

**TNO-rapport**

**OG-RPT-DTS-2010-00116**

**HotCO2 voor ontkoppelde warmte en CO2 in de  
glastuinbouw**

Datum	15 januari 2010
Auteur(s)	Ir P. Geerdink
Opdrachtgever	Productschap Tuinbouw, Ministerie van LNV in het kader van het programma Kas als Energiebron. Productschap Tuinbouw Postbus 280 2700 AG ZOETERMEER
Projectnummer	033.21306

Alle rechten voorbehouden. Niets uit dit rapport mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor onderzoeksopdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2010 TNO



landbouw, natuur en  
voedselkwaliteit



## Samenvatting

Bij het HotCO<sub>2</sub> proces is het verbrandingsproces opgesplitst in twee stappen, één waarbij CO<sub>2</sub> wordt gevormd en één waarbij enkel warmte vrijkomt. Door deze ontkoppelde warmte en CO<sub>2</sub> productie kan efficiënt gebruik gemaakt worden van zowel warmte als CO<sub>2</sub> op het moment dat dat nodig is. In de glastuinbouw is dit een groot voordeel omdat de warmte en CO<sub>2</sub> vraag daar niet tegelijk en in variërende verhoudingen optreedt.

Op basis van de berekeningen en aannamen in deze studie levert het HotCO<sub>2</sub> concept, in vergelijking met traditionele WKK installaties, de volgende voordelen op:

- met HotCO<sub>2</sub> kunnen warmte en CO<sub>2</sub> worden ontkoppeld en is jaarlijks een kostenbesparing mogelijk;
- emissies van NO<sub>x</sub> en koolwaterstoffen blijven uit wanneer HotCO<sub>2</sub> wordt gebruikt;
- biogas is toepasbaar in het HotCO<sub>2</sub> proces;
- in deze studie is uitgegaan van een zoveel mogelijk gesloten kas van vijf hectare tomaten.

De HotCO<sub>2</sub> installatie is ook geschikt voor biogas. Het tegenwoordig beschikbare biogas kan tot een hoog niveau ontzwaveld worden, waardoor dit geen substantiële belemmering vormt voor de HotCO<sub>2</sub> installatie. De lagere verbrandingswaarde van het gas door het hogere CO<sub>2</sub> gehalte en de hogere Wobbe-index hebben geen invloed op de uitvoering van het HotCO<sub>2</sub> proces. Bij de huidige gasprijs of een toenemende gasprijs is HotCO<sub>2</sub> een economisch interessante technologie. HotCO<sub>2</sub> zorgt voor een ont koppeling van warmte en CO<sub>2</sub> productie en zal de tuinder meer flexibiliteit geven om pieken in het gasverbruik te beperken, het jaarlijkse gasverbruik te verlagen en zijn kas te voorzien van zuivere CO<sub>2</sub>.

## Inhoudsopgave

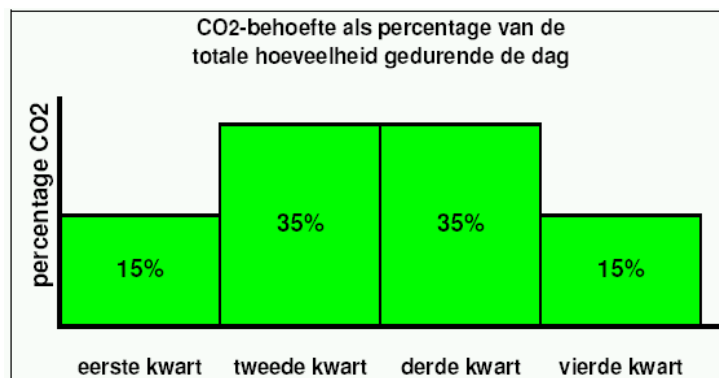
<b>1</b>	<b>Probleemstelling .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>CO<sub>2</sub> bronnen in de glastuinbouw .....</b>	<b>7</b>
2.1	CO <sub>2</sub> uit de buitenlucht .....	7
2.2	Vloeibare CO <sub>2</sub> .....	7
2.3	OACAP CO <sub>2</sub> .....	8
2.4	CO <sub>2</sub> van standaard ketel .....	8
2.5	CO <sub>2</sub> bij Warmte-kracht koppeling (WKK) .....	9
<b>3</b>	<b>Ontkoppelde warmte en CO<sub>2</sub> productie met HotCO<sub>2</sub> .....</b>	<b>10</b>
3.1	Voordeel ontkoppelde energieproductie.....	10
3.2	Het ontkoppelde verbrandingsproces .....	10
3.3	Designaspecten HotCO <sub>2</sub> voor toepassing in de kas .....	11
<b>4</b>	<b>Economisch- en milieu perspectief HotCO<sub>2</sub> .....</b>	<b>21</b>
4.1	Kostenopbouw van de HotCO <sub>2</sub> installatie .....	21
4.2	Kosten HotCO <sub>2</sub> installatie bij verschillende groottes .....	22
4.3	Milieubelasting van WKK en HotCO <sub>2</sub> .....	26
4.4	Aannamen bij de berekeningen .....	29
<b>5</b>	<b>Koppeling HotCO<sub>2</sub> met biogas.....</b>	<b>30</b>
5.1	HotCO <sub>2</sub> en biogas .....	30
<b>6</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen .....</b>	<b>32</b>
	<b>Dankwoord.....</b>	<b>33</b>
	<b>Ondertekening .....</b>	<b>34</b>
	<b>Referenties.....</b>	<b>35</b>

# 1 Probleemstelling

De glastuinbouw is in Nederland een grootverbruiker van aardgas. Aardgas wordt door de tuinders op drie manieren ingezet, namelijk voor de productie van warmte, de productie van elektriciteit en de productie van CO<sub>2</sub>. Warmte wordt gebruikt om de kas op de juiste temperatuur te houden. CO<sub>2</sub> wordt gebruikt om in de uren dat het licht is in de kas de groei van de planten te versnellen. Elektriciteit wordt gebruikt voor assimilatieverlichting of wordt verkocht. Met een verhoogde CO<sub>2</sub> concentratie in de kas kan de productie van de teelt toenemen tot ongeveer 140% ten opzichte van de standaard CO<sub>2</sub> concentratie<sup>i</sup>.

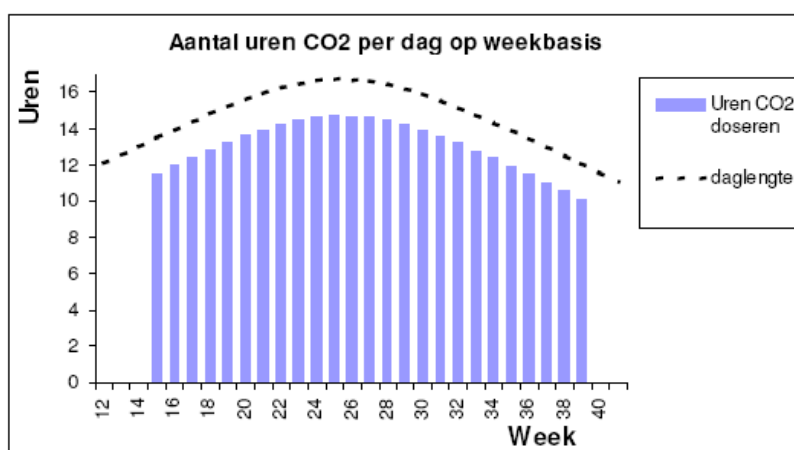
In de tuinbouw bestaat de wens om CO<sub>2</sub> en warmte onafhankelijk van elkaar te kunnen produceren omdat de warmte en CO<sub>2</sub> vraag niet op elkaar aansluiten. Zo is er overdag behoefte aan CO<sub>2</sub>, terwijl 's nachts warmte nodig is. Met warmtebuffers kunnen dag/nacht verschillen worden opgevangen, maar hierbij treden verliezen op. Daarnaast is het met een bovengrondse buffer niet economisch rendabel om maandinvloeden, laat staan seizoensinvloeden op te vangen. Met aquifers is dat vaak ook niet rendabel tenzij teelten worden gekoeld.

In Figuur 1 is de CO<sub>2</sub> behoefte gedurende de dag weergegeven als percentage van de totaal benodigde hoeveelheid CO<sub>2</sub> bij een lichtvolgende strategie<sup>ii</sup>. Wanneer er 's morgens minder licht is, zal het gewas minder CO<sub>2</sub> opnemen en is daarom ook minder dosering van CO<sub>2</sub> nodig. Op het midden van de dag zal er meer CO<sub>2</sub> worden opgenomen en wordt de dosering opgeschroefd om een constant niveau in de kas te kunnen handhaven van boven de 1000 ppm (parts per million) CO<sub>2</sub>. Ter vergelijking; buitenlucht bevat gemiddeld 360 ppm CO<sub>2</sub>. Wanneer de zon in de avond aan kracht verliest kan weer worden volstaan met een lagere dosering CO<sub>2</sub>, omdat de opname van CO<sub>2</sub> door het gewas weer afneemt. De vraag naar CO<sub>2</sub> en daarmee de dosering van CO<sub>2</sub> in de kas gedurende de dag is daardoor niet constant.



Figuur 1 Globale schematische weergave van de verdeling van de aangenomen CO<sub>2</sub> vraag gedurende een dag bij een lichtvolgende strategie toegepast door veel tuinders<sup>ii</sup>

Er is ook een seizoensinvloed van toepassing op de CO<sub>2</sub> behoefte. Het aantal uren dat er aanvullend CO<sub>2</sub> gedoseerd moet worden ten opzichte van de daglengte is weergegeven in Figuur 2. Om het CO<sub>2</sub> niveau van 1000 ppm in de kas te handhaven is het in de zomer (~week 26), wanneer het gewas meer CO<sub>2</sub> opneemt, noodzakelijk om meer CO<sub>2</sub> te doseren dan in de minder warme en zonnige wintermaanden (~week 40). Hierdoor ontstaat een maximumvraag naar CO<sub>2</sub> in de zomer en een minimumvraag naar CO<sub>2</sub> in de winter.



Figuur 2 Schematische weergave van het aantal uren dat er aanvullend CO<sub>2</sub> kan worden gedoseerd ten opzichte van de daglengte. Aanname: doseren 1 uur na zonsopgang tot 1 uur voor zonsondergang en een teelt die aanvullend CO<sub>2</sub> dosering nodig heeft vanaf week 15 door een geringe warmtevraag<sup>ii</sup>. De figuur beslaat de (energie) intensieve gewassen die bij veel licht geteeld worden.

Naar verwachting zal een gemiddelde tuinder tussen week 15 en week 20 beginnen met het aanvullend CO<sub>2</sub> doseren in de kas<sup>ii</sup>. Later dan week 15 beginnen met CO<sub>2</sub> aanvullend doseren zal voornamelijk plaatsvinden bij een teelt met een grote warmtevraag. Dit komt omdat het CO<sub>2</sub>-niveau in de kas al hoger zal liggen bij teelten met een vraag naar veel warmte vergeleken met teelten die geen grote warmtevraag hebben.

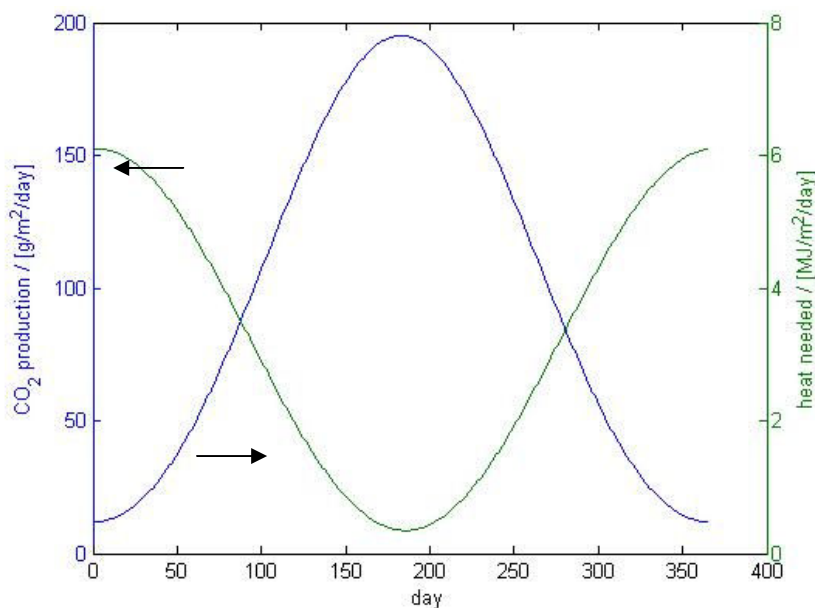
Naast de CO<sub>2</sub> vraag is de warmtevraag van belang voor het doorrekenen van het HotCO<sub>2</sub> concept. Bij het HotCO<sub>2</sub> proces wordt het verbrandingsproces in twee stappen opgedeeld, één waarbij CO<sub>2</sub> wordt gevormd en één waarbij enkel warmte vrijkomt. Op deze manier kan beter ingesprongen worden op de variabele vraag naar warmte en CO<sub>2</sub> in de kas. Door het seizoen heen is de warmtevraag variabel met een piek in warmtevraag in de winter en een minimum aan warmtevraag in de zomer. Daar tegenover staat dat de piek van CO<sub>2</sub> behoefte van het gewas juist in de zomer ligt en de CO<sub>2</sub> behoefte heeft een minimum in de. Hierdoor wordt in de tuinbouw in de zomer een overmaat aan warmte geproduceerd en in de winter een overmaat aan CO<sub>2</sub> wat in totaliteit leidt tot verliezen.

In Figuur 3 is de warmtebehoefte en de CO<sub>2</sub> behoefte van een tomatenkwekerij weergegeven, waarin de piekvraag naar warmte en CO<sub>2</sub> respectievelijk in de winter en de zomer zichtbaar is<sup>iii</sup>. Het HotCO<sub>2</sub> principe draagt eraan bij deze verschillen op te vangen in een buffer en zal op deze wijze het gasverbruik reduceren. De grootte van de buffer is hierbij bepalend voor de tijdsperiode die kan worden overbrugd. Het is daarom van belang de grootte van de buffer goed af te stemmen op de behoeften (productie) naar warmte en CO<sub>2</sub> van de betreffende tuinder.

Om in de energiebehoefte (warmte, CO<sub>2</sub> en/of elektriciteit) te voorzien wordt er in de tuinbouw gewerkt met verschillende systemen. Deze zijn:

- warmte-kracht koppeling (WKK);
- standaard ketel;
- warmte buffer;
- vloeibare CO<sub>2</sub>;
- externe CO<sub>2</sub> aanlevering door middel van een pijpleiding (OCAP).

Afhankelijk van de situatie bij de tuinder, zal een combinatie van de energiesystemen toegepast worden.



