	± 2,0 ton per hectare per dag	Tot ± 1,4 ton per hectare per dag
<i>Kosten CO₂ per kg</i>	€0,080 (vloeibaar) / "0" (WKK)	€0,016 (OCAP) / "0" (WKK)	€0,097 (vloeibaar) / "0" (WKK)
<i>(9) % CO₂ kosten van totale kosten product</i>	4-5% (WKK: "0")	3-5% (is 10-15% van de winst)	± 3 % (is 20-30% van de winst)
<i>Huidige opslag CO₂</i>	Tank 33 ton vloeibaar CO ₂	Geen	Tank ± 12 ton vloeibaar CO ₂
<i>Aansluiting OCAP</i>	Over 2 jaar	Ja, sinds 4 jaar	Niet mogelijk (te ver weg)
CO₂ - streefwaarden			
<i>(7) Zuiverheid CO₂</i>	Minimaal zo zuiver als nu gezuiverd uit WKK	Minimaal zo zuiver als nu gezuiverd uit WKK	Minimaal zo zuiver als nu gezuiverd uit WKK
<i>(3a) Minimale schakelsnelheid CO₂</i>	Minuten	Maximaal een uur	10-15 minuten
<i>(1e) gewenste opslagduur</i>	Idealiter half jaar. 1 à enkele dagen voor weersfluctuaties ook al handig. En: halve dag in de zomer.	Idealiter half jaar. 1 à enkele dagen voor weersfluctuaties ook al handig	Idealiter half jaar. 2-3 weken opslag voor weersfluctuaties zou erg mooi zijn

WKK			
<i>Aantal WKKs</i>	2 stuks, samen ± 4 MW	1 à 1 MW	2 à 1,55 MW waarvan 1 met ureumreiniging
<i>Gasverbruik WKKs</i>	575 kuub per uur = 78 kuub per m ² per jaar	223 kuub per uur = 85 kuub per m ² per jaar	428 kuub per uur = 62 kuub per m ² per jaar.
<i>Gebruiksuren WKKs</i>	6700 per jaar	>6000 uur per jaar. Zomer 12-14 uur per dag, winter 24 uur per dag (en dan nog 1.2 MW bijkopen)	6000 uur per jaar.
<i>(II) Winst door elektriciteitsproductie?</i>	Een beetje, door eigen stroom, verkoop stroom, warmtegebruik, en gratis CO ₂ .	Kwartaal 2-3: neutraal inkoop / verkoop. Kwartaal 1 en 4: meer inkoop.	Elektriciteit wordt bijna volledig verkocht (alleen warmte wordt gebruikt). €3-7 / m ² winst, is zelfde orde grootte als productwinst.
Vervuilingen in CO₂			
<i>Concentratie etheen</i>	150 ppb (max)	OCAP: 0 / WKK: 200 ppb (max)	180 - 190 ppb
<i>Concentratie NO_x</i>	70 ppm	OCAP: 0 / WKK: Onbekend	5 ppm (???)
<i>Concentratie CO</i>	0	0	0
<i>Concentratie methaan</i>	Wordt niet gemeten	OCAP: 0 / WKK: wordt niet gemeten	Wordt niet gemeten
<i>(12) Emissiekosten</i>	Ja: NO _x , CO ₂ ; betalen per vermogen, dus zuiverder uitstoot reduceert kosten niet	Nee, zodanig klein dat we niet hoeven te betalen voor emissies	Geen idee hoeveel / welke emissies precies. Betalen er in ieder geval niet voor.

