



CO₂-gebruik moet efficiënter

Mogelijke opties voor zuiniger CO₂-gebruik

Pieter de Visser

Rapport WPR-1282

Referaat

De CO₂ emissie van de hele tuinbouwsector moet in 2030 teruggebracht zijn naar 4.3 tot 4.8 Mton CO₂ equivalenten, bijna de helft van de emissie in 2020. Daarmee wordt het efficiënt benutten van CO₂ door het gewas en het minimaliseren van het verlies van CO₂ van groot belang. Voorgaand KaE onderzoek heeft aangetoond dat er goed geteeld kan worden met een lagere CO₂ dosering dan gebruikelijk. In deze studie is specifiek aandacht besteed aan de tot nu toe vrij onbelichte CO₂-problematiek bij chrysant en paprika. Via discussies met de sector en via studie van eerder onderzoek voor die gewassen is er kennis opgebouwd over de rol van CO₂ in groei, productkwaliteit en over de efficiëntie van de CO₂-inzet. Met reeds beschikbare data zijn de groeimodellen voor chrysant en paprika geïjkt, om er vervolgens kansrijke strategieën voor efficiënt CO₂-gebruik mee te voorspellen. De strategieën zijn met de sector samen geëvalueerd. Enkele strategieën bieden een perspectief voor de praktijk om met verminderd CO₂-gebruik en -verlies kosteneffectief te telen, waarbij wel voor ieder praktijkbedrijf maatwerk nodig is.

Abstract

The CO₂ emissions of the entire horticultural sector must be reduced to 4.3 to 4.8 Mton CO₂ equivalents by 2030, almost half of those in 2020. This makes the efficient use of CO₂ by the crop and the minimization of the loss of CO₂ of great importance. Previous KaE research has shown that it is possible to have an acceptable crop yield with a lower CO₂ dosage than usual. In this study, specific attention was paid to the hitherto relatively unexposed CO₂ problems in chrysanthemum and sweet pepper cultivation. Through discussions with the sector and through a study of previous research for these crops, knowledge has been built up on the role of CO₂ in growth, product quality and on the efficiency of the CO₂ deployment. With already available data, the growth models for chrysanthemum and sweet pepper have been calibrated, in order to predict promising strategies for efficient CO₂ use. The strategies have been evaluated together with the sector. A number of strategies offer a perspective for cultivation practice, in being cost-effective with concomitantly reduced CO₂ use and loss. The strategies require customization for every company.

Rapportgegevens

Rapport WPR-1282

Projectnummer: 3742336900

BO-nummer: BO-53-004-077-WPR

DOI: <https://doi.org/10.18174/644404>

Dit onderzoek is gefinancierd vanuit het onderzoeksprogramma Kas als Energiebron (KaE), het innovatie- en actieprogramma voor energiebesparing en verduurzaming in de glastuinbouw van Glastuinbouw Nederland en het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit.

Disclaimer

© 2024 Wageningen, Stichting Wageningen Research, Wageningen Plant Research, Business unit Glastuinbouw, Postbus 20, 2665 MV Bleiswijk T 0317 48 56 06, www.wur.nl/plant-research.

Kamer van Koophandel nr.: 09098104

BTW nr.: NL 8113.83.696.B07

Stichting Wageningen Research. 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, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Stichting Wageningen Research.

Stichting Wageningen Research aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Adresgegevens

Wageningen University & Research, BU Glastuinbouw

Postbus 20, 2665 ZG Bleiswijk

Violierenweg 1, 2665 MV Bleiswijk

T +31 (0)317 - 48 56 06

F +31 (0)10 - 522 51 93

glastuinbouw@wur.nl

wur.nl/glastuinbouw

Inhoud

Samenvatting	5
1 Inleiding	7
1.1 Achtergrond CO ₂ -problematiek en projectdoel	7
1.2 Indeling rapport	7
2 Beschrijving huidige situatie m.b.t. CO₂-gebruik	8
2.1 Inleiding	8
2.2 Huidige situatie chryasant	8
2.3 Huidige situatie paprika	8
3 Workshops met telers: mogelijke CO₂-strategieën	9
3.1 Inleiding	9
3.2 Chryasant	9
3.3 Paprika	10
4 Methoden	12
4.1 Data uit literatuur en voorgaand onderzoek	12
4.2 Algemene aanpak modelberekeningen	12
4.2.1 Chryasant	13
4.2.2 Paprika	14
5 Resultaten	15
5.1 Chryasant	15
5.1.1 Literatuur over groei, fotosynthese en bodem	15
5.1.2 CO ₂ -scenario's: resultaatoverzicht	16
5.1.3 Resultaat per CO ₂ -scenario	18
5.1.4 Conclusies chryasant	26
5.2 Paprika	27
5.2.1 Literatuur over fotosynthese en CO ₂	27
5.2.2 Resultaat per CO ₂ -scenario	29
5.2.3 Totaaloverzicht scenario's en conclusies paprika	35
5.3 Conclusies modelberekeningen	36
6 Discussie	37
6.1 Recente kennis over CO ₂ -benutting in kas en gewas	37
6.2 Evaluatie van de modelscenario's	38
6.3 Aanbevelingen	38
Literatuur	40
Bijlage 1 Groeimodel chryasant	41
Bijlage 2 Groeimodel paprika	44
Bijlage 3 CO₂-workshop chryasant	47
Bijlage 4 CO₂-workshop paprika 12 okt '23	49
Bijlage 5 Fact Sheets CO₂	53

Samenvatting

De CO₂ emissie van de hele tuinbouwsector moet in 2030 teruggebracht zijn naar 4.3 tot 4.8 Mton CO₂ equivalenten, bijna de helft van de emissie in 2020. Daarmee wordt het efficiënt benutten van CO₂ door het gewas en het minimaliseren van het verlies van CO₂ van groot belang. Voorgaand onderzoek binnen het onderzoeksprogramma Kas als Energiebron heeft aangetoond dat er goed geteeld kan worden met een lagere CO₂ dosering dan gebruikelijk.

In deze studie is specifiek aandacht besteed aan de tot nu toe vrij onbelichte CO₂-problematiek bij chrysant en paprika. Via discussies met de sector en via studie van eerder onderzoek voor die gewassen is er kennis opgebouwd over de rol van CO₂ in groei, productkwaliteit en de efficiëntie van de CO₂-inzet. Voorafgaand aan de modelberekeningen is overlegd met een groep paprikatelers en chrysantentelers om een keuze te maken uit de mogelijke modelscenario's. Via literatuur en met reeds beschikbare data zijn de groeimodellen voor chrysant en paprika geijkt. Essentieel waren de gegevens over de licht- en CO₂-respons van de fotosynthese van enkele gangbare rassen van chrysant en paprika. Ook de oogstgegevens van enkele praktijkconforme teelten, o.a. bij project Perfecte Chrysant, waren van belang voor correcte ijking van het gewasmodel.

Met de geijkte gewasmodellen voor chrysant en paprika, gekoppeld aan het kasklimaatmodel, is er een reeks scenario's gesimuleerd om de verwachte groei, oogst, benodigde CO₂ en verloren CO₂ te berekenen. Hiervoor werden de volgende strategieën voor efficiënt CO₂-gebruik informatief geacht door de betrokken telers:

1. bij zelfde aantal kilo's CO₂ per dag, de hoeveelheid gelijkmatig over de dag verdelen of slechts gedurende korte tijd
2. geeft 100 kg ha⁻¹ uur⁻¹ doseren van mrt-sept een te licht gewas dan 200 kg?
3. gewasvraag naar CO₂ per groeifase
4. hoeveel productie scheelt het als doseren per kap technisch mogelijk zou zijn, in plaats van per kas
5. wanneer kun je stoppen met doseren aan eind van de dag, bv. 0, ½, 1 of 1 ½ uur voor sluiten van scherm voor KD
6. verschil in takgewicht tussen doseren tot 800, 900 of 1000 ppm – vooral buiten de zomer
7. lichtafhankelijk doseren tot een setpoint van 800, 900 of 1000 ppm
8. raamstand-afhankelijk doseren, bijv. boven 20% afbouwen
9. vernevelen
10. semi-gesloten telen
11. in zomer bij grote raamstand slechts tot buitenwaarde doseren
12. luie bladeren vermijden door kas- CO₂ regelmatig naar 400 ppm te laten zakken, maar grotendeels CO₂-concentratie aanhouden die optimaal is voor de fotosynthese
13. meerdere niveaus van CO₂-dosering, variërend van 12 tot 200 kg ha⁻¹ uur⁻¹
14. per kwartaal kiezen voor 50 of 100 kg doseercapaciteit per uur
15. CO₂ uit buitenlucht beter benutten door trek of wind in de ramen

De twee strategieën die zowel CO₂-benutting als oogst verhoogden waren semi-gesloten telen en vernevelen in de zomer. Meerdere strategieën bleken volgens het model de CO₂-benutting te verhogen en slechts beperkt de groei en oogst te verlagen. Daarbij waren raamstand-afhankelijk doseren en verdelen van dosering over de dag -afhankelijk van gewasvraag en laag risico op verlies- gunstig voor de CO₂-benutting met geen of beperkt oogstverlies. In sommige perioden lagere doseercapaciteit inzetten, of in de zomer bij grote raamstand slechts tot de buitenwaarde van CO₂-concentratie, bleken ook effectief. Deze strategieën kunnen bij een hoge CO₂-prijs kosteneffectief zijn want dan kost de CO₂ meer dan het (beperkte) verlies in productie.

De verschillen in rekenresultaat tussen chrysant en paprika bleken beperkt. Beiden hadden een vergelijkbare CO₂-fotosynthese en -behoefte indien het gewas groot en gesloten is, maar tijdens de groei kent paprika een verloop in de gewasopbouw terwijl een chrysantenkas vol staat met planten van allerlei groeistadia en dito CO₂-behoefte. Terwijl bij chrysant het vernevelen een goede optie is om de CO₂-benutting te vergroten, is bij paprika gekozen voor de optie semi-gesloten telen.

De rekenresultaten van de strategieën zijn met de sector samen geëvalueerd. Enkele strategieën bieden een perspectief voor de praktijk om met verminderd CO₂-gebruik en -verlies een redelijke gewasproductie te realiseren, waarbij wel voor ieder praktijkbedrijf maatwerk nodig is. Afsluitend zijn enkele "do's and dont's" geformuleerd vanuit de beschikbare kennis om de telers te ondersteunen om het gebruik van CO₂ te verlagen. In de vorm van overzichtelijke 'fact sheets' zijn de resultaten samengevat. Deze studie is tot stand gekomen met behulp van financiering uit het onderzoeksprogramma Kas als Energiebron.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond CO₂-problematiek en projectdoel

In de afgelopen jaren is de input van fossiele energie in de glastuinbouw gestaag gedaald door ontwikkelingen zoals Het Nieuwe Telen en het gebruik van aardwarmte. Daardoor neemt ook de beschikbare hoeveelheid CO₂ als bijproduct van aardgas af, en moeten telers meer gebruik maken van alternatieve bronnen van CO₂ (OCAP, zuivere CO₂ inkopen). De emissie van de tuinbouwsector moet landelijk verminderen van 7.9 (2020) naar 4.3 tot 4.8 Mton CO₂ equivalenten (ca. 93% CO₂, rest is methaan) in 2030. Daarmee wordt het efficiënt benutten van CO₂ door het gewas en het minimaliseren van het verlies van CO₂ nog belangrijker dan het al was. In voorgaande KAE onderzoeken bij tomaat (Gelder et al., 2012; Visser et al., 2019, 2021) en komkommer (Bijlaard et al., 2023) is aangetoond dat er goed geteeld kan worden met soms de helft van de gebruikelijke CO₂ dosering. Het probleem van lage beschikbaarheid van CO₂ en grote ventilatieverliezen speelt alleen bij hoge instraling en grote raamstanden (vooral zomermaanden), en hier zal het onderzoek zich op moeten toespitsen. Voor verbreding van deze kennis naar andere gewassen als paprika en de sierteelt is nog onderzoek nodig wat de precieze reactie van het gewas op CO₂ is en hoe de CO₂ benutting efficiënter kan. Bij chrysant is daarbij mogelijk relevant dat er CO₂ vrij komt bij afbraak van organische stof in de bodem; dit kan in mindering gebracht worden op de dosering. Daarnaast moet de financiële afweging gemaakt worden tussen de baten (meer productie in zomer) en kosten van CO₂. De vraag is of CO₂-dosering in de zomer in de toekomst nog rendabel is, en hoe de sector hier over denkt.

Doel van de studie:

- Bewustwording in de glastuinbouwsector m.b.t. de noodzaak het zomers CO₂ gebruik in de toekomst aanzienlijk terug te brengen.
- Kennisopbouw t.a.v. CO₂-benutting door chrysant en paprika.
- Leveren van handvatten voor toekomstig lager CO₂ gebruik in de praktijk door doorrekening van CO₂ gebruik, verliezen en mogelijke kosten in paprika en chrysant.

Het onderzoek zal gebruik maken van de kennis en ervaring uit ander CO₂ onderzoek zoals bij tomaat (Gelder et al., 2012; Visser et al., 2019, 2021) en komkommer (2023). Tevens zijn kengetallen te gebruiken uit meerdere KAE-projecten van paprika (energiezuinig met LED) en chrysant, en uit onderzoek naar paprika en CO₂ (Dieleman et al., 2003; Hogewoning et al., 2015).

In het kader van dit onderzoek zijn bijeenkomsten met chrysantentelers en paprikatelers georganiseerd. Daarnaast is via een literatuuronderzoek zoveel mogelijk informatie uit onderzoek en praktijk verzameld in relatie tot het onderwerp.

1.2 Indeling rapport

In hoofdstuk 2 wordt een schets gegeven van de huidige situatie in de chrysanten- en de paprika-sector. Deze situatie wordt als start gebruikt in de eerste workshop met telers, om daarmee opties voor een efficiënter CO₂-gebruik te benoemen. Deze eerste workshop-discussie en opsomming van de opties worden gepresenteerd in Hoofdstuk 3. De data -uit literatuur en onderzoek- en modellen die hiervoor gebruikt zijn, worden in Hoofdstuk 4 beschreven. Vervolgens worden in Hoofdstuk 5 de genoemde opties doorgerekend met het bij WUR Glastuinbouw beschikbare kas- en gewasmodel op hun consequenties voor CO₂-benutting en gewasproductie. Afsluitend worden in Hoofdstuk 6 de discussie over de bevindingen met de telers kort samengevat. Resterende uitdagingen en kennishiaten worden benoemd. Tot slot wordt een top-3 adviezen benoemd voor efficiënter gebruik van CO₂.

2 Beschrijving huidige situatie m.b.t. CO₂-gebruik

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een schets gegeven van de huidige situatie in de chrysanten- en de paprika-sector. Tot slot worden de opties voor een efficiënter CO₂-gebruik besproken die in overleg met de telers zijn benoemd. In Hoofdstuk 4 worden deze opties middels een kas- en gewasmodel doorgerekend op hun consequenties voor CO₂-benutting en gewasproductie.

2.2 Huidige situatie chrysant

De meeste chrysantenteelten worden belicht zodat jaarrond geproduceerd kan worden. Geleidelijk aan worden de SON-T lampen vervangen door energiezuiniger LED-lampen. De aanwezige WKK kan CO₂ leveren voor de gewasgroei maar is nauwelijks regelbaar (alleen aan of uit, met eventueel het sluiten van slangen naar bepaalde kappen met bijv. een gewas in de langedag fase). De teelt bestaat uit twee fasen, langedag (LD) en kortedag (KD) met resp. een lichtperiode langer en korter dan 12 uur. In een kas bevinden zich velden met planten in meerdere groeifasen, zodat op kasniveau dagelijks kan worden geoogst. De CO₂-problematiek betreft -naast het niet kunnen regelen van de rookgas-CO₂ aanvoer- vooral het ontbreken van een OCAP-netwerk in de Bommelerwaard, een belangrijke regio voor chrysant. Hierdoor is in perioden dat niet gestookt wordt aanvoer van zuivere CO₂ nodig, hetgeen bijzonder duur is. Daarnaast is er de behoefte rookgas-CO₂ te kunnen opslaan voor later gebruik, een techniek die nu nog niet betaalbaar voorhanden is.

