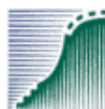


Optimaal gebruik van CO₂ in de glasgroenteteelt



G.L.A.M. Swinkels
H.F. de Zwart



landbouw, natuurbeheer
en visserij



Oktober 2002



Optimaal gebruik van CO₂ in de glasgroenteteelt

G.L.A.M. Swinkels
H.F. de Zwart

IMAG Nota: P 2002-68

PT projectnr: 10930

Oktober 2002

© 2002

Instituut voor Milieu- en Agritechniek (IMAG)

Interne mededeling IMAG. Niets uit deze publicatie mag elders worden vermeld, of vermenigvuldigd op welke wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van IMAG of de opdrachtgever. Bronvermelding zonder de feitelijke inhoud is evenwel toegestaan, op voorwaarde van de volledige vermelding van: auteursnaam, instituut en notanummer en de toevoeging: 'niet gepubliceerd'.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system of any nature, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying or otherwise, without the prior written permission of IMAG.

Voorwoord

CO₂ is in de glastuinbouw behalve een restproduct uit de verbranding van aardgas ook een belangrijke groeibevorderende meststof. In de energiebesparingsproblematiek speelt CO₂ dan ook een zeer complexe rol. Enerzijds vereisen de besparingsdoelstellingen een afname van de CO₂-emissie, maar anderzijds draagt CO₂ bij aan de toename van de productie. Dit laatste is van groot belang voor het bedrijfseconomisch rendement, en speelt een rol in de energie-efficiency index.

Wanneer een CO₂-infrastructuur zou kunnen worden aangelegd, of op een ander manier afval-CO₂ van elders zou kunnen worden benut in de glastuinbouw zou er veel veranderen in de perspectieven van energiebesparende maatregelen. Een van de factoren die de ontwikkeling van deze CO₂-distributie systemen bemoeilijkt is namelijk de onduidelijkheid over het te verwachten afnamevolume in relatie tot de prijs. Anderzijds is ook de individuele tuinder gebaat bij een economisch geoptimaliseerde CO₂-dosering op zijn bedrijf. Met de in voorliggend rapport ontwikkelde programmatuur kan een waardebeoordeling van elke kg extra gedoseerde CO₂ worden gedaan waarmee uiteindelijk op elk tijdstip de optimale CO₂-dosering kan worden bepaald. Met deze ontwikkeling van deze programmatuur kunnen bovengenoemde vragen worden beantwoord.

Het onderzoek en de ontwikkeling van de software zijn gefinancierd door het Ministerie van LNV en het Productschap Tuinbouw in het kader van het GLAMI energieonderzoeksprogramma.

Inhoud

VOORWOORD.....	5
SAMENVATTING	9
1 INLEIDING	10
2 OPTIMALE CO ₂ -DOSERING	11
3 KOSTEN VAN CO ₂ -DOSERING.....	13
3.1 CO ₂ uit rookgas	13
3.2 Zuivere CO ₂	14
3.3 CO ₂ -ventilator.....	14
4 BATEN VAN CO ₂ -DOSERING	15
4.1 Inleiding	15
4.2 De waarde van extra fotosynthese.....	17
4.3 Meerkosten	20
5 IMPLEMENTATIE	21
5.1 Methode.....	21
5.2 Technische uitvoering.....	24
6 BEREKENINGEN	26
7 CONCLUSIES	29
8 KENNISOVERDRACHT EN VERVOLG.....	30
9 LITERATUUR.....	31
BIJLAGE 1 VEILINGPRIJZEN.....	32
BIJLAGE 2 COMMODITY-GASPRIJS VOLGENS HET CDS	32

Samenvatting

Het gebruik van CO₂ biedt de glasgroenteteelt de mogelijkheid de productie aanzienlijk te laten toenemen. Dit gebruik is in veel gevallen gekoppeld aan extra (fossiel) energiegebruik, en brengt meerkosten met zich mee, omdat tijdens het produceren van CO₂ aardgas wordt verstoekt, waarvan de warmte niet altijd nuttig gebruikt kan worden. De kosten van CO₂ zijn nog duidelijker op het moment dat zuivere CO₂ wordt gedoseerd. Tegenover deze meerkosten staan echter ook opbrengsten en volgens algemene economische principes wordt het rendement groter naarmate de meeropbrengsten de meerkosten overtreffen. Het bepalen van de meeropbrengsten is echter niet eenvoudig omdat de relatie tussen CO₂-dosering en opbrengsten beïnvloed wordt door lichtintensiteit, ventilatieverlies, ontwikkelingsstadium van het gewas en de prijs van het te oogsten product.

Het in dit rapport beschreven onderzoek heeft tot doel gehad programmatuur te ontwikkelen, waarmee op grond van de genoemde invloedsfactoren een waardebeoordeling van elke kg extra CO₂ kan worden gemaakt, op basis waarvan de optimale CO₂-dosering kan worden bepaald. Allereerst zijn de kosten voor een kg CO₂ bepaald, voor zowel zuivere als met de ketel geproduceerde CO₂. Daarna zijn door middel van een fotosynthesemodel de extra productie ten gevolge van CO₂-dosering bepaald. Deze productie is op basis van parameters als versgewicht, oogstindex, oogstvertraging en de prijsverwachting vertaald naar extra inkomsten.

Fotosynthesemodellen gaan uit van CO₂-concentraties in de kas, CO₂-kosten zijn gebaseerd op doseringen. De verbindende factor tussen concentratie en dosering is de ventilatie. In dit project is een methode ontworpen en geïmplementeerd, om op basis van globale straling en temperatuurverschil tussen binnen en buiten een goede schatting te maken van deze ventilatie. De ventilatie vormt samen met een aantal door de gebruiker in te vullen parameters de basis van het programma CARBONOMIC. Dit programma berekent de marginale kosten en baten voor een kg extra CO₂ bij elk doseerniveau en bepaalt hiermee de optimale CO₂-dosering.

De in het project verworven kennis geeft belangrijke bouwstenen voor de ontwikkeling van kasklimaatcomputerprogrammatuur waarmee de CO₂-inkoop of -productie door de klimaatcomputer kan worden bestuurd.

1 Inleiding

De behoefte aan CO₂ bij groentegewassen in de glastuinbouw kan als belangrijke belemmerende factor voor de toepassing van energiebesparende maatregelen worden beschouwd. Regelstrategieën of kasconfiguraties waarbij in de zomer nauwelijks nog warmte wordt gevraagd, resulteren immers in een drastische afname van de beschikbaarheid van CO₂ uit rookgas. Aan de andere kant zullen individuele bedrijven over enige jaren in het kader van hun milieuvergunning genoodzaakt zijn hun energieverbruik te verminderen. Het is dus zaak om zorgvuldig met de CO₂-dosering om te gaan. Tevens kan gedacht worden aan een verdere ontwikkeling van de markt voor alternatieve CO₂-bronnen zal ontstaan. Uiteraard zal de omvang van de markt voor CO₂ uit deze alternatieve bronnen sterk afhangen van de prijs daarvan in relatie tot het inkomsteneffect dat deze CO₂ via de extra gewasproductie voortbrengt.

De kostenkant van additionele CO₂ kan door tuinders voor de verschillende bronnen eenvoudig worden opgevraagd (zuivere CO₂, CO₂ uit een distributienetwerk) of uitgerekend (rookgas-CO₂ met warmtevernietiging). De opbrengst is echter veel moeilijker te bepalen.

In de eerste plaats hangt de relatie tussen dosering en concentratie af van het ventilatiedebiet van de kas, en is dus van moment tot moment verschillend. In de tweede plaats hangt de relatie tussen CO₂-concentratie en gewasopname sterk af van de lichtintensiteit, dus ook van moment tot moment verschillend. In de derde plaats hangt de waarde van de assimilaten die met de fotosynthese uit de CO₂ worden gevormd, af van de prijs waarvoor de vruchten bij de oogst kunnen worden verkocht. De waarde van de fotosynthese varieert dus sterk over het jaar.

In voorliggend rapport is een methodologie ontwikkeld waarmee op grond van de relevante condities (buiten- en binnentemperatuur, lichtintensiteit en prijsverwachting) een waardebeoordeling van elke kg extra CO₂ kan worden gemaakt. Deze methodologie is geïmplementeerd in een stuk software waarmee interactief de optimale CO₂-dosering kan worden bepaald als functie van relevante invloedsfactoren.

