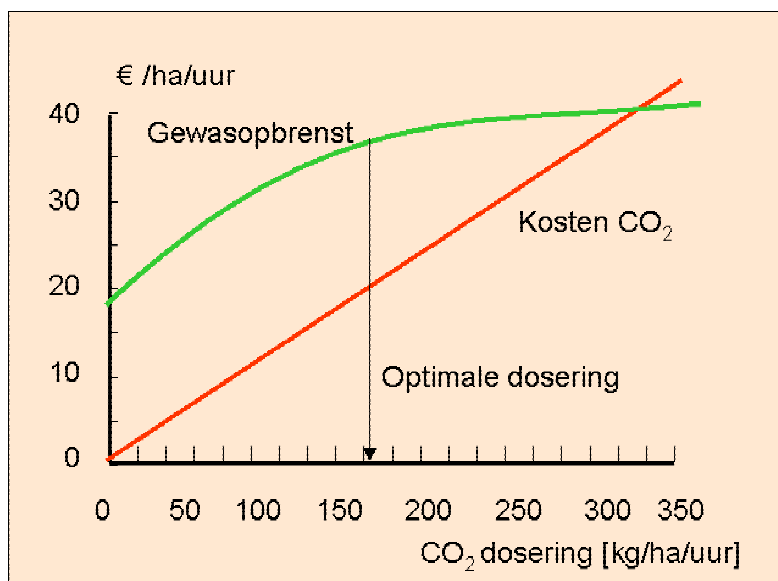


Praktijkexperiment naar on-line CO₂- optimalisatie in de tomatenteelt

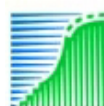


H.F. de Zwart

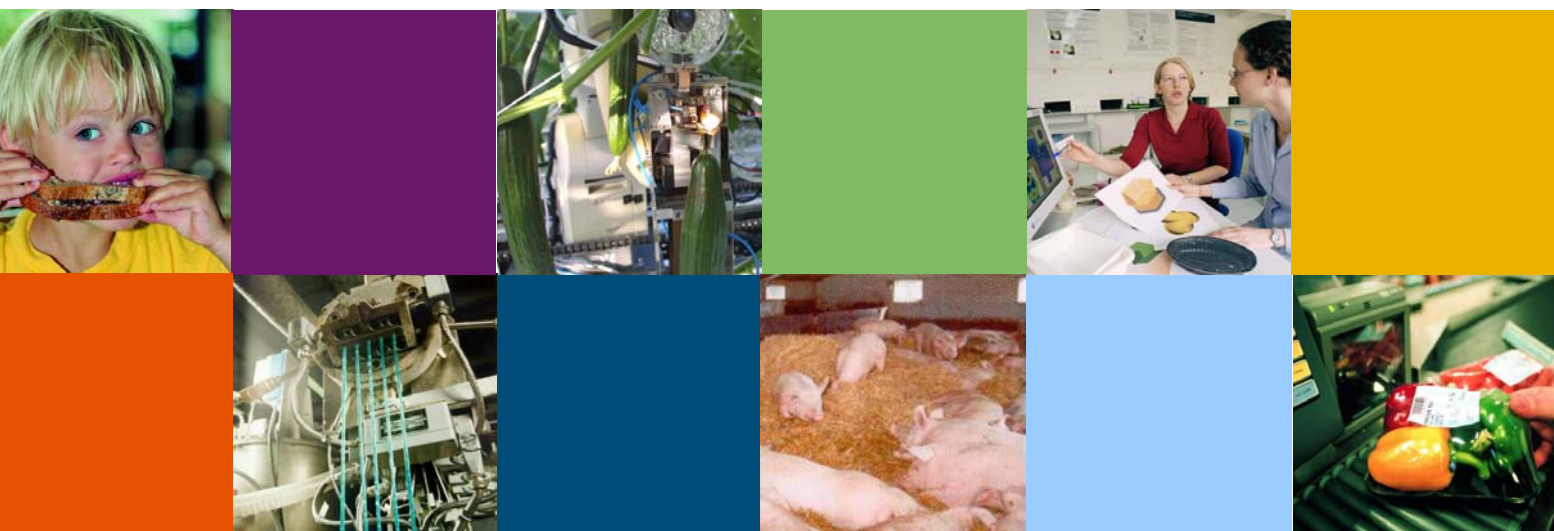
Report 233

Onderzoek in het kader van het Convenant Glastuinbouw en Milieu

In opdracht van:



landbouw, natuur en
voedselkwaliteit



Praktijkmetingen aan optimalisatie van zuivere CO₂dosering

H.F. de Zwart

Rapportnummer 311

Colofon

Dit onderzoek is Gefinancierd door



en



**landbouw, natuur en
voedselkwaliteit**

in het kader van



Title	Praktijkmetingen aan optimalisatie van zuivere CO ₂ dosering	
Author(s)	H.F. de Zwart	
A&F number	Rapportnr. 311	
ISBN-number	90-6754-873-1	
Date of publication	December 2004	
Confidentiality	non	
Project code.	PT-projectnr. 11460	A&F-projectnr. 630.54739.01

Agrotechnology & Food Innovations B.V.
P.O. Box 17
NL-6700 AA Wageningen
Tel: +31 (0)317 475 024
E-mail: Feije.deZwart@wur.nl
Internet: www.agrotechnologyandfood.wur.nl

© Agrotechnology & Food Innovations B.V.

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of openbaar gemaakt in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, hetzij mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever. De uitgever aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele fouten of onvolkomenheden.

All right reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system of any nature, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publisher. The publisher does not accept any liability for the inaccuracies in this report.

This report is authorised by: H.F. de Zwart



The quality management system of Agrotechnology & Food Innovations B.V. is certified by SGS International Certification Services EESV according to ISO 9001:2000.

Samenvatting

CO₂-dosering draagt bij aan productieverhoging en wordt daarom in ruime mate ingezet in de glastuinbouw. Op de meeste bedrijven gaat het hierbij om rookgas CO₂. Dit kan beschouwd worden als een afvalproduct bij de verbranding van aardgas ten behoeve van de warmtevoorziening en is daarmee een zeer goedkope CO₂-bron.

Op een aantal bedrijven wordt naast de rookgas CO₂ ook zuivere CO₂ toegevoegd. Deze CO₂ wordt per kg ingekocht en heeft daardoor duidelijke variabele kosten. Het is dus zaak die kilogrammen alleen in te zetten als er duidelijk zicht is op rendement van die kilogrammen.

In voorliggend rapport wordt een optimalisatie-algoritme beschreven dat in staat is om on-line, op ieder moment van de dag zo'n afweging te maken. Het ontwikkelde algoritme heeft gedurende een jaar meegedraaid in een kas-automatiseringssituatie op een concreet bedrijf in de praktijk en heeft in een on-line situatie bewezen te functioneren.

De bijdrage die het programma aan de vergroting van de winst op het bedrijf was echter zeer beperkt omdat er op dit bedrijf reeds veel zuivere CO₂ werd ingezet. De installatie kon alleen de dosering van zuivere CO₂ verhogen en niet verlagen.

Middels een simulatiestudie is datgene wat in de praktijk niet kon worden beproefd met een model doorgerkend, waarbij het model de meest essentiële informatie (stralingsintensiteit buiten de kas en gratis beschikbare CO₂ uit rookgassen) direct vanuit metingen betrok.

Het bleek duidelijk dat het optimale doseerniveau onder de teeltomstandigheden die zich in het tijdvak augustus 2003 t/m juli 2004 voordeden aanzienlijk lager lag dan de 5.66 kg/m² die volgens de metingen op het praktijkbedrijf is toegediend. De optimalisatie berekende dat met een toevoeging van 1.75 kg CO₂/m² in de 278 meetdagen 21 cent aan kosten voor de CO₂ zou zijn gemaakt en deze CO₂ voor toename van de productiewaarde met 45 cent zou hebben gezorgd. Een jaarrond simulatie over 365 dagen berekent bij een CO₂-prijs van 12 cent en een productprijs zoals die zich in 2003-2004 voordeed (gemiddeld zo'n 60 cent per kg vers product) een winst 50 cent. In dit geval werd er 4 kg zuiver CO₂ gegeven wat tot 97 cent meerproductie ten opzichte van de situatie waarbij uitsluitend met rookgassen CO₂ zou worden gegeven.

Er zijn ook berekeningen gedaan naar het effect van veranderingen van de prijs voor de zuivere CO₂ en de waarde van het product. Zoals verwacht berekent het optimalisatieprogramma een toename van de inzet van CO₂ bij lagere kosten voor CO₂ of hogere waarden van het product. Bij een lagere waarde van het product of bij duurdere CO₂ neemt het gebruik uiteraard af, maar de vermindering van het CO₂-gebruik gaat minder snel dan de toename van de inzet onder economisch gunstiger omstandigheden.

Het feit dat de programmatuur in technische zin goed gewerkt heeft en er in het experiment geen onverwachte problemen zijn opgetreden leidt tot de conclusie dat de ontwikkelde programmatuur rijp is voor toepassing.

Trefwoorden: CO₂-dosering, Optimalisatie

Inhoud

Samenvatting	3
1 Inleiding	7
2 Optimalisatie van de CO₂ dosering	9
2.1 Rookgas CO ₂ en additionele CO ₂	13
3 Experiment	15
4 Meetresultaten	19
5 Potenties van CO₂-optimalisatie	27
5.1 Optimalisatie van zuivere CO ₂ -dosering	27
5.2 Effect van de prijs van CO ₂ en de prijs van het product	30
6 Conclusies en aanbevelingen	33
7 Literatuur	35

1 Inleiding

CO₂-dosering is een belangrijke groeibevorderende factor in de moderne Nederlandse tuinbouw. De kwaliteit van de branders in de toegepaste verwarmingsketels is zodanig dat de rookgassen zonder meer in de kas kunnen worden geleid. Hierdoor beschikt de tuinder op momenten dat de ketel aan staat voor de verwarming over vrijwel gratis CO₂ (het elektriciteitsverbruik van de ventilator voor de luchtverplaatsing kost minder dan € 0,40 per ha/uur).

Het gebruik van een warmteopslagtank maakt het mogelijk om de productie van de warmte die gedurende het etmaal nodig is te concentreren in de dagperiode zodat het ongelijktijdigheidsprobleem van CO₂- en warmtevraag gemakkelijk kan worden ondervangen. Het kan dus worden gesteld dat een tuinder met een standaard bedrijfsuitrusting een belangrijk deel van het jaar over CO₂ beschikt die zonder variabele kosten kan worden aangewend.