2.3 Huidige situatie paprika

In paprika wordt vrijwel niet belicht, en wordt een teelt gestart aan het eind van het jaar om zo met de zon mee te gaan produceren. Gaande de teelt wordt het bladpakket groter (er wordt geen blad geplukt, wel wordt een maximum aantal stelen per plant aangehouden) en is er meer CO₂-vraag door het gewas. Hoewel er vaker een OCAP-aansluiting is dan bij chrysantentelers, is er vaak toch een probleem met de levering rond juni, als OCAP aan onderhoud doet. De telers zijn ongerust over de prijsontwikkeling van de CO₂. Adviezen ten aanzien van de CO₂-efficiëntie zijn algemeen welkom. Maar nauwkeurige CO₂-regelstrategieën zijn pas zinvol als de CO₂-sensoren betrouwbaarder worden.

3 Workshops met telers: mogelijke CO₂-strategieën

3.1 Inleiding

De mogelijk CO₂-efficiënte strategieën in de teelten van chrysant en paprika zoals in de workshops zijn opgesomd worden hier vermeld. In de volgende hoofdstukken worden rekenmethoden en de resultaten van de strategieën gerapporteerd. Vergelijkbare CO₂-toedieningsscenario's als voor de hier onderzochte chrysant en paprika zijn eerder voor tomaat gedaan (Visser et al., (2019 en 2022).

3.2 Chrysant

De teelt van chrysanten kent enkele teelt-specifieke kenmerken die relevant zijn bij het gebruik van CO₂. Het is een volleggrondsteelt waarbij CO₂ vrij komt uit de bodem. De teelt is belicht waardoor er in de wintermaanden continue wordt door geteeld, en er een grotere vraag is naar CO₂ door de via belichting verhoogde fotosynthese. Afhankelijk van het type lampen en kaseigenschappen kan belichting ook leiden tot warmteoverschot waardoor soms gelucht moet worden. Daarnaast bevat de kas meerdere vakken waarin zich chrysanten bevinden van een specifiek teeltstadium, zodat de CO₂ in de kaslucht op elk moment door planten in alle groeistadia wordt benut. Zie Tabel 1 voor de voorgestelde scenario's.

Tabel 1 Voorgestelde scenario's chrysant.

Nr	Scenario
0	Standaard scenario
1	Bij zelfde aantal kilo's CO ₂ per dag, de hoeveelheid gelijkmatig over de dag verdelen of slechts gedurende korte tijd
2	Laat model ook zien dat van mrt-sept 100 kg/ha/hr doseren een te licht gewas (ca. 20% minder dan optimaal) geeft dan 200 kg?
3	Gewasvraag naar CO ₂ per groeifase: vooral vanaf dag 15 in KD groeit het gewas enorm hard en heeft ook veel behoefte aan CO ₂ , terwijl bij LD en aan eind van teelt er veel minder gewichtsgroei is. Wat is er in al die fasen nodig, en wat is per fase het effect van lagere doseercapaciteit (halveren)
4	Verschil tussen doseren per kap/teeltfase en doseren van hele kas, want hoeveel productie scheelt het als doseren per kap technisch mogelijk zou zijn
5	Wanneer kun je stoppen met doseren aan eind van de dag, bv. 0, ½, 1 of 1 ½ uur voor sluiten van scherm voor KD
6	Verschil tussen doseren tot 800, 900 of 1000 ppm – vooral buiten zomermaanden als er weinig ventilatieverlies optreedt – wat levert dat op qua takgewicht
7	Lichtafhankelijk doseren tot een setpoint van 800, 900 of 1000 ppm, want in winter is wellicht minder hoge concentratie nodig bij het weinige licht
8	Vernevelen of niet: heeft meerdere voordelen m.b.t. CO ₂ : hogere RV zorgt ervoor dat huidmondjes open blijven en CO ₂ opnemen (gewas koelt en is zonder stress), hogere energie-inhoud van lucht betekent kleinere raamstand voor zelfde warmte afvoer en dus minder ventilatieverlies van CO ₂
9	Rasverschillen: sommige rassen moeten groot takgewicht opbrengen voor de markt, en vragen dus hogere belichtings- en CO ₂ -niveaus, en een modernere, lichte kas. Bereken verschil tussen licht en een zwaar ras, m.b.t. CO ₂ -dosering en -opbrengst

En er waren nog twee aanvullende berekeningen:

- Rol van CO₂-bron uit ademhaling van gewas en bodem, o.a. op LD-gewas wat onder doek nog wel licht krijgt en CO₂ onttrekt van rest van de kas (waar KD al in donker staat)
- Actief koelen (met semi-gesloten telen): dan kunnen ramen langer of helemaal dicht blijven zodat er geen CO₂ verloren gaat naar de buitenlucht.

Randvoorwaarden voor scenario's 8 en 9 waren: eerst testen of effect van bovengronds beregenen en het RV-effect op huidmondjes in rekenmodel klopt.

Verdere randvoorwaarden:

1. groeimodel eerst kloppend maken voor Baltica met de data van Perfecte Chrysant en van enkele aanwezige data van praktijkbedrijven
2. controleer of het effect van RV op de huidmondjesopening correct wordt gemodelleerd
3. nadruk in berekeningen op zomerperiode.

3.3 Paprika

In overleg met een groep telers zijn de volgende strategieën voorgesteld voor doorberekening (Tabel 2).

Tabel 2 Voorgestelde strategieën paprika.

Nr	Scenario	Opmerkingen
0	Standaard (referentie) scenario	Waarbij ongeveer 30 kg m ⁻² vruchtproductie per teelt
1	In zomer, bij grote raamstand, tot buitenwaarde doseren (1A), wat is het verschil in productie t.o.v. niet doseren (1B) en t.o.v. wel maximaal doseren (1C)	Gebruik van buiten-CO ₂ is natuurlijk zeer efficiënt, maar zonder extra dosering kan de CO ₂ -concentratie door gewasopname flink dalen
2	Luie bladeren vermijden door kas- CO ₂ regelmatig naar 400 ppm te laten zakken, maar grotendeels CO ₂ -concentratie aanhouden die optimaal is voor de fotosynthese	Hier nemen we de mogelijke plantadaptatie aan lager CO ₂ mee
4	Meerdere niveaus van CO ₂ -dosering, dus niet alleen ½ en ¼ van conventioneel. Suggestie: 12, 25, 50, 75, 100 en 200 kg ha ⁻¹ uur ⁻¹ , en dan 1 uur na zonop tot 1 uur voor zon onder, en zowel 600 als 800 ppm setpoint (dus 2 x 6 varianten)	Conventionele niveau wordt geschat op ca. 100 ha ⁻¹ uur ⁻¹ , met een jaartotaal van 70 kg m ⁻²
5	Minder doseren in zomer vergelijken met minder doseren in voor- en najaar wanneer er minder licht is. Voorstel: per kwartaal 50 i.p.v. 100 kg doseercapaciteit per uur.	Dosering halveren in een kwartaal (dec-feb/mrt-mei/jun-aug). Op jaarbasis dezelfde hoeveelheden
6	CO ₂ uit buitenlucht beter benutten: boven ventilatietemperatuur ramen juist geheel open (6A) of bij veel wind 20% raamstand om te zorgen voor trek via de ramen (6B)	Rol van windsnelheid, -richting en raamoppervlak op ventilatievoud benutten
8	Via kleine kier de buiten- CO ₂ inlaten en benutten, en zorgdragen voor minimaal energieverlies. Varianten 1, 2, 3 en 4% kier.	Variante van scenario 1 maar dan met kleine raamstand
9-ini	Ref vergelijken met dos.cap vanaf 20% omlaag tot 0 dosering bij 100% raam; start bij zon-op, eind bij zon-onder	Vergelijken met 9 waarin boven 20% raam helemaal niet gedoseerd wordt
9	Op warme zomerdag al bij zon-op beginnen met doseren, en capaciteit 2x t.o.v. standaard-scenario. Stoppen voordat de raamstand >20% komt; in de namiddag pas bij raam <20% beginnen met doseren	
10	Semi-gesloten telen vs. open kas: verschil in CO ₂ -benutting	
11	Langer lagere concentratie of korter hogere concentratie CO ₂	Bij zelfde doseerhoeveelheid, bijv. 500 vs 800 of 600 vs 900 ppm
12	Benodigde CO ₂ bij diverse stadia van groeigewas	Aangeven hoeveel CO ₂ wordt opgenomen bij diverse LAI's en plantbelastingen
Niet uitgevoerd want niet mogelijk met kasklimaat model:		
I	Hoge lichtniveaus wegschermen (vooral op zomerdagen) om schade aan fotosynthese apparaat te vermijden, en zo het vermogen tot CO ₂ -assimilatie te behouden. Niveaus 800 (3A), 1000 (3B) en 1200 (3C) umol m ⁻² s ⁻¹	In loop van dag met veel instraling loopt het fotosynthese apparaat schade op (lichtstress door fotorespiratie e.d.) en dat vermindert de fotosynthese en kost hersteltijd (meestal in de nacht).
II	CO ₂ uit buitenlucht beter benutten: boven ventilatietemperatuur ramen juist geheel open (6A) of bij veel wind 20% raamstand om te zorgen voor trek via de ramen (6B)	Rol van windsnelheid, -richting en raamoppervlak op ventilatievoud benutten

Overige vragen die ter sprake kwamen:

Wat moet je vooral niet doen bij CO₂-dosering, geef een soort do's & dont's. Ook voor de hand liggende zaken melden, om goede basis te leggen. Bijv. niet in de nacht doseren, alleen als het licht is (welk niveau is wel een discussiepunt)

Hoeveel CO₂ kun je benutten door trek van lij- naar luw-zijde

Paprika is ander, houtiger, trager gewas dan tomaat, en zal anders met CO₂ omgaan. Geef aan hoe. Welke basiskennis is er nu, hoe goed is die, en wat zijn de onzekerheden?

In winter is de OCAP-CO₂ goedkoper dan in zomer; graag ook de OCAP-toeslag meenemen (helaas zijn mij de tarieven niet bekend, zijn ook niet gedeeld).

Is een semi-gesloten kas in de toekomst gunstiger dan de standaard, open Venlo-kas?

Kan aanschaf van mass flow controllers terugverdiend worden via de besparing op CO₂-gebruik?

Antwoorden op in overleg gestelde vragen:

CO₂ is binnen een halve minuut van doseerslang bij het hele gewas (Vraag was: hoe snel verplaatst CO₂ zich van de doseerslang/darm naar het gewas?). Alleen nog vloeibare CO₂ blijft wat op de grond hangen voordat het verdampt (en zich dan dus snel verspreid).

Met name zon-belichte en dan te warme vruchten moeten vermeden worden. En de fotosynthese is ook niet meer optimaal boven de 27 graden (Vraag was: zijn hoge temperaturen schadelijk, bv. als je de ramen langer dicht houdt om CO₂ binnen te houden).

4 Methoden

4.1 Data uit literatuur en voorgaand onderzoek

Voor berekening van de juiste dosering en benutting van CO₂ door het gewas moet het model gevoed worden met correcte data. Zowel kennis van de meest gangbare teelt strategieën (bv. plantdichtheid) als de fysiologische eigenschappen van de betrokken planten zijn nodig voor het kas- en gewasmodel. Zowel naslagwerken die teelttechnieken uitgebreid bespreken (als de handleiding voor chrysant van Spaargaren, 1996) als proefresultaten van nu nog in gebruik zijnde rassen zijn hiervoor benut. De volgende data zijn gebruikt voor de twee gewassen:

Chrysant:

Voor deze studie is gekozen voor het gangbare, veel onderzochte ras Baltica. De groei en resulterende taggewichten voor Baltica (en ook enkele andere rassen) zijn in detail opgemeten tijdens de 23 teelten die voor project Perfecte Chrysant bij Delphy en een praktijkbedrijf zijn uitgevoerd. Tevens zijn de settings van de klimaatcomputer altijd geregistreerd, en waren voor een periode van 2 jaar alle condities van het binnenklimaat bekend. Bij de modelcalibratie zijn enkele representatieve teelten gebruikt (Teelten 16 t/m 19, zie Raaphorst et al., 2022) maar ook enkele andere teelten om een goed beeld van de gewasontwikkeling, LAI, lichtbenuttingsefficiëntie, reactietijden en taggewichten te krijgen.

Voor de fotosynthese karakteristieken is gebruik gemaakt van meetresultaten van Plant Lighting (Hogewoning et al., 2015; Boogaart et al., 2019; Hogewoning en Trouwborst, 2022), die ook andere rassen hebben onderzocht dan Baltica (o.a. Bacardi). Voor drogestofverdeling naar stengel, blad en bloem is geput uit het standaardwerk van Spaargaren (1996), en aangevuld met metingen bij Delphy (Raaphorst et al., 2022) en Plant Lighting (Boogaart et al., 2019).

Paprika:

De data over groei en oogst bij een gebruikelijk paprika-ras (Meteor, rood) zijn betrokken uit een oudere proef bij WUR (Dieleman et al., 2003). Hierbij waren ook de condities van het kasklimaat bekend zodat een model calibratie mogelijk was. De data met betrekking tot fotosynthese kwamen ook van deze proef, maar zijn aangevuld met enkele meetpunten verzameld door Plant Lighting voor paprika. Voor kennis over de huidige teelttechniek is informatie over plantdichtheid, aantal aangehouden stelen en vruchtbeleid van een teler overgenomen (YouTube).

In Bijlagen 1 en 2 worden in detail de in de berekeningen gebruikte data genoemd.

4.2 Algemene aanpak modelberekeningen

Voor de modelberekeningen aan CO₂-toedieningsstrategieën is het model Kaspro/Intkam van WUR Glastuinbouw gebruikt. Het kasklimaatmodel Kaspro genereert op basis van een buitenklimaat (normjaar of een specifiek meetjaar, flexibele tijdstap, meestal 5 of 10 minuten) een binnenklimaat op basis van settings zoals die in de klimaatcomputer worden ingesteld (zie o.a. Zwart, 1996). Met dit binnenklimaat berekent gewasgroeimodel Intkam de groei en oogst van het product (bloem, vrucht) (zie o.a. Marcelis et al., 2009). De berekende LAI (bladoppervlak per m² kas) wordt per rekenstap van 5 minuten teruggevoerd aan Kaspro voor simulatie van licht-, energie- en waterfluxen.

Fotosynthese:

Het gewasgroeimodel Intkam gebruikt de algemeen geaccepteerde Farquhar-vonCaemmerer-Berry fotosynthesemodule om de fotosynthese te berekenen (Farquhar et al., 1980). De module is regelmatig vernieuwd, de meest recente update is gedocumenteerd in Qian et al., (2012). In het model zijn de geabsorbeerde PAR en bladtemperatuur voor elk van 4 bladlagen vanuit Kaspro naar input voor Intkam, alsmede de gemiddelde CO₂ en VPD (dampdrukdeficiet) van de kaslucht. De bovenste bladlaag is bij een PAR boven 1200 μmol m⁻² s⁻¹ lichtverzadigd, en boven 700 ppm CO₂ vrijwel optimaal voorzien van CO₂. In een vol gewas zullen bladeren onderin het gewas nooit lichtverzadigd zijn, en is een CO₂-niveau van 700 ppm voldoende voor optimale fotosynthese. De lichtonderschepping wordt met de Lambert-Beer vergelijking berekend. In de hier gebruikte modelaanpak zijn er 3 bladlagen, i.e. een bovenste en twee gelijkwaardige lagen daaronder, onderscheiden voor de waarden voor maximale carboxylatie (V_{cmax}) en electrontransportsnelheid (J_{max}), die resp. met 13 en met 25% lager waren in de onderste 2 lagen t.o.v. de bovenste laag. De Farquhar-fotosynthese wordt uiteindelijk berekend door keuze uit het minimum tussen licht-afhankelijke (via de J_{max}-formule) en CO₂-afhankelijke (via de snelheid van CO₂-transport door huidmondjes en mesofyl, alsmede de snelheid van CO₂-binding door Rubisco) fotosynthese.