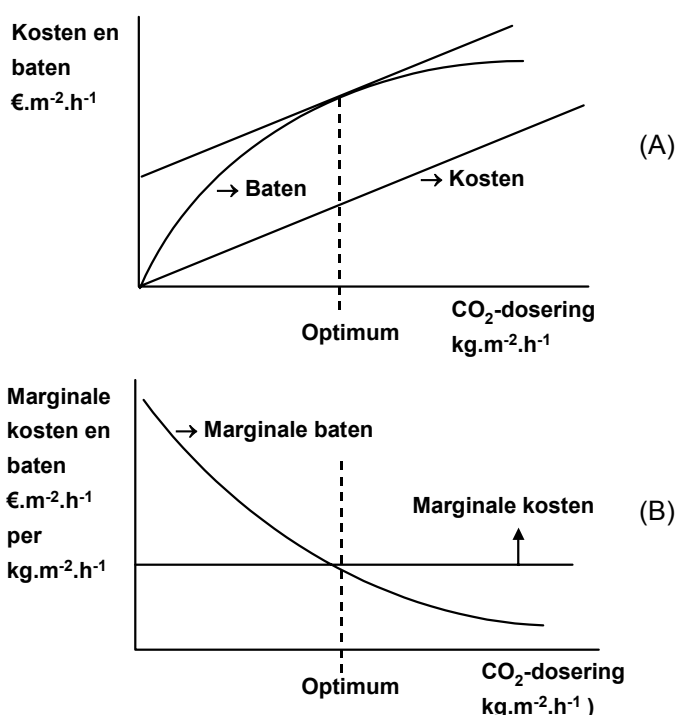
Hierdoor kan worden berekend welke hoeveelheid CO₂ van uur tot uur kosteneffectief kan worden ingezet. Sommatie van de hoeveelheden die bij een gegeven CO₂-prijs van uur tot uur rendabel kunnen worden gedoseerd, resulteert in een jaarverbruik.

De ontwikkelde programmatuur kan een grote bijdrage leveren aan de bewustwording over de waarde van CO₂. Daarmee kan het een belangrijke rol spelen in beslissingen van tuinders over de aanwending van alternatieve CO₂ en in de ontwikkeling van een CO₂ leverings-infrastructuur.

De in het project verworven kennis vormt tevens een aantal bouwstenen waarop kasklimaatcomputerprogrammatuur kan worden ontwikkeld die de aanwending van rookgas- of zuivere CO₂ op economische criteria beoordeelt.

2 Optimale CO₂-dosering

De in dit project ontwikkelde methode voor bepaling van de optimale hoeveelheid gedoseerde CO₂ is gebaseerd op het bedrijfseconomisch basisprincipe dat bij een optimale bedrijfsvoering de marginale opbrengsten gelijk zijn aan de marginale kosten. Normaal gesproken zal een extra kg gedoseerde CO₂ overdag resulteren in een hogere CO₂-concentratie en een extra groei en daardoor extra productie tot gevolg hebben. Bij een bepaalde productprijs zal deze extra productie uiteindelijk voor een extra geldelijke opbrengst zorgen. Aan de kostenkant zal bij een bepaalde CO₂-prijs een extra dosering voor extra geldelijke kosten zorgen. De optimale CO₂-dosering is dan de dosering waarbij de kosten van nog een extra kg CO₂ gelijk zijn aan de extra opbrengst; boven dit niveau levert een hoeveelheid extra gedoseerde CO₂ minder op dan de kosten daarvan en wordt een negatief financieel effect verwacht van extra dosering.



Figuur 2-1 Schematische weergave van optimale CO₂-dosesnelheid als optimum van kosten en baten (A) en marginale kosten en baten (B). De figuur geldt voor betaalde CO₂. Wanneer CO₂ onbeperkt gratis beschikbaar is (bijv. uit rookgassen) is het optimum altijd gelijk aan de dosering waarbij het setpoint voor de CO₂-concentratie bereikt wordt.

De gegeven definitie is gebaseerd op kosten voor het produceren of inkopen van CO₂ voor CO₂-dosering. Dit is het geval wanneer ingekochte zuivere CO₂-gedoseerd wordt of wanneer CO₂ uit ketelrookgas gedoseerd wordt, waarbij de vrijgekomen warmte niet nuttig kan worden gebruikt. In het andere geval, bij een warmtevraag van de kas of bij het vullen van de warmtebuffer, is de CO₂ een bijproduct van de nuttige productie van warmte, dus gratis of vrijwel gratis. Door optimalisatie kan op basis van de niet-gratis

CO₂ de optimale gift bepaald worden. Is deze hoger dan de beschikbare hoeveelheid gratis CO₂ dan wordt aanvullend zuivere CO₂ of CO₂ uit rookgas gedoseerd, waarbij in het laatste geval de warmte vernietigd wordt. Ligt de optimale hoeveelheid lager dan de beschikbare hoeveelheid gratis CO₂ dan wordt altijd alle gratis CO₂ gedoseerd zolang de grenzen van schadelijke concentraties niet worden bereikt.

Hierboven is de optimale CO₂-gift gedefinieerd als de gift waarboven de extra opbrengsten van dosering niet meer opwegen tegen de extra kosten. Om deze gift te bepalen moeten deze kosten en geldelijke opbrengsten van CO₂-dosering dus bekend zijn. De kosten voor een kg gedoseerde CO₂ zijn eenvoudig te berekenen, de baten van deze gedoseerde kg CO₂ zijn echter veel moeilijker te bepalen. In hoofdstuk 3 worden de kosten en in hoofdstuk 4 de baten uitgewerkt.

3 Kosten van CO₂-dosering

3.1 CO₂ uit rookgas

De kosten van CO₂ uit rookgas gaan een rol spelen vanaf het moment dat de door de ketel geproduceerde warmte vernietigd moet worden. Dit is noodzakelijk als er geen warmtevraag is en de warmtebuffer vol is of niet aanwezig. In het andere geval is de beschikbare CO₂, afgezien van de elektriciteitskosten voor de CO₂-ventilator, gratis.

De kosten voor CO₂ uit rookgas zijn rechtstreeks gekoppeld aan de gasprijs. Hiervoor kan het commodity-gedeelte van de gasprijs gehanteerd worden mits de contractcapaciteit bij CO₂-doseren niet wordt overschreden. Deze is namelijk ook in de zomer bepalend voor de maximale hoeveelheid af te nemen aardgas. Als de contractcapaciteit wel wordt overschreden, wordt het berekenen van de optimale CO₂-gift erg moeilijk, omdat dan rekening gehouden moet worden met de regelgeving rond het CDS-systeem. Zo kan met het opnemen van uurflexibiliteit in het gascontract, de werkelijk afgenomen hoeveelheid aardgas worden gespreid over het etmaal (virtuele buffer). Ook voorziet het ene contract in iets meer flexibiliteit dan het andere als er meerdere bedrijven op dezelfde hoofdleiding aangesloten zijn. Voor de CO₂-optimalisatiesoftware die in dit project is ontwikkeld, is een vereenvoudiging aangebracht, waarbij de teler zelf zijn maximale CO₂-doseerniveau (in kg CO₂ per ha per uur) invult rekening houdend met zijn contractcapaciteit en eventuele uurflexibiliteit. Op deze manier kan hij voor het berekenen van de CO₂-prijs de commodity-gasprijs gebruiken.

Voorbeeld

Bij een contractcapaciteit van 100 m³ gas per hectare per uur zal in het geval van uurflexibiliteit bijvoorbeeld incidenteel 180 m³ gas.ha⁻¹.h⁻¹ afgenomen mogen worden. De CO₂-ventilator zal in combinatie met de CO₂-branderstand gedimensioneerd kunnen zijn op maximaal 150 m³.ha⁻¹.h⁻¹ zodat met gebruikmaking van uurflexibiliteit de 'virtuele' contractcapaciteit van 180 m³ niet overschreden wordt. Bij het verbranden van één m³ aardgas komt 1.78 kg CO₂ vrij zodat de CO₂-doseercapaciteit in kilo's op 276 kg.ha⁻¹.h⁻¹ komt. Bij een commodity-gasprijs van € 0.12 per m³ zal een kg CO₂ bijna 7 Eurocent kosten. Dit is exclusief de elektriciteitskosten van de CO₂-ventilator.

3.2 Zuivere CO₂

Wanneer geen mogelijkheid bestaat additionele CO₂ met de ketel te produceren zal (zuivere) CO₂ ingekocht moeten worden. De prijs van ingekochte CO₂ hangt af van de leverancier en varieert tussen de 10 en 15 Eurocent per kg (KWIN, 1998). Naast de commodity-prijs moet ook rekening gehouden worden met een investering voor een CO₂-opslagtank, regelpaneel en leidingen tot aan de kas. Deze kosten hangen af van de grootte van de tank en bedragen ca. 200 Euro/mnd voor een 3000 liter tank (KWIN, 1998). Omdat dit vaste kosten zijn hebben deze geen invloed op het optimalisatieproces waarmee de gift van uur tot uur wordt berekend.