In warmere perioden van het jaar, of indien de kas door energiebesparende maatregelen een lage warmtevraag heeft, is de beschikbaarheid van CO₂ echter gering. De beschikbaarheid kan worden vergroot door doelbewust de warmtevraag te vergroten (warmte vernietigen, bijvoorbeeld d.m.v. een verhoogde minimumbuis) of door een alternatieve CO₂-bron te gebruiken. Allebei deze methoden leiden tot variabele kosten. Bij een verhoogde minimumbuis komen deze kosten voort uit het extra gasverbruik en in sommige perioden ook uit een nadelig effect op de gewasgroei. Bij gebruik van alternatieve CO₂ (denk aan zuivere CO₂) gaat bij gebruik ervan direct de verbruiksmeter lopen. De inzet van deze extra CO₂ zou dus moeten worden gebaseerd op een afweging tussen de extra kosten die deze dosering oplevert en de extra opbrengsten. Zolang de extra opbrengsten de kosten overtreffen wordt een bedrijfseconomisch verstandige beslissing genomen om de extra dosering in te zetten.

Dit rapport beschrijft een meet- en experimenteerproject waarin de CO₂-doseringstrategie die op een praktijkbedrijf is toegepast in het tijdvak augustus 2003 t/m juli 2004 is bestudeerd. Er is onderzocht in welke mate een on-line optimaliseringsprogramma verbeteringen kon aanbrengen in deze strategie. Daartoe beschikte de installatie zelfs over de mogelijkheid om extra CO₂ op een deel van het bedrijf in te brengen (1/3 van het bedrijfsoppervlak).

Het rapport bouwt voort op onderzoek dat A&F in 2002 heeft uitgevoerd en wat afgerond is met het rapport "Optimaal gebruik van CO₂ in de glasgroenteteelt".

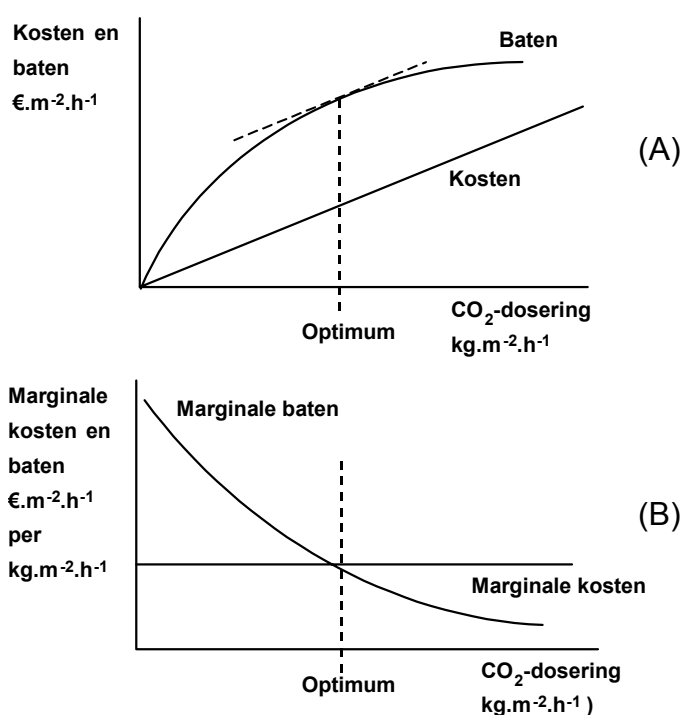
In hoofdstuk 2 wordt ingegaan op de berekeningswijze waarmee een optimalisatie van de CO₂-dosering onder praktijkomstandigheden gestalte kan krijgen.

In hoofdstuk 3 wordt een beschrijving van het bedrijf waar de metingen en experimenten hebben plaatsgevonden gegeven. Tevens wordt hier de meetopstelling uiteengezet.

Hoofdstuk 4 bespreekt de resultaten en in hoofdstuk 5 worden de conclusies uit het onderzoek gepresenteerd.

2 Optimalisatie van de CO₂ dosering

Elke optimalisatie berust op een afweging van kosten en baten. Toegespitst op de dosering van CO₂ kan worden gesteld dat zolang de baten van het verhogen van de CO₂-dosering meer toenemen dan de kosten van de toename van de dosering is het bedrijfseconomisch verstandig de CO₂ dosering te verhogen. De optimalisatietheorie zegt dat het optimum gevonden is wanneer de marginale opbrengsten (de toename van de opbrengst bij de laatste eenheid CO₂ dosering) gelijk zijn aan de marginale kosten (de toename van de kosten met de laatste eenheid CO₂ dosering). In onderstaande figuur is de bepaling van het optimum grafisch uitgebeeld.



Figuur 2-1 Schematische weergave van optimale CO₂-doseringsnelheid als optimum van kosten en baten (A) en marginale kosten en baten (B). De figuur geldt voor betaalde CO₂.

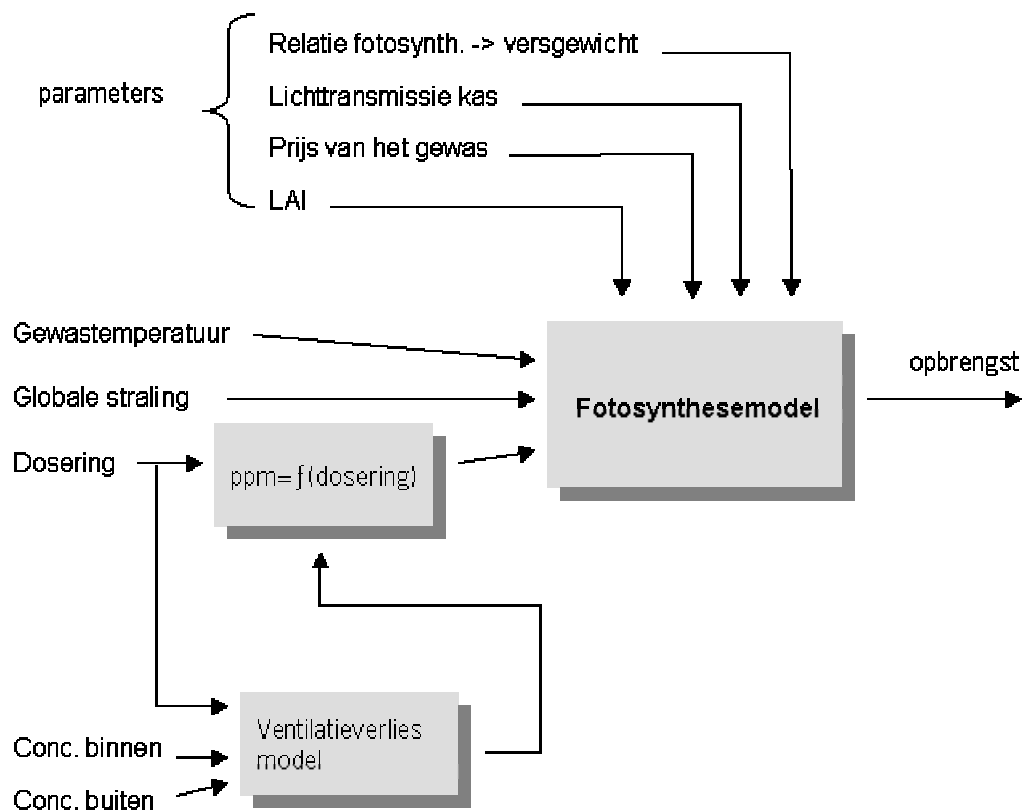
In figuur 2-1 (A) is geschetst dat bij toepassing van zuivere CO₂ de kosten lineair oplopen met de dosering. Als een kg CO₂ € 0.12 dan kost een dosering met 100 kg/uur immers precies twee keer zoveel als een dosering met 50 kg/uur. De baten lopen in figuur (A) in het begin steiler op dan de kosten (het effect van de dosering op de concentratie is groot). Het is dan dus verstandig de kosten voor extra CO₂ te maken, want ze worden meer dan goedgemaakt

De helling van de opbrengsten-curve gaat echter afvlakken omdat onder gegeven kasklimaat-omstandigheden het fotosynthese rendement van een hogere CO₂ concentratie afneemt. Op een gegeven moment is de curve voor de toename van de opbrengsten zover afgevlakt dat een extra verhoging van de CO₂-dosering net zoveel kost als dat hij oplevert. Vanaf dat punt is het onverstandig de dosering verder te verhogen. In figuur (A) is dit punt bereikt waar de helling van

de baten-curve gelijk is aan de helling van de kosten-curve. In figuur (B) is dit het snijpunt van de marginale kosten- en marginale batencurve.

Zoals al blijkt uit figuur 2-1 (A) is de kostencurve voor extra CO₂-dosering erg eenvoudig te bepalen. Dit is namelijk niets anders dan een rechte lijn, waarvan de richtingscoëfficiënt gelijk is aan de prijs van de zuivere CO₂.

Het grootste probleem bij de optimalisatie is dan ook de berekening van de productie. Een uitgebreide verantwoording van de gebruikte algoritmen staat beschreven in “Optimaal gebruik van CO₂ in de glasgroenteteelt” (Swinkels en de Zwart, 2002). In dit rapport wordt alleen de grote lijn van de aanpak beschreven. Ter illustratie wordt hierbij figuur 2-2 gegeven.



Figuur 2-2 Schematische weergave van de wijze waarop het optimaliseringsalgoritme de opbrengst bepaalt als functie van actueel gemeten grootheden (gewastemperatuur en globale straling) en CO₂-dosering

Het belangrijkste onderdeel van figuur 2-2 is het fotosynthese-model. Dit is gebaseerd op SUCROS (Gijzen, 1992) en berekent de momentane fotosynthese als functie van kasklimaat-omstandigheden. De lichtintensiteit en de CO₂-concentratie zijn in deze berekening uiteraard de belangrijkste invloedsfactoren. De gewastemperatuur heeft ook invloed, maar omdat deze slechts klein is wordt volstaan met de aanname dat de gewastemperatuur 1 °C boven de

luchttemperatuur ligt. De LAI (Leaf Area Index) moet als parameter aan de optimalisatieprocedure worden opgegeven evenals de lichttransmissie van de kas. De lichttransmissie-parameter geeft het model de mogelijkheid de lichtintensiteit in het gewas te berekenen uit de globale straling.

Vanuit de middels SUCROS berekende fotosynthese wordt het versgewicht bepaald. Hiervoor worden een aantal gewasspecifieke parameters meegegeven zoals de Harvest Index (de fractie droge stof die in de verkoopbare delen terecht komt) en de droge stof index (de fractie droge stof per kg vruchtgewicht).

Middels de vermenigvuldiging de versgewicht productie (in $[\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})]$) met de prijs per kg, eveneens door de gebruiker als parameter op te geven, wordt een opbrengstcurve verkregen (uitgedrukt in $[\text{€}/(\text{m}^2 \text{ s})]$).