CO₂-dosering:

Rekenmethoden om de benodigde dosering in te schatten om een bepaalde productie te behalen zijn al jaren geleden ontwikkeld. Met het kasklimaatmodel Kaspro is daarvoor bijvoorbeeld een schatting gemaakt voorafgaand aan de tomatenproef bij het Improvement Center in 2011 en bij proeven aan o.a. tomaat, komkommer en framboos bij WUR in de afgelopen 3-4 jaar. Hiervoor wordt de CO₂-doseercapaciteit als gegeven ingevoerd, evenals de CO₂-bronnen (WKK, ketel, vloeibaar). Tevens worden setpoints voor de CO₂-concentratie in de kas ingevoerd, met hun afhankelijkheid van raamstand, lichtniveau en windsnelheid buiten. De modelmatige schatting van de CO₂-benutting door het kas/gewas systeem is daarbij wel wat onzeker en moet in de proeven altijd gevalideerd worden. Redenen zijn dat (a) de benodigde ventilatie (en dus het verlies van gedoseerde CO₂) moeilijk vooraf in te schatten is omdat het buitenklimaat een onzeker factor is, en (b) de mate van vermindering van CO₂-opname boven concentraties van 800 ppm op een onbekende wijze varieert met de heersende plantbelasting (dus mate van sink). Met punt (a) is rekening gehouden voor de geijkte parameters te gebruiken van het kascompartiment bij WUR Bleiswijk van de tomatenproef (Visser et al., 2022), met een Venlo-type kasconstructie, een kasdek met helder glas zonder coating, een energie- en een verduisteringsscherm, en buisverwarming. Punt (b) is verdisconteerd door de assimilatenproductie die hoger is dan de vraag in een geschatte reserve-pool te stoppen mits die vol zit, want dan worden de assimilaten verwijderd (dit heeft hetzelfde effect als direct remmen van de fotosynthese bij source/sink > 1).

Parameters voor chrysant en paprika:

De parameters en teelt-settings voor de berekening van gewasgroei en CO₂-benutting door de gewassen chrysant en paprika zijn bepaald m.b.v. de literatuur en de eerder uitgevoerde proeven bij WUR en Delphy. De ijking van die parameters wordt beschreven in de bijlagen 1 en 2.

Klimaat:

De klimaatinput voor het kasmodel voor de scenario's bestond uit het buitenklimaat van het normjaar, regio Bleiswijk, met de kaseigenschappen van een compartiment van WUR Bleiswijk. Voor de calibraties zijn voor chrysant de settings van het binnenklimaat van proeven 16 t/m 19 van Perfecte Chrysant gebruikt (zie de bijlagen in Raaphorst et al., 2022), voor paprika de settings zoals gebruikt in Dieleman et al., (2003). Uiteraard zijn de settings voor de CO₂-scenario's (concentratie setpoints gedurende de dag en bij bepaalde raamstanden, alsmede de doseercapaciteit en gebruikte CO₂-bron) bepaald aan de hand van het gekozen scenario, zie Hoofdstuk 3.

4.2.1 Chrysant

Ijking van het chrysantenmodel is gedaan met behulp van de klimaat- en groeidata van project Perfecte Chrysant bij Delphy Improvement Center. Hierbij zijn teelten 15, 16, 18, 19 en 20 gebruikt aangezien deze allen in de geschikte perioden (januari-februari voor voorjaar-scenario, en april-oktober voor zomer-scenario's) vielen en goed gedocumenteerd waren (Raaphorst et al., 2022).

In de scenario's voor chrysant zijn de volgende aannamen gedaan:

1. In alle scenario's is gerekend met drie opeenvolgende teelten van totaal 210 dagen (15 april – 26 oktober).
2. De teelt start direct in de korte-dag fase, aangezien het kasmodel Kaspro niet tussentijds van belichtingsinterval kan wisselen en de plantjes in de lange-dag fase nog nauwelijks groeien en weinig CO₂ benutten en er daarom in de praktijk nog geen dosering wordt gegeven.
3. Er wordt belicht met LEDs, 185 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 100% tot 150 W m^{-2} , en 50% tot 225 W m^{-2} .

De uitkomst van de standaard strategie is eenmalig vergeleken met een standaard strategie waarbij we een gemiddelde gebruikten van de groei in 10 kraanvakken met teelten die onderling 1 week in leeftijd verschillen, wat in die 210 dagen betekent dat per kraanvak er 3 teelten van 70 dagen groeiden, en in totaal dus 30 afzonderlijke teelten werden doorgerekend.

4.2.2 Paprika

Voor de scenario's is m.b.t. het klimaat met het normjaar gewerkt. Voor ijking en check van het model is wel een specifieke periode gebruikt: 7 feb 2002 t/m 30 juni 2002, i.e. de periode waarin een WUR-proef met paprika heeft gedraaid en waar veel modelparameters aan zijn ontleend. Daarbij was de doseercapaciteit 100 $\text{kg ha}^{-1} \text{hr}^{-1}$ met CO₂-setpoints van 380, 580 en 780 ppm overdag conform de proef. Het betrof een onbelichte teelt met 6.4 stengels per m², die ontsprongen aan 3.2 planten per m², dus per plant 2 stengels. Voor de scenario's zijn de volgende uitgangspunten gebruikt:

- Teeltperiode van 1 dec t/m 30 oktober, onbelicht
- Normjaar voor klimaat, en kaseigenschappen van een 144 m² compartiment bij WUR Bleiswijk
- Stengeldichtheid: 10 stengels per m²
- Gemeten fotosynthese respons in model
- Bladopbouw en vruchtproductie conform proef in 2002
- Zowel groei van blad als vrucht reageert op assimilatenvoorziening

Bij een CO₂-dosering van 100 $\text{kg ha}^{-1} \text{hr}^{-1}$ en een CO₂-setpoint van 800 ppm is dan de jaarproductie ongeveer 32 kg verse paprika m².

5 Resultaten

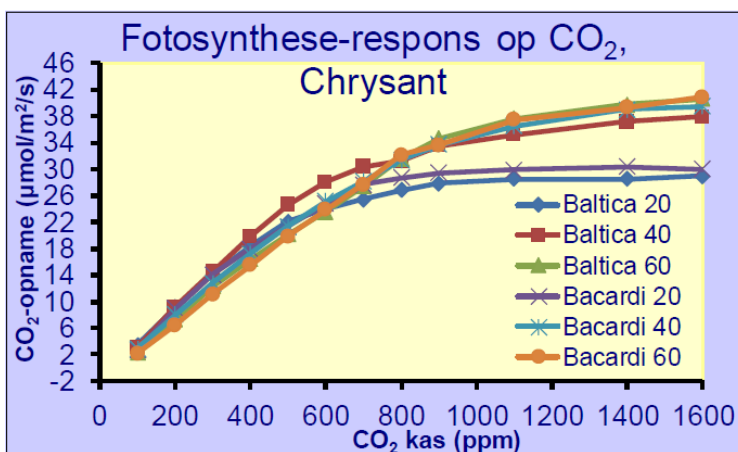
5.1 Chrysant

De resultaten zijn uitgesplitst in een korte verslaglegging van de literatuurstudie, gevolgd door de modelberekeningen. De modelwerking wordt beschreven in bijlage 1.

5.1.1 Literatuur over groei, fotosynthese en bodem

Chrysant is een goed onderzocht gewas. Veel oudere literatuur uit o.a. Denemarken (e.g. Carlsson et al., 1989, en onderzoekers als Rolf Larsen en Olivier Körner) en het Verenigd Koninkrijk (o.a. Cockshull & Kofranek, 1994) tonen de invloeden van licht, daglengte en temperatuur op groei en ontwikkeling van chrysant. Deze invloeden zijn bijzonder compleet vastgelegd in een handleiding voor telers (Spaargaren, 1996). Er was genoeg kennis om zelfs complexe 3D modellen mee te construeren (Visser et al., 2006). Voor deze CO₂-studie, waarin vooral de gevolgen van CO₂ op groei en productie relevant zijn, kan een eenvoudiger drogestofmodel als Intkam (Marcelis et al., 2009) volstaan. Als dit model voor een recent, representatief ras kan worden geijkt/gecalibreerd, zijn daarmee de CO₂-scenario's goed te simuleren.

Doorslaggevend voor een goede ijking zijn de data over de productie maar ook over de groeirespons op de CO₂-concentratie. De CO₂-responscurven zijn voor rassen Baltica en Bacardi in detail bepaald door Plant Lighting (zie o.a. Boogaart et al., 2019). Daarbij werd rekening gehouden met o.a. de invloed van plantleeftijd, bladpositie aan de plant, gewinning aan CO₂. Een voorbeeld van de gebruikte data is te zien in Figuur 1. Model ijking op de productie is goed mogelijk m.b.v. de vele data uit het project Perfecte Chrysant (Raaphorst et al., 2022). De dynamiek van de gewasgroei van begin tot einde teelt is daarbij van belang als het de rol van CO₂ en fotosynthese betreft: uit o.a. Boogaart et al., (2019) en Visser et al., (2006) blijkt dat de plant in begin korte dag een assimilatenvoorraad aanlegt in met name de steel, die tijdens de bloei wordt aangesproken. In de bloei is er namelijk een grote assimilatenvraag voor bloemopbouw en tegelijkertijd een verminderde plantfotosynthese door afsterven blad en beschaduwing door de bloemenkransen.



Figuur 1 Effect van CO₂ op de bladfotosynthese van chrysantenrassen Baltica en Bacardi, op dagen 20, 40 en 60 na planten. Temperatuur tijdens de metingen was 18 °C en het lichtniveau 1000 µmol PAR m⁻² s⁻¹. Data uit Boogaart et al. (2019).

Bij de chrysantenteelt kan de respiratie van bodemorganische stof en organische meststoffen wellicht voor een aanzienlijke extra bron voor CO₂ zorgen. In een studie naar organisch stofmanagement in chrysant zijn in labmetingen afbraaksnelheden gemeten waarmee de CO₂-emissie naar de lucht kan worden berekend (Marcelis et al., 2003). Het ging in die studie om courante organische meststoffen, meestal gewonnen uit restproducten (bv. bloedmeel). CO₂-emissies zijn ook gemeten in teeltbedden van Alstroemeria, waar ook het effect van verse bladresten en snoeiafval werden meegenomen (García et al., 2017)). Met de uitkomsten van die literatuurdata is in al de simulaties gerekend (zie o.a. tekst vak in §5.1.2).

Uiteindelijk is de vraag: hoeveel CO₂ heeft de chrysant nodig voor een goede groei en productie?

Een kleine rekensom met de uit de Perfecte Chrysant gebruikte data:

Het ras Baltica produceert 850 g drogestof m⁻² (110 g versgewicht per tak) in teelt 15 (Perfecte Chrysant) in mei/juni '20.

Dit is 2.83 mol CH₂O (koolhydraat, belangrijkste bestanddeel van de biomassa).

Dit is qua koolstof hetzelfde als 1.25 kg CO₂ (2.83 mol CO₂ x 44 g per mol) die in plant is vastgelegd.

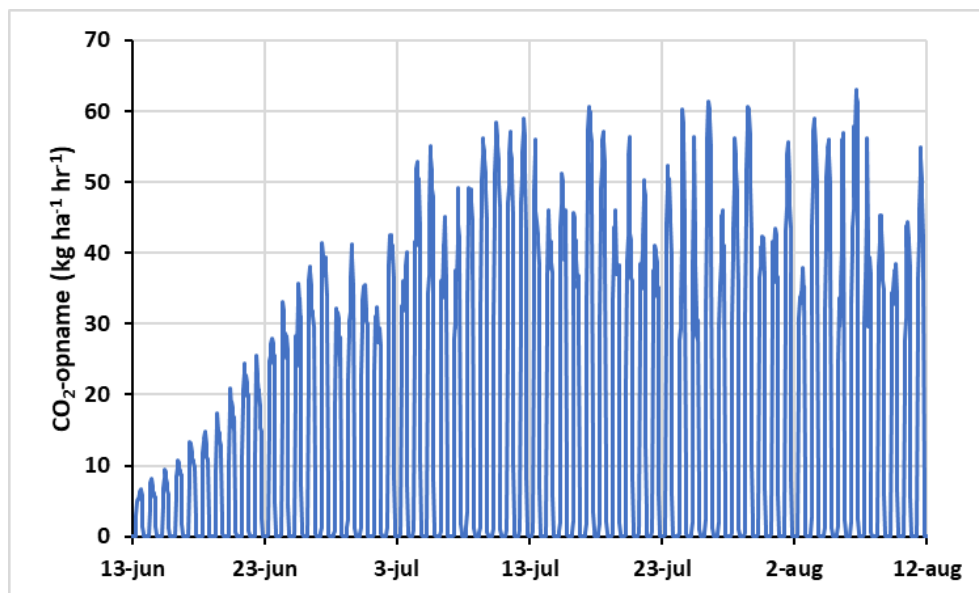
Dosering was ongeveer 7.5 kg CO₂ m⁻² per teelt (ca. 100 kg doseercap.)

→ CO₂ efficiency van 1.25/7.5 = 17%

De efficiency is eigenlijk nog wat minder omdat van de gedoseerde CO₂ er best veel wordt weg-geventileerd waarbij die warme lucht wordt uitgewisseld met buitenlucht met lagere CO₂-concentratie.

N.B. netto vastlegging is wat anders dan fotosynthese. Er wordt meer CO₂ benut door de fotosynthese dan boven vermeld omdat een aanzienlijk deel van de fotosynthese-suikers omgezet worden in energie voor groeiprocessen en onderhoudsprocessen (resultierend in groei- dan wel onderhouds-ademhaling). Zoals zal blijken uit de scenario-berekeningen is ongeveer 2x zoveel CO₂ geassimileerd via bruto fotosynthese dan uiteindelijk vastgelegd wordt. Dit betekent dat dan 2 x 17% = 34% van de gedoseerde CO₂ gebruikt is in fotosynthese. Maar ongeveer de helft daarvan komt dus via de ademhaling weer terug in de lucht.

In Figuur 2 is dan te zien hoeveel CO₂ er per uur werd opgenomen door fotosynthese in een zomerteelt. Als er geen ventilatieverlies zou zijn, is een doseercapaciteit van 60 kg ha⁻¹ uur⁻¹ dus voldoende voor de groei.



Figuur 2 CO₂-opname door fotosynthese van een teelt in de zomer.

5.1.2 CO₂-scenario's: resultaatoverzicht

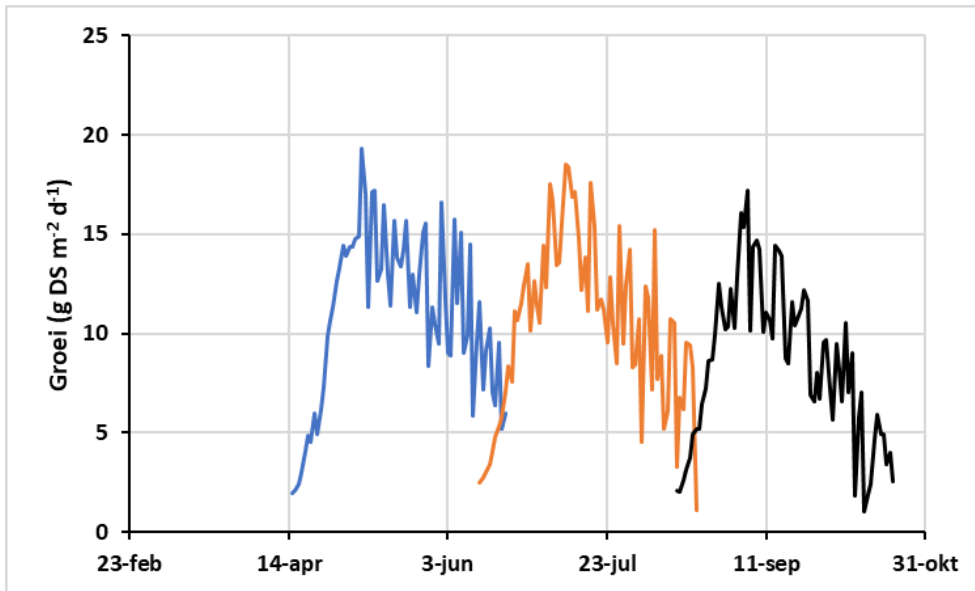
Elk scenario resulteerde in een gewasproductie, een opname van CO₂ (zowel van gift als buitenlucht) en een gesimuleerd verlies uit de ramen. De modelresultaten voor alle scenario's (Tabel 3) betreffen 3 aansluitende teelten van april tot eind september (alle scenario's behalve 4 en 6), een gemiddelde van de gelijktijdige teelten op 10 velden (scenario 4) en een periode in het voorjaar, van januari tot begin maart (scenario 6).