Figuur 3 Schematische weergave van de CO<sub>2</sub>- en warmtebehoefte per dag in het jaar, beginnend op 1 januari en eindigende op 31 december (365<sup>ste</sup> dag van het jaar)

Energie opweksystemen gebaseerd op de verbranding van fossiele brandstof hebben een drietal nadelen. Het eerste wordt veroorzaakt door de gekoppelde productie van warmte en CO<sub>2</sub>. Bij gekoppelde warmte en CO<sub>2</sub> productie (zoals bij alle huidige verbrandingsprocessen) zal het aardgasverbruik afhankelijk zijn van de vraag naar warmte of CO<sub>2</sub>. Piekverbruik van warmte of CO<sub>2</sub> zal in beide gevallen leiden tot een piekvraag naar aardgas. Dit leidt tot hoge kosten, omdat deze pieken soms extra belast worden door de gasleverancier. Het “piekscheren” (afvlakken van de piekvragen) kan een aanzienlijke kostenbesparing opleveren, wanneer een tuinder over de flexibiliteit beschikt om warmte en CO<sub>2</sub> op een ontkoppelde wijze te produceren. Ten tweede wordt bij gekoppelde productie het niet direct inzetbare CO<sub>2</sub> uitgestoten. Op dit moment zijn hier nog geen kosten aan verbonden, maar verwacht wordt dat dat in de toekomst gaat veranderen. Wanneer een tuinder emissierechten moet gaan betalen zal het zeer belangrijk worden om CO<sub>2</sub> uitstoot te minimaliseren. Sinds 2004 zijn er ontwikkelingen gaande binnen TNO om CO<sub>2</sub> te bufferen. Meer informatie hierover is te vinden op de internetsite van het Productschap Tuinbouw (project 11558: ‘Haalbaarheid CO<sub>2</sub> buffering’). Ten derde bestaat bij tuinders de wens om in de nabije toekomst (gedeeltelijk) met biogas te werken. Wanneer een ketel of WKK in combinatie met biogas zal worden gebruikt, dient naast aanpassingen aan de installatie, het biogas van een zekere kwaliteit te zijn om het te kunnen toepassen in de kas, welke weer eisen stelt aan de biogas-installatie.

In Hoofdstuk 2 zullen de verschillende bronnen voor CO<sub>2</sub> die in de glastuinbouw toegepast kunnen worden, worden beschreven. Hierbij wordt uitgegaan van de al bestaande methoden om CO<sub>2</sub> in een kas te krijgen. In Hoofdstuk 3 zal een nieuwe methode om CO<sub>2</sub> in de kas te doseren worden beschreven, genaamd HotCO<sub>2</sub>. Hoofdstuk 4 beschrijft het economisch en milieu perspectief van HotCO<sub>2</sub> op basis van aannamen. Hoofdstuk 5 beschrijft HotCO<sub>2</sub> in combinatie met biogas. Tenslotte worden de conclusies van deze haalbaarheidsstudie weergegeven in Hoofdstuk 6.

## 2 CO<sub>2</sub> bronnen in de glastuinbouw

De CO<sub>2</sub> concentratie in de kas is een belangrijk factor voor de ontwikkeling van het gewas. Door het kunstmatig verhogen van de concentratie in het kasklimaat kan de groei van gewassen worden bevorderd en daarmee ook de opbrengst. Er bestaan verschillende methoden om het CO<sub>2</sub> gehalte van de lucht in een kas op het gewenste niveau te houden. Ze verschillen van elkaar in prijs, kwaliteit, haalbaar CO<sub>2</sub>-niveau en leveringszekerheid. CO<sub>2</sub> dosering is zeer belangrijk voor de tuinbouwsector, omdat het de groei van de planten versnelt.

### 2.1 CO<sub>2</sub> uit de buitenlucht

Een methode om CO<sub>2</sub> in de kas te krijgen is door diffusie van CO<sub>2</sub> te laten plaatsvinden uit de buitenlucht naar de lucht in de kas. Buitenlucht bevat gemiddeld 360 ppm CO<sub>2</sub>. Dosereren van CO<sub>2</sub> in de kas vanuit de buitenlucht wordt gedaan door de luchtramen van de kas open te zetten. Als er in een gesloten kas overdag geen CO<sub>2</sub> wordt gedoseerd, dan zal door opname van de planten, de CO<sub>2</sub>-concentratie in de kas snel onder die van de buitenlucht zakken. Door de ramen open te zetten zal met behulp van ventilatie CO<sub>2</sub> van buiten naar binnen treden. Op deze wijze kan zeer goedkoop aan de CO<sub>2</sub> worden gekomen. Het is echter niet de meest optimale manier van doseren, omdat de concentratie in de kas altijd wat lager zal zijn dan buiten de kas, ongeacht de ventilatievoud, omdat de planten in de kas CO<sub>2</sub> consumeren. Op een dag met veel zon en de ramen volledig open is een CO<sub>2</sub>-concentratie van ongeveer 300 ppm in de kas een gebruikelijke waarde. Dit lagere CO<sub>2</sub> niveau ten opzichte van de streefwaarde voor de gewassen van 1000 ppm leidt tot een flink lagere productie. Daarnaast zal door de hoge ventilatievoud veel warmte verloren gaan.

### 2.2 Vloeibare CO<sub>2</sub>

Een andere methode om CO<sub>2</sub> in de kas te doseren dan door gebruik te maken van de buitenlucht, is opslag van (vloeibare) CO<sub>2</sub> in opslagtanks (Figuur 4). Het grote voordeel van vloeibare CO<sub>2</sub> is dat het niet is gekoppeld aan een warmtebron. Daarnaast bevat vloeibare CO<sub>2</sub> geen verontreinigingen. Voor de dosering kan gebruik worden gemaakt van het bestaande doseernetwerk voor rookgas-CO<sub>2</sub> of van een doseersysteem van dunne slangen. Bij het doseren van 100% CO<sub>2</sub> wordt een kleine volumestroom gebruikt om de gewenste CO<sub>2</sub> concentratie te bereiken. Dit in tegenstelling tot CO<sub>2</sub> uit rookgas, waarbij grotere volumes nodig zijn, omdat rookgas ongeveer 10% CO<sub>2</sub> bevat.

Enkele nadelen zijn de (hoge) prijs en beschikbaarheid. Doordat de CO<sub>2</sub> tank een beperkt volume heeft, dient de vraag in de kas en de levering van CO<sub>2</sub> nauw op elkaar afgestemd te worden.



Figuur 4  
Vloeibare CO<sub>2</sub>  
opslag

### 2.3 OCAP CO<sub>2</sub>

Een alternatief voor vloeibare CO<sub>2</sub> is het gebruik van CO<sub>2</sub> uit de OCAP leiding. Deze CO<sub>2</sub> is eveneens zuiver, maar wordt geleverd via een drukleiding en is afkomstig van een waterstoffabriek van Shell in Pernis. De hoofdleiding is een oude olieleiding van de Rotterdamse haven naar een raffinaderij in Amsterdam, welke niet meer bestaat. Tuinders in de buurt van deze hoofdleiding kunnen door middel van kleinere distributieleidingen worden aangesloten op de OCAP leiding. De kosten van CO<sub>2</sub> afkomstig uit de OCAP leiding zijn aanzienlijk lager dan die van vloeibare CO<sub>2</sub>, maar de beschikbaarheid hiervan is regiogebonden. (Figuur 5<sup>1</sup>) Tuinders die te ver van deze pijpleiding gelokaliseerd zijn, kunnen niet worden aangesloten op de OCAP leiding. Het aanleggen van een nieuwe hoofdleiding is op dit moment te duur. Daarnaast is een tuinder hierbij afhankelijk voor de levering van zijn CO<sub>2</sub> van derden. Uitval van de fabriek op Pernis of problemen in het distributienetwerk, kan de aanlevering van CO<sub>2</sub> belemmeren.

### 2.4 CO<sub>2</sub> van standaard ketel

De standaard ketel produceert overdag CO<sub>2</sub> en warm water. Dit warme water kan worden opgeslagen in een warmtebuffer en 's nachts gebruikt worden om de kas warm te houden. Dit systeem is niet erg efficiënt, omdat er warmteverliezen optreden door afkoeling van de buffer en geen elektriciteit wordt geproduceerd zoals met een WKK. Echter de CO<sub>2</sub> afkomstig van een ketel is schoner dan de CO<sub>2</sub> afkomstig van een WKK.

Wanneer een ketel goed is afgesteld, zal de brandstof volledig worden verbrand bij een niet al te hoge temperatuur. Dit is zeer belangrijk, omdat bij onvolledige verbranding koolmonoxide (CO) en etheen (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) kunnen ontstaan. CO is zeer giftig en etheen is een hormoon dat de rijping van planten bevordert. Bij een te hoge temperatuur ontstaan NO<sub>x</sub> welke eveneens giftig zijn en de groei van planten al in lage concentraties merkbaar remmen. Naast een volledige verbranding is het van belang dat de brandstoffen die de ketel in gaan zuiver zijn, zoals het gebruikte aardgas aangezien de vervuilingen uit de brandstof rechtstreeks in het rookgas van de ketel terechtkomt.

Uitgaande van aardgas als de brandstof voor een ketel, komt bij de verbranding van aardgas per m<sup>3</sup> gas (Gronings gas) circa 1,8 kg CO<sub>2</sub> vrij. De concentratie CO<sub>2</sub> in de rookgassen van een ketel hangt af van de luchtvermaat waarmee de brandstof in de ketel verbrandt wordt, maar ligt gemiddeld rond de 9%. Door de lage concentratie moet een aanzienlijke hoeveelheid rookgas de kas ingeblazen worden om het CO<sub>2</sub> niveau van de kas op peil te houden. Doordat de leidingen meestal van PVC gemaakt zijn (Figuur 7), waarmee het rookgas in de kas wordt gedistribueerd, is het van belang om de temperatuur van het rookgas beneden de



Figuur 6 Voorbeeld van een ketel



Figuur 7 CO<sub>2</sub> doseer slang

<sup>1</sup> [http://www.ocap.nl/img/overzichtkaart\\_e.gif](http://www.ocap.nl/img/overzichtkaart_e.gif)



60°C te houden, omdat het PVC anders smelt. Dit is mogelijk door het rookgas nog verder te verdunnen met buitenlucht of gebruik te maken van een optimaal werkende rookgascondensor.

De ketel produceert naast CO<sub>2</sub> ook warmte. Deze warmte kan direct worden ingezet om de kas te verwarmen of worden opgeslagen in een warmtebuffer in de vorm van warm water. Het warme water kan dan op een later tijdstip worden ingezet wanneer de temperatuur in de kas gedaald is. Momenteel worden bovengrondse warmte-buffers of warmtebuffers net onder de kas het meest toegepast. Door afkoeling van het warme water treden verliezen op.

## 2.5 CO<sub>2</sub> bij Warmte-kracht koppeling (WKK)

Een WKK is een gasmotor die werkt op aardgas en daarmee elektriciteit produceert. (Figuur 8) Naast elektrisch vermogen levert dit apparaat CO<sub>2</sub> en warmte. Dit apparaat draait overdag zodat stroom tegen een goede prijs aan het net kan worden geleverd en 's nachts produceert dit apparaat stroom die 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) die 's nachts wordt gebruikt om de kas te verwarmen. Dit systeem is efficiënt, omdat zowel warmte als CO<sub>2</sub> als elektriciteit kan worden gebruikt, maar toch zijn er beperkingen. De kwaliteit van de CO<sub>2</sub> uit WKK's staat ter discussie.



Figuur 8 WKK

Door onder andere de vrijkomende NO<sub>x</sub> en C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> (etheen) is het noodzakelijk om het rookgas te reinigen om te voorkomen dat er negatieve effecten optreden bij de planten. Daarnaast slijt methaan en daardoor ook etheen, door de verbrandingskamers van de WKK. Dit betekent dat er een extra apparaat moet worden aangeschaft, wat naast extra kosten ook leidt tot extra storingsgevoeligheid van de installatie. Rookgasreinigers op basis van ureum kunnen etheen deels verwijderen uit het rookgas, maar methaan niet.

In de nabije toekomst zal het gebruik van CO<sub>2</sub> in de kas verder bemoeilijkt worden door strengere regelgeving (BEES-B-wetgeving<sup>iv</sup>). Een ander nadeel van de WKK installatie is dat het apparaat maar op één snelheid optimaal kan draaien, terwijl de vraag naar CO<sub>2</sub>, warmte en elektriciteit sterk varieert.<sup>v</sup>

Een voordeel van de WKK ten opzichte van een ketel is het feit dat er minder warmte vrijkomt bij de productie van CO<sub>2</sub>. Doordat er ongeveer 40-45% van de geproduceerde warmte omgezet wordt tot elektriciteit, blijft er minder restwarmte over. Het produceren van warmte met een WKK is alleen interessant wanneer er ook elektriciteit nodig is of elektriciteit rendabel aan het net terug geleverd kan worden. In het recente verleden hebben tuinders WKK's aangekocht met subsidie. Deze subsidie is vervallen. Hierdoor veranderen de investeringskosten van een WKK, waardoor de tuinder opnieuw afwegingen zal moeten maken.

## 3 Ontkoppelde warmte en CO<sub>2</sub> productie met HotCO<sub>2</sub>

### 3.1 Voordeel ontkoppelde energieproductie

HotCO<sub>2</sub> betreft een nieuw soort tuinbouwketel waarbij zowel warmte als CO<sub>2</sub> ontkoppeld worden geproduceerd op basis van een verbrandingstechnologie. Gezien de potentie van het HotCO<sub>2</sub> proces, is het HotCO<sub>2</sub> concept in 2005 door TNO gepatenteerd. De inzet van HotCO<sub>2</sub> biedt de volgende potentiële voordelen:

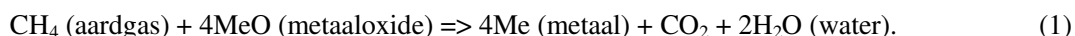
- ontkoppeling van warmte en CO<sub>2</sub> productie;
- geproduceerde CO<sub>2</sub> is zuiver en kan direct in de kas worden gedoseerd;
- elk reducerend gas kan worden ingezet (aardgas, biogas, synthese gas, etc.).

Ontkoppeling van warmte en CO<sub>2</sub> productie levert een grote mate van flexibiliteit op. Wanneer warmte nodig is kan dit worden geproduceerd zonder CO<sub>2</sub> te produceren en vice versa. De geproduceerde CO<sub>2</sub> is direct bruikbaar in de kas, zonder dat zuivering van de geproduceerde CO<sub>2</sub> noodzakelijk is. Dit komt omdat de verbrandingstemperatuur te laag is voor de vorming van NO<sub>x</sub>. Daarnaast verloopt het verbrandingsproces traag, waardoor het proces goed gecontroleerd kan worden en onvolledige verbranding (en daarmee de vorming van CO en etheen) wordt voorkomen. Het gebruik van andere gassen, mits reducerend gas (biogas, waterstof, synthese gas, etc.), behoort tot de mogelijkheden. Met reducerend gas wordt bedoeld een gas dat in staat is elektronen te doneren aan het overgangsmetaal, waardoor dit metaal in een gereduceerde toestand komt en het metaal hierbij één of meer zuurstof atomen afstaat. Hieronder vallen onder andere CO<sub>2</sub> rijke gassen als biogas en vergistinggas maar ook synthese gas en aardgas met een hoog CO<sub>2</sub> gehalte.