Wanneer wel additionele CO₂ geproduceerd kan worden met de ketel (waarbij de warmte afgelucht wordt) zal de prijs van zuivere CO₂ altijd lager moeten zijn dan de kosten voor CO₂ uit rookgas.

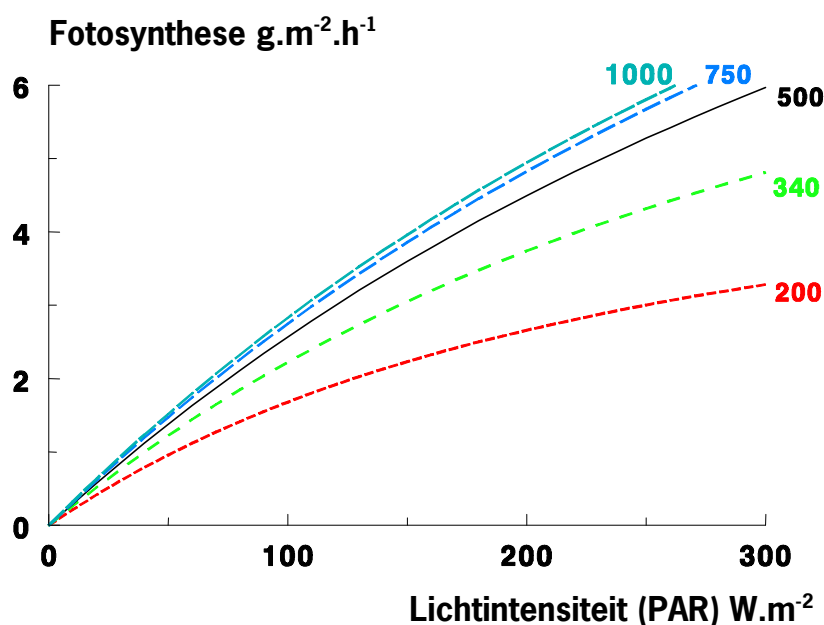
3.3 CO₂-ventilator

De elektriciteitskosten van de CO₂-ventilator bedragen in de regel nog geen 3% van de kosten van bijvoorbeeld zuivere CO₂, zodat deze verder buiten beschouwing worden gelaten.

4 Baten van CO₂-dosering

4.1 Inleiding

In samenwerking met de leerstoelgroep Tuinbouwproductieketens (HPC) van het departement Plantenwetenschappen van Wageningen UR is een methode uitgewerkt waarmee de assimilatenproductie kan worden uitgedrukt in termen van versgewicht en financiële waarde. Deze methode begint bij het basisproces voor de groei en productie van groene planten: fotosynthese. Dit is het proces waarbij met behulp van licht koolzuurgas uit de lucht wordt omgezet in suikers in de plant. CO₂ wordt vastgelegd door het enzym ribulose-1,5-bisfosfaatcarboxylase-oxygenase (Rubisco). Dit enzym is niet selectief in het binden van CO₂. Het kan ook zuurstof binden, en wanneer dit gebeurt, komt er juist CO₂ vrij, de zogenaamde fotorespiratie.



Figuur 4-1 Invloed van licht en CO₂ (in ppm) op de gewasfotosynthese

Verhoging van de CO₂-concentratie in de kaslucht geeft een hogere fotosynthesesnelheid, omdat koolzuurgas het substraat is voor de fotosynthesereactie

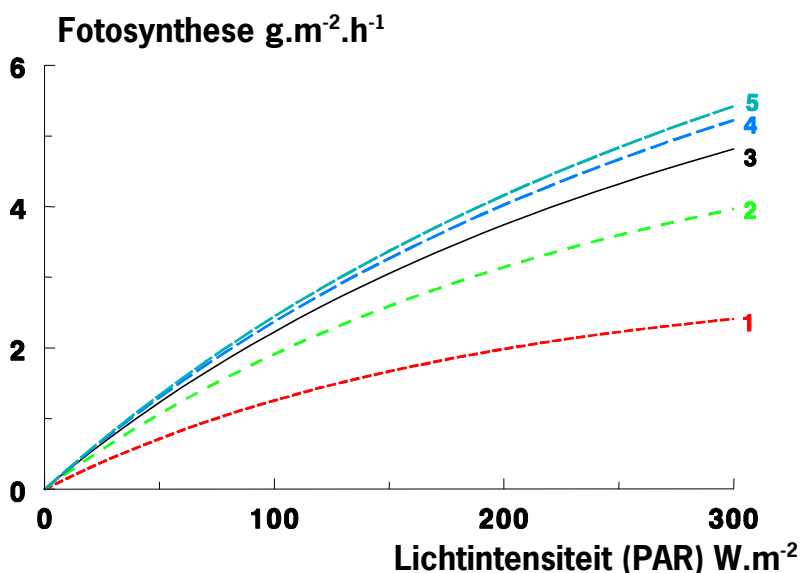


en omdat CO₂ de fotorespiratie onderdrukt. De fotosynthese vertoont een verzadigingsrespons op CO₂, naarmate de CO₂-concentratie hoger wordt neemt het extra effect steeds verder af. Rond de buitenluchtwaarde (360 ppm) is het effect van de CO₂-concentratie op de fotosynthese groot, terwijl concentraties boven 1000 ppm CO₂ nauwelijks nog bijdragen aan extra fotosynthese.

De invloed die CO₂ heeft op de fotosynthesesnelheid van een gewas is van veel factoren afhankelijk, zoals de hoeveelheid Photosynthetic Active Radiation (PAR), het licht tussen 400 en 700 nm (Figuur 4-1), de gewasomvang (gewasfase), en in mindere mate de temperatuur van het gewas.

De absolute toename in fotosynthesesnelheid als gevolg van een hogere CO₂-concentratie in de kaslucht is groter bij meer PAR (Figuur 4-1). De relatieve toename in fotosynthesesnelheid als gevolg van een hogere CO₂-concentratie is echter zowel bij veel als bij weinig licht ongeveer gelijk. De fotosynthesesnelheid is ongeveer 30% hoger bij 1000 ppm CO₂ dan bij 350 ppm CO₂ in de kaslucht. De opvatting dat CO₂-doseren bij weinig licht geen zin heeft, omdat de factor licht dan in het minimum verkeert en de productie beperkt, is niet juist. Deze is gebaseerd op de misvatting dat maar één factor 'in het minimum' kan zijn. In de winter zijn echter bij weinig licht en daarbij geen CO₂-dosering zowel de lage lichtintensiteit als de CO₂-concentratie beperkend voor de gewasgroei en productie.

De meeropbrengst, die verkregen wordt door CO₂-dosering, is afhankelijk van de gewasomvang, de bladoppervlakte-index (LAI). Dit is de hoeveelheid bladoppervlak van een gewas (alleen de bovenzijde in m²) per teeltoppervlak (in m²). Een jong gewas heeft een lage fotosynthese, omdat nog lang niet al het licht door het gewas wordt onderschept. Bij zo'n gewas zal het absolute effect van CO₂-dosering dus geringer zijn dan bij een gewas dat bijna al het licht onderschept. In de jonge gewasfase is dan ook vooral de mate van lichtonderschepping bepalend voor de groei. Bij een LAI van 2.5 tot 3 wordt vrijwel al het licht onderschept (85-90%) en daardoor is de gewasfotosynthese dan dus veel hoger dan voor een jong gewas (Figuur 4-2). De extra gewasgroei en productie als gevolg van CO₂-dosering zal daardoor dan ook veel groter zijn.



Figuur 4-2 Invloed van lichtintensiteit en bladoppervlakte-index LAI (m²/m², oplopend van 1 tot 5) op de gewasfotosynthese

De effecten van temperatuur op gewasgroei en productie zijn zeer groot, maar de effecten op gewasfotosynthese zijn binnen de range 17-23°C voor gewassen als tomaat en komkommer erg gering. Pas bij hogere of lagere temperaturen neemt de gewasfotosynthese af.

4.2 De waarde van extra fotosynthese

Om optimaal gebruik te kunnen maken van CO₂ in de glasgroenteteelt moeten telkens kosten en baten afgewogen worden. In deze paragraaf wordt aangegeven hoe de financiële waarde van een eenheid extra fotosynthese bepaald kan worden.