Langs bovenbeschreven weg kan dus voor de omstandigheden die op een willekeurig moment gelden worden berekend wat de productiewaarde is als functie van de CO_2 -concentratie, kort geschreven

$$\text{opbr} = f(\text{conc}) \quad [\text{€}/(\text{m}^2 \text{ s})]$$

Om een kosten/baten analyse van de CO_2 -dosering te kunnen maken moet er echter een relatie worden gevonden tussen productiewaarde en *dosering*. Deze kan worden opgesteld middels een relatie tussen dosering en concentratie. Dus

$$\text{conc} = f(\text{dosering}) \quad \text{samen met} \quad \text{opbr} = f(\text{conc}) \quad \text{leidt tot} \quad \text{opbr} = f(\text{dosering})$$

De bepaling van deze relatie tussen concentratie en dosering betekent vooral de bepaling van het actuele ventilatiedebiet. Immers, op elk moment geldt:

$$\text{Ventilatieverlies} = \text{ventilatiedebiet} * (\text{CO}_2 \text{ binnen} - \text{CO}_2 \text{ buiten}) \quad [\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})]$$

en onder stationaire omstandigheden geldt

$$\text{Dosering} = \text{CO}_2\text{opname} + \text{Ventilatieverlies} \quad [\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})]$$

zodat

$$\text{Dosering} - \text{CO}_2\text{opname} = \text{ventilatiedebiet} * (\text{CO}_2 \text{ binnen} - \text{CO}_2 \text{ buiten}) \quad [\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})]$$

Anders geschreven leidt deze vergelijking tot de formule

$$\text{CO}_2 \text{ binnen} = (\text{Dosering} - \text{CO}_2\text{opname})/\text{ventilatiedebiet} + \text{CO}_2 \text{ buiten} \quad [\text{kg}/\text{kg}_{\text{lucht}}]$$

waarin het ventilatiedebiet is gedrukt in $\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ en de concentraties in $\text{kg}_{\text{CO}_2}/\text{kg}_{\text{lucht}}$ *. Indien wordt uitgegaan van het feit dat de CO_2 -opname bij enig ventilatiedebiet slechts weinig verandert bij verandering van de dosering blijkt dat de CO_2 -concentratie middels een paar (langzaam in de tijd variërende) constanten lineair afhangt van de dosering, waarbij het ventilatiedebiet maatgevend is voor de richtingscoëfficiënt. Overigens wordt in de programmatuur bij de berekening van $\text{conc} = f(\text{dosering})$ wel rekening gehouden met de toenemende opname bij stijgende concentraties.

Het onderste blokje in figuur 2-2 betreft de schatting van dit ventilatiedebiet. In het rapport “Optimaal gebruik van CO_2 in de glasgroenteteelt” (Swinkels en de Zwart, 2002) is hier uitgebreid aandacht aan besteed. De bepaling van deze grootheid is niet triviaal, omdat deze niet zondermeer uit bijvoorbeeld raamstand en windsnelheid kan worden bepaald. Het proefschrift van de Jong (1991) laat zien dat er een grote scattering van meetdata ten opzichte van berekende ventilatiedebieten optreedt wanneer de ventilatie door formules benaderd wordt. Daarom wordt in het huidige project gebruik gemaakt van een on-line schatting van het ventilatiedebiet op basis van de CO_2 -balans. Immers als de vergelijking

$$\text{Dosering} - \text{CO}_2\text{opname} = \text{ventilatiedebiet} * (\text{CO}_2 \text{ binnen} - \text{CO}_2 \text{ buiten}) \quad [\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})]$$

geldt (zie vorige pagina), dan kan deze ook worden omgewerkt tot

$$\text{ventilatiedebiet} = (\text{CO}_2 \text{ binnen} - \text{CO}_2 \text{ buiten}) / (\text{Dosering} - \text{CO}_2\text{opname}) \quad [\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})]$$

waarin alle 4 de verklarende grootheden kunnen worden gemeten of berekend. In de praktijk geldt evenwel dat deze relatie alleen geldig is in een stationaire situatie. In tegenstelling tot de programmatuur die in “Optimaal gebruik van CO_2 in de glasgroenteteelt” is ontwikkeld, waar dit effect is veronachtzaamd, is in het huidige project daarom een accumulatie-term toegevoegd. Hierdoor kan ook in niet-stationaire situaties het ventilatiedebiet uit de CO_2 -balans worden geschat.

In de toekomst zouden ook de resultaten van het momenteel uitgevoerde project “On-line schatting van het ventilatiedebiet in kassen” hiervoor kunnen worden gebruikt. In dat geval wordt niet alleen de CO_2 -balans, maar worden ook de warmte- en vochtbalansen in de schattingsprocedure meegenomen.

Na het schema van figuur 2-2 doorlopen te hebben kan er voor elk ogenblik een afweging worden gemaakt tussen de kosten van additionele CO_2 -dosering en de opbrengst daarvan. Op elk ogenblik kan dan een beslissing worden genomen over de hoeveelheid zuivere CO_2 die bedrijfseconomisch verantwoord kan worden ingezet.

* De concentratie in kg/kg is een factor 44/29 groter dan de concentratie in ppm

Hierbij moet overigens ook nog rekening gehouden met het feit dat extra gewasgroei niet alleen extra opbrengst, maar ook extra arbeid met zich meebrengt. Het optimaliseringsprogramma houdt hiermee rekening door een aantal duidelijke extra kostenposten die met de meerproductie samenhangen in mindering te brengen op de meeropbrengsten. Zo moeten er kosten voor de extra oogstwerkzaamheden, het fust en eventueel de veiling (allen uitgedrukt per kg vers product) worden ingevuld.

2.1 Rookgas CO₂ en additionele CO₂

In de bovenbeschreven theorie is nog geen aandacht besteed aan interactie van de dosering van CO₂ uit de ketelrookgassen en additionele zuivere CO₂.

Het blijkt echter dat de voorgestelde aanpak het mogelijk maakt om deze twee zaken onafhankelijk van elkaar te optimaliseren. Gegeven het feit dat rookgas CO₂ altijd goedkoper is dan zuivere CO₂ zou het een werkbare strategie zijn om eerst de verdeling van de rookgas CO₂ te optimaliseren en daar bovenop van moment tot moment de afweging voor de toevoeging van zuivere extra CO₂ te maken.

Deze benaderingswijze werkt ook in geval de rookgas CO₂ op een minder optimale wijze wordt gedoseerd. In hoofdstuk 4 wordt hier nader op ingegaan.

3 Experiment

Ter beproeving van de ontwikkelde CO₂-optimaliseringsprogrammatuur is een experiment uitgevoerd voor het gewas tomaat op een bestaand bedrijf. Het betreft een modern bedrijf (bouwjaar 1997) van 4.5 ha waar losse tomaten worden geproduceerd.

Dit bedrijf was voor dit onderzoek zeer geschikt omdat het reeds gebruik maakt van additionele CO₂-dosering vanuit een zuivere CO₂-tank. Bovendien heeft het bedrijf een uitstekende automatiserings infrastructuur en maakt het gebruik van een padregistratiesysteem waarmee de productie tot op pad-niveau kan worden geregistreerd.

De CO₂-dosering vindt vooral plaats vanuit de ketelrookgassen. Nadat deze in de condensor zijn afgekoeld tot waarden rond de 40 °C worden ze met behulp van een ventilator via ondergrondse buizen naar de kas getransporteerd. Deze rookgassen kunnen door middel van een zuivere CO₂ doserings-unit worden verrijkt met additionele CO₂. Deze verrijking wordt op het bedrijf gerealiseerd door KeBuS, een product van Westland Energie Services.

KeBuS, in combinatie met zuivere CO₂ dosering, stelt de tuinder in staat CO₂ te doseren ongeacht de warmtevraag. Indien een door de tuinder gewenste doseerflux niet kan worden gehaald met de op dat moment beschikbare ketelrookgassen zal KeBuS additionele CO₂ bijmengen. Vanwege de plaats van de inspuiting daarvan (vlak na de ketel) wordt deze CO₂ met de rookgassen over het hele bedrijf verspreid.

Het KeBuS-systeem maakt intensief gebruik van meetgegevens uit de kasklimaatcomputer. Dit vindt plaats door middel van een PC die middels een lokaal netwerk is verbonden met de kasklimaatcomputer. Op deze KeBuS-PC wordt elke 2 minuten een bestand met meetdata aangemaakt.

In overleg met Westland Energie is overeengekomen dat dit bestand ook door A&F gebruikt mag worden. Daartoe is ook de A&F-PC in het netwerk opgenomen.

In nevenstaande foto hoort de onderste PC (half achter de envelop) bij de tuinbouwcomputer (voor het bijhouden van de meet- en instellingen database, de besturing van de feitelijke kasklimaat- en substraatcomputer en het faciliteren van grafiek-programma's). De middelste PC is bestemd voor de optimalisatiesoftware en datalog-programmatuur van A&F en de bovenste PC draagt zorg voor de KeBuS algoritmen.



Het datalog-programma registreert op 2 minutenbasis de volgende kasklimaat-grootheden:

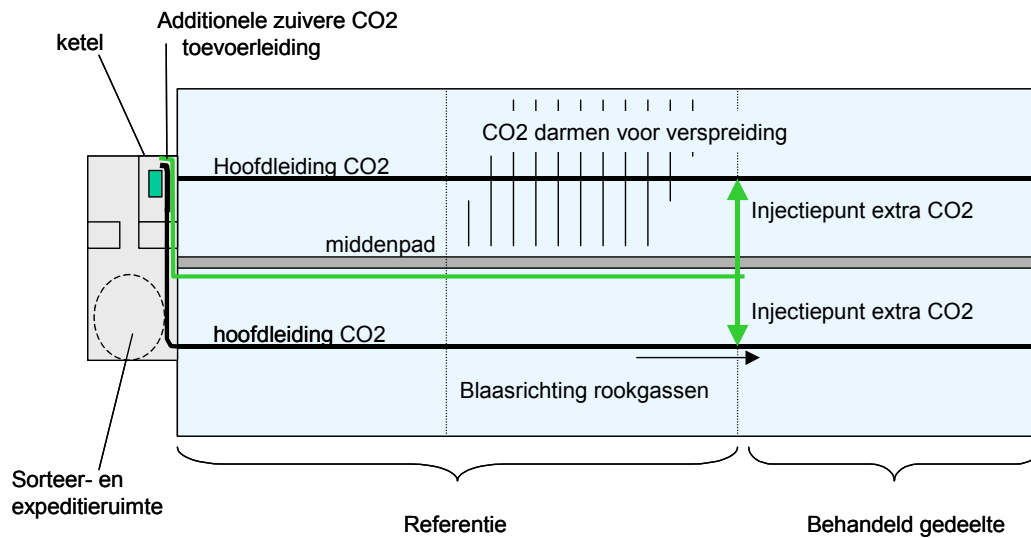
- globale stralingsintensiteit [W/m^2]
- buitentemperatuur [$^{\circ}\text{C}$]
- windsnelheid [m/s]
- buiten CO_2 concentratie
- binnen CO_2 concentratie in voorste deel [ppm]
- binnen CO_2 concentratie in achterste deel [ppm]
- kasluchttemperatuur [$^{\circ}\text{C}$]
- kaslucht RV [%]
- actueel gasverbruik [$\text{m}^3/(\text{m}^2 \text{ s})$]
- actuele rookgas-dosering [$\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$]
- actuele zuivere CO_2 -dosering door de KeBuS-regeling [$\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$]
- actuele extra CO_2 -dosering door de optimaliserende regeling [$\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$]

Vanuit deze dataset bepaalt het optimalisatieprogramma direct nadat de gegevens ververst zijn volgens de in het vorige hoofdstuk beschreven methode de opbrengst van de laatste kg CO_2 . Wanneer de waarde van de laatste kg CO_2 boven de kostprijs van zuivere CO_2 ligt besluit het optimalisatieprogramma om extra zuivere CO_2 te doseren in het achterste deel van de kas, welke 1500 m^2 beslaat.