De aansluiting van de 3 "zomer"-teelten is gedaan voor de KD-fase, terwijl de LD-fase van de vervolgteelt al plaats vindt aan eind van KD van vorige teelt, zoals is geïllustreerd met de drogestofproductie in Figuur 3. In de figuur is duidelijk zichtbaar dat na 1-2 weken KD de groei het hoogst is van de gehele teelt.

Tabel 3 Gemiddelde versgewicht productie (in g m⁻² per teelt, hele plant) met bijbehorende CO₂-gift, -opname en -verlies voor de zomerperiode (alle scenario's) of specifieke maanden (scenario 6). Standaard is een setpoint van 800 ppm aangehouden.

Scenario	Optie (setpoint, capaciteit e.d.)	Productie vers# (g m ⁻² teelt ⁻¹)	CO ₂ -gift (g CO ₂ m ⁻² d ⁻¹)	CO ₂ -opname (g CO ₂ m ⁻² d ⁻¹)	CO ₂ -verlies (g CO ₂ m ⁻² d ⁻¹)
1. Gelijke CO ₂ -gift per dag, anders verdelen over dag	100 kg capaciteit/dag of 200 kg per halve dag				(verlies/gift, %)
	Alle 11 uur hetzelfde (1A)	7630	105	39	66 g (63%)
	Alles in ochtend (1B)	7580	107	38	69 (65%)
	Alles in middag (1C)	7310	107	36	71 (66%)
2. Verschil in doseercapaciteit	70 kg capaciteit	6886	77	35	42 (55%)
	100 kg capaciteit (2A)	7630	105	39	66 (63%)
	200 kg capaciteit (2B)	9370	184	47	136 (74%)
3. CO ₂ -vraag	Details per groeifase: zie figuren				
	600 ppm, 100 kg	7185	90	32	58 (64%)
	600 ppm, 200 kg	7681	113	34	79 (70%)
(settings iets anders dan 2)	800 ppm, 100 kg	7643	102	35	68 (66%)
(settings iets anders dan 2)	800 ppm, 200 kg	9135	176	41	134 (76%)
	1000 ppm, 100 kg	7786	107	35	72 (67%)
	1000 ppm, 200 kg	9504	194	43	151 (78%)
4. Dosereren hele kas (100 kg)	Gemiddelde van 10 kappen	9830	108	41	68 (63%)
	Zelfde periode, met 3 opeenvolgende teelten	8690	109	43	66 (61%)
5. Eind van dag eerder stoppen met doseren	Referentie (5A)	7643	102	35	68 (66%)
	Half uur eerder (5B)	7633	99	34	65 (65%)
	Een uur eerder (5C)	7574	97	34	62 (65%)
	1 ½ uur eerder (5D)	7498	94	34	60 (64%)
6. Een vroege teelt, 3 setpoints, start 6/1	800 ppm	5614	44	21	23 (52%)
	900 ppm	5873	49	22	27 (55%)
	1000 ppm	5874	49	22	27 (55%)
Teeltstart op 6/6	800 ppm	7600	111	38	73 (66%)
	900 ppm	7677	113	38	75 (66%)
	1000 ppm	7693	114	38	76 (67%)
7. Lichtafhankelijk doseren	Niet lichtafh (referentie)	7641	117	38	79 (67%)
(800 ppm; jun/aug)	Wel: van 0-100% bij 400W	7303	95	36	59 (62%)
8. Vernevelen	RV 80%	7640	117	38	79 (67%)
	RV 85%	7975	115	40	75 (65%)
	RV 90%	8211	113	41	71 (63%)
9. Rasverschillen	Zwaar ras, 100 kg	8050	116	41	64 (61%)
	Zwaar ras, 200 kg	9560	138	49	126 (72%)
	Licht ras, 100 kg	6320	95	30	65 (69%)
	Licht ras, 200 kg	n.v.t			

aanname: DS-gehalte 10%



Figuur 3 Berekende drogestof productie ($\text{g drogestof m}^{-2} \text{ dag}^{-1}$) van chrysant gedurende drie opeenvolgende zomerteelten.

5.1.3 Resultaat per CO₂-scenario

1. CO₂ verdelen over dag of geconcentreerd in ochtend of middag

Uitgangspunt was: setpoint 800ppm, en 100kg (hele dag) of 200kg (halve dag) $\text{ha}^{-1} \text{ hr}^{-1}$ doseercapaciteit. Conclusie: verdeel CO₂ over de dag, als het de zomerperiode betreft (zie Tabel 4).

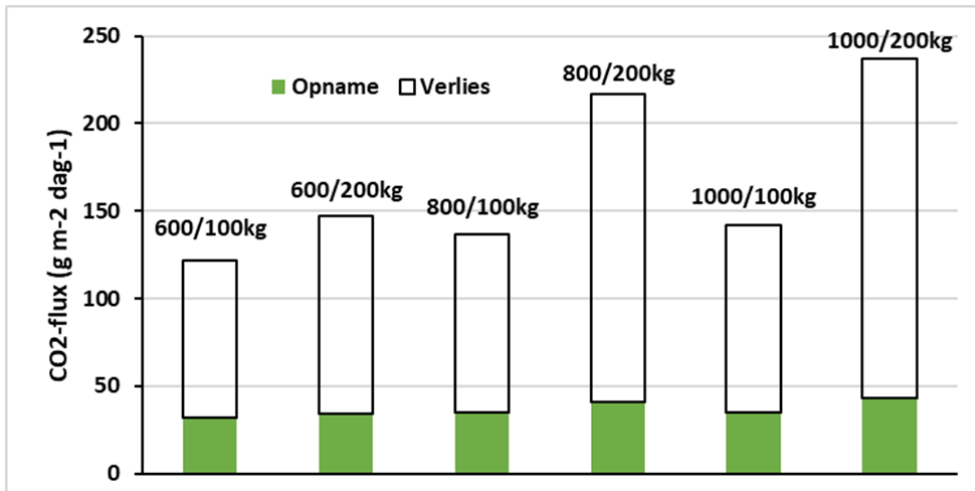
Bij hele dag 100 kg doseren is de productie iets meer en het CO₂-verlies iets minder dan een halve dag 200 kg doseren. Het is logisch dat het verlies groter is als in helft van de tijd zo veel wordt gedoseerd dat het aanbod van CO₂ te groot voor de plantopname. Bij matiging van de doseercapaciteit is CO₂-opname en productie meer (1A). Het zou kunnen dat de hoge dosering (1B, 1C) tot onevenredig veel ventilatieverlies leidt. Dit zal te wijten zijn aan de grote raamstanden in de gebruikte zomerperiode; bij paprika is – voor een jaarrond teelt- beperken tot ochtenddosering iets gunstiger dan hele dag doseren.

Tabel 4 Resultaten voor scenario 1: CO₂ doseren in helft van de dag of verspreiden over hele dag.

	Takgewicht (g pl^{-1})	Gift ($\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)	Opname CO ₂ (g m^{-2})	Verlies CO ₂ (g m^{-2} ; % v. gift)
Alle 11 uur hetzelfde (1A)	112	105	39	66 (63%)
Alles in ochtend (1B)	111	107	38	69 (65%)
Alles in middag (1C)	107	107	36	71 (66%)

2. Geeft 100 kg $\text{ha}^{-1} \text{ hr}^{-1}$ doseren een te licht gewas (ca. 20% minder dan optimaal) dan 200 kg

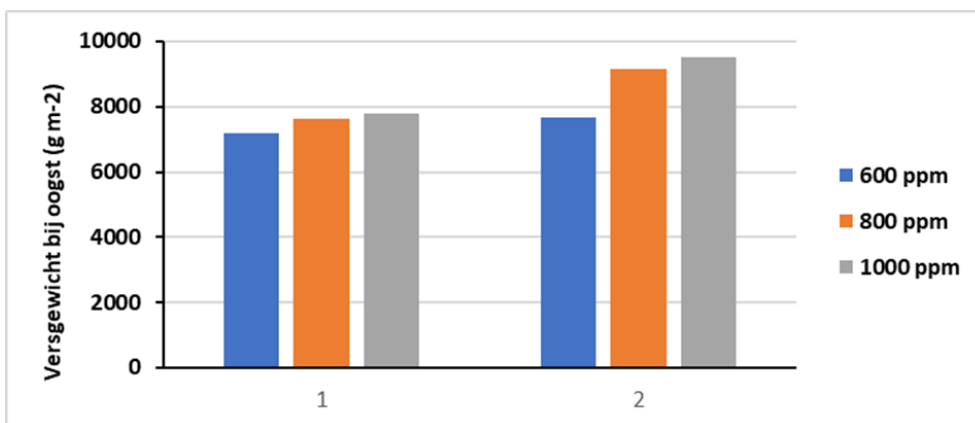
Bijna wel, plant wordt maximaal 18% lichter. Als we kijken naar stijgende CO₂-giften: opname stijgt van 32 naar 43 $\text{g CO}_2 \text{ dag}^{-1} \text{ m}^{-2}$, daarbij takgewicht van 105 gram bij 600 ppm en 100 kg dosering naar maximaal 140 gram bij 1000 ppm en 200 kg (Fig. 4). En weer in termen van verlaagd CO₂-gebruik: een oogstverlies van 25% bij 50% minder CO₂-gift. Oogstverlies van 200 naar 100 kg dosering bij zelfde setpoint (600, 800 of 1000 ppm) is maximaal 18%, bij aanhouden van 1000 ppm, maar bij de andere twee setpoints is effect van capaciteitsverlaging minder (8 en 16% bij 600 en 800 ppm).



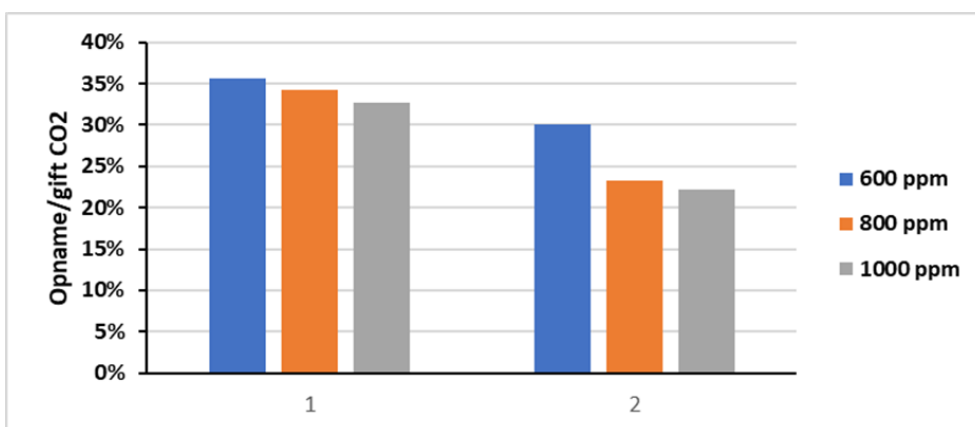
Figuur 4 Doseercapaciteiten 100 en 200 kg ha⁻¹ m⁻² CO₂ en 3 setpoints: opname en verlies.

Hoogste dosering (bij 1000 ppm en 200kg) kent een verlies van wel 200 g CO₂ dag⁻¹ m⁻² (Figuur 4), dit is 180 kg CO₂ ha⁻¹ uur⁻¹ dus maar 20 kg wordt benut.

Groei neemt nog (iets) toe bij meer CO₂, zeker bij de combinatie van hogere concentratie (1000 ppm) en hogere doseercapaciteit (200 kg) (Figuur 5). Evenwel wordt de CO₂-benutting bij die hogere niveaus steeds lager (Figuur 6). Let wel, er is geen reductie van CO₂-gift in afhankelijkheid van raamstand.

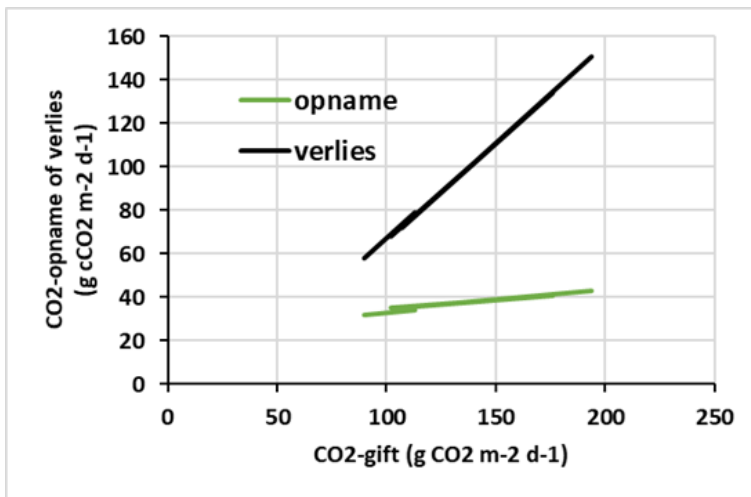


Figuur 5 Opbrengst gewas bij 2 doseercapaciteiten (1: 100 kg; 2: 200 kg) en 3 CO₂-setpoints.



Figuur 6 Verhouding gewasopname CO₂ versus gedoseerde CO₂, bij 2 doseercapaciteiten (1: 100 kg; 2: 200 kg) en 3 CO₂-setpoints.

Opname en verlies nemen evenredig toe met het verhogen van de CO₂-dosering (Figuur 7). Maar daarmee neemt de efficiënte benutting (opname/gift) van gedoseerde CO₂ ook evenredig af met totale gift.

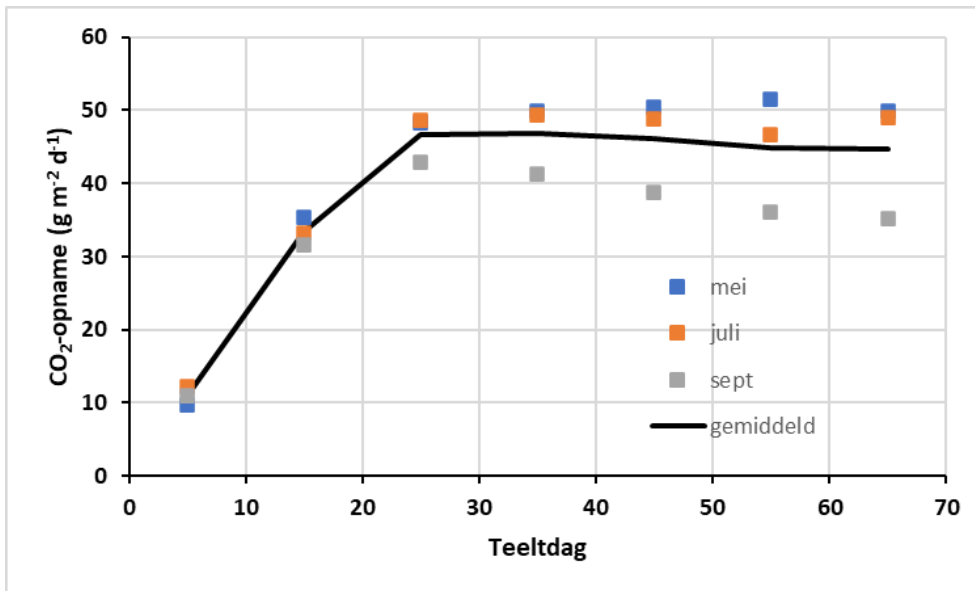


Figuur 7 Opname en verlies van CO₂ bij toenemende giften.