We moeten onderscheid maken tussen een jong gewas en een producerend gewas. Bij een jong gewas zal het doel van een teler vooral zijn om het bladoppervlak (LAI), en daarmee het lichtonderscheppend vermogen, te doen toenemen. De uit CO₂-dosering voortvloeiende extra fotosynthese leidt tot toename in droog- en versgewicht met al gevolg vooral het versneld in productie raken ('vroegheid' van het gewas). In deze fase is er niet of nauwelijks direct effect op hoeveelheid oogstbaar product, wel indirect via vervroeging, waardoor een mogelijke verlenging van de totale productiefase optreedt. De economische waarde van het versneld bereiken van de productiefase is moeilijk in zijn algemeenheid aan te geven. Deze hangt bijvoorbeeld sterk samen met het al dan niet bereiken van de door de tuinder beoogde doelstellingen met betrekking tot specifieke oogsttijdstippen. Het is wel goed mogelijk om economische waarde toe te kennen aan het verlengen van de productiefase.

Als een gewas eenmaal in productie is, komt de toename in droog- en versgewicht tot uitdrukking in een toename van de hoeveelheid oogstbaar product (vruchtgroenten) en/of een vervroeging van het oogsttijdstip (bladgewassen, radijs). Aan de toename van hoeveelheid oogstbaar product is op basis van prijs(-verwachting) een economische waarde toe te kennen. In de methodieken voor de bepaling van de optimale CO₂-dosering in dit rapport, is geen rekening gehouden met het versneld bereiken van de productiefase. De methodiek gaat uit van een gewas dat al in productie is.

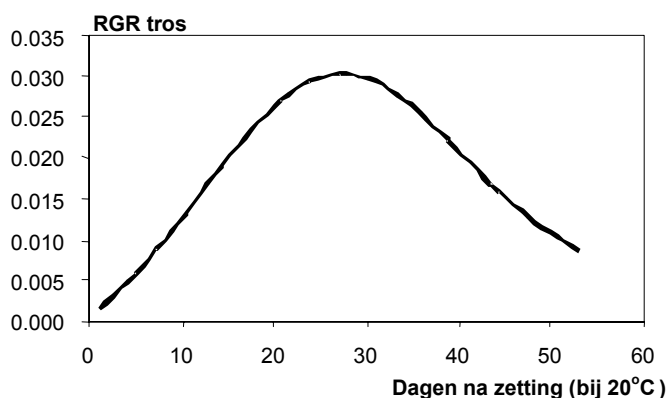
Om de financiële waarde van één eenheid extra fotosynthese te kunnen bepalen, zullen we moeten vaststellen tot hoeveel extra productie, bijvoorbeeld kilogrammen tomaten, deze eenheid extra fotosynthese aanleiding geeft en welke prijs dit oplevert. Als de fotosynthese uitgedrukt wordt als opnamesnelheid voor koolzuurgas (g.m².h⁻¹), dan is de eerste stap op weg naar het berekenen van de uiteindelijke hoeveelheid oogstbaar product, het omzetten van deze CO₂ naar suikers (C₆H₁₂O₆). Hiertoe dient met 30/44 te worden vermenigvuldigd (de gewichtsverhouding tussen 1 mol C₆H₁₂O₆ en 6 mol CO₂). Vervolgens worden deze suikers omgezet in structurele drogestof (biomassa), want de vaste componenten van een plant bestaan voor het grootste deel uit andere 'stoffen' dan suikers, zoals bijvoorbeeld oliën, vetten, aminozuren en lignine. De omzettingsefficiëntie hierbij is voor gewassen als tomaat, paprika en komkommer ongeveer 0.7, hetgeen betekent dat 1 gram suikers ongeveer 0.7 gram drogestof oplevert. Verrekenen met deze factor geeft dan de groeisnelheid van het gewas als geheel.

De geldwaarde van deze totale groei wordt bepaald door het aandeel hiervan dat uiteindelijk in de economisch belangrijke delen terechtkomt, zoals de vruchten bij tomaat en paprika. Deze zogenoemde oogstindex (HI) bedraagt voor tomaat en komkommer ongeveer 0.7. Dat wil dus zeggen dat van de totale groei 70% in de vruchten

terecht komt en 30% in de vegetatieve delen. Vervolgens moet deze toename in vruchtdrooggewicht worden omgerekend naar een versgewichttoename, want dat is hetgeen dat economische waarde heeft. Om de versgewichttoename te kunnen bepalen is het drogestofgehalte van belang. Het drogestofgehalte kan sterk variëren, afhankelijk van de teeltwijze en het seizoen. Voor komkommer bedraagt het drogestofgehalte circa 3.5% hetgeen betekent dat dan 1 g toename in vruchtdrooggewicht 28.6 g toename in versgewicht als gevolg heeft.

De laatste stap is dan het vermenigvuldigen van een extra verkregen hoeveelheid vruchtversgewicht met een prijs per eenheid versgewicht om zo de financiële waarde te bepalen. De extra vruchtgroei komt zowel in vruchten terecht die bijna oogstbaar zijn, als ook in vruchten die pas kortgeleden aangelegd zijn. Het grootste deel gaat echter naar de vruchten die op het moment van de extra fotosynthese het hardst groeien en dat zijn de vruchten die ongeveer halverwege de uitgroei duur zijn (Figuur 4-3). We hanteren derhalve als prijsniveau de verwachte opbrengstprijs op het tijdstip dat de halve uitgroei duur verderop in de tijd gelegen is. Voor tomaat bij 20°C bedraagt de vruchtuitgroei duur circa 55 dagen, zodat we het prijsniveau kunnen hanteren dat op dag 27 vanaf het moment van extra fotosyntheseproductie verwacht wordt.

Een andere mogelijkheid zou zijn om de opbrengstprijs te bepalen als een gewogen gemiddelde van opbrengstprijzen over de komende 55 dagen. Als wegingsfactor nemen we dan de dagelijkse groeisnelheid van een vrucht, als fractie van de totale groei van deze vrucht gesommeerd over de uitgroei duur (Figuur 4-3).



Figuur 4-3 Dagelijkse groeisnelheid van tomatenvrucht, relatief t.o.v. totale groei van een vrucht. Tevens weegfactor om opbrengstprijs van extra vruchtgroei te bepalen

In formulevorm ziet de berekening zoals hiervoor toegelicht er als volgt uit:

$$\Delta E = \alpha \times 0.68 \times \Delta P_g \times HI / DMC \times \text{prijs}$$

met:

ΔE	financiële waarde van ΔP_g extra fotosynthese	(€·m ² ·h ⁻¹)
α	conversie-efficiëntie (g structurele droge stof g ⁻¹ CH ₂ O)	
0.68	conversiefactor omrekening van 6CO ₂ naar C ₆ H ₁₂ O ₆ (=30/44)	
ΔP_g	extra fotosynthese als gevolg van CO ₂ dosering in de kas (g·m ² ·h ⁻¹)	

- HI harvest index; fractie van de totale gewasgroei die in de oogstbare delen terechtkomt
- DMC dry matter content; fractie drogestof in het versgewicht van de oogstbare delen
- Prijs opbrengstprijis van 1 g extra versgewicht oogstbare delen (€·g⁻¹ vers)
(er wordt in dit geval dus uitgegaan van vaste relatie tussen gewicht en prijs)

Een voorbeeld met kengetallen voor komkommer:

We berekenen de financiële waarde van 1 gram extra fotosynthese (1 g extra CO₂-opname per m² per uur)

- $\Delta P_g = 1$
- conversie-efficiëntie C₆H₁₂O₆ naar structurele droge stof (α) bedraagt 0.7
- omrekening van 6CO₂ naar C₆H₁₂O₆ (0.68=30/44)
- harvest index (HI) = 0.7 (aandeel van de geproduceerde droge stof dat ten goede komt aan de vruchten)
- drogestofgehalte komkommervrucht is 3.5 %; DMC=0.035
- prijs van 1 g versgewicht is € 0.00068 (€ 0.68 per kg vers, KWIN, 2001)

De financiële waarde van 1 gram extra fotosynthese wordt nu dus:

$$0.7 \times 1 \times 30/44 \times 0.7 / 0.035 \times 0.00068 = \text{€ } 0.00647$$

Bij een extra fotosynthesesnelheid voor een hectare kas van 10 kg CO₂-opname per uur, betekent dat een financiële waarde voor deze fotosynthese (extra opbrengst) van € 64,70 per ha per uur.