Bij dag/nacht cycli kunnen verschillen in warmte en CO<sub>2</sub> vraag worden opgevangen met de HotCO<sub>2</sub> ketel. Daarnaast kan HotCO<sub>2</sub> het gasverbruik verlagen door het overbruggen van koude periodes waarbij voornamelijk warmte nodig is en warme periodes waar voornamelijk CO<sub>2</sub> nodig is. De reden van deze besparing zal verderop in dit hoofdstuk uitgelegd worden. Het inzetten van HotCO<sub>2</sub> zal op jaarbasis een besparing van het gasverbruik kunnen opleveren van 10% of meer.<sup>vi</sup>

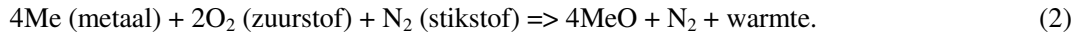
### 3.2 Het ontkoppelde verbrandingsproces

Het HotCO<sub>2</sub> proces is gebaseerd op een techniek genaamd “Chemical Looping Combustion” (CLC). Het is een manier om brandstof te verbranden in 2 stappen. Hierbij wordt een vast materiaal (metaal) gebruikt als een intermediaat tussen de 2 stappen. De eerste stap bestaat uit het reduceren van metaaloxide, de reductiereactie:

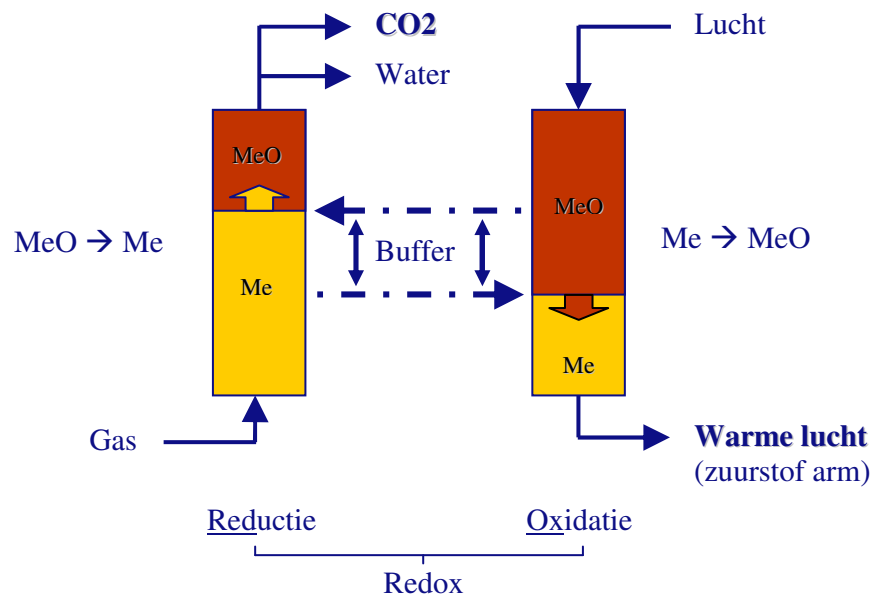


Het gebruikte metaal is een zogenaamd overgangsmetaal. Dit is een metaal wat relatief eenvoudig van oxidatietoestand kan wijzigen. Voorbeelden zijn NiO/Ni, MoO<sub>4</sub>/MoO<sub>2</sub> en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Deze uitgaande gasstroom kan eenvoudig door condensatie van water worden ontdaan, zodat zuivere CO<sub>2</sub> beschikbaar komt.

Stap 2 van het proces bestaat uit het oxideren (verbranden) van het metaal, zie vergelijking 2. Hierbij wordt metaaloxide gevormd, waardoor het materiaal weer gebruikt kan worden voor Stap 1, de reductie van het metaal. Tijdens het verbranden wordt lucht, wat in feite een mengsel is van stikstof en zuurstof, langs het metaal geleid. Zuurstof uit de lucht reageert met het metaal, terwijl stikstof, dat inert is niet reageert met het metaal en daardoor vrij door het metaalbed kan bewegen. De oxidatiereactie is als volgt:



Tijdens de oxidatiereactie komt warmte vrij. In Figuur 9 is het HotCO<sub>2</sub> proces schematisch weergegeven ter verduidelijking van het concept.



Figuur 9 Schematische weergave van het HotCO<sub>2</sub> proces

Het HotCO<sub>2</sub> proces is ideaal voor energieproductie waarbij geen CO<sub>2</sub> wordt uitgestoten. Immers, de stap waarbij CO<sub>2</sub> wordt geproduceerd levert geen warmte, terwijl de stap die warmte levert (vergelijking 2) geen CO<sub>2</sub> productie kent. Reiniging van de vrijkomende gassen is niet meer nodig en kan direct ingezet worden. Hierdoor wordt de bij reiniging van het gas behorende efficiency penalty voorkomen.

### 3.3 Designaspecten HotCO<sub>2</sub> voor toepassing in de kas

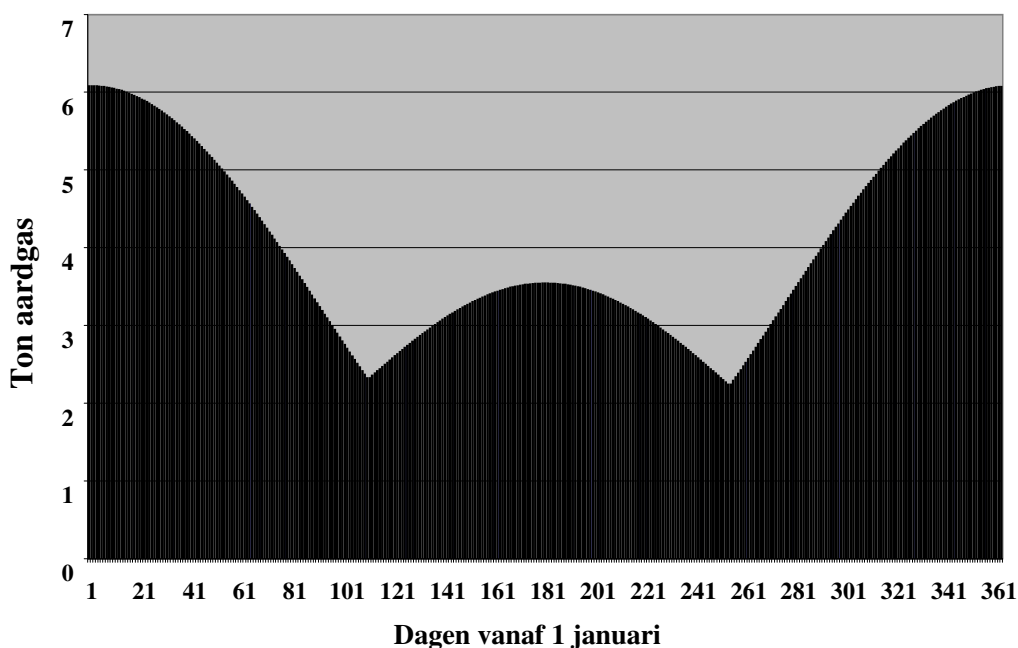
#### 3.3.1 Energie-invulling in kas met HotCO<sub>2</sub>

In Figuur 10 is weergegeven hoe de vraag naar aardgas voor de WKK is verdeeld gedurende één jaar. In de zomermaanden (rond dag 181) is de (piek)gasvraag voornamelijk gebaseerd op de benodigde CO<sub>2</sub>, terwijl in de winter (rond dag 1/dag 361) dit voornamelijk wordt veroorzaakt door de verwarming van de kas.<sup>iii</sup>

De kracht van het HotCO<sub>2</sub> principe is gelegen in de ontkoppelde warmte en CO<sub>2</sub> productie. Dit houdt in dat afhankelijk van de grootte van het bed een bepaalde hoeveelheid warmte geleverd kan worden, zonder dat er CO<sub>2</sub> vrijkomt en omgekeerd. Bij een bedgrootte van 80 m<sup>3</sup> kan er (bij gemiddeld verbruik) 21 dagen CO<sub>2</sub> worden geleverd aan de kas zonder warmte te produceren.

In andere woorden: een bed van 80 m<sup>3</sup> kan ongeveer 21 dagen CO<sub>2</sub> produceren voordat deze volledig is gereduceerd. Omgekeerd kan het bed 7 dagen warmte leveren aan de kas, voordat het bed volledig geoxideerd is.

Met de omvang van het bed zoals hier besproken, kan een voldoende lange periode van vraag naar alleen warmte of alleen CO<sub>2</sub> overbrugd worden. Hiermee kan de uit het aardgas vrijkomende warmte en CO<sub>2</sub> optimaal worden ingezet. Afhankelijk van specifieke condities in de kas en de gewenste overbruggingsperiode waarbij alleen CO<sub>2</sub> of warmte wordt geleverd dient de omvang van het bed bepaald te worden. Dit betekent: indien 3 weken alleen CO<sub>2</sub> produceren zonder warmte verbruik niet voor komt bij de tuinder, wordt de HotCO<sub>2</sub> installatie kleiner.



Figuur 10 Gasverbruik van een kas van 50.000 m<sup>2</sup> groot gedurende 1 jaar<sup>iii</sup>

### 3.3.2 Systeem Configuratie

Het gecontroleerde proces waarbij de verbranding in een HotCO<sub>2</sub> installatie plaatsvindt in combinatie met de lage temperatuur maakt het mogelijk om zeer zuivere CO<sub>2</sub> te produceren zonder dat daarbij ongewenste producten als koolmonoxide, etheen en stikstofoxiden worden geproduceerd. Dit maakt het mogelijk om CO<sub>2</sub> te doseren in een meer gesloten kas. Dit is een groot voordeel vergeleken met het doseren van rookgas van bijvoorbeeld een WKK waarbij een hoge ventilatievoud in de kas aangehouden dient te worden.

HotCO<sub>2</sub> is een modulair ontwerp, waardoor opschaling zeer eenvoudig te realiseren is. Door dit modulaire ontwerp kunnen verschillende kanalen aan en uit worden geschakeld, waardoor de hoeveelheid gedoseerde CO<sub>2</sub> gemakkelijk en direct kan worden geregeld. Naast CO<sub>2</sub> kan het systeem warmte produceren. Hierbij geldt, net als bij de productie van CO<sub>2</sub>, dat het modulaire ontwerp de vrijheid geeft om de hoeveelheid geproduceerde warmte te verhogen of te verlagen. Daarnaast kan ook tegelijkertijd warmte en CO<sub>2</sub> worden geproduceerd. De grote flexibiliteit van het systeem vereist een goed geïntegreerd meet- en regelsysteem om de kaslucht zo optimaal mogelijk te voorzien van CO<sub>2</sub> en warmte.

Temperaturen van de uitgaande gassen uit de HotCO<sub>2</sub> installatie verschillen van elkaar. Wanneer CO<sub>2</sub> wordt geproduceerd, zijn de uitgaande gasstromen van kamertemperatuur. Wanneer warmte wordt geproduceerd is de temperatuur van de uitgaande gasstroom ongeveer 800 °C. Deze warmte kan direct worden ingezet als luchtverwarming waarbij de verwarmde lucht uit de HotCO<sub>2</sub> installatie zal moeten worden vermengd met kaslucht om zo de temperatuur van de gasstroom op een acceptabel niveau te brengen. Een tweede optie met betrekking tot het verwarmingssysteem is de lucht te gebruiken om een gesloten verwarmingssysteem met bijvoorbeeld water te verwarmen.

Door het modulaire ontwerp van de HotCO<sub>2</sub> installatie kan dit apparaat eenvoudig worden aangepast aan de grootte van de kas. Wanneer een tuinder uitbreiding wenst van de kas kunnen extra modules eenvoudig worden aangesloten. Hierdoor kan de installatie gemakkelijk meegroeien met de kas en CO<sub>2</sub> precies op maat worden geproduceerd.

### 3.3.3 *Materiaalkeuzen voor het metaalbed*

De buffercapaciteit met betrekking tot CO<sub>2</sub> en warmte in het HotCO<sub>2</sub> proces zijn afhankelijk van de materiaalkeuze en de hoeveelheid aanwezig materiaal. Er bestaan verschillende metalen waarmee het HotCO<sub>2</sub> proces kan worden uitgevoerd, de zogenaamde overgangsmetalen. De meest toegepaste overgangsmetalen zijn: nikkel, koper, ijzer en mangaan. Elk overgangsmetaal heeft specifieke reactiekenmerken met aardgas, waardoor het belangrijk is het juiste overgangsmetaal te kiezen waarmee het proces zo optimaal mogelijk kan worden uitgevoerd. Daarnaast zit er een grote variatie in de prijs van de verschillende overgangsmetalen.

In Tabel 1 zijn 4 verschillende overgangsmetalen en een legering weergegeven waarmee het HotCO<sub>2</sub> proces kan worden uitgevoerd inclusief de bijbehorende voor- en nadelen. In Tabel 1 wordt met de buffercapaciteit: de relatieve hoeveelheid materiaal, benodigd voor buffering van CO<sub>2</sub> bedoeld. De reactiviteit is de snelheid en efficiency waarmee het materiaal reageert met aardgas. De prijs is de prijs per ton van het materiaal; met het milieueffect wordt de giftigheid van het materiaal aangegeven, wanneer het metaal in het milieu terecht komt; de geschiktheid voor verschillende brandstoffen geeft aan of het metaal de mogelijkheid heeft om brandstoffen zoals bijvoorbeeld biogas, synthese gas en waterstof toe te kunnen passen om het metaal te reduceren. Tenslotte geeft het smeltpunt de relatieve hoogte van het smeltpunt van het materiaal aan. Een laag smeltpunt beperkt de vrijheid en stelt eisen aan de processturing.

Tabel 1 Voor- en nadelen van de verschillende metalen, geschikt voor HotCO2

	Buffer capaciteit	Reactiviteit	Prijs	Milieu-effect	Geschiktheid verschillende brandstoffen	Smeltpunt
<b>Nikkel</b>	++	++	--	--	?	+
<b>Koper</b>	++	++	±	+	?	-
<b>Mangaan</b>	±	++	+	--	+	+
<b>IJzer</b>	--	--	++	+	--	+
<b>Ilmeniet</b>	--	+	++	+	+	+

De materiaalkeuze van het metaalbed van de HotCO2 installatie beïnvloedt naast de reactie met aardgas en de prijs ook de grootte van de uiteindelijke HotCO2 installatie. In Tabel 2 is schematisch weergegeven hoe de kosten en de omvang van de installatie afhangen van de materiaalkeuze. Hierin komt duidelijk naar voren dat er grote verschillen bestaan tussen de prijs en de capaciteit van de verschillende overgangsmetalen.

Tabel 2 Eigenschappen van de verschillende materialen die ingezet kunnen worden voor het metaalbed<sup>vii</sup> <sup>viii</sup>

Materiaal	Euro/ton materiaal	m <sup>3</sup> Materiaal benodigd per ton CO <sub>2</sub> <sup>2</sup>	Euro/ton CO <sub>2</sub> buffer <sup>3</sup>
<b>IJzer</b>	71	21,8	3.090
<b>Nikkel</b>	7.900	1,5	42.157
<b>Koper</b>	2.766	1,6	15.967
<b>Mangaan</b>	1.720	9	33.258
<b>Ilmeniet</b>	76	14,7	2.102

Koper lijkt uit Tabel 2 het meest geschikt vanwege de relatief lage prijs en hoge opslagcapaciteit. Naast koper lijkt ilmeniet een interessante optie vanwege de zeer lage prijs. Het benodigde volume van de installatie zal bij gebruik van ilmeniet in plaats van koper echter met een factor 10 toenemen. Toch is het interessant om deze twee opties naast elkaar te zetten, omdat de veel lagere prijs van ilmeniet de installatie groter maar toch goedkoper zou kunnen maken.