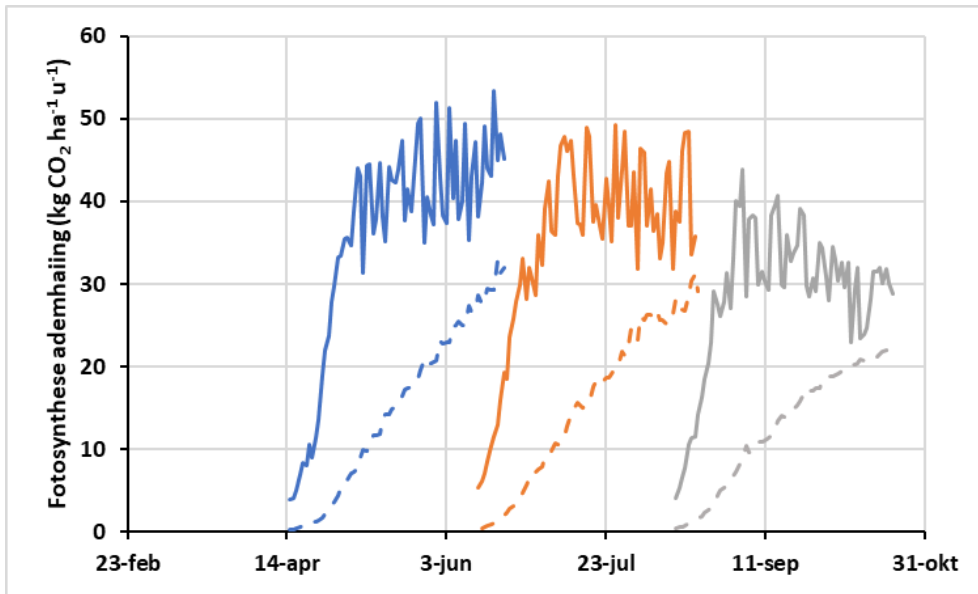
3. Gewasvraag naar CO₂ per groeifase

De vraag naar CO₂ is het hoogst tussen dag 25 en (ongeveer) dag 45. Het is dus niet zo dat bij de snelle groei tussen dag 10 en 20 er meer CO₂ per m² kas wordt gevraagd, want de plant is dan nog niet groot en heeft nog geen volledig bladpakket.

In het voorjaar is er vanaf dag 25 meer groei en CO₂-vraag dan in juli, en in de nazomer (september) is de vraag nog lager dan in juli (Figuur 8).



Figuur 8 CO₂-opname in g/m²/dag gedurende een teelt startend in mei, juli of september. Ook de gemiddelde opname in die zomerperiode is weergegeven.



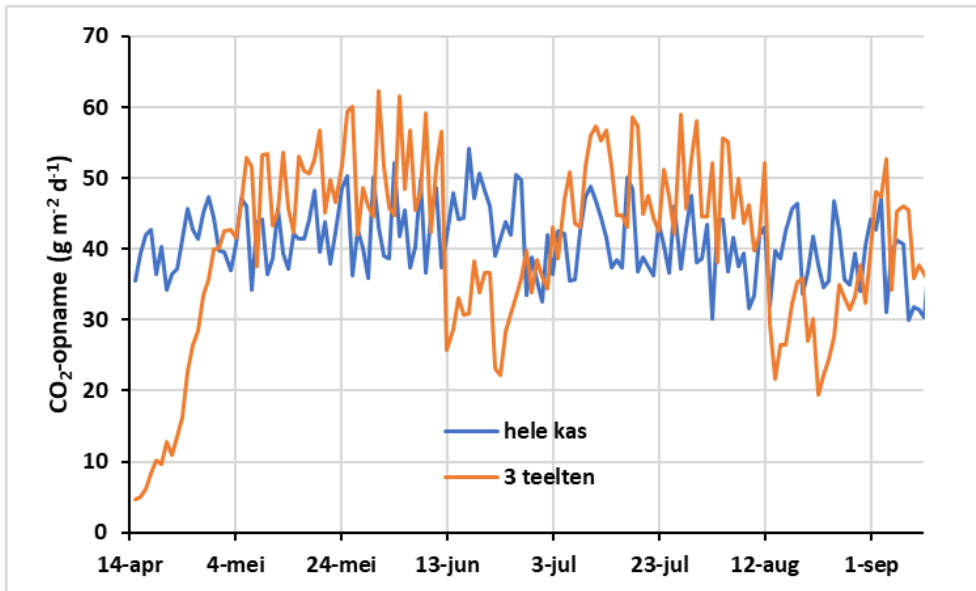
Figuur 9 Fotosynthese en ademhaling (streepjeslijn) in de 3 opeenvolgende teelten bij een $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ uur}^{-1} \text{ CO}_2$ -dosering.

De fotosynthese gedurende de 3 teelten (Figuur 9) is maximaal de helft van de gegeven dosering (van $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ uur}^{-1}$), en de ademhaling vormt een steeds groter deel van het bruto opgenomen CO_2 . Dit verklaart waarom de fotosynthese in de 2^{de} helft van een teelt nog zo hoog is, terwijl de netto groei steeds lager wordt (Figuur 3).

Een lage CO_2 -concentratie vroeg in de teelt tikt harder aan in het oogstverlies dan later in de teelt. Dit komt doordat de plantopbouw en bladontwikkeling dan vertraagd wordt terwijl later in de teelt het bladpakket al volstaat voor fotosynthese om de bloem te vormen. Een lagere dosering in begin teelt maakt weinig uit, de plantvraag naar CO_2 is dan nog relatief laag per m^2 , ondanks de grote groei per individuele plant. Dit kon met het model niet worden nagerekend omdat de CO_2 -instellingen in het model altijd over de hele teelt vaststaan.

4. Verschil tussen doseren per kap/teeltfase en doseren van hele kas

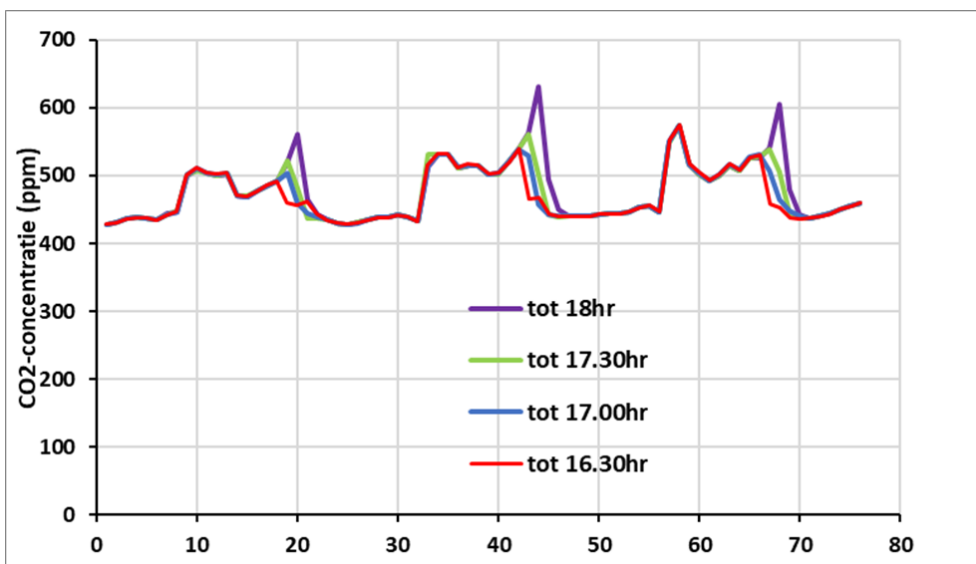
CO_2 -vraag van een complete kas met 10 groeistadia van chrysant (10 veldjes waar tussen de plantdatum steeds 1 week verschil) is vrij constant (rond $40 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) gedurende 3 maanden (Figuur 10). Als 3 opeenvolgende teelten worden gesimuleerd fluctueert de CO_2 -vraag wel meer maar heeft wel dezelfde orde van grootte als het kasgemiddelde van de 10 groeistadia.



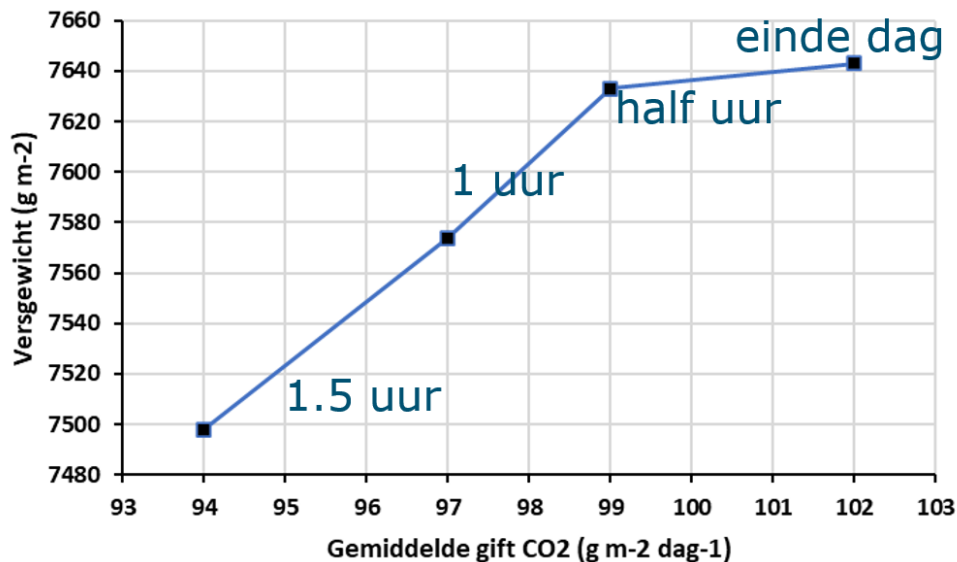
Figuur 10 Verloop van de CO₂-opname voor een kas met in totaal 10 verschillende groeistadia en voor 3 opeenvolgende teelten.

5. Eind van dag eerder stoppen met doseren

Een half uur eerder stoppen met CO₂ doseren heeft geen noemenswaardige gevolgen voor productie en takgewicht. Als we voor 3 zomerdagen de CO₂-concentratie weergeven blijkt dat de verhoging dan maximaal 120 ppm is (Figuur 11). En deze verhoging geeft voor de 3 opeenvolgende zomerteelten volgens het model slechts een stijging van het totale versgewicht van 7630 naar 7640 g m⁻² (Figuur 12). Opmerkelijk is wel dat nog eerder stoppen het versgewicht lineair doet afnemen (Figuur 12) terwijl de verschillen in CO₂-concentratie daarbij niet groot zijn (Figuur 11). Dit komt enerzijds doordat Figuur 11 maar 3 van de 3 x 70 dagen teelt weergeeft, en dat ook toevallig 3 dagen zijn met veel ventilatieverlies (want vrijwel geen concentratieverhoging) waardoor de dosering nauwelijks effectief is.



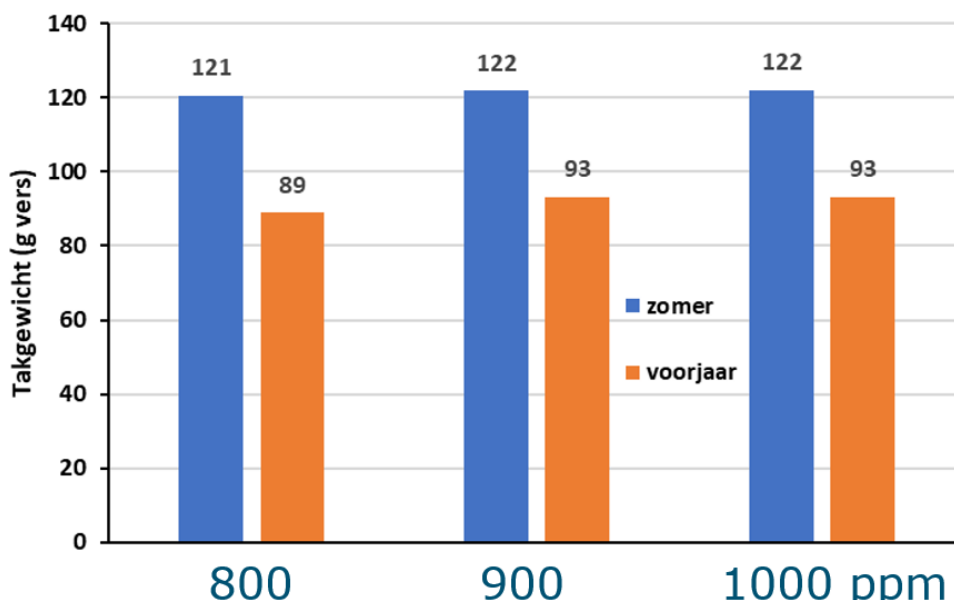
Figuur 11 Uurwaarden van CO₂-concentratie gedurende 3 dagen, waarbij op verschillende tijdstippen in de middag wanneer de dosering wordt gestopt voor de nacht wordt ingegaan.



Figuur 12 Vergewicht opbrengst ($g\ m^{-2}$) bij CO_2 -dosering tot einde van de dag (KD-periode) en 3 scenario's waarin eerder gestopt wordt met doseren.

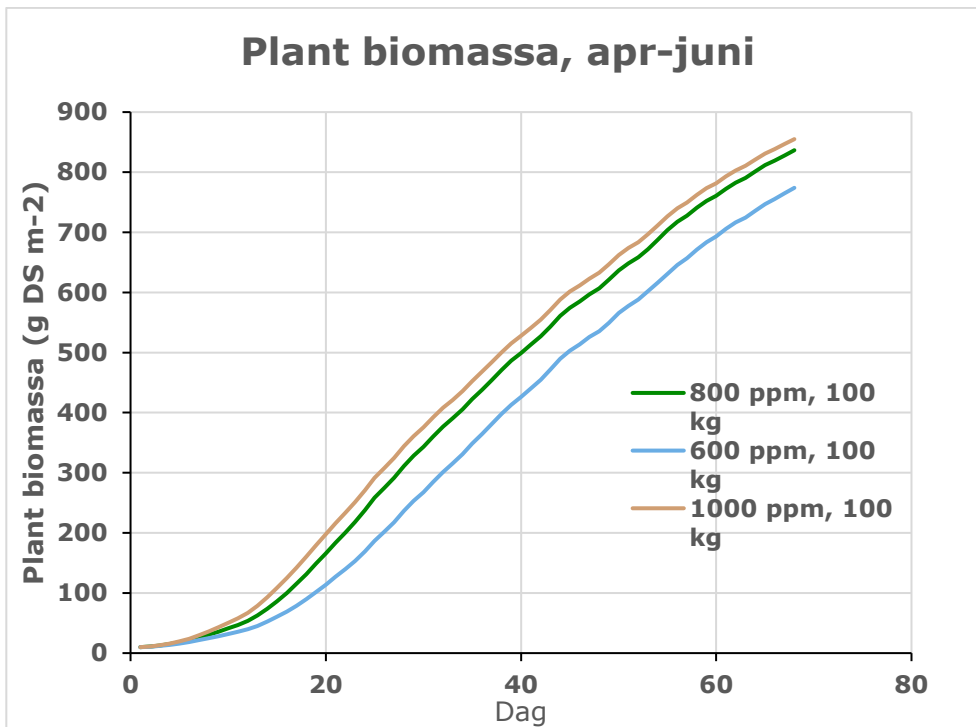
6. Verschil tussen doseren tot 800, 900 of 1000 ppm, in voorjaar of zomer

Verhogen van het CO_2 -setpoint van 800 naar 900 of 1000 ppm is nauwelijks effectief. In het voorjaar is er een lichte stijging in het takgewicht van 5%, terwijl dit in de zomer slechts 1% is (Figuur 13). Bij 100 kg doseercapaciteit is het verschil nog minder, omdat in de zomer dan de 2 hogere setpoints op zonnige dagen met grote raamstand nooit worden gehaald. Dit resultaat wordt bevestigd door de fotosynthese-metingen, waar de respons op CO_2 boven 800 ppm erg klein is.



Figuur 13 Takgewicht in voorjaar en in zomer bij 3 setpoints voor CO_2 (800, 900 en 1000 ppm). Doseercapaciteit was $200\ kg\ ha^{-1}\ uur^{-1}$.

Het verschil tussen 600 en 800 ppm in plantbiomassa is wel aanzienlijk, in tegenstelling tot het verschil tussen 800 en 1000 ppm (Figuur 14).



Figuur 14 Verloop van de plantbiomassa bij 3 concentratie setpoints, en 100 kg doseercapaciteit.

7. Lichtafhankelijk doseren

Lichtafhankelijk doseren van CO₂ is berekend voor de maand juni (veel zon). Daarbij ging de doseercapaciteit in het traject 0 – 400W zonlicht van 0 naar 100%. Het bleek dat de benutting van gedoseerde CO₂ steeg van 32 -bij steeds maximale doseercapaciteit- naar 38%. Er was 25% minder ventilatieverlies, en maar slechts 4% minder productie (van 121 naar 116 g per hele tak, zwaar ras).