De financiële waarde van 1 g product, gebaseerd op gemiddelde veilingprijzen over 1997-1999 (KWIN, 2001), varieert van slechts € 0.00043 voor Chinese kool tot € 0.00177 voor rode paprika (Tabel 4-1). De verschillen in financiële waarde van 1 g extra fotosynthese zijn minder groot, omdat rode paprika door het hogere drogestofgehalte van de vruchten (8.5% tegenover 4.5% voor krop Chinese kool), per eenheid opgenomen CO₂ een lager (vrucht)versgewicht oplevert dan Chinese kool.

Tabel 4-1 Economische waarde van 1 gram extra CO₂-opname

Gewas	Oogstindex (HI)	DMC (%)	Conversie factor	Prijs (€·g ⁻¹) gem. 97-99	Waarde 1g CO ₂ (€·g ⁻¹)
aubergine	0.8	7	5.4	0.00121	0.00659
chinese kool	0.8	4.5	8.5	0.00043	0.00365
komkommer	0.7	3.5	9.5	0.00068	0.00644
paprika (rood)	0.65	8.5	3.6	0.00177	0.00644
radijs (in bos v. 20)*	0.9	5	8.6	0.00117	0.01
sla (krop, zwaar)**	0.85	5	8.1	0.00132	0.01071
tomaat (rond)	0.7	6	5.6	0.00080	0.00446
tomaat (tros)	0.7	6	5.6	0.00130	0.00721

- DMC: percentage drogestof in oogstbare delen (drooggewicht/versgewicht*100)

- prijzen over periode 1997-1999, in € per g vers (KWIN 2001, afgeleid van ct./kg of van ct/stuk)

- conversie factor: gram oogstbaar versgewicht verkregen per gram opgenomen CO₂

- econ. waarde in Eurocent/ gram extra CO₂ opgenomen middels gewasfotosynthese

* aanname gewicht radijs per bos van 20: 210 gram

** aanname kropgewicht sla: 240 gram

4.3 Meerkosten

Naast de geldelijke opbrengsten zijn ook meerkosten aan extra productie verbonden. In samenspraak met Praktijkonderzoek Plant en Omgeving (PPO) is uitgewerkt op welke wijze de extra veiling- en oogstkosten die aan meerproductie vastzitten meegenomen kunnen worden. De kosten van fust, koeling en heffingen kunnen als Euro per kg versproduct worden opgegeven. De extra veilingkosten moeten als percentage van de omzet worden berekend. In de onderstaande tabel zijn voor een aantal gewassen de meest relevante geschatte meerkosten weergegeven.

Tabel 4-2 Overzicht van de geschatte gemiddelde meerkosten bij extra productie

	Arbeid		Fust, Koeling en Heffingen	Veiling
	minuten/100kg	€.kg ⁻¹	€.kg ⁻¹	% van omzet
Trostomaat	40	0.10	0.03	2.75
Vleestomaat	48	0.12	0.03	2.75
Tomaat rond	67	0.17	0.03	2.75
Paprika	85	0.21	0.05	2.75
Komkommer	18	0.05	0.03	2.75

Uitgangspunten:

CO₂ wordt geacht geen invloed te hebben op gewashandelingen als dieven, draaien en bladbreken.

Arbeidsnorm geldt voor een vaste kracht

Arbeidskosten per uur: € 15.00

bron: PPO, 2002.

Naast de kosten uit bovenstaande tabel zijn aan extra productie ook kosten voor extra bemesting verbonden. Volgens KWIN (1999) bedragen de kosten voor bemesting ca. 0.016 €.kg⁻¹. Omdat deze kosten veel lager liggen dan kosten uit bovenstaande tabel zijn ze verder buiten beschouwing gelaten bij het berekenen van de optimale CO₂-doserings in de hoofdstukken 6 en 7. Desgewenst kunnen bijkomende kosten, zoals bemesting, in de gebruikersinterface van het softwareprogramma worden opgenomen.

5 Implementatie

5.1 Methode

Voor het bepalen van de optimale CO₂-gift zijn 6 relaties van belang, waarvan 3 afhankelijk zijn van het kasklimaat. In de eerste plaats hangt de netto-fotosynthese af van de CO₂-concentratie en de lichtintensiteit op gewasniveau (netto straling), welke van moment tot moment verschillend zijn. In de tweede plaats hangt de CO₂-concentratie in de kas af van CO₂-dosering, ventilatie van de kas en de CO₂-opname door het gewas, die ook van moment tot moment verschillen. Als derde is er een correlatie tussen ventilatie en globale straling en het temperatuurverschil tussen binnen en buiten, ook weer van moment tot moment verschillend. In de vierde plaats is de hoeveelheid oogstbaar product afhankelijk van de netto fotosynthese (§ 4.2). In de vijfde plaats hangt de waarde van het oogstbaar product af van de prijs waarvoor de vruchten bij de oogst kunnen worden verkocht (§ 4.2 en 4.3). Ten slotte zijn de doseerkosten afhankelijk van de prijs van CO₂.

Samengevat

de kasklimaat afhankelijke relaties:

- (1) De netto fotosynthese hangt af van de CO₂-concentratie en netto straling
- (2) De CO₂-concentratie hangt af van de CO₂-dosering, ventilatie en de CO₂-opname door het gewas
- (3) De ventilatie is gerelateerd aan de globale straling en het temperatuurverschil

en de kasklimaat onafhankelijke relaties:

- (4) De oogst hangt af van de netto fotosynthese
- (5) De oogstwaarde hangt af van de productprijs
- (6) De doseerkosten hangen af van de prijs van CO₂.

Omdat relatie (3) alleen te formuleren is in samenhang met alle relevante klimatologische grootheden, is de ventilatie alleen met een dynamisch simulatiemodel te berekenen. Om voor een bepaalde combinatie van globale straling en temperatuurverschil de bijbehorende ventilatie te kunnen bepalen is met het simulatiemodel KASPRO een tabel (VENTILATIETABEL in Figuur 5-1) gegenereerd waaruit de ventilatie kan worden onttrokken. Dit is gedaan door op basis van het SEL-jaar¹ een dataset te genereren waarvan alle voorkomende globale stralingsniveaus en temperatuurverschillen opgedeeld zijn in categorieën met bijbehorende ventilatie. De ventilatie in een kas is een geregelde grootheid en is daarom, zolang de ramen geopend zijn en de maximum raamstand niet bereikt wordt, onafhankelijk van de windsnelheid. Wanneer de ramen maximaal geopend zijn wordt de ventilatie namelijk niet meer geregeld maar bepaald door het temperatuurverschil en de windsnelheid. Wanneer de ramen gesloten zijn wordt de ventilatie volledig bepaald door de lekventilatie, die windsnelheidsafhankelijk is. Om deze reden wordt in de ventilatietabel de ventilatie exclusief de lekventilatie opgeslagen.

Met de fotosynthesemodule van KASPRO zijn tevens berekeningen uitgevoerd, waarbij voor een reeks verschillende globale stralingsintensiteiten en CO₂-concentraties de

¹ Het SEL-jaar is een set van weergegevens, die representatief zijn voor het weer in Nederland, specifiek samengesteld voor simulatieberekeningen voor de Nederlandse glastuinbouw (Breuer en Van de Braak, 1989).

bijbehorende netto fotosynthese bepaald is. Deze gegevens zijn opgeslagen in een tabel (PRODUCTIETABEL_PPM in Figuur 5-1) en hiermee is relatie (1) vastgelegd. Deze fotosynthesetabel wordt o.a. gebruikt voor het bepalen van de CO₂-opname in relatie (2) die kan worden beschreven door de balans:

$$\text{dosering} = \text{ventilatie} \times (\text{concentratie}_{\text{binnen}} - \text{concentratie}_{\text{buiten}}) \times 1.83\text{E-}6 + \text{opname} \quad [1]$$

Waarbij de dosering en opname in kg.s⁻¹, de ventilatie in m³.s⁻¹ en concentraties in ppm zijn uitgedrukt.

Wanneer globale straling en temperatuurverschil bekend zijn kan de bijbehorende ventilatie uit de VENTILATIETABEL gehaald worden en ook ingevoerd in relatie (2), waardoor een relatie ontstaat tussen CO₂-concentratie en dosering. Op deze manier kan door vervanging van de CO₂-concentratie in de PRODUCTIETABEL_PPM een nieuwe tabel gemaakt worden met een verband tussen netto fotosynthese, netto straling en dosering (PRODUCTIETABEL_DOS in Figuur 5-1). Bij dezelfde netto straling ontstaat zo de gezochte relatie tussen dosering en netto fotosynthese. Met (4) en (5) en (6) kan uiteindelijk de marginale waarde van een kg gedoseerde CO₂ berekend worden. In nevenstaande figuur is de berekeningsmethodiek grafisch weergegeven.