Nikkel, mangaan en ijzer lijken op het eerste gezicht minder interessant om onderzocht te worden in deze studie. Nikkel is namelijk vanwege de hoge prijs en de geringe extra opslagcapaciteit ten opzichte van koper niet interessant genoeg om verder te bekijken in deze haalbaarheidsstudie.

Mangaan is niet alleen duurder dan koper per ton CO<sub>2</sub> opslagcapaciteit, maar heeft ook een kleinere buffercapaciteit dan koper per m<sup>3</sup>. IJzer is vergelijkbaar in prijs met ilmeniet, maar heeft een lagere buffercapaciteit dan ilmeniet en is daardoor minder geschikt als buffermateriaal. Het uiteindelijke apparaat waarmee HotCO2 wordt bedreven omvat veel meer dan alleen het actieve materiaal. De grootte van de HotCO2 installatie en de bijbehorende kosten daarvan zullen vanwege het modulaire ontwerp min of meer lineair toenemen met de toename van het benodigde actieve materiaal. Daarom is het belangrijk om naast de prijs per ton CO<sub>2</sub> opslagcapaciteit ook te kijken naar de impact van de hoeveelheid materiaal benodigd per ton CO<sub>2</sub> opslagcapaciteit.

Wanneer het HotCO2 proces wordt uitgevoerd is het belangrijk dat het proces onder controle is en de gasstromen en temperaturen automatisch worden aangestuurd. Het lage smeltpunt van koper bijvoorbeeld, vereist dat de processturing accuraat is.

Wanneer het koper plaatselijk smelt verhoogt dit de stromingsweerstand van het metaalbed en neemt het beschikbare oppervlak voor CO<sub>2</sub> buffering af. Het is daarom van groot belang dat het metaal niet smelt tijdens het proces.

<sup>2</sup> Berekend met behulp van de porositeit en de reactiviteit van het materiaal

<sup>3</sup> Berekend met behulp van de dichtheid van het materiaal

Daarnaast is het van belang dat er geen vervuiling of onverbrande brandstoffen worden uitgestoten. De ingaande en uitgaande gasstromen dienen daarom gestuurd en gecontroleerd te worden. Door een gedeelte van het uitlaatgas te recyclen of door een inert gas mee te voeren door het metaalbed, kan de reactie en daarmee de temperatuursontwikkeling in het metaalbed worden afgeremd.

### 3.3.4 Reactoromvang van HotCO<sub>2</sub>

De hoeveelheid actief materiaal, aanwezig in de HotCO<sub>2</sub> installatie staat in lineair verband met de grootte van de warmte- en CO<sub>2</sub>-buffer en met de grootte van de totale installatie. Het is van belang dat daarom de reactorgrootte in verhouding staat tot de grootte van de kas en de dagelijkse warmte en CO<sub>2</sub> vraag door het jaar heen. Elke tuinder kan kiezen voor een aantal modules om tot een ontwerp te komen dat aansluit op de karakteristieken van zijn kas. In deze studie wordt uitgegaan van getallen uit het onderzoek naar optimale teelt in de gesloten kas door Marcel Raaphorst van PP&O<sup>ix</sup> en een kas van 50.000 m<sup>2</sup>. In Tabel 3 zijn de waarden van de gesloten kas bij Themato<sup>ix</sup> weergegeven ten opzichte van een open kassysteem. Deze getallen vormen de basis voor de aannames van de studie naar HotCO<sub>2</sub>. In deze studie wordt uitgegaan van een buffercapaciteit van drie weken. Dit wordt aangenomen omdat in het algemeen in Nederland, zonnige periodes in de zomer niet langer dan drie weken duren net als de koude periode in de winter. Daarom is in deze studie voor de berekeningen uitgegaan dat de capaciteit van een buffer om warmte chemisch op te slaan ook voor drie weken is. Dit betekent ook dat de buffer zo groot moet zijn om gedurende drie weken CO<sub>2</sub> te kunnen produceren, voordat het metaalbed weer wordt geregenereerd.

Tabel 3 Schatting van het CO<sub>2</sub>-verbruik in een open en gesloten kassysteem

	Eenheid	Open	Gesloten
Gemiddeld binnenniveau overdag	Ppm	490	1000
Gemiddelde raamstand overdag	% luw	70	1,75
Gemiddelde ventilatievoud overdag	Per uur	38	1,1
CO <sub>2</sub> verlies	Kg/m <sup>2</sup> .jr	27,3	4,2
Productie (vruchten)	Kg/m <sup>2</sup> .jr	50	55
Droge stof in vruchten	Kgds/m <sup>2</sup> .jr	3,5	3,85
Droge stof in gewas	Kgds/m <sup>2</sup> .jr	1,5	1,65
CO <sub>2</sub> in droge stof	Kg/m <sup>2</sup> .jr	5,6	6,2
Ademhaling CO <sub>2</sub> overdag	Kg/m <sup>2</sup> .jr	1,5	1,5
Totale CO <sub>2</sub> -opname overdag	Kg/m <sup>2</sup> .jr	7,1	7,7
Totale CO <sub>2</sub> -behoefte overdag	Kg/m <sup>2</sup> .jr	34,4	11,9

In deze studie is uitgegaan van een gesloten teeltsysteem en de bijbehorende getallen, omdat HotCO<sub>2</sub> met de levering van zuivere CO<sub>2</sub> voorziet in de mogelijkheid om de kas zoveel mogelijk gesloten te houden. Dit is één van de voordelen die HotCO<sub>2</sub> levert ten opzichte van conventionele installaties en draagt daardoor bij aan een voordeligere situatie met betrekking tot het gas- en CO<sub>2</sub> verbruik.

Wanneer uit zou worden gegaan van een semigesloten teeltsysteem, zal de totale HotCO<sub>2</sub> installatie driemaal zo groot moeten worden uitgevoerd. Dit heeft te maken dat bij hoge CO<sub>2</sub> concentraties (~1000 ppm) in een semigesloten teeltsysteem de behoefte aan CO<sub>2</sub> driemaal zo hoog is (33 kg/m<sup>2</sup>.jr). Hierdoor wordt de toepassing van het HotCO<sub>2</sub> systeem in deze situatie uiteindelijk economisch onaantrekkelijk.<sup>x</sup>

Bij lagere concentraties CO<sub>2</sub> is het verlies door ventilatie minder. Overigens kan door verneveling de ventilatie en dus ook het CO<sub>2</sub> verlies wel worden beperkt.

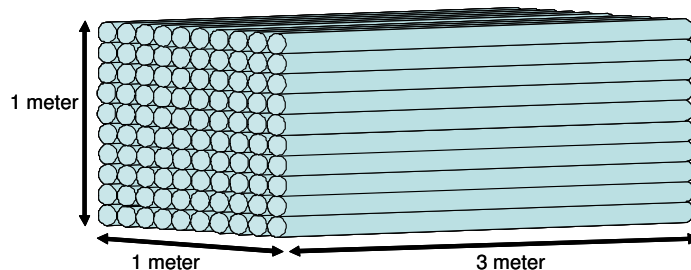
Een buffercapaciteit van drie weken komt neer op een gemiddelde CO<sub>2</sub>-behoefte van een gesloten kas in drie weken van  $11,9/365 \cdot 21 = 0,68 \text{ kg/m}^2$ . Om op zonnige dagen, waarin er een piekbehoefte is aan CO<sub>2</sub>, aan de vraag te kunnen voldoen, wordt een marge ingebouwd. Voor het inbouwen van deze marge is uitgegaan van een CO<sub>2</sub>-behoefte in drie weken tijd van  $1 \text{ kg/m}^2$  in plaats van de normale CO<sub>2</sub> vraag in drie weken van  $0,68 \text{ kg/m}^2$ . Kortstondige pieken gedurende de dag in CO<sub>2</sub> behoefte kunnen ook worden opgevangen met de HotCO<sub>2</sub> installatie. Om dit te bereiken zal de aardgasstroom die door de installatie gaat worden opgevoerd om voldoende CO<sub>2</sub> te produceren. Een gesloten kas van  $50.000 \text{ m}^2$  komt neer op een consumptie in drie weken van 50 ton CO<sub>2</sub>. Dit komt overeen met het verbranden van ruim  $25.000 \text{ m}^3$  aardgas met een totale verbrandingswarmte van 240 MWh. In Tabel 4 zijn de hoeveelheden overgangsmetaal warmtecapaciteit weergegeven uitgaande van 50 ton CO<sub>2</sub>-opslag.

Tabel 4 Buffercapaciteit van ilmeniet en koper

Materiaal	Hoeveelheid	CO <sub>2</sub> buffer	Warmtebuffer
Koper	80 m <sup>3</sup>	50 ton	194 MWh
Ilmeniet	735 m <sup>3</sup>	50 ton	265 MWh

Uit Tabel 4 blijkt dat wanneer de hoeveelheid CO<sub>2</sub> die gebufferd kan worden gelijk blijft, de hoeveelheid warmte die gebufferd wordt wel veranderd. Dit heeft de volgende reden: de hoeveelheid methaan, benodigd om deze hoeveelheid CO<sub>2</sub> te produceren blijft gelijk, maar wanneer methaan reageert met koper komt warmte vrij, terwijl bij de reactie van methaan met ilmeniet juist warmte nodig is. Er wordt dus tijdens de reactie van ilmeniet met methaan meer warmte in het bed opgeslagen dan tijdens de reactie van methaan met koper. Deze warmte moet echter in het geval van ilmeniet worden opgewekt tijdens het opslaan van warmte in het bed. Een bijkomend voordeel van koper is dat de reactie met methaan ook een klein beetje warmte oplevert, wat uiteindelijk het produceren van CO<sub>2</sub> vergemakkelijkt ten opzichte van ilmeniet. Dit komt omdat bij het regenereren van het metaalbed en het produceren van CO<sub>2</sub> een bed van ilmeniet snel afkoelt, terwijl een bed van koper in deze fase een beetje warmte opwekt en daardoor op temperatuur blijft. Wanneer vervolgens koude gassen in het bed worden gebracht voor het opwekken van warmte, hoeft dit temperatuurverschil niet overwonnen te worden. Bij gebruik van een bed van ilmeniet, kan het daarom van belang zijn om het bed de regeneratie op te warmen. Bij een bed van koper is dat niet nodig.

HotCO<sub>2</sub> is een modulair ontwerp, waarbij het HotCO<sub>2</sub> bed bestaat uit gepakte kolommen (gevulde buizen), met bijvoorbeeld een diameter van 0,1 meter en een lengte van 3 meter, gevuld met actief materiaal. In Figuur 11 is een HotCO<sub>2</sub> module weergegeven, bestaande uit 100 kolommen van 0,1 bij 3 meter. De modules kunnen onafhankelijk aan- en uitgeschakeld worden. Extra modules kunnen eenvoudig worden aangesloten om de capaciteit van de installatie uit te breiden. Hierdoor kan deze gemakkelijk meegroeien met de kas.

Figuur 11 Concept ontwerp HotCO<sub>2</sub> module



Een module heeft een afmeting van, bijvoorbeeld, 1 bij 1 bij 3 meter. In een 45 voets container passen zodoende 16 modules (zie Figuur 12). De specificaties van de kolommen zijn schematisch weergegeven in Tabel 5.



Figuur 12 16 HotCO2 modules in een container

Tabel 5 Specificaties van HotCO2 met koper als actief materiaal

	Lengte (m)	Breedte-hoogte (m)	Inhoud materiaal (m <sup>3</sup> )	CO <sub>2</sub> productie (kg/hr)	Warmte productie (MJ/hr)
<b>Kolom</b>	3	0,1·0,1	0,024	0,56	0,22
<b>Module</b>	3	1·1	2,4	56	22,9
<b>Container</b>	14	1,5·2,6	38,4	896	350

Een container met 16 modules bevat 1600 kolommen, dat neerkomt op 38 m<sup>3</sup> materiaalinhoud. De buffercapaciteit van een kas van 50.000 m<sup>2</sup> vereist een opstelling ter grote van 2 containers, wanneer koper wordt gebruikt als actief materiaal. De maximale CO<sub>2</sub> productie bedraagt dan 1800 kg/hr. Wanneer ilmeniet wordt gebruikt zal de grote van de opstelling ongeveer 19 containers bedragen in plaats van 2 containers in het geval van koper. Een vraag naar CO<sub>2</sub> van 50 ton in drie weken komt overeen met een vraag van 300 kg CO<sub>2</sub>/hr wanneer wordt uitgegaan van 8 uur CO<sub>2</sub> dosering per dag. De HotCO2 opstelling kan de vraag van 50 ton CO<sub>2</sub> in drie weken (ofwel 300 kg CO<sub>2</sub>/hr) in beide gevallen aan.

Het gebruik van koper als actief materiaal in plaats van ilmeniet heeft dus als groot voordeel dat de HotCO<sub>2</sub> installatie ongeveer tien maal kleiner kan worden uitgevoerd terwijl dezelfde opbrengsten worden gehaald. Doordat de HotCO<sub>2</sub> installatie bij het gebruik van koper tien maal kleiner is en daarmee maar een tiende van het aantal modules nodig is te verwachten dat de investeringskosten in dezelfde orde zullen dalen. Dit geldt alleen wanneer de kosten voor de aanschaf van het actieve materiaal buiten beschouwing wordt gelaten. Op basis hiervan wordt koper in deze studie als economisch gunstiger beschouwd dan ilmeniet.

In Hoofdstuk 4 zal verder worden ingegaan op de financiële impact van de grootte van de installatie. Aangezien er veel actief materiaal per container wordt opgeslagen (38 m<sup>3</sup>), zal één container inclusief de opstelling en het materiaal tussen de 250 en 300 ton wegen. Qua transport lijkt dit een lastige opgave, maar vanwege het modulair ontwerp kan de opstelling eenvoudig in delen worden getransporteerd. In het hier gekozen ontwerp weegt een module ongeveer 16 ton, wat geen bijzondere transport eisen met zich mee brengt. Dit geeft de tuinder tevens de mogelijkheid zijn installatie met de grootte van zijn kas mee te laten groeien, waardoor het HotCO<sub>2</sub> systeem tevens flexibel is.