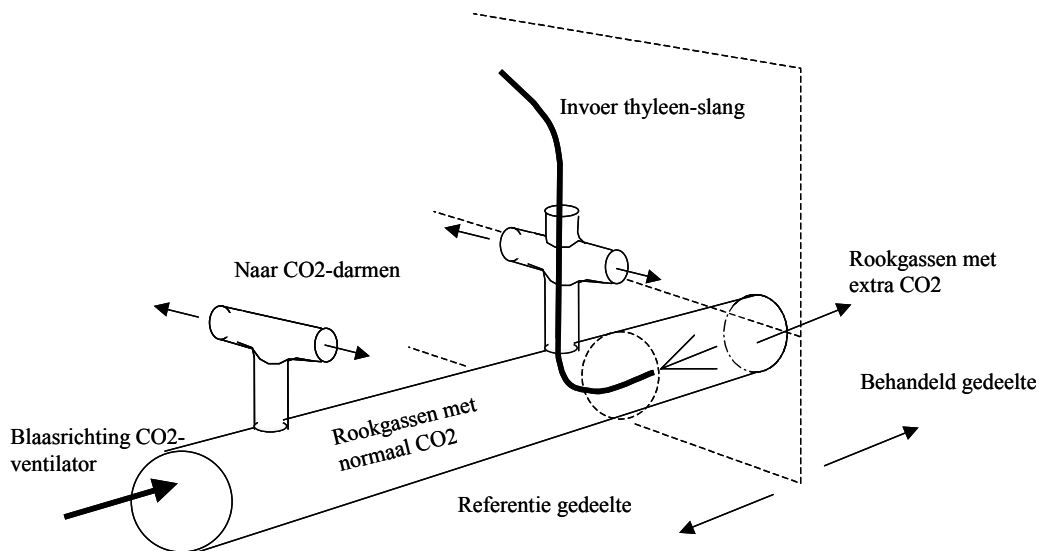
In figuur 3-1 is aangegeven hoe het bestaande CO_2 -doseersysteem op het bedrijf in elkaar zit en hoe een extra leiding waardoor zuivere CO_2 kan worden aangevoerd een verhoogde CO_2 -dosering voor het achterste deel van het bedrijf tot stand kan brengen.

In figuur 3-2 is een schets gemaakt van de wijze waarop de eventueel extra in te zetten CO_2 in de aanvoerleiding wordt geïnjecteerd.

In het ketelhuis is een extra regelklep en doorstroommeter geïnstalleerd, waarmee de CO_2 toevoer naar het additionele injectiepunt kan worden geregeld. De extra CO_2 dosering naar het achterste deel van het bedrijf is begrensd op $135 \text{ kg}/\text{ha}/\text{uur}$.



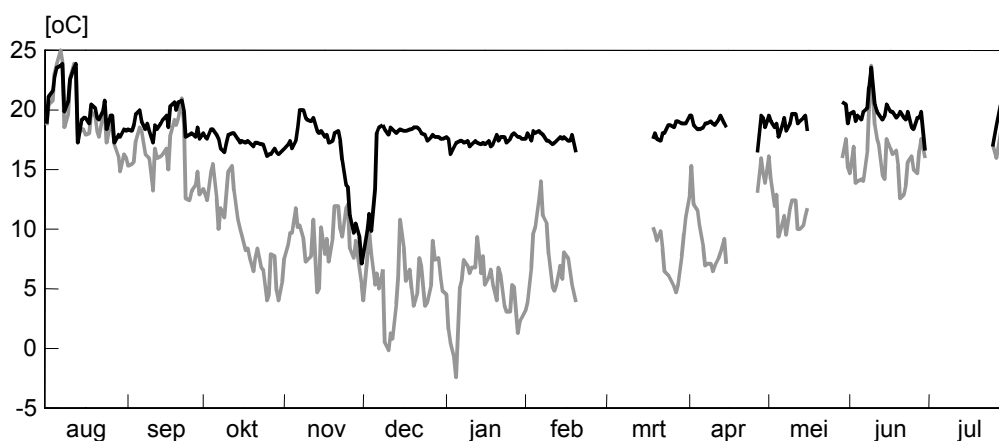
Figuur 3-1 Schets van de CO₂-dosering infrastructuur van het bedrijf waar het experiment heeft plaatsgevonden. De basis van de installatie is een leidingwerk dat de ketelrookgassen over de kas verdeelt. De CO₂-concentratie in deze rookgassen kan worden verhoogd met de insputting van zuivere CO₂. Indien de optimaliseringsprogrammatuur daartoe mogelijkheden voor economisch gewin ziet, kan in het achterste deel extra CO₂ worden bijgemengd. Het injectiepunt zit op de scheiding van het behandelde en niet behandelde gedeelte.



Figuur 3-2 Schets van het injectiepunt voor extra CO₂. Het laatste T-stuk vóór de scheiding van de afdelingen is vervangen door een kruisstuk waardoor een toevoerslang in de rookgas toevoerleiding kan worden ingebracht. De ingespoten CO₂ vermengt zich met de rookgassen zodat de CO₂ concentratie vanaf het injectiepunt hoger is dan in het gedeelte vóór het injectiepunt.

4 Meetresultaten

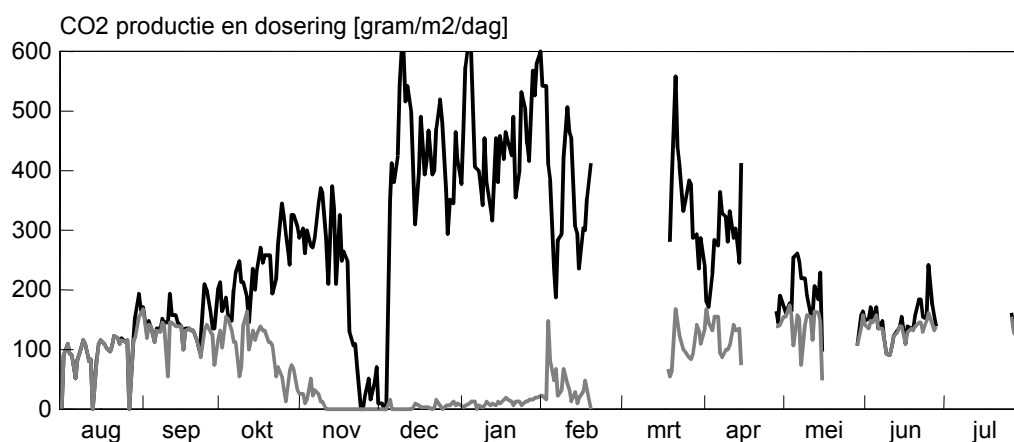
Het experiment is opgebouwd in de zomermaanden van 2003 en de metingen zijn gestart op 1 augustus. Daarmee is het experiment begonnen met de uitzonderlijk hete augustusmaand van 2003. In onderstaande grafiek, waar ter illustratie de gemiddelde etmaaltemperatuur in de kas en de gemiddelde buitentemperatuur zijn afgebeeld is dit goed te zien. De gemiddelde etmaaltemperatuur raakt in de tweede week van augustus de 25 °C, wat uitzonderlijk hoog is voor de tomatenteelt.



Figuur 4-1 Gemiddelde kaslucht- en buitentemperatuur gedurende het experiment.

Figuur 4-1 laat ook duidelijk de teeltwisselingsperiode zien van half november tot begin december. Ook de week met tropische temperaturen in juni 2004 komt prominent in de grafiek naar voren.

De meeste belangstelling gaat in dit project echter uit naar de CO₂-dosering. In de huidige intensieve glasgroenteteelt wordt deze vooral gerealiseerd door de benutting van de rookgassen die vrijkomen bij de warmteproductie

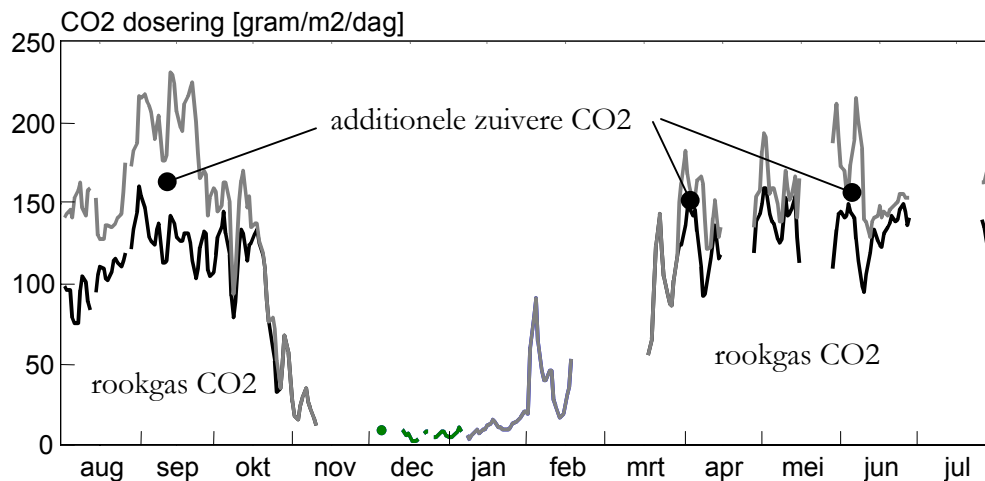


Figuur 4-2 CO₂productie bij de invulling van de warmtevraag (bovenste lijn) en CO₂ dosering t.b.v. de verhoging van de CO₂concentratie in de kas (onderste lijn).

Figuur 4-2 laat zien dat in de periode half april tot half oktober de CO₂ dosering ongeveer 150 gram/m² per dag bedraagt en dat dit in deze periode bijna gelijk is aan de dagelijkse hoeveelheid CO₂ die bij de warmteproductie vrijkomt. Met andere woorden: gedurende de helft van het jaar wordt bijna alle warmte die op het tuinbouwbedrijf wordt gebruikt overdag geproduceerd zodat de CO₂ nuttig kan worden gebruikt voor de verhoging van de CO₂-concentratie.