Bedrijfsspecifieke tabel

De ventilatiefluxen in de ventilatietabel zijn gegeven als functie van inkomende globale straling en temperatuurverschil tussen binnen en buiten. Het verschil tussen de inkomende globale straling en de straling in de kas wordt bepaald door de lichttransmissie van de kas voor diffuus en direct licht, waarbij de transmissie voor direct licht weer afhankelijk is van o.a. de oriëntatie van de kas. De hoeveelheid warmte die bij een bepaalde stralingsintensiteit afgevoerd moet worden, hangt af van de temperatuur in de kas die o.a. afhangt van het gewas (verdamping) en gewasstadium (Leaf Area Index: LAI).

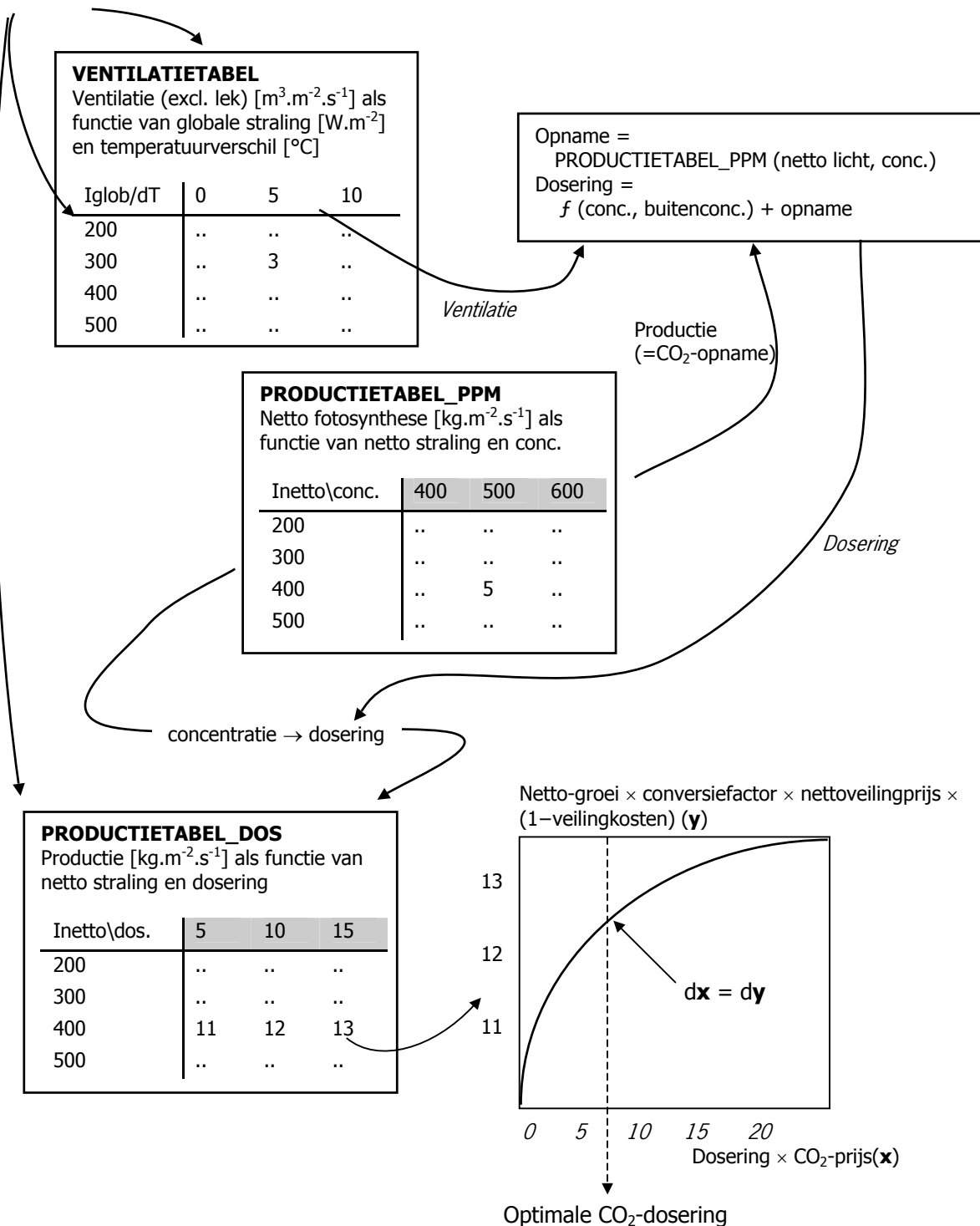
Uit bovenstaande blijkt dat de ventilatietabel specifiek is voor een bepaalde kas met een bepaald gewas in een bepaald teeltstadium. Bovendien is het zo dat de tabel gemaakt is op basis van het SEL-jaar (standaard Nederlands jaar), waardoor in de praktijk altijd afwijkende (meer extreme) condities kunnen optreden. Hierdoor bevat de ventilatietabel in eerste instantie "gaten" op bepaalde combinaties van temperatuurverschil en straling, bijvoorbeeld bij grote temperatuurverschillen in combinatie met hoge stralingsniveaus.

Om in een praktijksituatie de tabel enerzijds specifiek te maken voor een bepaalde kas en teeltstadium en anderzijds de ontbrekende waarden aan te kunnen vullen, kan de tabel worden geactualiseerd op basis van metingen uit het verleden. De ventilatie (inclusief lekventilatie) wordt dan bepaald op basis van de gemeten CO₂-dosering en CO₂-concentratie volgens onderstaande balans:

$$\text{ventilatie} = (\text{dosering} - \text{opname}) / (\text{concentratie}_{\text{gemeten}} - \text{concentratie}_{\text{buiten}}) \times 1.83\text{e-}6 \quad [2]$$

waarbij de opname gevonden wordt in de productietabel (PRODUCTIETABEL_PPM) op basis van de globale straling en de CO₂-concentratie. Van deze berekende ventilatie wordt de lekventilatie (berekend op basis van windsnelheid) afgetrokken alvorens opgeslagen te worden in de ventilatietabel.

Licht- en temperatuurmeting



Figuur 5-1 Grafische weergave van de berekeningsmethodiek voor bepaling van de optimale CO₂-dosering.

5.2 Technische uitvoering

In deze paragraaf wordt de procedure in de optimalisatiemodule van CARBONOMIC beschreven bij berekening van de optimale dosering op tijdstip t_0 :

Bekend zijn de volgende parameters:

Algemeen	<i>Type gewas</i> <i>Maximaal toelaatbare CO₂-concentratie, ppm</i>
Meting	<i>Globale straling, W.m²</i> <i>Kasluchttemperatuur, °C</i> <i>Buitemtemperatuur, °C</i> <i>Windsnelheid, m.s⁻¹</i> <i>CO₂-doseersnelheid, k.ha⁻¹.h⁻¹</i> <i>CO₂-concentratie, ppm</i>
Kasspecifiek	<i>Windsnelheidsafhankelijke lekventilatie, m³.m⁻².s⁻¹ per m.s⁻¹</i> windsnelheid. Deze kan eventueel bepaald worden door tijdens de teeltwisseling met gesloten ramen o.b.v. de actuele windsnelheid, de CO ₂ -doseersnelheid en de CO ₂ -concentratie met behulp van balansvergelijking 2 de ventilatie te bepalen en te delen door de windsnelheid. <i>Lichttransmissie van de kas, -</i> <i>Maximale CO₂-doseercapaciteit, kg.ha⁻¹.h²</i>
Prijzen en kosten	<i>De prijs van additionele CO₂, €.kg⁻¹</i> . Dit kunnen de kosten voor het produceren van CO ₂ met de ketel zijn maar ook de prijs van zuivere CO ₂ . <i>De productprijzen</i> geldend voor 4 weken na t_0 , €.kg ⁻¹ . Tijdens de optimalisatie wordt gerekend met deze productprijzen. <i>Meerkosten</i> die optreden bij meerproductie, €.kg ⁻¹ of percentage van de omzet. Dit kunnen arbeidskosten, heffingen, kosten voor extra fust en opslag en veilingkosten zijn. De meerkosten worden in mindering gebracht op de productprijzen. Uiteraard zullen de meerkosten nooit hoger zijn dan de productprijzen.