### 3.3.5 Invloed van drukval en deeltjesgrootte

Om op een efficiënte manier gebruik te maken van metaaldeeltjes in een gepakte kolom, is het van belang dat de juiste deeltjesgrootte wordt gekozen. Grote deeltjes zorgen voor een lage drukval (de druk, benodigd om het gas door de kolom te laten stromen), maar ook voor een kleiner beschikbaar oppervlak van het actieve materiaal. Een kleine deeltjesgrootte zorgt voor een hoge beschikbaarheid van het actieve materiaal maar ook voor een hoge drukval; immers de ruimte tussen de deeltjes is groter bij gebruik van grote deeltjes dan bij gebruik van kleinere deeltjes. Daarnaast heeft de snelheid waarmee het gas door de kolom stroomt een groot effect op de drukval. Hoe sneller het gas door de kolom stroomt, hoe hoger de drukval wordt. Op de keuze van de deeltjesgrootte wordt verderop in dit hoofdstuk ingegaan. Om de drukval laag te houden is een gassnelheid van 0,5 millimeter per seconde gekozen. Doordat er zoveel pijpen tegelijk kunnen worden gebruikt kan er toch een aanzienlijke hoeveelheid CO<sub>2</sub> of warmte geproduceerd worden. Een bijkomend voordeel van een langzame gasstroom is dat de reactie van metaal met het aardgas meer tijd beschikbaar heeft om plaats te vinden, wat de processturing vereenvoudigt. Een aantal voorbeelden van verschillende beschikbare soorten metaalpoeders zijn weergegeven in Figuren 13, 14<sup>xi</sup> en 15<sup>xii</sup>.

De deeltjesgrootte is van belang op twee vlakken. Ten eerste is de deeltjesgrootte een maat voor de hoeveelheid beschikbaar materiaal voor het langstromende gas. Indien wordt aangenomen dat alleen het oppervlak van een deeltje beschikbaar is voor een reactie met gas, dan zal bij een groot deeltje het binnenste van het deeltje niet reageren met het gas. Daarom is een zo klein mogelijk deeltje optimaal om met zo min mogelijk materiaal een zo hoog mogelijke performance van de opstelling te halen. In Figuur 16 is weergegeven welk percentage van een deeltje beschikbaar is, afhankelijk van de deeltjesgrootte.



Figuur 13 IJzerpoeder

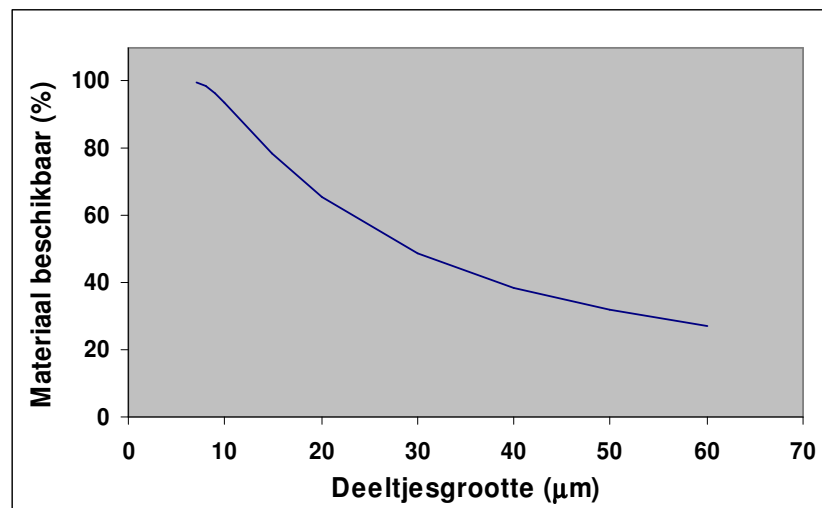


Figuur 14 Cobaltpoeder



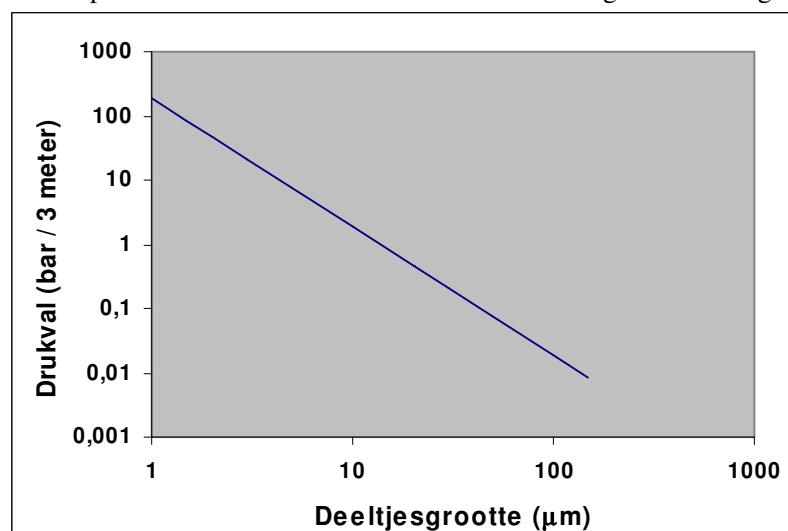
Figuur 15 Koperpoeder

Hierbij is uitgegaan van bolvormige deeltjes en een penetratiediepte van het gas in het metaal van 3 micrometer ( $3 \cdot 10^{-6}$  m). In deze figuur is een duidelijke daling in het beschikbare actieve materiaal voor het gas te zien met een toename van de deeltjesgrootte. Het is daarom van belang dat de deeltjesgrootte optimaal wordt gekozen, namelijk op een punt waarbij een hoog percentage van het materiaal beschikbaar is voor het gas, maar de drukval over de kolom laag genoeg blijft, zodat een industriële ventilator kan worden gebruikt om lucht aan te voeren. De drukval mag hiervoor niet hoger zijn dan 750 millibar.



Figuur 16 Percentage van het beschikbaar actieve materiaal bij toenemende deeltjesgrootte

Ten tweede punt waarom de deeltjesgrootte van belang is heeft te maken met de drukval ofwel doorstroming van het gas door de kolom. Het doorstromende gas zal meer hinder ondervinden van een metaalbed bestaande uit kleine deeltjes dan uit grote deeltjes. In Figuur 17 is de relatie tussen drukval en deeltjesgrootte weergegeven. Bij deze figuur is uitgegaan van een kolom met een lengte van 3 meter, een diameter van 10 centimeter en een gassnelheid van 0,5 millimeter per seconde. De schaal op zowel de horizontale als de verticale as is logaritmisch uitgezet.



Figuur 17 Ontwikkeling van de drukval bij toenemende deeltjesgrootte

Om nu de meest optimale deeltjesgrootte te bepalen dient de optimale combinatie van het beschikbare actieve materiaal (zo hoog mogelijk) en de drukval (zo laag mogelijk) gevonden te worden. Wanneer deze deeltjesgrootte wordt vergeleken met de beschikbaarheid van het actieve materiaal (Figuur 16) en tevens rekening wordt gehouden met de drukval die bij die deeltjesgrootte overeenkomt (Figuur 17), blijkt op het eerste gezicht dat de meest optimale deeltjesgrootte rond de 10 micrometer ligt. Een grotere deeltjesgrootte van bijvoorbeeld 15 micrometer levert een beschikbaarheid van het materiaal op van 78,4% en een drukval van 0,64 bar. Dit terwijl een deeltjesgrootte van 10 micrometer een beschikbaarheid van 93,6% van het materiaal oplevert bij een drukval van 1,9 bar. De ideale deeltjesgrootte ligt waarschijnlijk tussen deze waarden in, omdat de druk van het aardgasnet ruim voldoende is om een dergelijk druk op te wekken, en daarnaast een eenvoudige industriële ventilator de benodigde luchtdruk kan verzorgen. Een dergelijke ventilator levert een druk van 800-1000 millibar. Daarnaast is de beschikbaarheid van het actieve materiaal bij deze deeltjesgrootte hoog. In deze studie zal worden uitgegaan van een deeltjesgrootte van 15 micrometer en een drukval van 0,7 bar omdat bij deze drukval met één ventilator de benodigde hoeveelheid druk kan worden opgewekt.

### 3.3.6 *Materiaalkeuze en kostenstructuur HotCO<sub>2</sub>*

Op basis van de eerder gemaakte aannames zal de modulair ontworpen reactor bestaan uit losse modules van 100 kolommen waarbij een kolom een lengte heeft van 3 meter en een diameter van 10 centimeter. Elke module heeft afmetingen van 1·1·3 meter zonder aansluitingen en procesapparatuur. De kolommen zijn gevuld met actief materiaal bestaande uit ronde deeltjes met een grootte van 15 micrometer in diameter, resulterend in een drukval van 0,7 bar over een buis wanneer een gasstroomsnelheid van 0,5 millimeter per seconde wordt gehanteerd. Elke module bevat 2,5 kubieke meter actief materiaal.

Wanneer koper als actief materiaal wordt gebruikt, zijn 34 modules nodig om te voorzien in een CO<sub>2</sub> buffer van 50 ton. Wanneer ilmeniet als actief materiaal wordt gebruikt zijn 312 modules nodig (zie Paragraaf 3.3.3). Wanneer de lagere prijs van ilmeniet de prijs van de totale installatie in aanschaf voordeliger moet maken, mag een lege module niet meer dan €2.500 kosten. Dit bedrag is gebaseerd op de extra investeringskosten per extra module die uiteindelijk nodig is om dezelfde buffercapaciteit te realiseren en de extra investering voor het duurdere actieve materiaal. De additionele operationele kosten van de keuze voor ilmeniet zijn hierbij buiten beschouwing gelaten. In Tabel 6 is dit schematisch weergegeven.

Tabel 6 Impact materiaalprijs en moduleprijs van koper en ilmeniet als actief materiaal op de prijs van de HotCO<sub>2</sub> installatie

<b>Materiaal</b>	<b>Prijs per ton CO<sub>2</sub> buffering</b>	<b>Prijs voor 50 ton CO<sub>2</sub> buffering</b>	<b>Aantal modules benodigd</b>	<b>Maximale prijs per module voor rendabele keuze</b>
Koper	€16.000	€800.000	34	>€2.500
Ilmeniet	€2.100	€105.000	312	<€2.500

## 4 Economisch- en milieu perspectief HotCO<sub>2</sub>

In dit hoofdstuk worden de kosten van het HotCO<sub>2</sub> systeem uiteengezet. Hierbij zal worden gekeken naar zowel de investeringskosten als de operationele kosten. De investeringskosten zal vooral beïnvloed worden door de aan te schaffen hoeveelheid actief materiaal. De operationele kosten zullen vooral worden beïnvloed door het gasverbruik.

### 4.1 Kostenopbouw van de HotCO<sub>2</sub> installatie

De kosten van de HotCO<sub>2</sub> installatie is afhankelijk van de gewenste grootte en zullen voornamelijk afhangen van de prijs van het benodigde overgangsmetaal voor het metaalbed. Dit metaal ondervindt geen slijtage en zal, wanneer de installatie wordt ontmanteld, weer geld opbrengen. Hierdoor bedragen de kosten met betrekking tot het overgangsmetaal in feite de transportkosten en de interestkosten (de rente) van het benodigde kapitaal.

Aangezien de kosten van een HotCO<sub>2</sub> installatie afhankelijk is van de grootte van de installatie, zullen de kosten trapsgewijs toenemen wanneer de benodigde capaciteit toeneemt. Dit komt door het modulaire ontwerp van de installatie. In Tabel 7 zijn de kosten voor de verschillende onderdelen van één module van 100 kolommen weergegeven, uitgaande van de eerder bepaalde 2,5 m<sup>3</sup> overgangsmetaal per module (zie Paragraaf 3.3.3). De onderste regels in Tabel 7 zijn schuin gedrukt, omdat deze onderdelen niet per module aangeschaft hoeven te worden, maar eenmalig aangeschaft moet worden per installatie.

Tabel 7 Geschatte kosten van één module van 100 kolommen

Onderdeel	Prijs per stuk	Aantal nodig	Prijs totaal
Koperdeeltjes	€2.766/ton	9	€25.000
Pijpen	€50	100	€5.000
Isolatie (1" steenwol)	€25	100	€2.500
Kleppen	€50	100	€5.000
Flow controller gas	€2.500	2	€5.000
Druk controller	€2.500	1	€2.500
<i>Blower</i>	<i>€10.000</i>	<i>1</i>	<i>€10.000</i>
<i>Compositie controller</i>	<i>€20.000</i>	<i>1</i>	<i>€20.000</i>
<i>Central processing unit</i>	<i>€15.000</i>	<i>1</i>	<i>€15.000</i>

In deze studie wordt aangenomen dat de installatie wordt afgeschreven in 15 jaar en de interest 6% bedraagt. De afschrijving vindt alleen plaats over de ketel (de installatie zonder het metaalbed) omdat het metaal gemakkelijk hergebruikt kan worden met de aanname dat de kiloprijs niet toe- of afneemt. De verwachting is dat de onderhoudskosten voor een HotCO<sub>2</sub> installatie laag zullen uitvallen vanwege het minimaal gebruik van roterende onderdelen. Vanuit onderhoudsperspectief is de HotCO<sub>2</sub> ketel te vergelijken met een warmtebuffer systeem. Er is dan ook aangenomen dat de onderhoudskosten overeenkomen met de kosten van een warmtebuffer, ofwel 1% van de aanschafwaarde.

Voor een kas van 50.000 m<sup>2</sup> zijn 34 modules nodig, wat de geschatte aanschafkosten op 1,4 miljoen euro brengt. In Tabel 8 is een overzicht van de kosten van de installatie gegeven. Hiermee kan dan 595 ton zuivere CO<sub>2</sub> en 3100 MWh warmte per jaar worden geproduceerd. In een gesloten kassysteem is deze hoeveelheid CO<sub>2</sub> voldoende om een jaar lang het CO<sub>2</sub> niveau van de kas boven 1000 ppm te houden. De theoretische emissie van CO<sub>2</sub> naar de omgeving door de HOTCO<sub>2</sub> ketel zal de gedoseerde hoeveelheid zijn, minus de door de planten opgenomen CO<sub>2</sub>.