In de wintermaanden piekt de dagelijkse hoeveelheid CO₂ per m² naar ruim 600 gram per m². Op deze dagen staat de ketel bijna de hele dag op zijn maximale brandercapaciteit, te weten 700 m³ per uur voor het bedrijf van 4.5 ha (155 m³/(ha uur)). Uiteraard is in de koude wintermaanden, waarin de dagen kort, en de ramen hoofdzakelijk gesloten zijn, de CO₂-behoefte slechts een fractie van de beschikbare hoeveelheid CO₂.

Naast rookgas-CO₂ beschikt de aanwezige installatie ook over zuivere CO₂. Hiermee kan tijdens de dosering van rookgasen additionele CO₂ worden gegeven. In figuur 4-3 is de gemeten inzet van zuivere CO₂ als additionele hoeveelheid op de rookgas-CO₂ getoond.

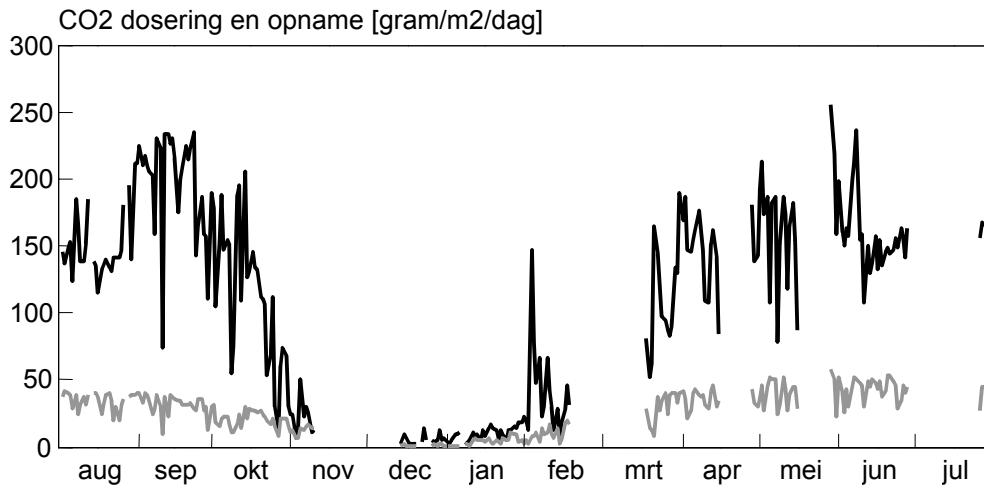


Figuur 4-3 Stapelgrafiek van de CO₂-gift middels rookgassen (onderste oppervlak) en de additionele dosering met zuivere CO₂ (daarbovenop getekend vlak). Om de grafiek wat makkelijker leesbaar te maken zijn de gegevens afgevlakt met een 3-daag voortschrijdend gemiddelde filter.

Op jaarbasis was 20% van de CO₂-dosering afkomstig uit zuivere CO₂. Figuur 4-3 laat zien dat met name in de maand september 2003 erg veel zuivere CO₂ is gedoseerd.

Ter illustratie wordt in figuur 4-4 weergegeven hoe de CO₂-opname van het gewas zich verhoudt tot de CO₂-dosering. In deze grafiek is de CO₂-opname uiteraard niet gemeten maar berekend met een model.

De opname van het gewas bedraagt volgens de data uit deze grafiek op jaarbasis 21% van de dosering.



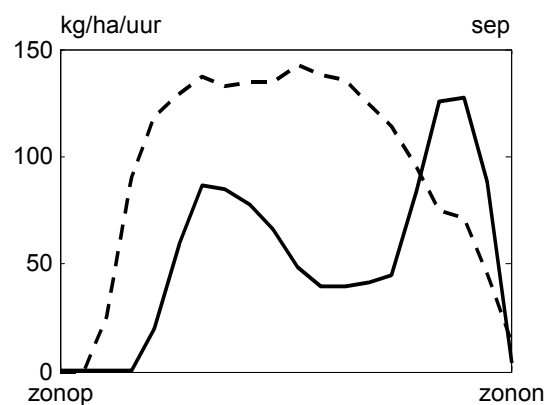
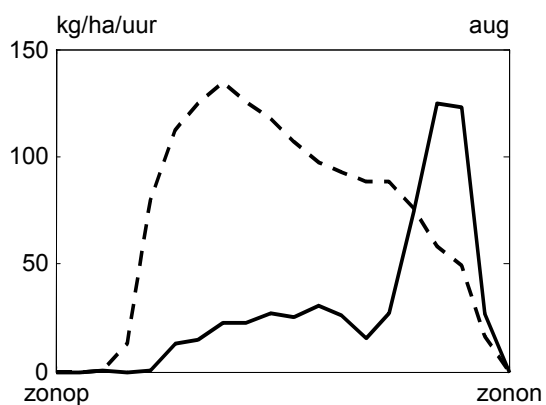
Figuur 4-4 CO₂opname door het gewas (onderste lijn) in vergelijking met de totale CO₂ dosering (rookgas CO₂ + zuivere CO₂) (bovenste lijn).

In figuur 4-3 komt naar voren dat de zuivere CO₂-dosering een substantieel deel van de totale CO₂-dosering op het bedrijf uitmaakt. Deze CO₂ wordt via een bepaalde visie toegediend. In figuur 4-5 is een aantal grafieken getoond waarin het gemiddelde doseerpatroon per maand, opgesplitst naar CO₂ uit ketelrookgassen en zuivere CO₂ is afgebeeld. Het zwaartepunt van de CO₂-dosering zoals die in de gehanteerde bedrijfsfilosofie wordt toegepast ligt in alle maanden op het eind van de dag. De maand september vormt de enige uitzondering omdat in die maand ook veel zuivere CO₂ vóór de middag is gedoseerd. In de maand april zijn veel rookgassen gedoseerd en is navenant weinig zuivere CO₂ toegevoegd.

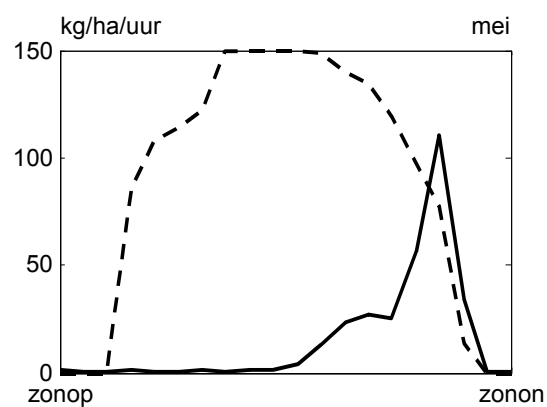
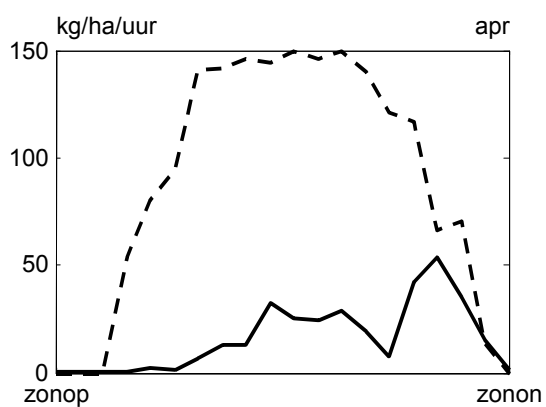
De patronen die uit de grafieken naar voren komen zijn het resultaat van een strategie die er op neer komt dat de tuinbouwcomputer een bepaald doseerniveau tot een uur of drie voor zonsondergang aanhoudt en, afhankelijk van de vullingsgraad van de buffer, aan het eind van de dag met zuivere CO₂ doorgaat, of aanvult.

De regeling van de hoeveelheid CO₂ is daarbij een streefwaarde voor de doseersnelheid, die meestal op 150 tot 180 kg/ha/uur ligt.

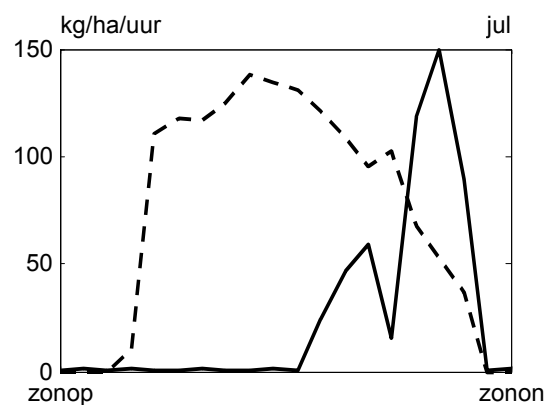
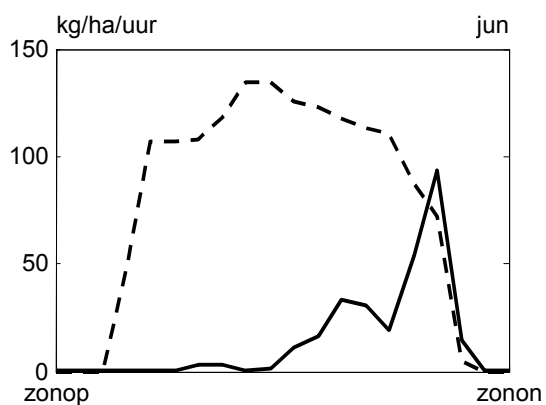
(a)



(b)



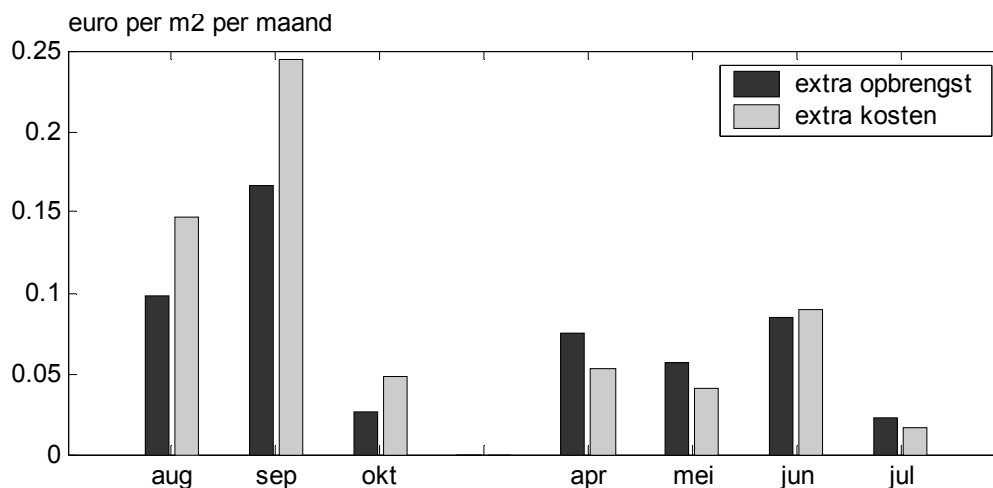
(c)



Figuur 4-5 Maandelijks gemiddeld doseerpatroon van CO₂ middels rookgassen (onderbroken lijn) en vanuit zuivere CO₂ (doorgetrokken lijn). Deel (a) geldt voor aug en sept. 2003 en de andere delen gelden voor 2004

Het effect van de toevoer van zuivere CO₂ bovenop de toegevoerde rookgas CO₂ is een verhoging van de productie. De toevoer van zuivere CO₂ brengt echter ook kosten met zich mee die, volgens opgave van de tuinder 12 cent per kg bedragen.