Klimaatbeheersings-systemen			
<i>(VIIa) Temperatuur</i>	WKK met warmtebuffer (tank), 6000 m ³ net onder maaiveld, aquifer. Ook koeling dmv sproeien op glas, 600 airco's (ook droger), ventilatie.	WKK met warmtebuffer (tank), ventilatie	2 WKK's met warmtebuffer, sproeisysteem op dak, ventilatie.
<i>(VIIb) Luchtvochtigheid</i>	600 airco's, ventilatie	Ventilatie	Ventilatie
<i>(VIIc) Gasreiniging</i>	Ureum (NO _x verwijdering)	Ureum (NO _x verwijdering)	Ureum (NO _x verwijdering)
Antwoorden op vragen			
<i>(3b) Minimale schakelsnelheid warmte</i>	Uren, want vrij constante vraag	Gaat via warmtebuffer, dus uren is prima.	Maakt niet uit, gaat immers via warmtebuffer
<i>(4,6) Leveringszekerheid, storingsgevoeligheid</i>	Van levensbelang! Meer dan paar dagen tekort / storting is een ramp; alles om dit te voorkomen	Bij 1 bron: heel belangrijk! Dus ofwel een back-up nodig (ketel), of zeer betrouwbaar. Een week buiten bedrijf (bij mooi weer) is dodelijk.	Belangrijk!! Een paar uur storting (c.q. geen voorraad) zou kunnen, een paar dagen is een probleem.
<i>(5) Rijpheid / betrouwbaarheid (bereidheid tot uitproberen)</i>	Tuinders zijn innovatief! Open voor vernieuwingen. Alles voor betere klimaatbeheersing uitproberen, afhankelijk van prijs en leveringszekerheid	Buffer CO ₂ zou interessant zijn, maar wij hebben OCAP + ketel, dus noodzaak is lager. Wel proberen bij voldoende lage prijs, of subsidie.	Heel interessant! Het moet echter wel werken (technisch, economisch). Leverancier moet garantie geven, anders huiverig, te veel slechte ervaringen.
<i>(I) Belangrijkste</i>	Leveringszekerheid /	Zuiverheid CO ₂ , leveringszekerheid /	Economische haalbaarheid,

<i>parameters?</i>	storingsgevoeligheid, prijs, zuiverheid CO ₂ .	storingsgevoeligheid, prijs	technische betrouwbaarheid
<i>(III) Open voor vervanging WKK door iets anders? (HOTCO₂)</i>	In principe wel; stroomproductie is niet zo belangrijk als voor groenteteelt (weinig stroom over, weinig toegevoegde waarde), maar wel veel haken en ogen	Als het economisch interessant is, dan wel; is onwaarschijnlijk, want stroomproductie is belangrijk.	Absoluut niet aan de orde. Elektriciteitsproductie is van levensbelang.
<i>(IV,V) Op de hoogte van huidige / nieuwe technieken?</i>	Redelijk op de hoogte via Lek / Habo, maar niks bekend wat geschikt is (hoeveelheid CO ₂)	Via Lek / Habo: een 'container met balletjes' voor CO ₂ absorptie	Systeem van Jaap Vink, houtketel waar zuiver CO ₂ uit komt. Adsorbentia (zilverbinding).
<i>(VI) Open voor handelen in CO₂ of emissierechten?</i>	Ja, in principe wel; altijd doen als er rendement mee te halen valt	In principe sta ik er open voor als het winstgevend is	Ja, prima.

Aanvullende / gerelateerde informatie:

Porta Nova

- Ventilatievoud varieert tussen 2-3 en 50 (aantal malen dat totale luchtvolume ververst wordt per uur).
- Meer verbruik CO₂ bij licht / dag.
- In de zomer is stroom relatief goedkoop, dus 's nachts belichten met netstroom, geen WKK aan. Overdag wel stroom nodig, wel WKK aan, dus CO₂ productie, meer dan verbruik. Dag-nacht opslag zou dus handig zijn. (in de winter is er niet zo'n dag-nacht ritme).
- In de winter (zeg eind oktober tot en met begin maart) is ruwweg 90% van het geproduceerde CO₂ over.
- In de zomer wordt zonnewarmte geoogst en in de aquifer opgeslagen tot gebruik in de winter. De geoogste warmte is een 4-voud van wat nodig is; er is dus geen extra verwarming nodig, wat 40 m³ gas per m² per jaar bespaart!
- Er is ± 500 hectare rozenkweek in Nederland, 400 bedrijven. Binnen een paar jaar zouden dat er best wel eens 200 kunnen zijn, door faillissementen en fusies, vanwege zwaardere omstandigheden.
- Er is wel eens onderzoek gedaan naar de luchtstroming in de kas, met name naar de menging van de CO₂ met de lucht en de stromingspatronen daarvan. De werkelijkheid kwam goed overeen met de computersimulaties.