Tabel 8 Geschatte kosten van de HotCO2 installatie

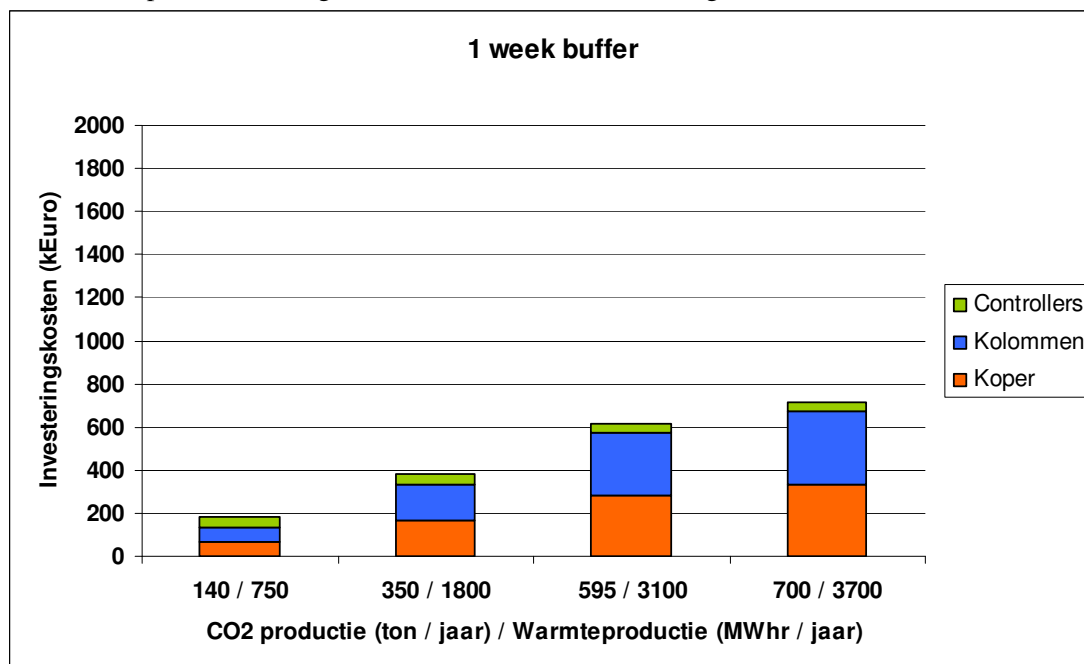
HotCO2 Kosten	Aanschaf		Afschrijving		Rente	Onderhoud
	€		€/jaar		€/jaar	€/jaar
	Ketel	Bed	Ketel	Bed	Systeem	Systeem
<b>Module (2,4 m<sup>3</sup>)</b>	65.000	25.000	4.000	-	5.400	900
<b>Systeem (80 m<sup>3</sup>)</b>	600.000	800.000	40.000	-	84.000	14.000

## 4.2 Kosten HotCO2 installatie bij verschillende groottes

Er is voor gekozen om de kosten van een HotCO2 installatie uit te splitsen in installatiekosten en jaarlijkse kosten afhankelijk van de bufferperiode. Deze uitsplitsing maakt het mogelijk voor een tuinder om voor zijn bedrijf de kosten (en daarmee de besparing) te bepalen. De exacte kostenbesparing hangt onder andere af van: de grootte van de kas, de gewenste hoeveelheid warmte en CO<sub>2</sub> per jaar, de gasprijs en de gewenste buffertijd. Deze parameters kunnen voor elke tuinder verschillend zijn afhankelijk van onder andere: het type gewas en geografische ligging.

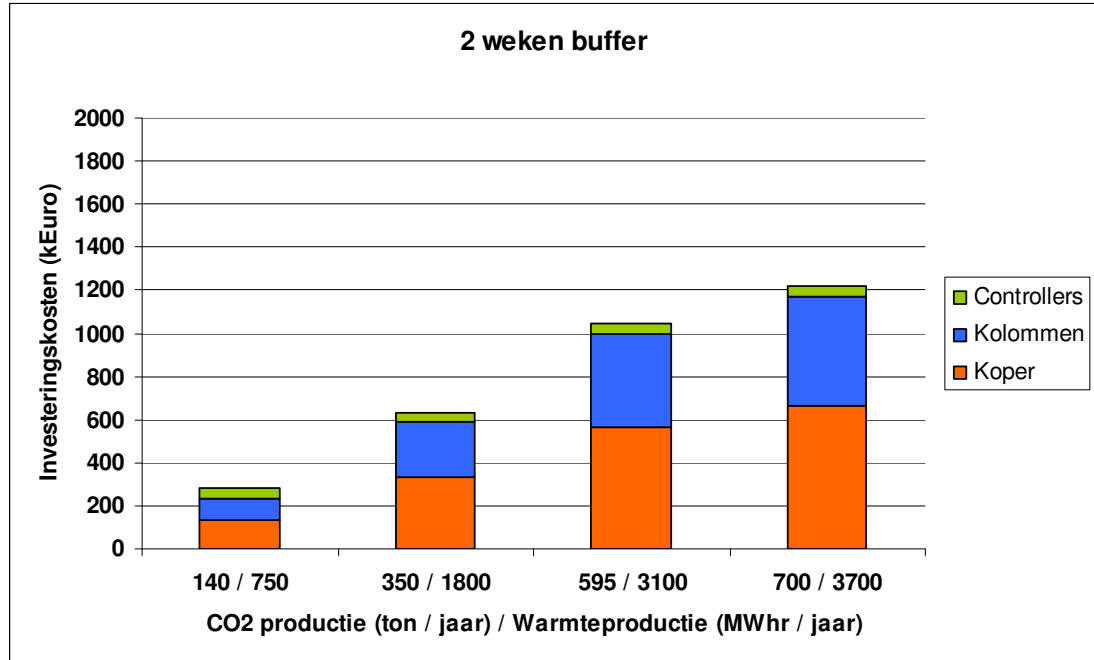
### 4.2.1 Investeringskosten HotCO2 installatie bij verschillende groottes

De kosten van de HotCO2 installatie in aanschaf hangen van een aantal zaken af, voornamelijk van de jaarlijks benodigde hoeveelheid warmte en CO<sub>2</sub> en van de gewenste buffertijd. In deze paragraaf wordt uiteengezet hoe de kosten zich ontwikkelen met toenemende CO<sub>2</sub> en warmte productie capaciteit en de buffergrootte van een HotCO2 installatie. In Figuur 18, Figuur 19 en Figuur 20 zijn de investeringskosten van een installatie met een buffercapaciteit van respectievelijk 1 week, 2 weken en 3 weken weergegeven. Een kleinere buffer betekend in feite dat de kolommen waarin het HotCO2 proces wordt bedreven korter kunnen zijn. Bij een buffergrootte van 1 week kan met 1 meter lange kolommen worden volstaan, bij een buffergrootte van 2 weken is 2 meter lengte voldoende. Een buffergrootte van 3 weken resulteert in de in de vorige hoofdstukken beschreven kolomlengte van 3 meter. In deze figuren is duidelijk te zien dat bij een grotere capaciteit en voornamelijk bij een grotere buffergrootte de kosten van het actieve materiaal, koper, een steeds groter deel van de totale investering beslaan.



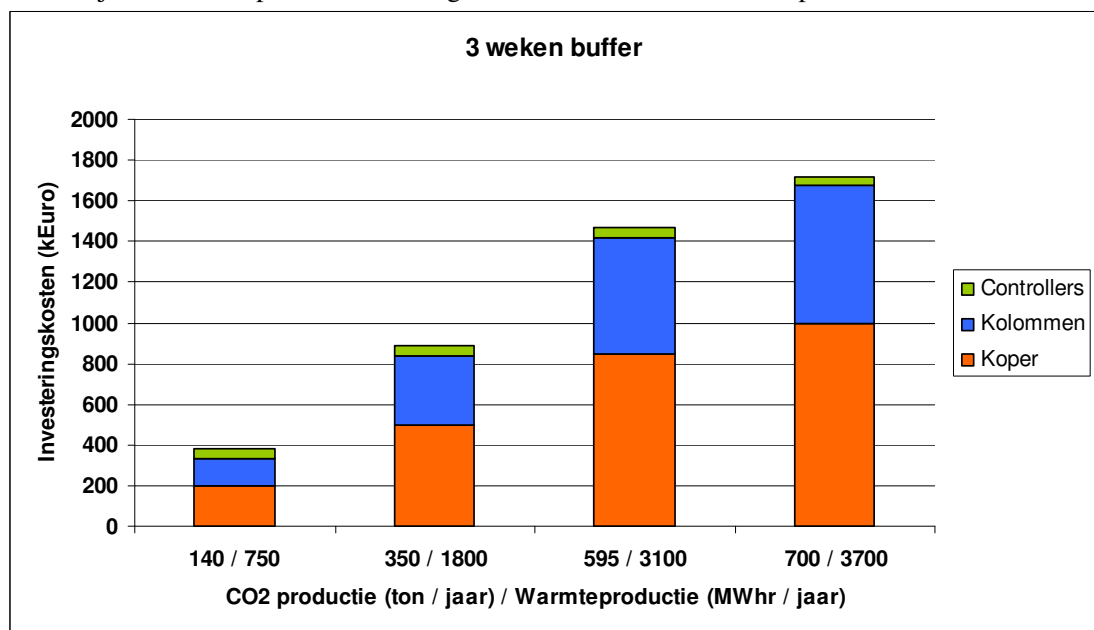
Figuur 18 Investeringskosten bij een buffergrootte van 1 week

In Figuur 18, waarbij de kleinste installatie minder dan 200 kEuro investering vergt, is duidelijk te zien dat de controllers, oftewel de apparatuur om de installatie te regelen en de in en uitgaande gasstromen te monitoren een substantieel deel van de totale investering beslaat. Naarmate de installatie groter wordt, neemt het aandeel van deze systemen in de totale investering snel af.



Figuur 19 Investeringskosten bij een buffergrootte van 2 weken

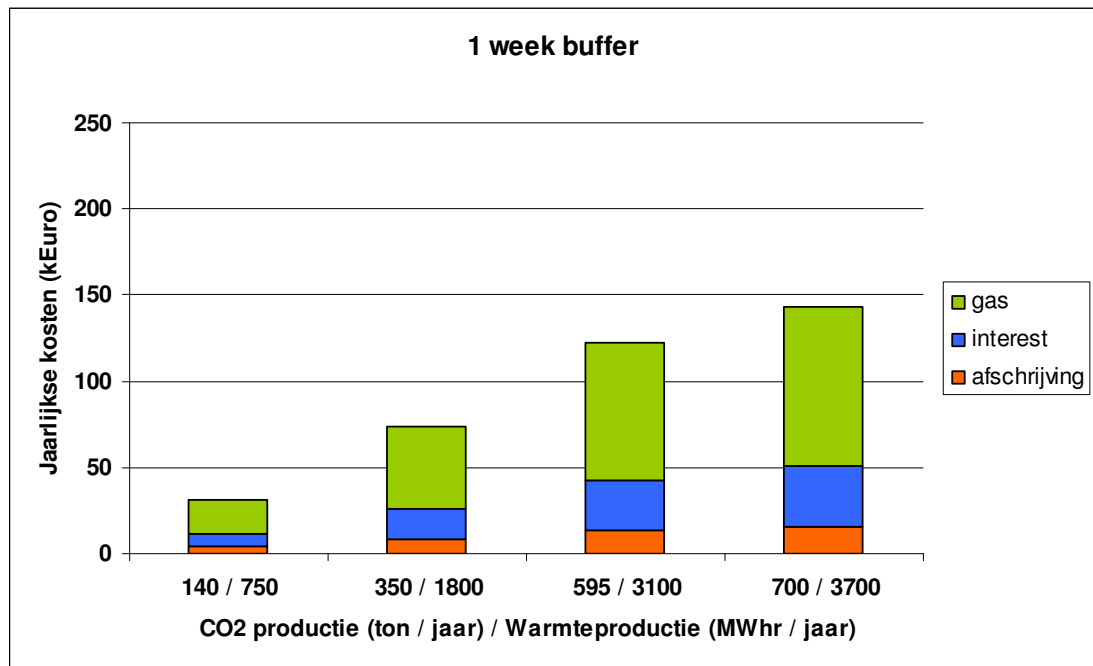
Van Figuur 19 en Figuur 20 kan worden opgemaakt dat de investering in een HotCO2 installatie bijna lineair oploopt met een toenemende buffercapaciteit. Dat komt voornamelijk omdat het actieve materiaal en de hardware daaromheen voor het grootste gedeelte de kosten bepalen. Het zal per tuinder dus een afweging zijn of een HotCO2 installatie een toegevoegde waarde levert aan het bedrijf en welke capaciteit en buffergrootte het meeste rendement op kan leveren.



Figuur 20 Investeringskosten bij een buffergrootte van 3 weken

#### 4.2.2 Jaarlijkse kosten HotCO<sub>2</sub> installatie bij verschillende groottes

Naast de investeringskosten in een HotCO<sub>2</sub> installatie zijn ook de jaarlijkse kosten een belangrijke parameter welke bepaalt of een HotCO<sub>2</sub> installatie een interessante en kostenbesparende optie is voor de tuinbouw. In Figuur 21, Figuur 22 en Figuur 23 in weergegeven hoe de jaarlijkse kosten zich ontwikkelen bij een buffergrootte van respectievelijk 1 week, 2 weken en 3 weken. De jaarlijkse kosten zijn opgebouwd uit de kosten voor het gasverbruik, de afschrijving van de installatie en de interest, betaald over de investering. Onderhoudskosten van de installatie zijn in deze beschouwing niet meegenomen. In vergelijking met een WKK zijn de te verwachten onderhoudskosten voor een HotCO<sub>2</sub> installatie minimaal aangezien het systeem geïnstalleerd wordt zonder onderhoudsgevoelige componenten zoals roterende onderdelen.

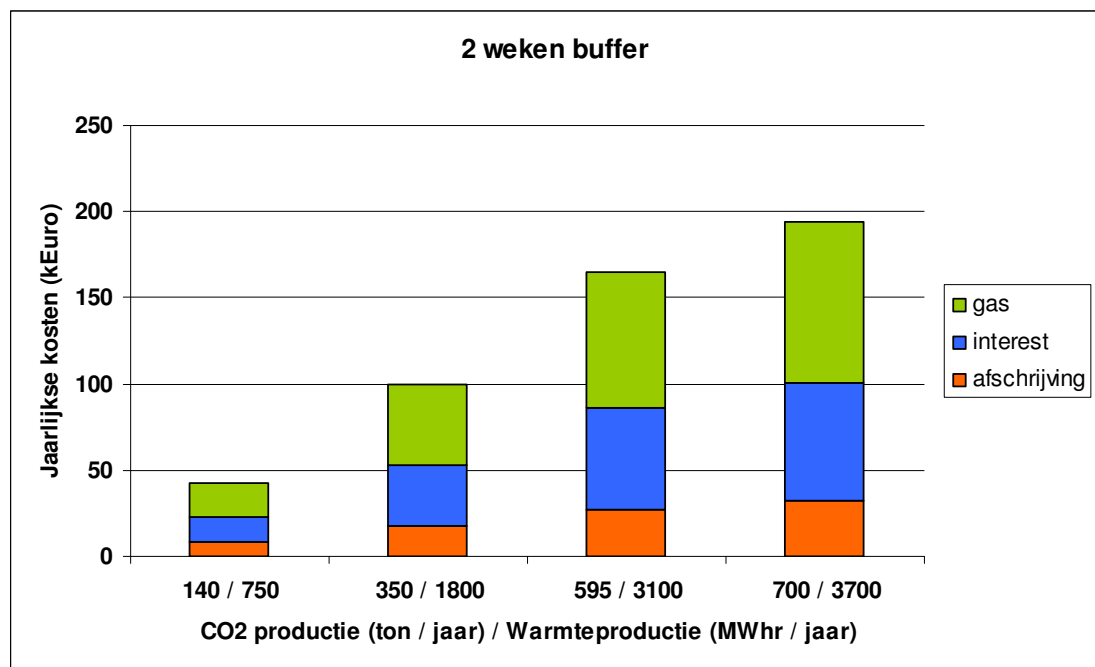


Figuur 21 Jaarlijkse kosten bij een buffergrootte van 1 week

Uit Figuur 21 blijkt dat bij een kleine buffer de jaarlijkse kosten voornamelijk worden bepaald door de kosten van het gasverbruik. Een relatief klein deel van de kosten bestaat uit afschrijving op de installatie en een iets groter deel van de kosten bestaat uit interest, betaald over de investering in de installatie.