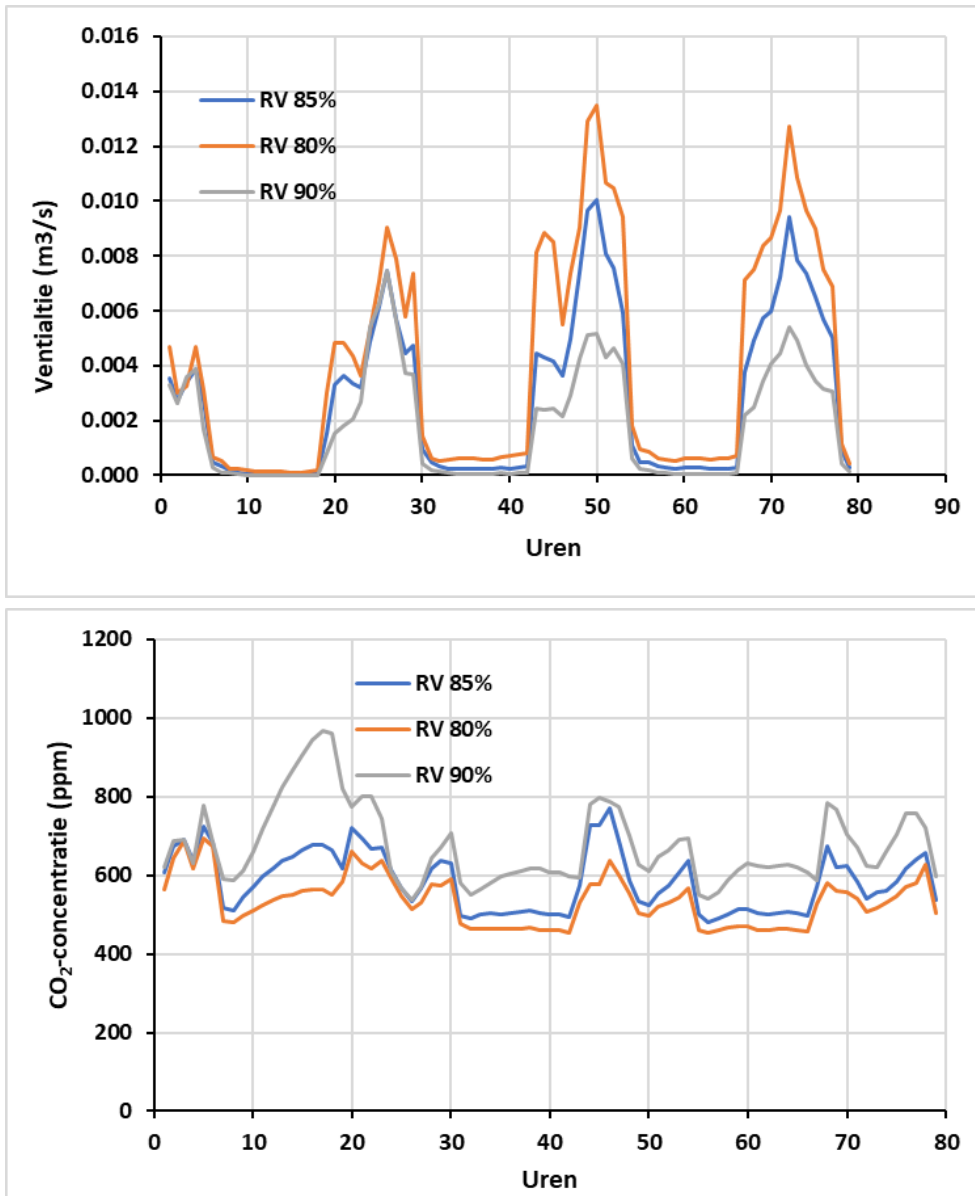
8. Vernevelen

Het effect van vernevelen werd in het model gesimuleerd door het aanhouden van een hoger setpoint voor relatieve luchtvochtigheid (RV). Zodoende werd later gelucht voor vocht, wat voor de 3 setpoints goed te zien is (Figuur 15, boven). Dit had een positief effect op de CO₂-concentratie, waarbij het verschil tussen 85 en 90% groter was dan tussen 80 en 85% (Figuur 15, onder). Het gevolg van het verhogen van de RV op de opbrengst was +7% terwijl het CO₂-verlies 6-10% verminderde (Tabel 3 en Tabel 5).

9. Rasverschillen

Een zwaar ras reageert significant op het verhogen van de doseercapaciteit van 100 naar 200 kg ha⁻¹ uur⁻¹ (Tabel 3, onderin) door 20% meer opbrengst, maar ook 20% meer CO₂-verlies. Afhankelijk van de prijs voor CO₂ en de verkoopprijs van de takken is dit wel of niet rendabel.

Voor een licht ras is alleen de 100 kg dosering uitgerekend, en daarbij zijn de verliezen kleiner dan bij het zware ras. Dit komt doordat de dosering eerder gestopt kon worden want de lagere groei en opname betekende dat het concentratie-setpoint eerder bereikt werd dan bij het zware ras. Een hoge dosering – van 200 kg – geeft geen extra opbrengst maar wel extra CO₂-verlies en is daarom niet doorgerekend.



Figuur 15 Dagverloop van ventilatie (boven) en CO₂-concentratie (Onder) bij 3 setpoints voor relatieve luchtvochtigheid (80, 85 en 90%). Verloop start bij 12.00 uur.

Er zijn nog extra scenario's berekend n.a.v. de vragen van de telers:

a. Rol van CO₂-bron uit ademhaling van gewas en bodem

In de LD (lange dag) fase is de vraag naar CO₂ nog laag doordat de planten klein zijn. De vraag is maximaal 10 kg ha⁻¹ uur⁻¹. De bodemademhaling levert gemiddeld 5 kg ha⁻¹ uur⁻¹ (zie tekstblok). Dit is niet voldoende maar het gewas in de KD-fase produceert met name in de 2^{de} helft van de teelt vrij veel CO₂ door gewasademhaling (zie Figuur 9), en dit vermengt zich in de kas zodat de veldjes in de LD-fase hier gebruik van kunnen maken.

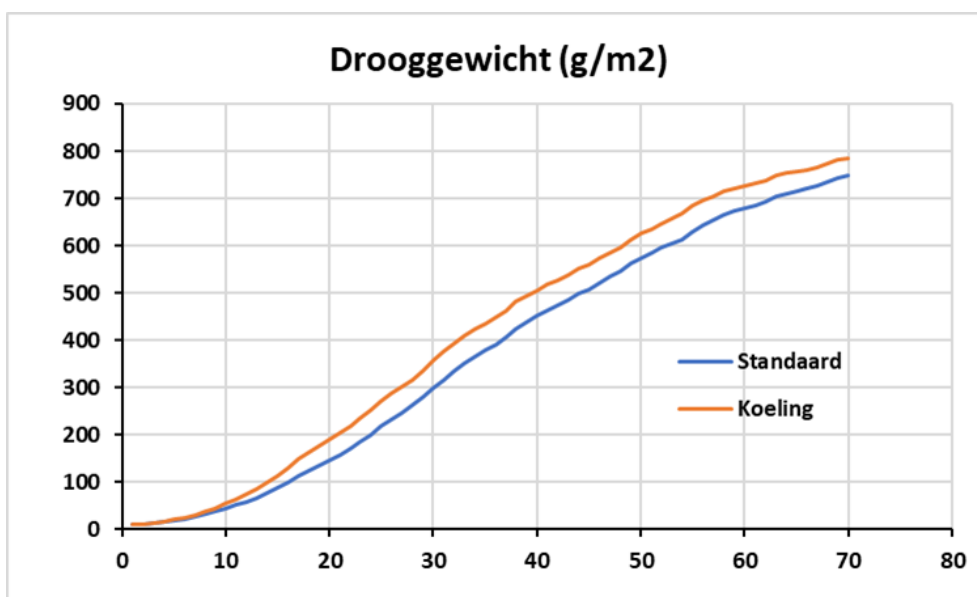
In proeven met 4.4% bodemorganische stof in de bodem is deze voorraad in 100 dagen afgebroken van 65.5 naar 64.2 ton ha⁻¹ (Marcelis et al., 2003). Dit is ongeveer 1 kg CO₂ ha⁻¹ uur⁻¹ gemiddeld. Emissie van CO₂ uit afbraak van jonge mest, net gegeven voor de teeltaanvang, is wat groter: bij afbraak van 3 ton ha⁻¹ bloedmeel komt 2.3 kg CO₂ ha⁻¹ uur⁻¹ vrij. Een vergelijkbare emissie is gevonden in teeltbedden van Alstroemeria, 3.2 kg (García et al., 2017).

Afbraak van verse bladresten en snoeiafval (Alstroemeria) leidde tot 16 kg CO₂ ha⁻¹ uur⁻¹ emissie. In chrysant zijn er echter bij aanvang van de teelt geen snoeiresten

Onze inschatting is dat de CO₂-emissie door afbraak van organische stof en mest maximaal 5 kg CO₂ ha⁻¹ uur⁻¹ is. Hiermee is gerekend.

b. Actief koelen

Actief koelen van de kas – als gesloten kas concept – met een vermogen van 300 W (per m²) betekent dat de drogestofproductie 4% kan stijgen, zoals berekend voor een teelt van juni tot augustus (Figuur 16).



Figuur 16 Ontwikkeling van drooggewicht per m² voor een standaard teelt en een teelt met actieve koeling (vermogen 300 W m²).

5.1.4 Conclusies chrysant

In Tabel 5 zijn de belangrijkste rekenresultaten samengevat.

Tabel 5 Overzicht van de afname in oogst en CO₂-gift van berekende strategieën bij chrysant, ten opzichte van de standaard doseerstrategie van 100 kg doseercapaciteit met 800 ppm CO₂.

Scenario	Doseer-capaciteit (kg ha ⁻¹ hr ⁻¹)	Oogst (%)	CO ₂ gift (%)	CO ₂ verlies/gift (%)
Standaard	100	121 g tak, vers	117 g m ⁻² d ⁻¹	66%
Lichtafh dos.	100	-4%	-19%	62%
1000 ipv 800 ppm	200 i.p.v. 100	+24%	+91%	78%
600 i.p.v. 800 ppm	100	-6%	-12%	64%
1.5 hr eerder stop	100	-2%	-8%	64%
Raamstand afh.	100 (tot 20% raam)	-7%	-18%	57%
200 ipv 100 kg cap	200 t.o.v. 100	+23%	+75%	74%
Hele dag ipv ½ dag	100	+2%	-2%	69%
Vernevelen	100	+7%	-3%	63%

Allereerst valt een grote opbrengststijging op als er meer CO₂ wordt gedoseerd, (bv. +24%) maar ook stijgt dan het CO₂-verlies enorm (78% van de gift):

Een combinatie van verhogen setpoint (800 -> 1000 ppm) en doseercapaciteit (100 -> 200 kg) levert vrijwel geen opbrengstverhoging meer op (+1%) t.o.v. het alleen verhogen van de doseercapaciteit (+23%). Wel zijn de CO₂-verliezen door ventilatie aanzienlijk meer bij hoger setpoint, terwijl het verlies al veel was bij verhogen doseercapaciteit alleen (74% van de gift). Dit heeft alles te maken met het zomerhalfjaar als rekenperiode: er is veel ventilatie.

Een setpoint van 800 ppm is voldoende, maar is op zomerdagen niet houdbaar tenzij men veel CO₂-verlies op de koop toe neemt.

Verder resulteren de CO₂-besparende scenario's in verminderde CO₂-giften van 2 tot 19%, met opbrengstverschillen t.o.v. de standaard van -7 tot +7%. Hiervan zijn de meest aantrekkelijke opties:

(a) vernevelen bespaart CO₂ én verhoogt de opbrengst, (b) dosis beter over hele dag verspreiden dan veel in halve dag, (c) technieken om scherper te doseren zoals licht- en raamstand-afhankelijk en eerder stoppen op de dag verhogen de CO₂-benutting aanzienlijk en maar met beperkt oogstverlies.

Het taggewicht gaat te ver omlaag bij een setpoint van 600 ppm in combinatie met 100 kg ha⁻¹ uur⁻¹ (scenario 2). Dit scenario geeft uiteraard een beteren CO₂-benutting maar het is raadzaam dan een lagere plantdichtheid dan 64 pl m⁻² aan te houden. Het taggewicht bij 800 ppm was wel goed.

5.2 Paprika

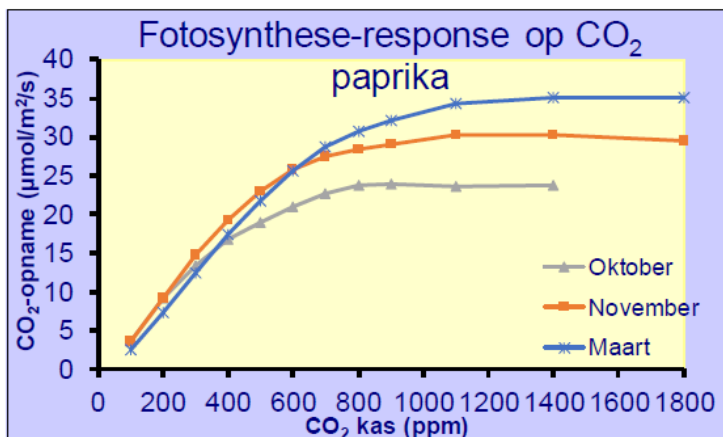
De resultaten zijn uitgesplitst in een korte verslaglegging van de literatuurstudie, gevolgd door de modelberekeningen. De modelwerking wordt beschreven in bijlage 2.

5.2.1 Literatuur over fotosynthese en CO₂

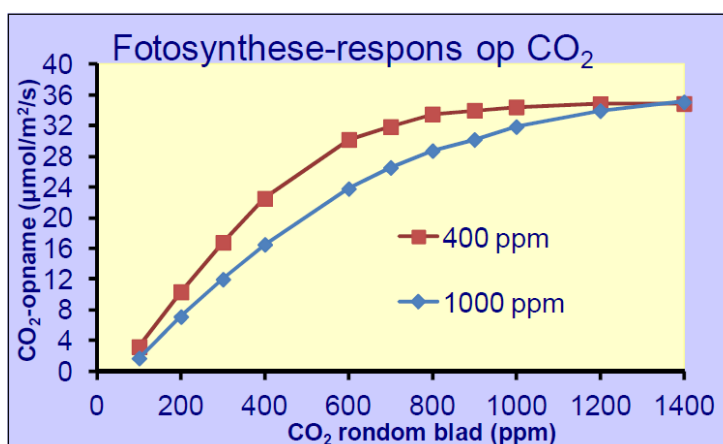
In de lezing van Trouwborst en Hogewoning in voorjaar 2022, getiteld 'Plantfysiologie: onderzoek en rekenen aan CO₂', werden enkele licht- en CO₂-responsecurven getoond voor paprika. De metingen waren verricht in een proef bij Delphy Improvement Centre (2018-2019) en bij Plant Lighting in 2013-2015 (Hogewoning et al., 2015). Hun conclusie was dat CO₂-concentraties boven de 800 ppm de fotosynthese nauwelijks meer verhogen. Uit de Figuur 17 blijkt echter dat in maart de paprika nog tot 1200 ppm een positieve respons vertonen in de CO₂-opname. De calibratie van het fotosynthesemodel met deze data en met de data van de WUR-proef in 2002 is verder toegelicht in bijlage 2.

In de proeven in 2013-2015 bleek het blad van paprika zich enigszins aan te passen aan het constant gehouden CO₂-concentratie van 400 of 1000 ppm dat in de klimaatkamers werd toegepast. Dit bleek door die planten vervolgens bij de andere concentratie te meten. De aan 1000 ppm aangepaste bladeren waren luier en gaven minder fotosynthese bij 400 ppm, terwijl de aan 400 ppm aangepaste bladeren relatief meer fotosynthese gaven bij 1000 ppm (Figuur 18). Door deze adaptatie werd er ca. 30% minder CO₂ benut in de teelt in het voorjaar en 10% minder in het najaar. Reden was een minder efficiënt Rubisco eiwit, en had niets te maken met luiheid van de huidmondjes. Deze luiheid was binnen 1 week weer weg. In de praktijk zijn de CO₂-concentraties in de voor CO₂ belangrijke zomermaanden zelden constant dus vermoedelijk is deze tijdelijke adaptatie daarmee weinig relevant.

In de WUR-proef met constante CO₂-concentraties van 380, 580 en 780 ppm paste de plant zich niet aan (adaptatie) qua fotosynthese (Dieleman et al., 2003). Het bleek dat -als na een week van concentratie werd gewisseld- de fotosynthese nog dezelfde respons m.b.t. CO₂ had. Mogelijk is de adaptatie na 1 week nog niet voltrokken.