Op basis van bovenstaande waarden gebeurt het volgende:

Lekventilatie	Op basis van de windsnelheidsafhankelijke lekventilatie en de windsnelheid wordt de lekventilatie uitgerekend.
Netto straling	Op basis van de globale straling en de transmissiefactor van de kas wordt de netto straling op gewasniveau uitgerekend.
Ventilatie	Op basis van de combinatie van netto straling en temperatuurverschil tussen binnen en buiten wordt in de VENTILATIETABEL de bijbehorende ventilatie (excl. lek) opgezocht. Wanneer de tabel geen waarde bevat bij de gegeven combinatie wordt de ventilatie (incl. lek) uitgerekend op basis van

	vergelijking [2]. De berekende ventilatie wordt dan, na verminderen met de lekventilatie, ingevuld voor de ontbrekende waarde in de VENTILATIETABEL.
Productie	Van de PRODUCTIETABEL_PPM worden de kolommen die horen bij CO ₂ -concentraties, die hoger zijn dan de maximaal toelaatbare concentratie, verwijderd. Op basis van de eerder berekende ventilatie en de netto straling worden de resterende CO ₂ -concentraties vervangen door de bijbehorende doseringen waardoor de PRODUCTIETABEL_DOS ontstaat. De netto straling is nodig voor het berekenen van de CO ₂ -opname in de balansvergelijking [1].
Doseringen en oogst	Door uit de PRODUCTIETABEL_DOS de producties te nemen die horen bij de berekende netto straling ontstaat een verband tussen dosering en productie in kilogrammen. Na vermenigvuldiging van de productiewaarden met de conversiefactor uit Tabel 4-2 worden de producties naar kg oogst geconverteerd. Door de doseringen en oogstwaarden in kg te vermenigvuldigen met de CO ₂ -prijs respectievelijk productprijs.
Optimale dosering	De hierboven beschreven relatie tussen dosering en oogst in Euro's wordt geconverteerd naar marginale (doseer)kosten in relatie met marginale (oogst)opbrengsten. Hierna wordt de dosering gezocht waarbij de marginale kosten gelijk zijn aan de marginale opbrengsten waarbij rekening gehouden wordt met de maximale CO ₂ -doseercapaciteit.

Initiële tabel

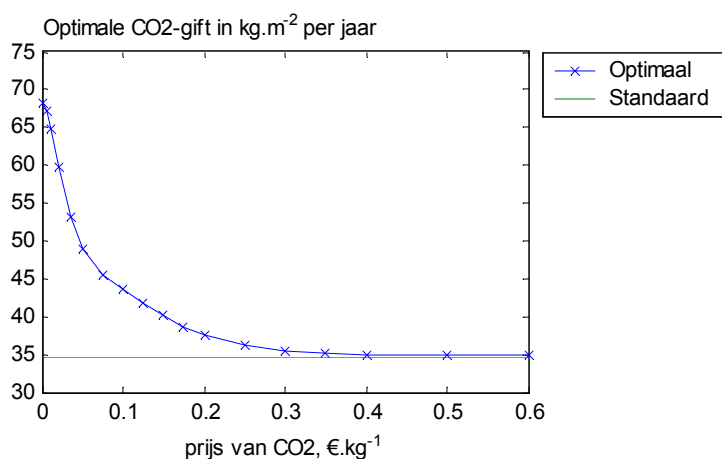
In CARBONOMIC is per gewas een initiële ventilatietabel beschikbaar die samengesteld is op basis van berekeningen van KASPRO. Dit model houdt rekening met de karakteristieken van een moderne tuinbouwkas. Uitgangspunten zijn een enkelglas Venlo-kas met hoge lichtdoorlatendheid en een klimaatregeling zoals die in de praktijk gangbaar is. De standaard kas heeft een goothoogte van 4.5 m, een dakhelling van 22°, een lekventilatie van $1.2E-4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ per m^2 kas en per $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ windsnelheid en is Noord-zuid georiënteerd. De LAI van het gewas is 3.

6 Berekeningen

Voor een standaard tomatenteelt is op basis van de volgende uitgangspunten de relatie tussen de kosten voor CO₂ en de optimale CO₂-gift bepaald:

- weersgegevens volgens het SEL-jaar
- de productprijzen uit Bijlage 1
- de meerkosten voor arbeid zijn € 0.17 per kg, voor fust, opslag en heffingen € 0.03 per kg en voor veiling 2.75% van de geldelijke omzet
- de HI is 0.7
- de DMC is 6 %
- hiermee komt de conversiefactor op 5.57
- de maximale doseercapaciteit is 250 kg CO₂ per ha per uur
- de maximaal toelaatbare CO₂-concentratie is 1200 ppm
- de lichttransmissie van de kas is 75 %
- de standaardgift is berekend op 35 kg CO₂ per m² kas per jaar

In Figuur 6-1 is de optimale CO₂-gift uitgezet tegen de prijs van CO₂. De standaardlijn in deze figuur geeft de hoeveelheid CO₂ aan die een tuinder zou kunnen geven zonder warmtevernietiging (dit is weinig omdat uitgegaan wordt van energiezuinige kasklimaat instellingen). Naast een logische afname van de gift bij oplopende CO₂-prijs kan uit de figuur kan geconcludeerd worden dat bij een doseercapaciteit van 250 kg.ha⁻¹.h⁻¹, de maximaal haalbare dosering 68 kg.m⁻².ha⁻¹ is. Bij een standaarddosering van 35 kg.m⁻² per jaar wordt additioneel 68 - 35 = 33 kg.m⁻² per jaar gegeven. Dit komt overeen met 18.5 m³ gas.

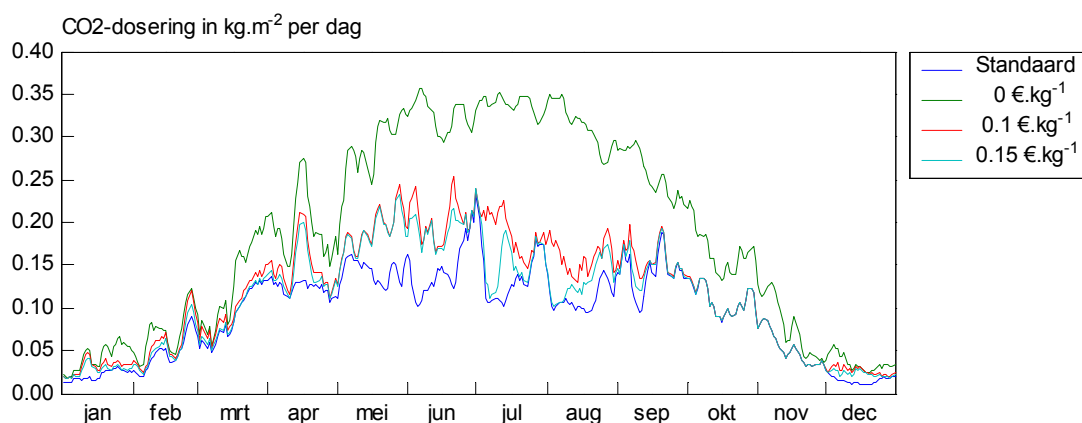


Figuur 6-1 Jaarlijkse additionele CO₂ bij oplopende CO₂-prijs voor een tomatenteelt met een maximale doseercapaciteit van 250 kg.ha⁻¹.h⁻¹ en een bovengrens van 1200 ppm.

Bij CO₂-productie middels warmtevernietiging, op basis van reële CO₂-kosten van 5.8 Eurocent per kg (commodity gasprijs van € 0.1034 per m³, zie Bijlage 2), is de optimale gift 47 kg per m² kas per jaar bij een standaardgift van 35 kg. Bij deze prijs is het dus bedrijfseconomisch verantwoord om 12 kg CO₂ additioneel te doseren. Met het gegeven dat bij 1 m³ gas 1.78 kg CO₂ vrijkomt, komt dit overeen met 6.7 m³ gas. Bij deze

gasprijs is het in dit geval dus verantwoord om de vrijgekomen warmte van bijna 7 m³ gas te vernietigen en de vrijgekomen CO₂ uit de rookgassen te doseren. De figuur laat tevens zien welke hoeveelheid CO₂ verkocht zou kunnen worden indien tuinders zouden zijn aangesloten op een CO₂ distributie netwerk. Uiteraard zou deze CO₂ goedkoper moeten zijn dan 5.8 Eurocent per kg omdat tuinders de CO₂ in dat geval gewoon met hun ketel produceren (tenzij dit onmogelijk zou zijn in verband met de AMvB-maxima).