In figuur 4.6 is aangegeven welke extra opbrengsten en welke extra kosten de additionele CO₂ zoals die door de tuinbouwcomputer is geregeld heeft opgeleverd. De grafiek beperkt zich tot de belangrijkste maanden van het jaar.



Figuur 4-6 Maandelijke extra opbrengsten (linker staafjes) en extra kosten (rechter staafjes) door de gemeten zuivere CO₂ dosering.

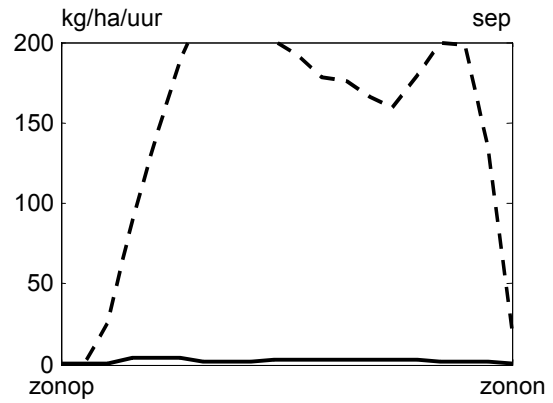
Figuur 4-6 laat zien dat met name in de maanden augustus en september door de tuinbouwcomputer veel zuivere CO₂ is toegediend waarvan (volgens de berekening) de kosten niet kunnen worden gecompenseerd door extra opbrengsten.

De maanden april, mei en juli laten wat dit betreft een beter resultaat zien. In deze maanden zijn de opbrengsten van de additionele CO₂ dosering steeds ongeveer 25% hoger dan de kosten van die CO₂. Hierbij moet nog wel de opmerking gemaakt worden dat de gegevens over juli maar enkele dagen omvatten zodat de absolute niveaus van kosten en opbrengsten in werkelijkheid in juli waarschijnlijk aanzienlijk hoger zijn geweest (zie ook het duidelijke gat in de metingen in figuur 4-1 t/m 4-4).

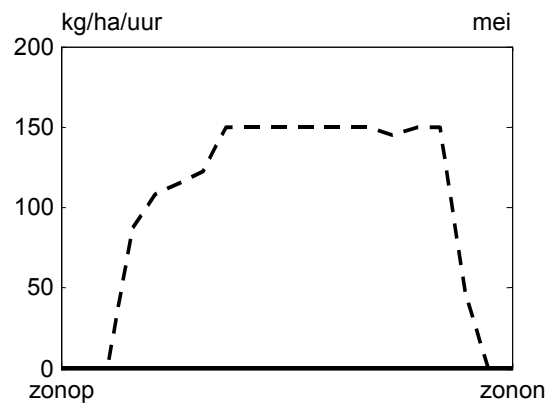
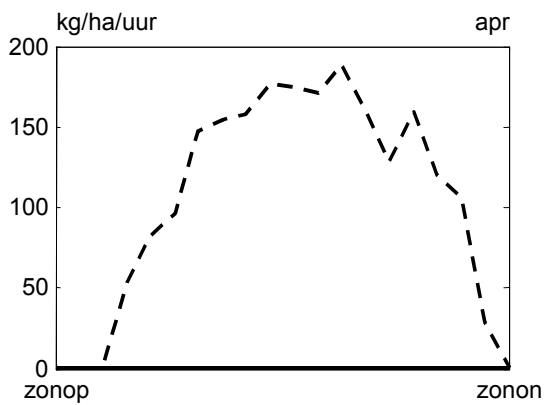
In figuur 4-7 is een tweede serie van 6 grafieken gemaakt. De grafieken zijn gelijk van opzet als de grafieken in figuur 4-5, maar in figuur 4-7 gaat het om de hoeveelheid zuivere CO₂ die volgens het optimalisatieprogramma vanuit bedrijfseconomisch oogpunt nog bovenop de reeds door de kasklimaatcomputer geregelde hoeveelheid CO₂ gegeven is. Deze extra additionele CO₂ is dus op slechts 1/3 deel van het bedrijf (het achterste deel) toegediend.

De grafiek van augustus 2003 is afgedekt omdat de klep-besturing die voor deze extra additionele CO₂ was gemaakt in eerste instantie niet goed werkte. In augustus is deze extra additionele CO₂ wél toegediend, maar niet volgens de beoogde regelstrategie.

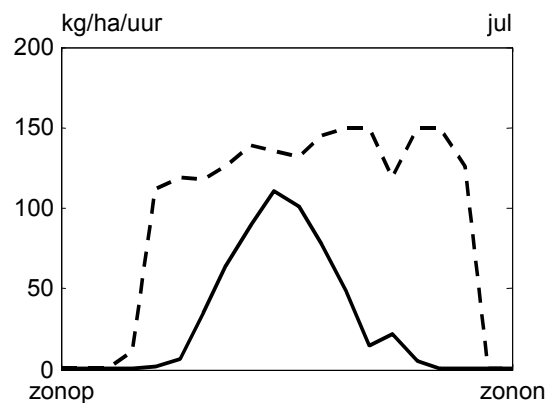
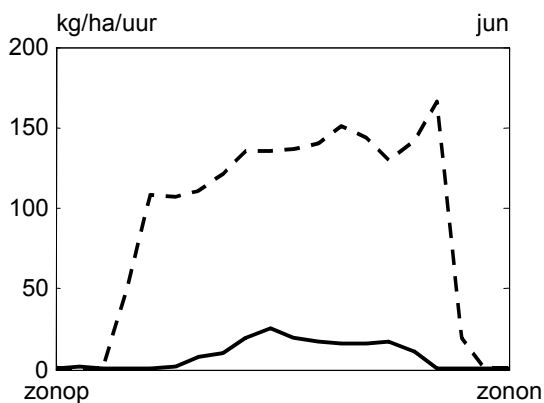
(a)



(b)



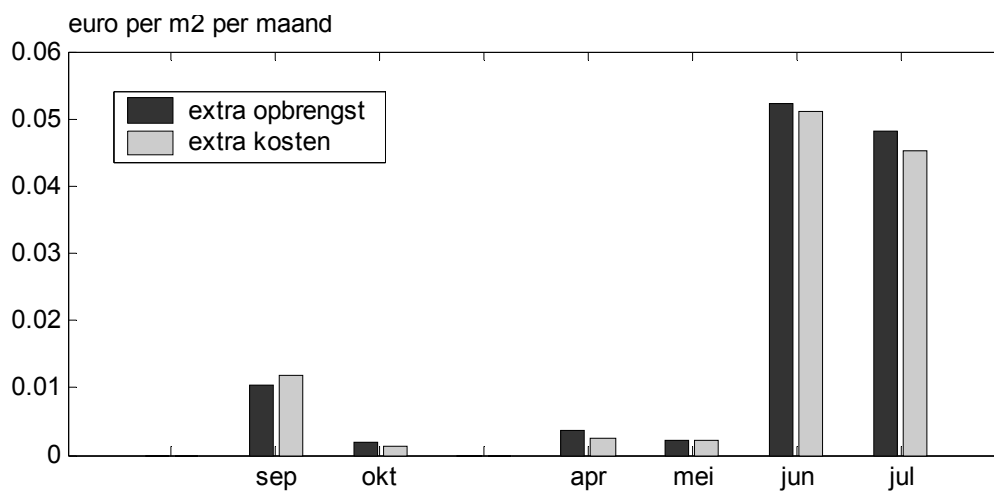
(c)



Figuur 4-7 Maandelijks gemiddeld doseerpatroon van CO₂ middels rookgassen en additionele CO₂ zoals die door de tuinbouwcomputer is toegediend (onderbroken lijn) en de toevoeging van extra additionele CO₂ door de experimentele regeling op het achterste 1/3 deel (doorgetrokken lijn). Deel (a) geldt voor aug en sept. 2003 en de andere delen gelden voor 2004.

Het belangrijkste dat uit de grafieken in figuur 4-7 naar voren komt is dat er slechts weinig extra additionele CO₂ gegeven is. Alleen in de maanden juni en juli bleek er volgens de on-line berekeningen ruimte voor een hogere zuivere CO₂-dosering dan er door de klimaatcomputer reeds werd gegeven.

De bijdrage van deze extra toegevoegde CO₂ aan de toename van de winst is navenant beperkt. Dit blijkt uit figuur 4-6, waar voor de belangrijkste maanden met zuivere CO₂ dosering de totale kosten en de totale opbrengst van de extra additionele CO₂ op het achterste deel van het bedrijf zijn weergegeven.



Figuur 4-8 Maandelijkse extra opbrengsten (linker staafjes) en extra kosten (rechter staafjes) door de extra additionele zuivere CO₂ dosering zoals die in het experiment op basis van de on-line optimalisatie in het achterste deel van de kas is toegevoerd.

Figuur 4-8 laat zien dat, zoals uiteraard de bedoeling is, de (berekende) meeropbrengst van het gewas de meerkosten overtreft. De linker staafjes zijn immers hoger dan de rechter staafjes. De maand augustus is in deze grafiek weggelaten omdat in die maand fors extra additionele CO₂ is gegeven, maar op grond van een nog niet goed werkend systeem, waardoor veel meer dan bedoeld is gegeven en de meerkosten navenant veel groter waren dan de meeropbrengst. In het begin van de maand september was dit ook nog het geval, waardoor ook daar een klein verlies is gemaakt.

Het absolute niveau van kosten en opbrengsten is in deze grafieken laag. Dit heeft te maken met de (te) grote hoeveelheid die reeds door de klimaatcomputer werd, maar in de maand juli komt dit doordat de resultaten slechts 5 dagen betreffen.

Gezien de zeer geringe berekende meeropbrengsten en de geringe extra additionele zuivere CO₂ op het achterste deel van het bedrijf zijn er geen vergelijkingen gemaakt tussen de gemiddelde productieniveaus in het voorste en in het achterste deel van het bedrijf.

5 Potenties van CO₂-optimalisatie

In het vorige hoofdstuk is getoond dat de toevoer van zuivere CO₂ een duidelijk productieverhogend effect heeft, maar dat de kasklimaatcomputer op het praktijkbedrijf in de maanden augustus, september en oktober van 2003 te veel, of op minder effectieve momenten heeft gedoseerd.