Figuur 17 CO₂-respons van de fotosynthese bij paprika, gemeten in 3 perioden in het jaar, bij constant lichtniveau van 1000 µmol PAR m⁻² s⁻¹. Data uit Hogewoning et al. (2015).



Figuur 18 Fotosynthese-respons (in µmol CO₂ m⁻² s⁻¹) van aan 400 en 1000 ppm CO₂ aangepaste bladeren. Data uit Hogewoning et al. (2015).

De belangrijkste modelaannamen ten aanzien van fotosynthese zijn: (a) interne CO₂ is 0.75 x de CO₂-concentratie in de kaslucht, (b) de fotosynthese wordt gereduceerd indien er meer suikeraanbod (sources) is dan suikervraag (sink), (c) er is geen fotosyntheseremming door tekort aan triosefosfaat (dit is de zgn. Ap-reductie). De fotosynthese is conform de fotosynthese-curven van de WUR-proef in 2002 goed gecalibreerd door aanname van punten a en c.

Gecombineerd met de fitting van de groei door aanpassing van de sink voor blad, stengel en vruchten ten opzichte van het suikeraanbod -door aanname van punt b- reageert het model correct op CO₂-scenario's mits eenzelfde teeltstrategie (stengeldichtheid en aantallen vruchten, want heeft invloed op de suikervraag) wordt aangehouden.

De WUR-proef uit 2002 is gebruikt om de groei en ontwikkeling van de paprikaplant te calibreren. Deze proef was vrij praktijkconform, zoals ook bleek uit recente productiecijfers vermeld in diverse YouTube video's van gangbare teelten van oranje en rode paprika. Anders dan bij chrysant, en overeenkomstig met tomaat, moet het groeimodel na een vegetatieve fase in de generatieve fase steeds fytoeren aanleggen, bestaande uit zowel blad/stengel als vrucht. De uiteindelijke productie van 30 kg verse paprika per jaar per m² heeft de volgende CO₂-vraag tot gevolg (zie tekst vak).

CO₂-vraag paprika:

Voor een oogst van 30 kg m⁻² per jaar is een totale drogestofproductie van ca. 3.5 kg (plant+vrucht) nodig. Dit is minimaal (schatting) **8 kg CO₂ m⁻²** aan fotosynthese.

Hiervan is 5 kg CO₂ netto in plant vastgelegd (=3.5 kg drogestof), en 3 kg CO₂ is ademhaling

Bij een doseercapaciteit van 200 kg CO₂ ha⁻¹ uur⁻¹ is de totale dosering ca. 45 kg CO₂ m⁻² jr⁻¹

→ CO₂ efficiency van slechts 11% qua vastlegging

Maar omdat de fotosynthese-suikers ook nodig zijn voor de ademhaling is het CO₂-gebruik:

→ CO₂ benutting van 8 kg fotosynthese / 45 kg dosering = 18%

De overige CO₂ verdwijnt dus naar de buitenlucht.

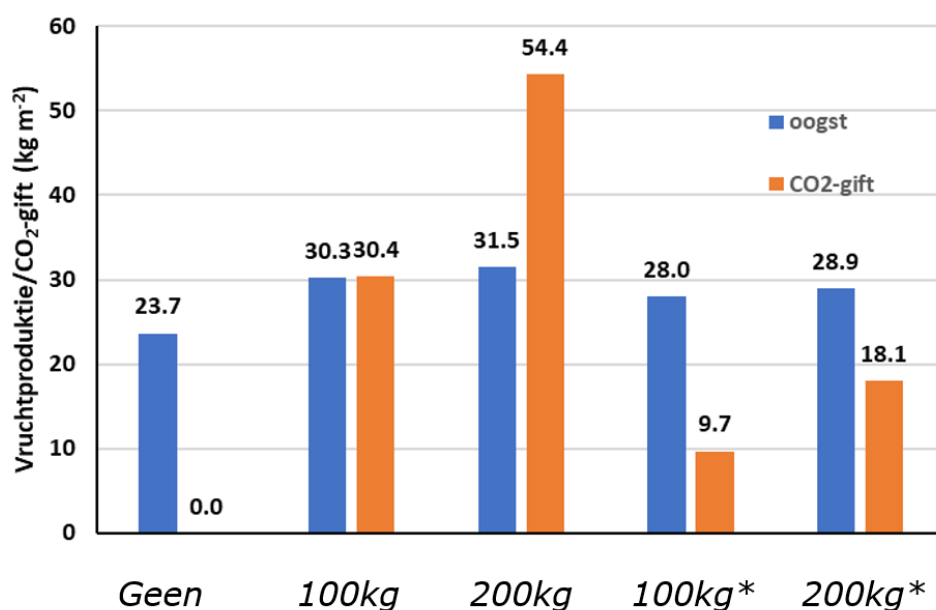
5.2.2 Resultaat per CO₂-scenario

Toediening van veel grotere doses CO₂ t.o.v. de referentie (van 30 kg per ha per teelt) levert erg weinig extra groei op want die is vooral gelimiteerd door de PAR in het normjaar. Indien de veel hogere dosering wordt gecombineerd met een 50% hogere plantbelasting en dus grotere CO₂-sink, is er slechts 3 kg extra CO₂-assimilatie wat wel resulteert in een aanzienlijke 15 kg extra verse oogst (55% toename!). Zonder die extra plantbelasting met extra vruchten, is bij die hoge CO₂-doseringen het gewas 'sink-gelimiteerd', dus heeft te weinig sinks om de extra CO₂ te benutten.

Scenario's:

1. Bij raamstanden boven 20% maximaal blijven doseren, afbouwen tot 0 kilo bij 100% raam, of niet doseren

Bij een doseercapaciteit van 100 kg CO₂ blijkt het afbouwen van de dosering boven 20% de totale dosering flink te reduceren (van 30.4 naar 9.7 kg m⁻² per teelt), terwijl de oogst daalt van 30.3 naar 28 kg m⁻² (Figuur 19). Bij een doseercapaciteit van 200 kg is bij maximaal doseren tot aan 100% raam de oogst maar 2.3 kg hoger dan bij 100 kg doseercapaciteit, de CO₂-gift stijgt wel fors. Afnemend doseren boven 20% raam geeft bij 200 kg capaciteit een vergelijkbare daling (ca. -30%) van de totale CO₂-gift en oogst (-2.6 kg). Het totaal niet doseren van CO₂ geeft een oogstdaling van 7 kg, ongeveer 25% minder dan de referentie met een oogst van 30 kg, met 100 kg doseercapaciteit.



*CO₂-dosering verlaagd vanaf 20% tot 0 bij 100%

Figuur 19 Vruchtproductie en CO₂-gift bij scenario's met 0, 100 en 200 kg doseercapaciteit en wel/niet verlaagde dosering boven 20% raamstand.

- Wisselend enkele dagen hoge en lage CO₂-concentraties om de plant zich te laten aanpassen aan lager CO₂-aanbod

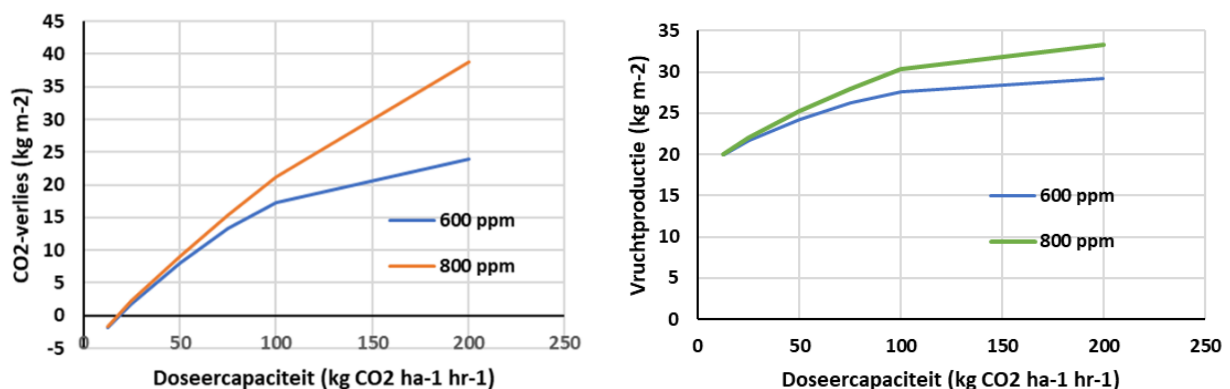
Als 2 van de 7 dagen van de week en setpoint van 400 i.p.v. 800 ppm wordt aangehouden, wordt de CO₂-gift 22% lager en de oogst 8% lager. Het CO₂-verlies door de ramen is 28% minder, dat is vrijwel gelijk aan 2/7 (29%) dus waarschijnlijk is bij het 400 ppm setpoint nauwelijks verlies opgetreden. De gift is met 22% verlaging meer dan 2/7, dus voor de 400 ppm was er toch wat CO₂ nodig die is opgenomen zonder dat de verliezen toenamen.

Uit het onderzoek van Dieleman et al., (2003) bleek dat korte episodes met verlaagde CO₂-concentratie de plant niet efficiënter maken in de assimilatie. Maar als kas-gewas systeem is de CO₂-benutting wel degelijk hoger omdat bij lagere CO₂-dosering de verliezen minder zijn qua absolute totaal gegeven kilo's. In relatieve zin wordt bij een bepaalde raamstand altijd evenveel CO₂ verloren naar de buitenlucht, ongeacht de heersende concentratie. Maar bij een hogere concentratie gaat het daarbij om meer kilo's.

- Testen van een range van doseercapaciteiten – bij 2 CO₂-concentraties – om te zien bij welke gift de oogst niet meer wordt verhoogd

In de range van 12.5 tot 200 kg doseercapaciteit blijkt de oogst langzaam minder te stijgen maar elke kilo extra CO₂ blijkt toch de groei en oogst nog te stimuleren (Figuur 20). Nadeel van de hoge doseringen is dat het CO₂-verlies uit de ramen evenredig aan de gift stijgt tot de hoge waarden van bijna 40 kg CO₂ m⁻², bij 200 kg doseercapaciteit (Figuur 20).

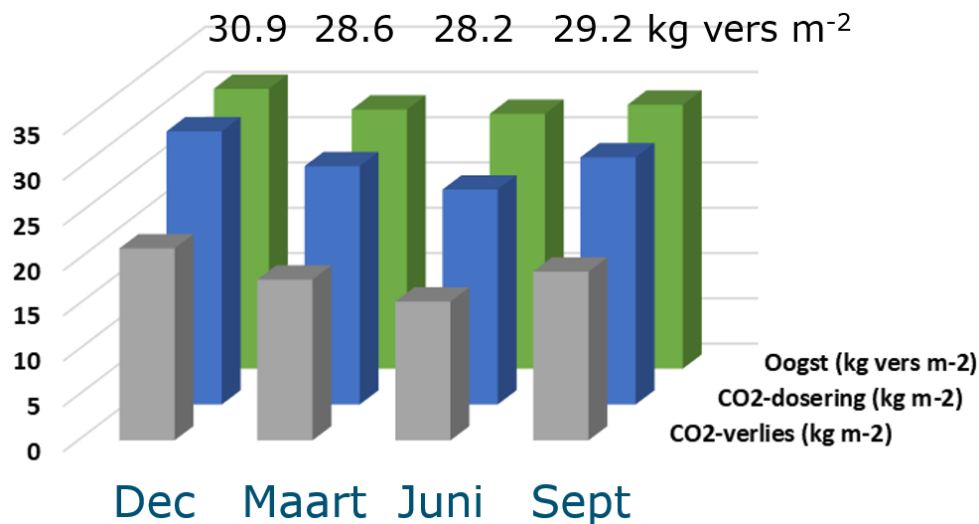
Let op: in al de simulaties is eenzelfde stengeldichtheid en aantal vruchten opgevoerd. De inzet van veel grotere doses CO₂ t.o.v. de referentie (van 30 kg per ha per teelt) levert dan vrij weinig extra groei op want die is, naast de PAR in het normjaar, gelimiteerd door de hoeveelheid sinks. Indien de veel hogere dosering wordt gecombineerd met een 50% (extreem) hogere plantbelasting en dus grotere CO₂-sink, is er 3 kg extra CO₂-assimilatie wat resulteert in een aanzienlijke 15 kg extra verse oogst (55% toename!). Zonder die extra plantbelasting met extra vruchten, is bij die hoge CO₂-doseringen het gewas 'sink-gelimiteerd', dus heeft te weinig sinks om de extra CO₂ te benutten.



Figuur 20 CO₂-verlies en vruchtproductie bij diverse CO₂-doseercapaciteiten (links) en bij twee CO₂-setpoints (600 en 800 ppm)(rechts).

- Halveren van de doseercapaciteit gedurende een kwartaal: bij welk kwartaal heeft dat het meeste effect op groei en CO₂-benutting

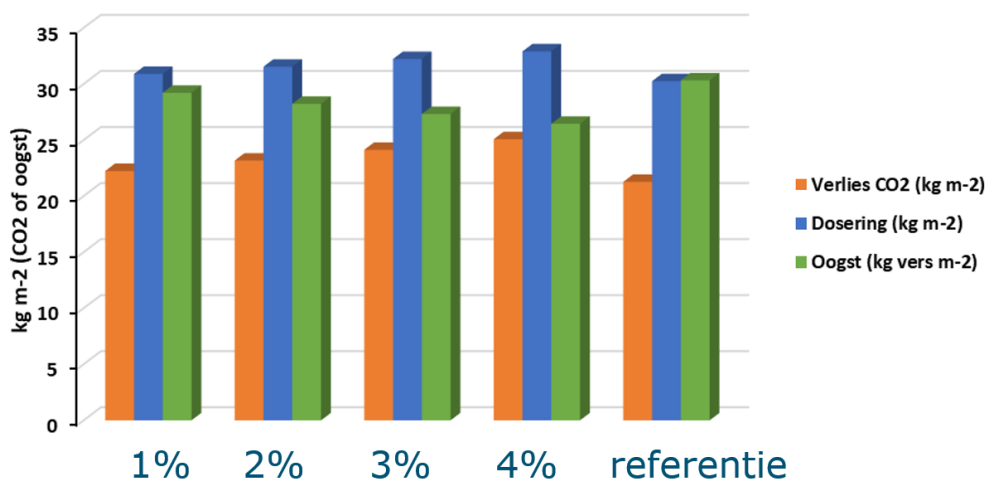
Halveren van de dosering heeft in het winterkwartaal de minste negatieve invloed op de oogst terwijl de CO₂-benutting slechts licht stijgt. In het zomerkwartaal wordt de CO₂-benutting aanzienlijk hoger bij gehalveerde dosering, maar de oogst gaat ook significant omlaag met 2.7 kg (Figuur 21).



Figuur 21 CO₂-verlies, -dosering en vruchtproductie bij halveren van de dosering in gedurende 3 maanden in winter, voorjaar, zomer of najaar.

5. Diverse kierstanden om CO₂ uit de buitenlucht binnen te trekken.

Het vergroten van een permanente kier – als niet gelucht hoeft te worden volgens de ventilatietemperatuur – leidt tot enig verlies van de gedoseerde CO₂ (Figuur 22). Het idee om met zo'n kier CO₂ uit de buitenlucht binnen te halen werkt volgens het kasmodel dus niet. Het kan wel gunstig zijn als er (a) wind staat op de betreffende kier, en (b) op dat moment niet gedoseerd wordt.

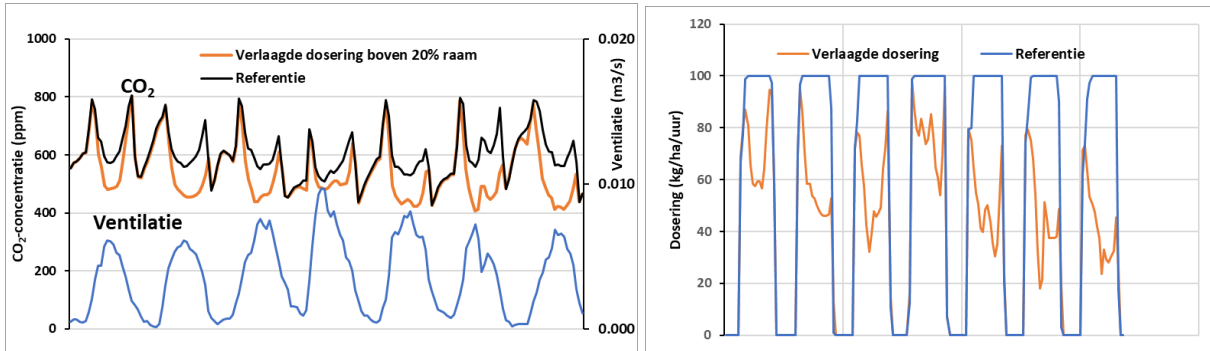


Figuur 22 Effect van kierstand op vruchtoogst en CO₂-verlies.