Boonekamp Roses

- Ventilatievoud varieert tussen 2-3 en 50 (aantal malen dat totale luchtvolume ververst wordt per uur).
- Het hogere CO₂ verbruik per m² dan Porta Nova ligt aan andere omstandigheden, type kas, en soort / kwaliteitseisen rozen.
- WKK is hele jaar door wel even in gebruik. Zomer: 12-14 uur per dag, waarvan 8 uur per dag vrijwel volledig aan het net geleverd wordt (100 KW eigen, 900 KW verkoop). Winter: 24 uur per dag, 1 MW productie + 1,2 MW bijkopen. Als er te weinig warmtevraag is dan wordt 's nachts van het net af gelicht.
- Zomer: 10% kunstlicht; winter: tot 50% kunstlicht.
- De lichtintensiteit van het kunstlicht wordt beperkt door de hitteproductie van de lampen. Als die lager zou zijn, dan zou een evenredig hogere intensiteit worden gebruikt.
- Er gaat binnenkort een nieuwe, semi-gesloten kas bijkomen (à la Porta Nova's nieuwe kas), met sproeikoeling, airco's etc. Reden: minder open ramen betekent beter CO₂- en klimaatregeling. Er komt weer een ketel als back-up. Er komt geen rookgasreiniger voor de WKK, want de WKK zal minder draaien. Stroom wordt dan ingekocht.

van Ruijven Paprika

- Als meer dan 2 tankvullingen CO₂ per maand worden afgenomen, krijgt van Ruijven Paprika een boete.
- CO₂ voorziening is soms een groot probleem:
 - aanvoer vloeibaar CO₂ duurt vaak lang
 - WKK CO₂ is te onzuiver om exclusief te gebruiken bij te dichte ramen
 - er is geen gas voor de ketel → het gascontract sluit precies aan op 2 WKK.
- Extra reden om nieuwe technieken te proberen: zelfstandigheid / onafhankelijkheid van grote bedrijven (gas, netwerk etc). Valt niet mee te onderhandelen, slechte voorwaarden.
- Geen warmteopslag in de bodem, vanwege ongunstige locatie (bodem, transportsnelheid water).
- Project "Demarkas" in Rijswijk was een interessant demonstratieproject voor heteluchtverwarming.
- De laatste 4 jaar is het veel moeilijker geworden om te overleven, oa vanwege de gasprijs.

REFERENTIES

-
- ¹ www.cogenprojects.nl (CO₂ bemesting met rookgassen van W/K- gasmotoren)
- ² Handboek verwarming glastuinbouw, Nutsbedrijf Westland N.V., 1995.
- ³ <http://www.lei.dlo.nl/publicaties/PDF/2008/2008-019.pdf> (Bijlage B1)
- ⁴ Hierbij is vanzelfsprekend ook gebruik gemaakt van resultaten uit voorgaande studies, te weten:
- De Noord, G.J. "Vergelijking methoden rookgasreiniging Warmte-Kracht installaties voor CO₂-doserings", Centrum voor energiebesparing en schone technologie, Delft, 1991.
 - De Noord, G.J. "Deel 2: Beschrijving methoden rookgasreiniging Warmte-Kracht installaties voor CO₂-doserings", Centrum voor energiebesparing en schone technologie, Delft, 1991.
 - "De bestedingsruimte voor rookgasbehandeling in kassen, uitgerekend voor verschillende gewassen [concept]", Studies en Diensten de Melker B.V., Margraten, 1991.
 - "Rookgasbehandeling voor CO₂-bemesting bij warmte/kracht-koppeling in de glastuinbouw", Studies en Diensten de Melker B.V., Margraten, 1995.
- ⁵ <http://www.enecogen.nl/CO2.html>
- ⁶ EU FP6 Integrated Project "NanoGLOWA" (Nanomembranes against Global Warming). Zie ook www.nanoglowa.com.
- ⁷ Zie PT-project 13238, "HOT-CO₂, productie en buffering van CO₂ en warmte naar behoefte".
- ⁸ http://www.kesi.nl/cms/index.php?option=com_content&view=article&id=6&Itemid=9
- ⁹ http://www.tno.nl/images/shared/overtno/magazine/ient_4_2008_10_11.pdf
- ¹⁰ http://www.co2captureproject.org/pdfs/3_basic_methods_gas_separation.pdf
- ¹¹ http://www.seed.slb.com/en/scictr/watch/climate_change/sleipner.htm
- ¹² <http://www.bellona.org/factsheets/1191928198.67>
- ¹³ http://www.netl.doe.gov/technologies/carbon_seq/core_rd/storage.html
- ¹⁴ http://en.wikipedia.org/wiki/Lake_Monoun
- ¹⁵ http://en.wikipedia.org/wiki/Lake_Nyos
- ¹⁶ http://www.wdr.de/themen/panorama/unfall07/moenchengladbach_chemieunfall/index.jhtml
- ¹⁷ <http://www.allcryo.com/infopgs/install/install.html>
- ¹⁸ EU FP6 Integrated Project "EnCap" (Enhanced Capture of CO₂). Zie ook <http://www.encapco2.org/>