Het algoritme dat in het experiment on-line gewerkt heeft kon op het achterste deel van het bedrijf alleen extra additionele CO₂ toevoeren en geen zuivere CO₂ achterhouden. Het bleek dat er erg weinig momenten zijn geweest waarop extra additionele CO₂ op het achterste deel van het bedrijf bedrijfseconomisch verantwoord kon worden ingezet. Er is op het achterste deel 0.950 kg extra additionele CO₂ per m² ingezet (bovenop de 5.66 kg zuivere CO₂ die door de klimaatcomputer is gegeven). Deze extra CO₂ heeft 11.4 cent per m² gekost en volgens de berekeningen 11.8 cent per m² opgeleverd. De winst door deze extra additionele CO₂ is dus klein, maar nog altijd positief. De 5.66 kg zuivere CO₂ die tijdens de meetperiode door de klimaatcomputer is toegevoerd heeft 68 cent gekost en slechts 52 cent opgeleverd. Ook hieruit blijkt dat er veel momenten zijn waarop de klimaatcomputer CO₂ heeft gegeven in perioden waarop het niet, of in ieder geval minder, had moeten gebeuren.

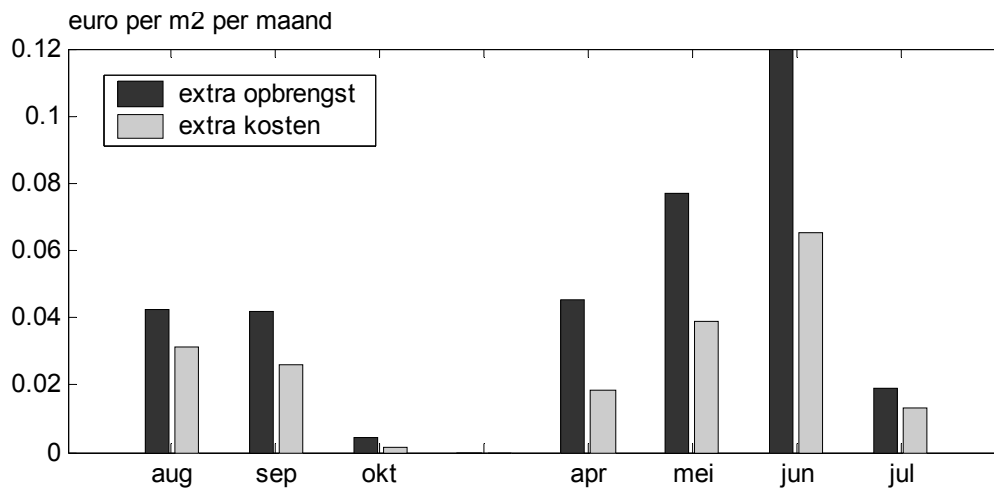
Om te kunnen bestuderen wat het effect op de CO₂ dosering zou zijn geweest wanneer de volledige toevoer van zuivere CO₂ door het optimalisatie-programma zou zijn geregeld wordt in § 5.1 een modelsimulatie uitgevoerd. Hierbij wordt de optimalisatieprocedure toegepast op de bedrijfssituatie waarbij de gemeten rookgas-CO₂ dosering als gegeven wordt beschouwd. Hiermee is dit een simulatie van de situatie waarbij het optimalisatie-programma niet 'in de weg zou zijn gezeten' door de in de praktijksituatie metingen reeds toegevoerde additionele CO₂. In § 5.2 wordt een scenario-analyse gedaan naar het effect van de prijzen voor zuivere CO₂ en wordt uitgezocht wat de gevoeligheid is van de kwaliteit van de CO₂ concentratiemeting op het te behalen economisch voordeel.

In § 5.3 wordt het hoofdstuk afgesloten met een aantal concluderende bespiegelingen op de praktische optimalisatie van CO₂ in de glasgroenteteelt.

5.1 Optimalisatie van zuivere CO₂-dosering

Om de werking van het CO₂-optimalisatieprogramma te kunnen beoordelen zonder hinder te ondervinden van de zuivere CO₂-dosering die door de kasklimaatcomputer is gegeven (en die op veel momenten te veel bleek te zijn) kan gebruik gemaakt worden van het kasklimaat simulatiemodel KASPRO, wat is voorzien van dezelfde optimalisatie-software als die in het praktijk-experiment is gebruikt. In deze berekening wordt het kasklimaat op een vrijwel gelijke manier als in het praktijk-experiment geregeld door de KASPRO klimaat-regelaar, met uitzondering van de CO₂-branderstand. Deze branderstand wordt voor deze berekeningen namelijk niet door de KASPRO brander-regeling bepaald, maar wordt bestuurd vanuit de meetgegevens die in het experiment zijn verzameld. De resultaten van de berekening geven dus de bedrijfseconomisch optimale toevoeging van zuivere CO₂.

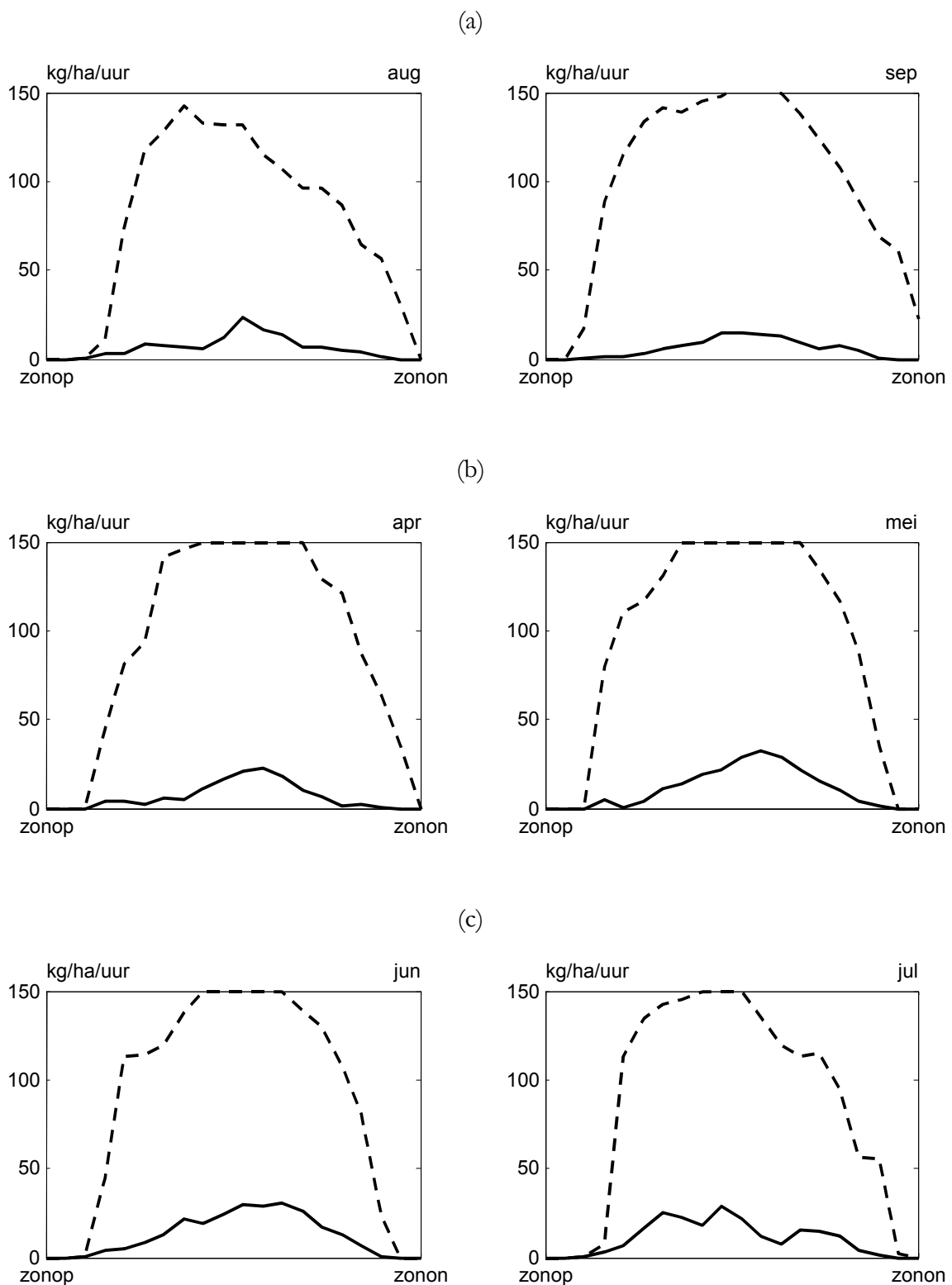
Om de figuur vergelijkbaar te houden met de soortgelijke figuren in hoofdstuk 4 zijn de getoonde maand-cumulaties beperkt tot de dagen waarover metingen beschikbaar zijn. Dit betekent bijvoorbeeld dat de 2 cent opbrengst en 1.5 cent kosten voor CO₂ die voor de maand juli berekend zijn gelden voor slechts 5 dagen. Zou de volledige maand juli in de berekeningen zijn meegenomen dan waren de kosten en opbrengsten vergelijkbaar geweest met de maand juni (zie figuur 5-3).



Figuur 5-1 Maandelijke extra opbrengsten (linker staafjes) en extra kosten (rechter staafjes) wanneer de zuivere CO₂ dosering geheel door het nieuw ontwikkelde algoritme zou hebben plaatsgevonden.

Wanneer de toevoer van zuivere CO₂ geheel volgens het optimalisatieprogramma zou hebben plaatsgevonden dan zou in de afgelopen meetperiode, althans gecumuleerd over de 278 dagen waarvan metingen beschikbaar zijn, 1.75 kg zuivere CO₂ per m² zijn gegeven. Dit is duidelijk veel minder dan de 5.66 kg die in deze 278 dagen door de kasklimaatregelaar is gegeven. De kosten voor deze 1.75 kg bedragen € 0.21 en de berekende totale meeropbrengst over deze dagen bedraagt € 0.45. De extra inkomsten voor het bedrijf bedragen dus € 0.24 per m² over deze 278 dagen. Het is duidelijk dat de optimalisatie van de CO₂-dosering tot een veel kleinere toegediende hoeveelheid zou hebben geleid, maar dat het rendement van de toegediende CO₂ zeer sterk is verbeterd. De optimalisatie van de toediening laat de meer-opbrengst van CO₂ zakken van € 0.52 naar € 0.45, maar de besparing op CO₂ kosten zijn veel groter dan het verlies aan opbrengst (namelijk van € 0.68 naar € 0.21).

In figuur 5-2 wordt in een figuur die vergelijkbaar is met figuur 4-5 getoond hoe het optimalisatieprogramma de toevoer van zuivere CO₂ over de dag verdeelt.



Figuur 5-2 Maandelijks gemiddeld doseerpatroon van CO₂ middels rookgassen (geregeld door de tuinbouwcomputer) (onderbroken lijn) en additioneel toegevoegd door een optimaliserende zuivere CO₂-regelaar (getrokken lijn). Deel (a) geldt voor aug en sept. 2003 en de andere delen gelden voor 2004.