Wanneer een grotere buffer gewenst is, zoals is weergegeven in Figuur 22 en Figuur 23, nemen de kosten voor het gasverbruik een relatief kleiner deel in van de jaarlijkse kosten. Vooral de interest kosten verzorgen een veel groter aandeel van de totale kosten voor hun rekening. Dit komt vooral omdat door een grotere installatie veel meer actief materiaal nodig is, terwijl het gasverbruik bij een grotere buffer nauwelijks toeneemt.

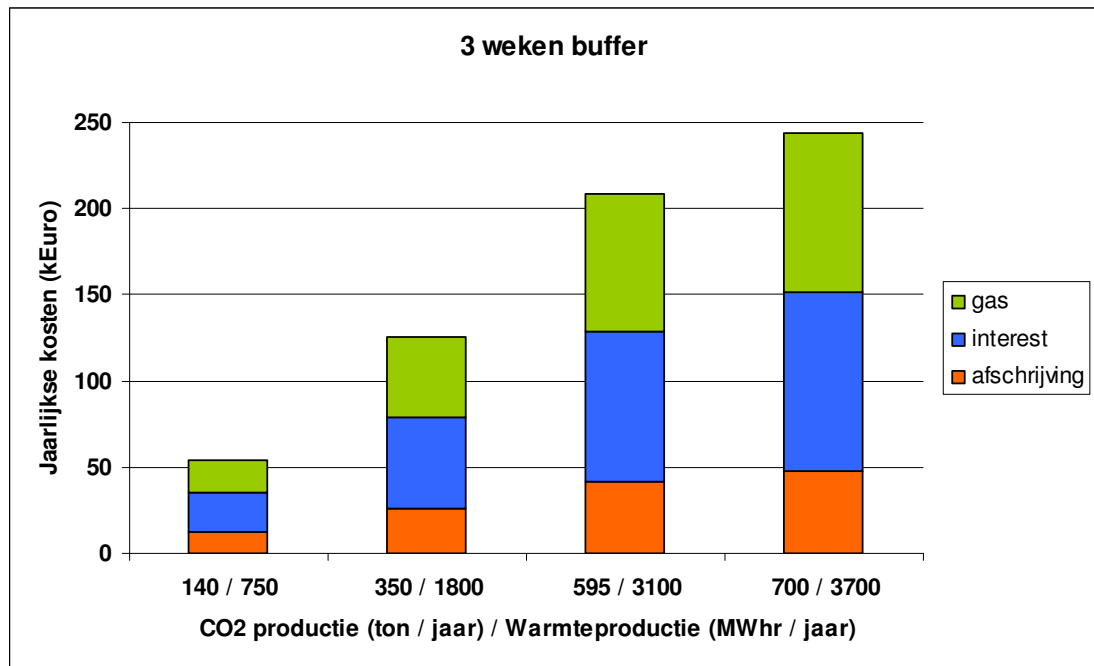




Figuur 22 Jaarlijkse kosten bij een buffergrootte van 2 weken

Bij een buffer van 3 weken en een relatief kleine installatie welke 140 ton CO<sub>2</sub> per jaar produceert, neem het gasverbruik nog maar een klein aandeel van de jaarlijkse kosten voor zijn rekening. Zoals uit Figuur 23 kan worden opgemaakt bedragen de kosten van de afschrijving en de interest een relatief groot deel van de totale kosten. Deze factoren zijn van groot belang om een goede afweging te maken of en in welke vorm van HotCO<sub>2</sub> het beste bij een bedrijf past.

Aangezien de kosten van het actieve materiaal in grote mate de kostprijs van de installatie bepalen, zullen in een vervolg onderzoek de mogelijkheden van goedkopere actieve materialen een belangrijk aandachtspunt zijn. Daarnaast zal worden onderzocht hoe de beschikbaarheid van het actieve materiaal in het bed kan worden geoptimaliseerd, zodat met een kleinere hoeveelheid actief materiaal een zelfde buffergrootte kan worden gerealiseerd.



Figuur 23 Jaarlijkse kosten bij een buffergrootte van 3 weken

### 4.3 Milieubelasting van WKK en HotCO2

Op verschillende manieren belast de verbranding van aardgas het milieu. In de eerste plaats belasten de emissies van de verbranding het milieu in de vorm van broeikasgassen ( $\text{CO}_2$  en  $\text{CH}_4$ ) en schadelijke uitlaatgassen ( $\text{NO}_x$ ). Daarnaast belasten de installaties waarin het aardgas wordt verbrand indirect het milieu, doordat onderdelen niet kunnen worden gerecycled of door het transport van de zware installaties.

#### 4.3.1 Oorzaken van luchtverontreiniging in rookgassen

Een verbrandingsinstallatie die warmte en  $\text{CO}_2$  levert voor in de kas, dient zo goed mogelijk te worden afgesteld en gecontroleerd te worden. Dit omdat in de rookgassen van de verbrandingsmotoren verschillende verontreinigingen vrijkomen, waarvan er een aantal schadelijk zijn voor de teelt. Het afstellen en controleren van de verbrandingsinstallatie zorgt er dan voor dat de gehalten van de verontreinigingen minimaal blijven. Wanneer een verbrandingsinstallatie niet goed afgesteld is kan onvolledige verbranding optreden, waardoor onder andere etheen en koolmonoxide ontstaan. Etheen is een plantenhormoon dat al in zeer kleine hoeveelheden schadelijk is voor planten. Koolmonoxide is voor planten minder schadelijk, maar kan bij mensen tot verstikking leiden. Etheen kan moeilijk gemeten worden, koolmonoxide is makkelijker te meten. In de praktijk wordt meestal koolmonoxide gemeten en aan de hand daarvan de volledigheid van de verbranding gecontroleerd.



Figuur 24 Rookgasreiniger

Een overmaat lucht zorgt voor een volledige verbranding, maar een te grote overmaat zorgt voor een daling van het rendement van de desbetreffende installatie (WKK, ketel of biogas-installatie).

Een WKK installatie verbrandt brandstof bij een hoge temperatuur. Wanneer verbranding bij een temperatuur boven de 1000°C plaats vindt, worden van zuurstof en stikstof uit de lucht stikstofdioxiden (NO<sub>x</sub>) gevormd. Stikstofdioxiden zijn schadelijk voor het gewas, doordat het de groei van de plant remt. Een rookgasreiniger kan NO<sub>x</sub> verwijderen uit het rookgas. Eventueel aanwezige zwavel in de brandstof wordt tijdens de verbranding omgezet in zwaveldioxide (SO<sub>2</sub>), dat net als stikstofdioxiden een groeiremmend effect heeft op de planten. Het is dus vooral bij het gebruik van een WKK voor CO<sub>2</sub> dosering van belang dat de tuinder over een goed werkende rookgasreiniger beschikt (Figuur 24).

#### 4.3.2 Emissies uit WKK

In Tabel 14 zijn de meetwaarden weergegeven van verontreinigingen bij vijf verschillende bedrijven waar een WKK in combinatie met een rookgasreiniger gebruikt wordt voor CO<sub>2</sub> dosering. De metingen vonden plaats in het rookgaskanaal.<sup>xiii</sup>

Tabel 14 Emissies vanuit een WKK installatie met aan- en uitgeschakelde rookgasreiniger

Bedrijf	Component	Reiniger aan	Reiniger uit
1	Etheen	193 ppb	307 ppb
	Methaan	2762 ppm	2777 ppm
	NO <sub>x</sub>	9 ppm	70 ppm
2	Etheen	63 ppb	310 ppb
	Methaan	1527 ppm	1527 ppm
	NO <sub>x</sub>	96 ppm	96 ppm
3	Etheen	37 ppb	171 ppb
	Methaan	1785 ppm	1826 ppm
	NO <sub>x</sub>	14 ppm	38 ppm
4	Etheen	43 ppb	81 ppb
	Methaan	529 ppm	508 ppm
	NO <sub>x</sub>	22 ppm	90 ppm
5	Etheen	12 ppb	80 ppb
	Methaan	1019 ppm	1032 ppm
	NO <sub>x</sub>	13 ppm	128 ppm

Uit deze tabel blijkt dat er aanzienlijke vervuilingen de kas binnenkomen wanneer de rookgasreiniger uitgeschakeld is. Wanneer de rookgasreiniger aan staat neemt de hoeveelheid NO<sub>x</sub> snel af, maar de hoeveelheid methaanslip blijft gelijk. Een WKK zorgt hierdoor voor aanzienlijke methaan emissies. Daarnaast blijken er grote verschillen te zitten in de concentraties van de verschillende componenten.

Het Ministerie van VROM gaat strengere emissie-eisen stellen in kader van de aankomende BEES-B wetgeving. De achtergrond daarvan is dat het emissieplafond voor NO<sub>x</sub> in heel Nederland in 2010 overschreden dreigt te worden. Dit wordt door meerdere sectoren veroorzaakt waaronder ook de landbouwsector. Dit wordt vooral veroorzaakt door de toename van WKK's op aardgas in de tuinbouw en de biogasinstallaties in de landbouw. VROM heeft in juli een concept voorstel bekend gemaakt met aangescherpte emissie-eisen. Hierin wordt voor bestaande zuigermotoren op een gasvormige brandstof een emissie-eis van 80 g/GJ en voor nieuwe zuigermotoren een emissie-eis van 30 g/GJ gesteld. Dit zou dan uitkomen op een verscherping van de eis met een factor 2,6.

Voor de emissie, berekent in Tabel 15, als gevolg van de inzet van een WKK, is uitgegaan van een 3 MWe WKK eenheid met rookgasreiniger. Voor de emissies van etheen is uitgegaan dat 70 ppb (parts per billion) etheen in het rookgas aanwezig blijft na rookgasreiniging.

Het blijkt dat voornamelijk onverbrand methaan wordt uitgestoten. Methaan wordt door de rookgasreiniger niet opgenomen, waardoor alle onverbrande methaan met het rookgas mee uit de schoorsteen komt. In de kas zorgt methaan niet direct voor problemen aangezien het op planten geen effect heeft. Echter, methaan is een broeikasgas dat 20 keer zo sterk werkt als CO<sub>2</sub>. Op jaarbasis zorgt methaan hiermee dan ook voor een broeikasgasemissie equivalent aan 400 ton CO<sub>2</sub>. In Tabel 15 zijn de emissies van verschillende componenten per uur en per jaar. De jaarlijkse emissies van NO<sub>x</sub> van een WKK liggen boven 400 kg. NO<sub>x</sub> is schadelijk voor planten, maar daarnaast ook voor mensen. Het niveau van NO<sub>x</sub> in de atmosfeer, voornamelijk in de Randstad, ligt op sommige momenten van het jaar boven de maximaal toegestane waarde gesteld door de Europese Unie. De overheid wenst dat de tuinbouw sector deze emissies terugdringt.<sup>xiv</sup> Dit kan in de toekomst een probleem opleveren, wanneer de overheid op last van de Europese Unie de emissies van NO<sub>x</sub> gaat beperken.

De emissies van CO<sub>2</sub> in de tuinbouw zijn hoog. Bij een bepaalde warmtevraag zal de hoeveelheid vrijgekomen CO<sub>2</sub> altijd een ruime overmaat zijn ten opzichte van de CO<sub>2</sub> behoefte. Om een voorbeeld te geven, bij gebruik van een 3MWe WKK en een CO<sub>2</sub> behoefte van 595 ton CO<sub>2</sub> is de overmaat en dus de emissie 9.300 ton CO<sub>2</sub> per jaar. Dit houdt in dat slechts 5% van de totaal geproduceerde CO<sub>2</sub> van een WKK nuttig kan worden ingezet voor het gewas. Het ligt in de lijn van verwachting dat naast de energiesector, ook andere sectoren zullen moeten gaan betalen voor de emissies van CO<sub>2</sub>. Als men een methode zoekt om de absolute CO<sub>2</sub> emissie te verlagen is het een mogelijkheid om de overmaat aan CO<sub>2</sub> te bufferen of om de warmtevraag (en dus de verliezen) te verkleinen. Dit zou bereikt kunnen worden door bijvoorbeeld de kas (volledig) te sluiten of beter te isoleren. Het (gedeeltelijk) sluiten van een kas stelt echter wel eisen aan de emissies van de rookgassen. In onderstaande tabel staan de emissies van een 3MWe WKK weergegeven.

Tabel 15 Emissies van een 3 MWe WKK met rookgasreiniger

Component	Emissie per uur	Emissie per jaar
Etheen	0,14 g	560 g
Methaan	3,1 kg	12.400kg
NO <sub>x</sub>	62,4 g	250 kg
CO <sub>2</sub>	2,3 ton	9.300 ton

Ter vergelijking, de NO<sub>x</sub> uitstoot van een HotCO<sub>2</sub> installatie is nul aangezien de temperatuur waarbij NO<sub>x</sub>-en worden gevormd (>1000 °C) nooit bereikt zal worden. De emissies van methaan en ethaan zijn naar verwachting nihil aangezien het HotCO<sub>2</sub> principe een zeer gecontroleerde verbranding is waarbij geen (m)ethaan slip ontstaat.

#### 4.3.3 *Overige milieubelasting WKK en HotCO2*

Wanneer een WKK aan het eind van zijn levensduur wordt opgehaald, kunnen veel onderdelen worden gerecycled en valt de verdere milieubelasting van niet-recyclebare onderdelen mee. Wanneer een HotCO2 installatie aan het eind van zijn levensduur moet worden opgehaald, zal voornamelijk de milieubelasting, veroorzaakt door transport, hoger uitvallen. Om de 400 ton wegende installatie te verwijderen zullen tien grote vrachtwagens nodig zijn. Echter, vergeleken met de emissies tijdens de levensduur van de installatie valt dit mee. Het actieve materiaal kan gemakkelijk worden gerecycled. De installatie is door het eenvoudige ontwerp gemakkelijk te ontmantelen en te recyclen.

#### 4.4 **Aannamen bij de berekeningen**

De gasprijs is in deze studie constant aangenomen. Sinds 1 juli 2004 is de Nederlandse gasmarkt volledig vrijgegeven. Dit betekent dat het iedere marktpartij, zowel energiedistributiebedrijf als eindverbruiker, vrij staat aardgas te kopen van welke aanbieder dan ook. Nieuw zijn de contractvormen op basis van spotmarktindexatie. Vanaf 1 juni 2007 verkoopt GasTerra naast hoogcalorisch gas ook laagcalorisch aardgas voor het jaar 2008 op de TTF (Title Transfer Facility) tegen een TTF-spotmarktindexatie. Hiermee wordt invulling gegeven aan de huidige marktontwikkeling, waarbij naast de conventionele en internationaal nog ruim gehanteerde oliekoppeling en sommige mixvarianten van olie en kolen, er ook een prijs ontstaat op handelsplaatsen die het gevolg is van gas-to-gas concurrentie op de geliberaliseerde markt. Omdat deze prijzen sterk afhangen van het contract van de tuinder met de gasleverancier en het ontbreken van accurate data, is dan ook besloten om deze prijs constant, 24 cent, te nemen voor alle hier berekende situaties.