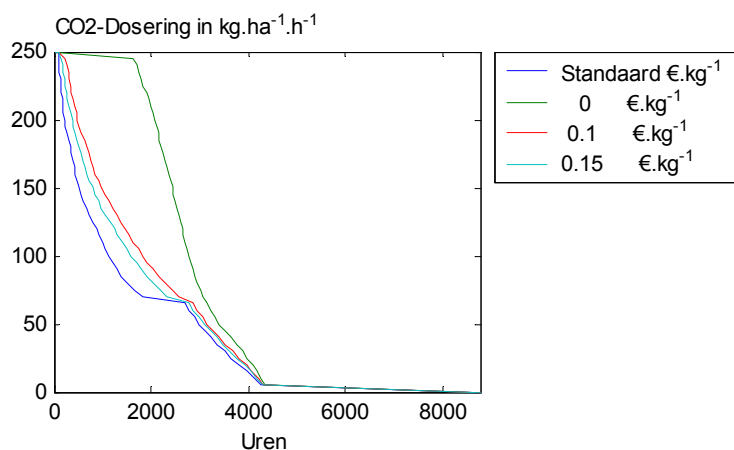
In onderstaande figuur is het jaarverloop van de optimale CO₂-dosering weergegeven voor enkele prijzen voor additionele CO₂.



Figuur 6-2 Dagelijkse optimale CO₂-dosering voor verschillende prijzen voor additionele CO₂ voor een tomatenteelt met een maximale doseercapaciteit van 250 kg.ha⁻¹.h⁻¹ en een bovengrens van 1200 ppm

Uit de figuur blijkt dat de prijs van CO₂ de meeste invloed heeft in lichtrijke periode mei t/m oktober.

In Figuur 6-3 is de jaarbelastingduurkromme van de doseerflux weergegeven. Voor reële CO₂-prijzen rond de 8 ct.kg⁻¹ blijkt dat de maximale doseercapaciteit niet vaak gehaald wordt. Bij gratis additionele CO₂ daarentegen wordt op bijna 2000 uren maximaal gedoseerd.



Figuur 6-3 Jaarbelastingduurkromme voor de optimale CO₂-doseerflux bij verschillende CO₂-prijzen voor een tomatenteelt met een maximale doseercapaciteit van 250 kg.ha¹.h¹ en een bovengrens van 1200 ppm

7 Conclusies

In dit onderzoek is een methode gevonden waarmee op grond van de condities buitentemperatuur, binnentemperatuur, lichtintensiteit en prijsverwachting een waardebeoordeling van elke kg extra CO₂ kan worden gemaakt. Gegeven de kosten voor productie of inkoop van CO₂ kan hiermee de optimale CO₂-dosering worden bepaald. De gevonden methode is omgezet in een makkelijk te hanteren computerprogramma.

Met de rekenmethode kunnen de momentane optimale CO₂-dosering, een waarde op jaarbasis, een jaarverloop en een jaarbelastingduurkromme van de dosering worden bepaald. Tevens kan bepaald worden welke de hoeveelheid CO₂ verkocht zou kunnen worden indien tuinders zouden zijn aangesloten op een CO₂ distributie netwerk.

Uit berekeningen met het computerprogramma blijkt dat het bedrijfseconomisch verantwoord is om naast de 35 kg.m² CO₂, die met de rookgassen uit de verwarmingsbehoefte beschikbaar komt, nog eens 12 kg.m² extra CO₂ met warmtevernietiging te produceren (zo'n 7 m³ aardgas), waarbij het produceren van 1 kg CO₂ een reële prijs heeft van 5.8 Eurocent.

Tot aan prijzen van zo'n 40 Eurocent per kg (een gasprijs van 70 €ct.m³) blijft het op bepaalde momenten in het jaar verantwoord om additionele CO₂ te doseren middels warmtevernietiging.

Met deze bevindingen kan het gedrag van sommige glasgroentetuinders, namelijk CO₂-doseren middels warmtevernietiging, verklaard worden.

8 Kennisoverdracht en vervolg

De resultaten van deze studie zijn van belang voor diegenen die bij de levering en afname van alternatieve CO₂ ten behoeve van de tuinbouw betrokken zijn. De in het project verworven kennis en programmatuur vormt de basis voor integratie van CO₂-optimalisatie in kasklimaatcomputers waardoor uiteindelijk de CO₂-inkoop of -productie door de klimaatcomputer kan worden bestuurd. De uiteindelijke interface zal waarschijnlijk door klimaatcomputerfabrikanten ontwikkeld gaan worden omdat de programmatuur gebruik maakt van diverse grootheden die door de bestaande klimaatcomputers reeds gemeten of berekend worden. Naast deze technische integratie is een integratie van gebruikersinterfaces wenselijk. Praktijkonderzoek Plant en Omgeving (PPO) heeft contacten gelegd met klimaatcomputerfabrikanten. Deze zijn enthousiast over de aanpak en gaan hiermee verder op het moment dat zuivere CO₂ goedkoper wordt dan het verbranden van aardgas.

De user-interface die als projectresultaat opgeleverd is, is als download versie beschikbaar op de IMAG internetpagina en kan in principe gebruikt worden door tuinders, maar is meer bedoeld als demonstratie.

PPO heeft in samenwerking met LTO groeiservice begin 2003 een tuindersbijeenkomst georganiseerd waarop de resultaten gepresenteerd zullen worden.

Door DLV is in samenwerking met o.a. IMAG het "Marktintroductieplan CO₂-optimizer" ontwikkeld om tot een succesvolle praktijkintroductie van CO₂-optimalisatie, zoals beschreven in dit rapport, te komen.

9 Literatuur

Breuer, J.J.G. en N.J. van de Braak, 1989 Reference Year for Dutch Greenhouses, Acta Horticulturae 248, 1989

Challa, H en Heuvelink, E., 1993. Economic evaluation of crop photosynthesis. Acta Horticulturae 328: 219-228.

Heuvelink, E. en Challa, H., 1989. Dynamic optimization of artificial lighting in greenhouses. Acta Horticulturae 260: 401-412

Kwantitatieve informatie voor de glastuinbouw (KWIN) 1999-2000.

Kwantitatieve Informatie voor de Glastuinbouw (KWIN) 2000-2001.

PPO, 2002. Schiftelijke informatie.

Proefstation voor Bloemisterij en Glasgroente (PBG). Naaldwijk.

Nederhoff, E.M., 1987. CO₂ in de kas. Economisch verantwoord CO₂-doseren. Groente en Fruit 43(7): 27-29

Nederhoff, E.M., 1987. CO₂ doseren met behulp van computer. Groente en Fruit 42(34): 40-43

Nederhoff, E.M., 1989. CO₂ te kostbaar om te royaal mee om te springen. Groente en Fruit 44(29): 38-39.

Nederhoff, E.M., 1987. Berekenen CO₂-verbruik en efficiëntie. Groente en Fruit 43(6): 27-29.

Nederhoff, E.M., 1984. Berekeningen aan CO₂-verbruik. Intern verslag nr. 44. Proefstation voor Tuinbouw onder Glas, Naaldwijk.

Nederhoff, E.M. en Vegter, J.G., 1994. Photosynthesis of stands of tomato, cucumber and sweet pepper measured in greenhouses under various CO₂-concentrations. Annals of Botany 73: 353-361.

Bijlage 1 Veilingprijzen

Veilingprijzen van diverse gewassen. Bron: KWIN 1999-2000

Periode	Tomaat	Paprika	Komkommer
1	1.54 ¹⁾	1.93 ¹⁾	1.67
2	1.54 ¹⁾	1.93 ¹⁾	1.33
3	1.54	1.93	0.87
4	1.33	2.38	0.66
5	1.12	3.22	0.49
6	0.77	1.81	0.51
7	0.75	1.51	0.32
8	0.64	1.01	0.31
9	0.56	1.28	0.34
10	0.65	1.02	0.44
11	0.70	0.82	0.58
12	0.53	1.32	0.65
13	0.53 ¹⁾	1.32 ¹⁾	0.65 ¹⁾

¹⁾KWIN geeft geen prijzen voor deze periode: hiervoor is de vorige periode is genomen

Bijlage 2 Commodity-gasprijs volgens het CDS

Voor de 2e kwartaal van 2002 wordt de commodity-gasprijs volgens het Commodity Diensten Systeem (CDS) op de volgende manier berekend:

Gemiddelde stookolieprijs	121.30 EUR per ton
Toeslag	21.78 EUR per ton +
P	143.09 EUR per ton

De commodity-prijs is dan gelijk aan $37.4/500 \times P - 0.36302 = 0.1034 \text{ €} \cdot \text{m}^3$.
(bron: www.gasunie.nl)