Het opvallendste verschil tussen figuur 4-5, waar de zuivere CO₂-dosering werd gerealiseerd door de kasklimaatcomputer en figuur 5-2, waar de zuivere CO₂-dosering wordt gerealiseerd door de optimaliserende regelaar is dat de doseerniveaus lager zijn, maar vooral dat de additionele CO₂ op het midden van de dag wordt gegeven. In de praktijk heerst het beeld dat dit een ongunstige periode is omdat de ramen dan ver open staan en de verliezen dus groot zijn. Toch weegt blijkens de optimalisatie dat van het grote licht-aanbod rond het midden van de dag een dusdanig productieeffect mag worden verwacht dat ondanks de grote verliezen van CO₂ het productieeffect juist in die periode opweegt tegen de kosten van CO₂ dosering.

5.2 Effect van de prijs van CO₂ en de prijs van het product

De kern van het CO₂ optimalisatieprogramma is dat van elke kg zuivere CO₂ die in de kas ingebracht wordt beoordeeld of deze zijn geld al dan niet waarmaakt. De consequentie hiervan is de hoeveelheid CO₂ die ingezet wordt sterk zal afhangen van de prijs van de CO₂.

Het effect van de prijs van CO₂ is getoond in tabel 5.1.

Tabel 5.1. Invloed van de prijs van CO₂ op de hoeveelheid CO₂, de extra productie en de winst wanneer de zuiver CO₂ met het optimalisatieprogramma

prijs CO ₂ [ct/kg]	dosering [kg/(m ² jr)]	meerprod. [€/ (m ² jr)]	winst [€/ (m ² jr)]
8	9.02	1.87	1.15
9	7.34	1.59	0.93
10	6.03	1.37	0.77
11	4.82	1.13	0.60
12	3.98	0.97	0.50
13	3.33	0.84	0.41
14	2.72	0.71	0.33

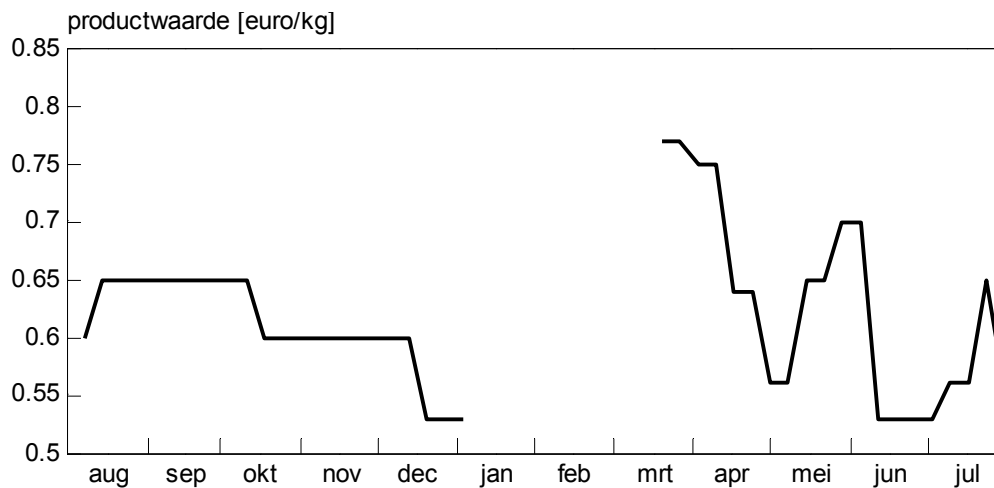
De tabel laat zien dat in de condities die zich gedurende het meetseizoen heeft voorgedaan en bij een CO₂ prijs van 12 cent op jaarbasis bijna 4 kg zuivere CO₂ per m² kas per jaar op bedrijfseconomische gronden kan worden ingezet. Na aftrek van variabele kosten verhoogt deze extra CO₂ de winst met 50 cent per m² per jaar.

Zoals verwacht kan worden zal de optimale inzet van zuivere CO₂ en de winst toenemen wanneer de zuivere CO₂ goedkoper wordt. De tabel laat zien dat er grote wijzigingen optreden wanneer CO₂ goedkoper wordt en minder grote wijzigingen optreden wanneer de CO₂ duurder wordt.

Net zoals een toenemende prijs voor CO₂ de gedoseerde hoeveelheid zal laten afnemen zal een daling van de waarde van het product de inzet van CO₂ laten verminderen. In tabel 5.2 wordt

getoond wat het effect is een daling van de productwaarde met 10 en 20% wat het effect is van een stijging van de productwaarde met 10 en 20%.

Deze percentages gelden ten opzichte van de prijzen die in figuur 5-3 zijn getoond.



Figuur 5-3 Verkoop-prijs tomaten in het tijdvak aug. 2003 t/m juli 2004.

De figuur geeft geen prijzen voor de periode januari en februari. Dit is ook niet nodig omdat in die periode de beschikbaarheid aan rookgas CO₂ groot en de behoefte klein is (zie figuur 4-2) zodat er in die periode geen zuivere CO₂ hoeft te worden gegeven.

Tabel 5.2. Invloed van de productwaarde op de geoptimaliseerde hoeveelheid zuivere CO₂ die bij de teelt wordt ingezet, de extra productie en de winst. Uitgangspunt is dat de zuivere CO₂ 12 cent per kg kost.

productwaarde	dosering [kg/(m ² jr)]	meerprod. [€/ (m ² jr)]	winst [€/ (m ² jr)]
80%	2.25	0.48	0.21
90%	3.12	0.72	0.34
100%	3.98	0.97	0.50
110%	4.91	1.27	0.69
120%	6.06	1.65	0.93

Tabel 5.2 laat zien dat het effect van een verandering van de productprijzen eveneens tot grote variaties in de optimale inzet van zuivere CO₂ leidt. Toch, wanneer de effecten verhoudingsgewijs worden bekeken kan worden gesteld dat 10% lagere opbrengsten voor het gewas een vergelijkbaar effect hebben als een 10% stijging van de prijs voor zuivere CO₂. Ook bij hogere opbrengsten gaat dit op.

Voor de winst is het effect van relatieve veranderingen van de productprijs echter duidelijk sterker dan het effect van relatieve veranderingen van de CO₂ prijs.

6 Conclusies en aanbevelingen

- De optimalisatie van de dosering van zuivere CO₂ kan via een tamelijk recht-toe-recht-aan methode plaatsvinden op basis van publiek toegankelijke kennis.
- De uitvoering van metingen op een praktijkbedrijf geeft een goed inzicht in de wijze waarop met CO₂ wordt omgegaan. De metingen laten zien dat in de zomer vrijwel alle CO₂ die bij de invulling van de warmtevraag vrijkomt wordt gebruikt voor de CO₂-dosering. De metingen geven evenwel ook aan dat de strategie waarmee op het praktijkbedrijf additionele zuivere CO₂ is gegeven niet tot een optimale toediening leidt. De meetdata geven aan dat, uitgaande van een kostprijs van € 0.12 per kg, gedurende de periode waarover data voor handen zijn voor 68 cent CO₂ is toegediend terwijl het berekende productie-effect op een toename van de verkoopwaarde van 52 cent uitkomt. De kasklimaatregelaar heeft dus vaak te veel CO₂ gegeven.
- Doordat er vaak al te veel CO₂ werd gegeven heeft het optimalisatieprogramma erg weinig extra additionele CO₂ op het achterste deel van het bedrijf gegeven. De meetgegevens wijzen uit dat er voor 11.4 cent extra additionele CO₂ is gegeven wat voor 11.8 cent extra (berekende) opbrengsten heeft gezorgd. Deze verschillen zijn dermate klein dat er geen analyse op de productiegegevens is uitgevoerd.
- Wanneer met een simulatiemodel wordt uitgerekend wat de inzet van zuivere CO₂ zou zijn geweest indien het optimalisatieprogramma de vrije hand had gekregen (niet gehinderd was door de reeds toegediende zuiver CO₂) dan zou in de bewuste meetperiode (278 dagen) slechts 1.75 kg zijn gedoseerd (in plaats van 5.66 kg). De kosten dalen daarmee tot 21 cent en de berekende waarde van de meerproductie daalt naar 45 cent. De ingezette CO₂ geeft echter een duidelijke winst van 24 cent, terwijl de gemeten inzet van zuivere CO₂ volgens de berekeningen 16 cent verlies heeft opgeleverd.
- Wanneer een jaarrond scenariostudie wordt uitgevoerd (dus over de vollen 3665 dagen in plaats van de 278 meetdagen) dan blijkt dat bij een kostprijs van zuivere CO₂ van 12 cent per kg Het gebruik van additionele CO₂ bijna 4 kg zal bedragen. De winst bedraagt in dat geval 50 cent per m² per jaar. Als de CO₂ goedkoper is neemt het gebruik en de winst toe (tot 9 kg met een winst van € 1.15 bij een CO₂ prijs van 8 cent per kg). Bij duurdere CO₂ neemt het gebruik en de winst uiteraard af. Bij 14 cent per kg wordt nog 2.7 kg gebruikt, met een winst van € 0.41 per m²/jaar. Hieruit blijkt al dat het effect van duurdere CO₂ kleiner is dan het effect van een afname van de prijs.
- De gevoeligheid van de optimale inzet van CO₂ voor de productprijs is eveneens duidelijk merkbaar. Een 10% toename van de productprijs doet de bedrijfseconomisch optimale inzet van CO₂ met 25% toenemen en de winst met bijna 50%. Bij een 10% lagere productprijs daalt de inzet van zuivere CO₂ met 21% en daalt de winst door zuivere CO₂ toediening met ruim 30%.

Aanbevelingen

- De ontwikkelde programmatuur is rijp voor toepassing. Voor een goede toepassing is het wenselijk dat een applicatie wordt ontwikkeld die nauw samenwerkt met de kasklimaatcomputer. Voor het ontwikkelen van deze applicatie is een goede samenwerking met de leverancier van de kasklimaatcomputer nodig. Voorwaarde daarbij is dat tuinders en kasklimaatcomputer leveranciers op de hoogte moeten zijn van de beschikbaarheid van de in dit rapport uitgewerkte theorie.
- De methodologie, waarbij continu de waarde van de toegediende CO₂ in de gaten wordt gehouden, kan ook worden toegepast om de inzet van rookgas CO₂ verder te optimaliseren. De verwachting is dat hiermee een toename van de productie van bijna 1% gerealiseerd kan worden. Om dit met succes toe te passen in de praktijk moet de kasklimaatcomputer evenwel gebruik maken van lokale weersverwachtingen.

7 Literatuur

Gijzen, H., 1992, Simulation of photosynthesis and dry matter production of greenhouse crops. Simulation report 28, CABO-DLO, Wageningen

Swinkels, G.L.A.M. en H.F. de Zwart, 2002, Optimaal gebruik van CO₂ in de glasgroenteteelt, A&F Wageningen, IMAG nota P2002-68