Op het gebied van emissie-eisen zijn er veel wijzigingen te verwachten. Zo heeft het Europees Parlement ingestemd met een wijziging van het EU- emissiehandelssysteem voor CO<sub>2</sub> in 2013. Alle bedrijven die meer dan 25 kiloton uitstoten of met meer dan 35 megawatt opgesteld vermogen, moeten betalen voor CO<sub>2</sub>. In Nederland zal dit voor 40 tuinders gaan gelden. Voor NO<sub>x</sub> hebben de lidstaten van de Europese Unie (EU) in 2001 afspraken gemaakt over hoeveelheid dat een land in 2010 maximaal mag uitstoten. Dit is vastgelegd in de Europese NEC-richtlijn (NEC staat voor *National Emission Ceilings* oftewel nationaal emissieplafond). Volgens deze richtlijn mag Nederland in 2010 niet meer dan 260 kiloton (260.000.000 kilo) NO<sub>x</sub> uitstoten. Omdat het op dit moment nog niet bekend is wat deze kosten voor de tuinders zullen betekenen, zijn deze in de studie buiten beschouwing gelaten.

## 5 Koppeling HotCO<sub>2</sub> met biogas

### 5.1 HotCO<sub>2</sub> en biogas

Biogas wordt op veel verschillende manieren geproduceerd en komt in veel verschillende kwaliteiten en samenstellingen voor. Biogas kan worden geproduceerd met behulp van mest vergisters (pluimvee, varkens of rundermest) waaraan verschillende producten worden toegevoegd. Reststromen uit de levensmiddelen industrie zoals bierborstel, stoomschillen en bietenpulp. Daarnaast wordt maïs, soja olie en glycerol toegevoegd om de opbrengst te verhogen. Daarnaast kan biogas worden gewonnen bij rioolwater zuivering en vanuit stortplaatsen. Dit is de reden dat de kwaliteit zo varieert.<sup>xv</sup>

#### 5.1.1 *Eigenschappen biogas op HotCO<sub>2</sub> installatie*

De gemiddelde samenstelling van biogas uit fermentatie/vergisting bestaat uit <sup>xvi</sup>:

- brandbaar Methaan (CH<sub>4</sub>), 45-75%;
- onbrandbaar Koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>), 24-45%;
- water (H<sub>2</sub>O), 2-7%;
- Zwavelwaterstof (H<sub>2</sub>S), 20 - 20.000 ppm;
- Stikstof (N<sub>2</sub>), < 2%;
- Zuurstof (O<sub>2</sub>), < 2%;
- Waterstof (H<sub>2</sub>), < 1%.

Biogas kenmerkt zich door een relatief hoog gehalte aan CO<sub>2</sub>. Van de componenten in het biogas, zal zwavelwaterstof de grootste negatieve invloed kunnen hebben. Dit omdat verwacht wordt dat zwavelwaterstof de component is met de hoogste reactiviteit met het koper. Echter, zwavelverbindingen kunnen vrij eenvoudig worden afgevangen tot een gehalte van <2mg/m<sup>3</sup> biogas. Wanneer een jaarlijks gasverbruik wordt aangenomen van 450.000 m<sup>3</sup> komt dit neer op 900 gram zwavel per jaar. 900 gram zwavel kan maximaal 1800 gram koper aantasten. Dit is verwaarloosbaar ten opzichte van de hoeveelheid koper aanwezig in de installatie. Verdere verbindingen die voorkomen in biogas zijn siliciumverbindingen, stikstof en zuurstof. Deze verbindingen zullen geen problemen veroorzaken voor de HotCO<sub>2</sub> installatie. Siliciumverbindingen kunnen zorgen voor neerslag op het koper, maar de hoeveelheden zijn zo klein dat dit de installatie niet merkbaar zal beïnvloeden. Siliciumverbindingen kunnen in motoren voor schade zorgen door afzetting van vast silicium (glasstof) op bewegende delen.

De verbrandingswarmte van biogas is lager dan de verbrandingswarmte van aardgas door de hogere concentratie CO<sub>2</sub>, maar voor het HotCO<sub>2</sub> proces heeft dit geen effect. Het enige verschil zal zijn dat de hoeveelheid gas welke door het bed moet worden geblazen hoger zijn om het bed volledig te reduceren. Daarom zal er in totaal ook meer CO<sub>2</sub> beschikbaar zijn voor de kas, omdat de CO<sub>2</sub> uit het biogas ook beschikbaar is voor de kas.

Biogas wordt nog niet veel gebruikt als alternatief voor aardgas in het aardgasnet. Dit komt mede omdat biogas niet voldoet aan de zogenaamde Wobbe-index. De Wobbe-index is een maat voor de uitwisselbaarheid van verschillende gassen op een bepaalde brander. Indien gassen met eenzelfde Wobbe-index worden toegepast, geven de gassen eenzelfde thermisch vermogen op een gegeven brander. Wanneer niet voldaan wordt aan deze index is de verbranding niet optimaal. Omdat in het HotCO<sub>2</sub> systeem geen vlam aanwezig is, is de Wobbe-index niet van invloed op de prestaties van het systeem.

### 5.1.2 *Economisch perspectief biogas*

Economisch gezien is het interessant om HotCO<sub>2</sub> te gebruiken in combinatie met biogas, juist omdat het hoge CO<sub>2</sub> gehalte geen probleem is. CO<sub>2</sub> hoeft dus niet afgevangen te worden voordat het gas kan worden toegepast in de installatie. Hierdoor kan gas van een relatief lage kwaliteit, alleen ontzwaveld, direct toegepast worden in deze technologie. Dit levert een kostenbesparing op.

### 5.1.3 *Ontwikkeltraject biogas*

De toevoeging van materiaal aan een mest vergister heeft een effect op de kwaliteit van het biogas. Een belangrijke onderzoeksvraag is daarom uit te vinden welk afval uit de kas in welke verhouding het meest wenselijke biogas produceert. Biologisch materiaal dat veel water bevat is minder interessant om toe te voegen aan een mest vergister. Biologisch materiaal dat uit energierijk (koolstofrijk) materiaal bestaat is interessanter. Daarnaast is het voor het HotCO<sub>2</sub> proces van belang om de reducerende eigenschappen van biogas goed te analyseren en het proces daarop te sturen. Het HotCO<sub>2</sub> proces is namelijk in grote mate afhankelijk van de reducerende eigenschappen van het ingaande gas. Wanneer deze niet goed bepaald zijn kan door verkeerde processturing slip optreden van brandstoffen door het metaalbed.

## 6 Conclusies en aanbevelingen

HotCO<sub>2</sub> is een nieuw soort tuinbouwketel waarbij zowel warmte als CO<sub>2</sub> ontkoppeld kan worden geproduceerd op basis van het verbranden van aardgas. Door de ontkoppelde productie van warmte en CO<sub>2</sub>, kan beter op de specifieke energiebehoefte van de tuinder ingegaan worden. Het HotCO<sub>2</sub> proces onderscheidt zich van traditionele energiesystemen op de volgende punten:

- met HotCO<sub>2</sub> kunnen warmte en CO<sub>2</sub> worden ontkoppeld wat interessant kan zijn met het oog op kostenbesparing door verlaging van het gasverbruik;
- emissies van NO<sub>x</sub> en koolwaterstoffen blijven uit wanneer HotCO<sub>2</sub> wordt gebruikt;
- biogas is toepasbaar in het HotCO<sub>2</sub> proces.

Of het HotCO<sub>2</sub> systeem interessant is voor de specifieke tuinder hangt af van veel factoren. Daarom is het belangrijk dat afzonderlijke tuinders zelf hun conclusies trekken aan de hand van dit rapport en resultaten met betrekking tot de ontwikkeling van dit concept in de toekomst. De exacte kostenbesparing hangt onder andere af van: de grootte van de kas, de gewenste hoeveelheid warmte en CO<sub>2</sub> gedurende het jaar, de gasprijs en het aantal dagen dat de tuinder alleen CO<sub>2</sub> of warmte wil kunnen produceren.

De emissies van NO<sub>x</sub> en koolwaterstoffen (o.a. etheen en methaan) van een HotCO<sub>2</sub> installatie worden tot een minimum beperkt. Het CO<sub>2</sub> kan gemakkelijk zuiver worden verkregen waardoor het ingezet kan worden in de kas. Vanwege de hoge zuiverheid van de CO<sub>2</sub> kan deze ook ingezet worden in een distributienet.

De hier gekozen HotCO<sub>2</sub> installatie heeft een omvang van 80 m<sup>3</sup>. Hiermee kan een kas voor 3 weken van CO<sub>2</sub> (50ton CO<sub>2</sub>, 200MWhr thermische energie) worden voorzien zonder dat hiervoor gas verstoekt hoeft te worden. Doordat de installatie uit modules van ongeveer 2,5 m<sup>3</sup> bestaat kan de installatie eenvoudig groter of kleiner gemaakt worden naar gelang de behoefte van de tuinder.

Het gebruik van biogas in de HotCO<sub>2</sub> installatie levert geen principiële bezwaren op. Ondanks dat de lagere calorische waarde een grotere hoeveelheid gas vereist om dezelfde hoeveelheid metaal te reduceren in vergelijking met aardgas, levert het gebruik van biogas een grotere hoeveelheid CO<sub>2</sub> op voor de kas. De zwavel gehalten in het biogas zijn vermoedelijk te laag om het metaalbed aan te tasten. Verder onderzoek is noodzakelijk om de toepasbaarheid van biogas in HotCO<sub>2</sub> aan te tonen.

Vanwege het potentieel dat HotCO<sub>2</sub> biedt is het interessant om het HotCO<sub>2</sub> systeem verder uit te werken tot een demonstratie model. Procesparameters (als deeltjesgrootte, buislengte, etc.) zullen nader moeten worden gespecificeerd. Hiermee kan dan een module gemaakt worden die getest kan worden in reële omstandigheden. Omdat het HotCO<sub>2</sub> systeem bestaat uit modules, zal het opschalen naar een bruikbaar compleet systeem in de praktijk relatief eenvoudig gerealiseerd kunnen worden.

De omvang van het HotCO<sub>2</sub> systeem zal per tuinder verschillen. Het valt aan te bevelen om een rekenmodel te ontwikkelen waarmee de optimale omvang van het HotCO<sub>2</sub> systeem berekend kan worden. De inputvrijheidsgraden van het model zullen dan worden: kosten voor emissies, (gas)contractcondities, omvang van de kas, (piek)energiebehoefte, etc.



## Dankwoord

Wij zouden graag de volgende mensen willen bedanken voor hun bijdrage aan dit onderzoek:

Rik van den Bosch, Vleestomatenkwekerij A + G van den Bosch B.V. uit Bleiswijk, voor informatie over de aardwarmte installatie.

Michel van Binnendijk, Diederik den Hartog, Matthijs Huisman, Massimiliano Quaglia, Etienne Roger van de TU Delft. Als Conceptual Process Design Group 3355 hebben ze gewerkt aan HotCO<sub>2</sub> en het rapport 'Implementation of decoupled production of heat and CO<sub>2</sub> in greenhouses' geschreven.

## Ondertekening

Delft, 15 January 2010  
EHA-PGE-SGI/VBA

TNO Industrie en Techniek

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'S. van der Gijp'.

Dr. S. van der Gijp

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'E. Hagen'.

Ir. E. Hagen

## Referenties

- <sup>i</sup> *Uit: handboek verwarming glastuinbouw, Nutsbedrijf Westland N.V., 1995)*
- <sup>ii</sup> CO<sub>2</sub> bemesting met rookgassen van W/K- gasmotoren, (september 2003), Driebergen-Rijsenburg: Cogen Projects,  
[http://www.tuinbouw.nl/Website/PTcontent.nsf/vwAllOnID/78F628F3D8CDBC14C1256DFA0046CF5A/\\$File/Rookgasreiniging2003.pdf](http://www.tuinbouw.nl/Website/PTcontent.nsf/vwAllOnID/78F628F3D8CDBC14C1256DFA0046CF5A/$File/Rookgasreiniging2003.pdf)
- <sup>iii</sup> Binnendijk, M., Hartog, D., Huisman, M., Quaglia, M., Roger, E. Implementation of decoupled production of heat and CO<sub>2</sub> in greenhouses. CPD group 3355, TU-Delft, 2007
- <sup>iv</sup> [http://www.infomil.nl/legsys/beesb/welkm\\_ix.htm](http://www.infomil.nl/legsys/beesb/welkm_ix.htm)
- <sup>v</sup> <http://www.lei.dlo.nl/publicaties/PDF/2008/2008-019.pdf> – Bijlage B1
- <sup>vi</sup> [http://www.weekbladgroentenenuitvoerers.nl/thema/id2715-18467/dubbele\\_winst\\_door\\_water\\_met\\_een\\_kleurtje.html](http://www.weekbladgroentenenuitvoerers.nl/thema/id2715-18467/dubbele_winst_door_water_met_een_kleurtje.html)
- <sup>vii</sup> Leion, H., Lyngfelt, A., Johansson, M., Jerndal, E., Mattisson, T. The use of ilmenite as an oxygen carrier in chemical-looping combustion. Chemical engineering research and design 86 (2008) 1017-1026
- <sup>viii</sup> Weast, R.C. Handbook of chemistry and physics 57 (1976-1977) D67-D78
- <sup>ix</sup> Raaphorst, M. Optimale teelt in de gesloten kas (2005) Praktijkonderzoek plant & omgeving B.V.
- <sup>x</sup> E. Poot, *et al.* (2008). Richtinggevende toekomstbeelden voor semi-gesloten telen, PT projectnummer 13231  
<http://www.tuinbouw.nl/website/projects.nsf/0/4E83D6884F4420B1C1257413004A7CA5?opendocument&Sector=GenF>
- <sup>xi</sup> [www.mariettaminerals.com](http://www.mariettaminerals.com)
- <sup>xii</sup> [www.dalchem.com.au](http://www.dalchem.com.au)
- <sup>xiii</sup> Dueck, Th.A., van Dijk, C.J., Kemples, F., van der Zalm, T. emissies uit WKK installaties in de glastuinbouw. Wageningen UR nota 505 (2008) p36
- <sup>xiv</sup> Erop of eronder. Uitvoeringsnotitie emissieplafonds verzuring en grootschalige luchtverontreiniging 2003,  
[http://nl.sitestat.com/infomil/infomil/s?infomil.homepage.lucht.stookinstallaties\\_en.nec\\_richtlijn.uitvoeringsnotitie\\_emissieplafonds\\_dec2003pdf1.pdf&ns\\_type=pdf&ns\\_url=%5bhttp://www.infomil.nl/contents/pages/137573/uitvoeringsnotitie\\_emissieplafonds\\_dec2003pdf1.pdf](http://nl.sitestat.com/infomil/infomil/s?infomil.homepage.lucht.stookinstallaties_en.nec_richtlijn.uitvoeringsnotitie_emissieplafonds_dec2003pdf1.pdf&ns_type=pdf&ns_url=%5bhttp://www.infomil.nl/contents/pages/137573/uitvoeringsnotitie_emissieplafonds_dec2003pdf1.pdf)
- <sup>xv</sup> E.A. Polman Analyse van biogassen uit vergistinginstallaties. Senter Novem/Kiwa rapport 2021-07-20-10-009; GT-080142
- <sup>xvi</sup> <http://www.biogas.nl/samenstelling/>