6. Boven een raamstand van 20% te dosering afbouwen tot 0 kilo bij 100% raam, of dan geen CO₂ geven.

Dit is feitelijk hetzelfde scenario als nummer 1. In Figuur 23 zijn nu de dagverlopen uitgezet voor een warme week in juni. Te zien is dat op alle 7 dagen er een forse ventilatie plaats vind overdag (blauwe lijn in figuur links), en dat alleen bij begin en eind van de dag de CO₂-concentratie ca. 100 ppm verhoogd kan worden door de dosering. Overdag wordt meeste CO₂ weggelucht, maar bij verlaagde dosering bij >20% is dan de concentratie lager dan bij de referentie die door blijft doseren. Omdat de concentraties zelfs bij de referentie niet boven de 600 ppm komen (setpoint is 800 ppm) is dit weinig effectief en zonde van de dure CO₂-gift. In Figuur 23 (rechts) is zichtbaar dat de verlaagde dosering op alle dagen werd uitgevoerd, variërend van -5 tot wel -80% van de referentie.

In de gehele teelt is in totaal 68% minder CO₂ gedoseerd, met 'slechts' een oogstreductie van 8%.

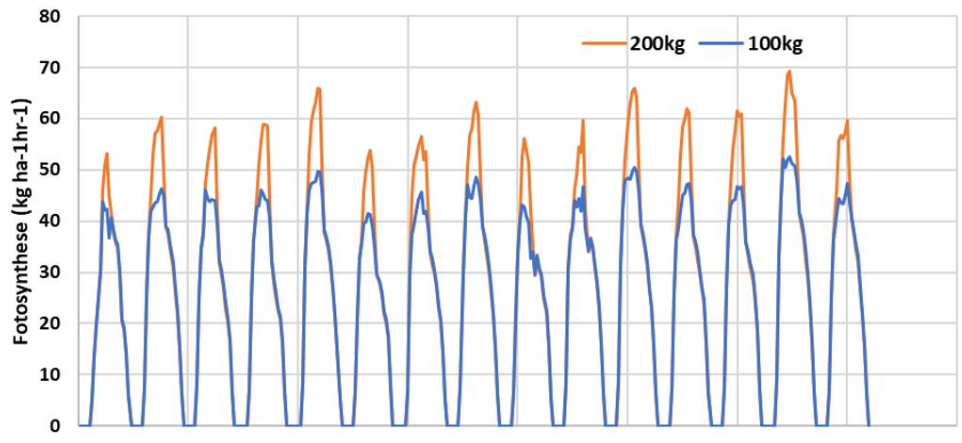


Figuur 23 Urwaarden CO₂-concentratie en ventilatie (links) en dosering (rechts) bij standaard (referentie) en verlaagde dosering boven 20% raam. Periode 7 tot 15 juni.

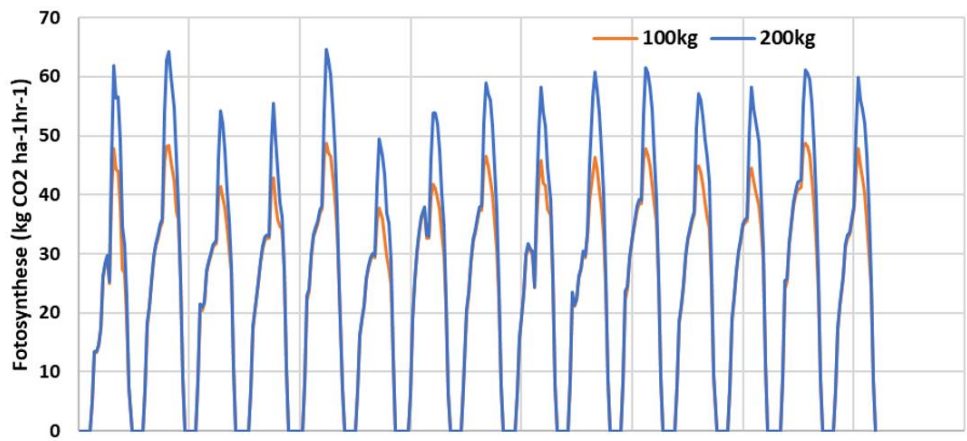
7. In de ochtend of juist in de middag doseren, dan wel hele dag, alles met zelfde totaal dosering.

Vraag is of in ochtend of middag doseren een efficiënter benutting van CO₂ oplevert. Het blijkt dat alleen doseren in de ochtend gunstiger is dan in de middag, doordat in de middag de ramen relatief vaker open moeten omdat zich dan warmte heeft opgebouwd.

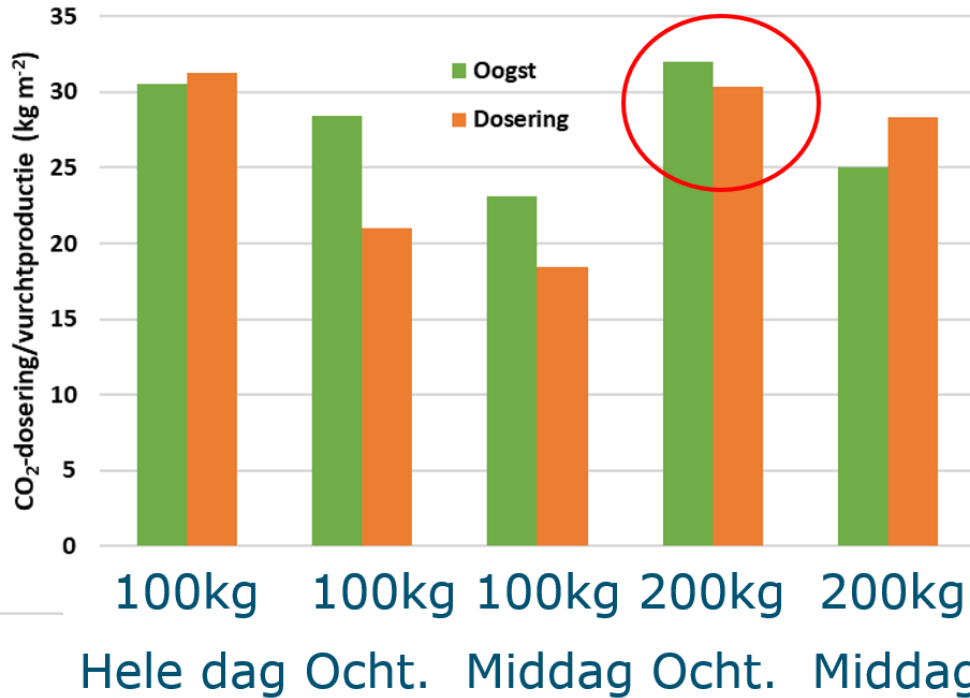
Tevens blijkt dat in de ochtend de hele dosis geven effectiever is dan die hoeveelheid over de hele dag uitsmeren, en dus per kilo gedoseerde CO₂ meer oogst oplevert (Figuur 24, onderin). Daarbij geeft een 200 kg capaciteit uiteraard meer oogst op dan 100 kg, maar de 100 kg capaciteit is veel effectiever want doseert veel minder CO₂ t.o.v. de oogst (28 kg oogst bij 21 kg CO₂, terwijl 32 kg vruchten bij 30 kg CO₂ bij 200 kg capaciteit).



4 t/m 18 juni (meest zonnige dagen)



4 t/m 18 juni (meest zonnige dagen)

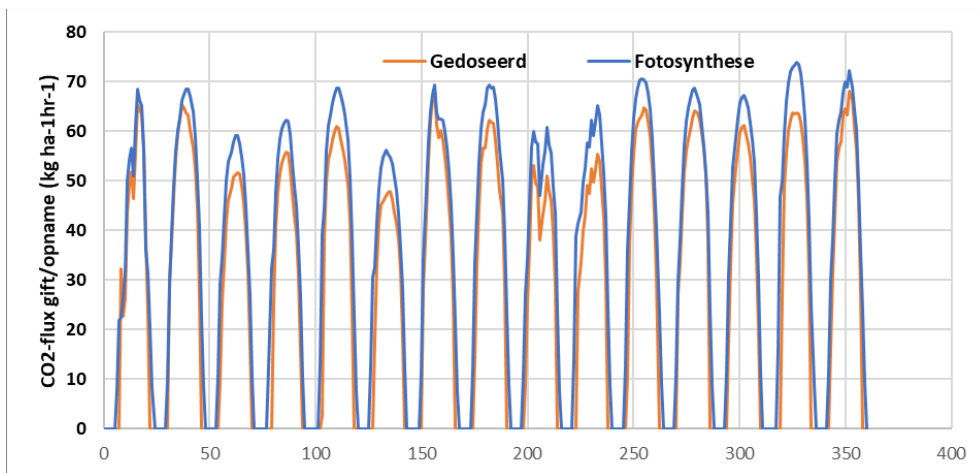


Figuur 24 Fotosynthese bij doseren in ochtend (boven) of middag (midden) en resulterende dosering (onder, in kg CO₂ m⁻²) en vruchtproductie (kg vers m⁻²). Cirkel: de grootste oogst.

8. Houdt een semi-gesloten kas meer CO₂ binnen?

Inderdaad wordt in een semi-gesloten kas de CO₂ efficiënter benut, omdat de actieve koeling er voor zorgt dat op warme zomerdagen de ramen minder vaak open gaan. Zo wordt de gedoseerde CO₂ grotendeels opgenomen (Figuur 25) en gaat veel minder CO₂ verloren door ventilatie. Resultaat:

- CO₂-concentratie komt nauwelijks onder setpoint (gemiddeld 763 ppm)
- Beperkt lekverlies van 3 kg CO₂ m⁻²
- Oogst wordt 20% meer!
- Dosering volgt de fotosynthese (bij nauwkeurige doseerinstallatie)
- Dure optie: binnenhouden CO₂ wordt betaald met electra voor airco



Figuur 25 Verloop van gegeven en via fotosynthese opgenomen CO₂ (kg ha⁻¹ hr⁻¹) op een reeks van merendeels zonnige en warme zomerdagen in het semi-gesloten scenario.

9. Langer een lagere CO₂-concentratie aanhouden in plaats van kort een hoge concentratie

Dit scenario is indirect af te leiden uit de resultaten van twee eerdere scenario's:

Scenario 3 (een reeks van doseercapaciteiten bij 2 concentraties). Als we in Figuur 20 kiezen voor een gelijke dosering en een gelijk ventilatieverlies aan CO₂, bijvoorbeeld

- Bij 600 ppm is er een verlies van 21 kg CO₂ m⁻² bij een doseercapaciteit van 150
- Hetzelfde verlies is bij 800 ppm te zien bij 100 kg doseercapaciteit (Figuur 20, linker deel)
- De gift van de dosering was bij 600 ppm 29 kg, bij 800 ppm 30.3 kg CO₂
- De oogst was uiteindelijk bij 600 ppm 28.4 kg, bij 800 ppm 30.3 kg versproductie
- Efficiency is dan bij 600 ppm 0.98, bij 800 ppm 1 kg productie per kg gegeven CO₂

Dit is natuurlijk maar een klein verschil. Bij eenzelfde totaalverlies (21 kg CO₂ m⁻²) is dan de groei bij 800 ppm iets groter want de fotosynthese is dan wat hoger dan bij 600 ppm.

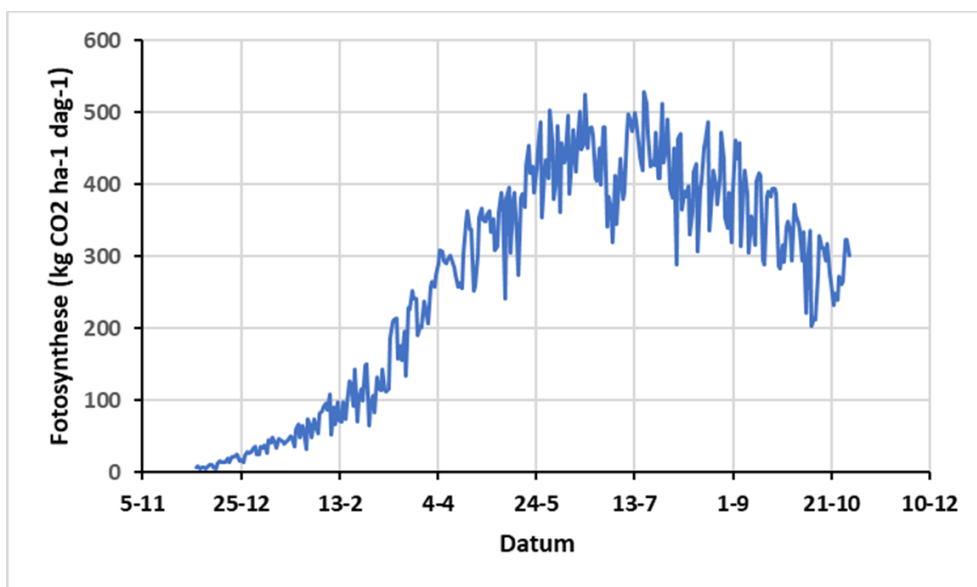
De totale tijd van dosering was gelijk tussen de twee scenario's, maar bij 600 ppm is 50% meer weggelucht (grotere capaciteit gegeven) maar van lagere concentratie t.o.v. 800 ppm, met beiden hetzelfde verlies.

Conclusie: de hogere concentratie (800 ppm) gecombineerd met een lagere doseercapaciteit dan bij 600 ppm is dus gunstiger voor de oogst, met daarbij dezelfde gift en verlies als bij 600 ppm.

Eenzelfde conclusie kan getrokken worden uit scenario 7 (halve dag doseren met dubbele capaciteit vs. hele dag met normale capaciteit). We zien onderin Figuur 24 (staafdiagram) dat halve dag 200 kg capaciteit meer oogst oplevert dan hele dag met 100 kg capaciteit. En in het dagverloop in Figuur 24 is zichtbaar dat de fotosynthese ook hoger is in de ochtend door de hogere doseercapaciteit, dit betekent dat de CO₂-concentratie hoger was. Dus korter een hogere concentratie is gunstiger dan langer een lagere concentratie. Kanttekening: in scenario 7 was overall een setpoint van 800 ppm aangehouden, desondanks gaf doseren met meer capaciteit gemiddeld een ca. 100 ppm hogere CO₂-concentratie in de ochtend.

10. Benodigde CO₂ per groeistadium

In Figuur 26 is de CO₂-opname per dag gedurende de paprikateelt uitgezet. Logischerwijs is de opname hoger bij een gewas dat groter is (juni-juli). De afname na juli komt vooral door afnemend zonlicht, terwijl de vruchtproductie bijna lineair door gaat. Uit de grafiek is te schatten dat de piekwaarden in juni betekenen dat, bij 16 uur licht, er gemiddeld per uur 31 kg CO₂ ha⁻¹ hr⁻¹ wordt opgenomen. Dat is voor alle lichtniveaus; voor maximum lichtniveau van ca. 900 W buitenlicht is het dan ongeveer 31 x 2 = 62 kg. Dit is ook wat het model Intkam berekent (zie Figuur 25). Zonder CO₂-verlies door ventilatie zou een dosering van 62 kg CO₂ ha⁻¹ hr⁻¹ dus volstaan voor de hier getoonde groei en vruchtproductie van ca. 30 kg productie verse paprika per m².



Figuur 26 Bruto fotosynthese (kg CO₂ ha⁻¹ dag⁻¹) voor de referentieteelt van 30 kg vruchtproductie vers per m² per teelt.

De resultaten van de scenario's voor paprika worden in §5.2.3 samengevat.

5.2.3 Totaaloverzicht scenario's en conclusies paprika

Op grond van de modelberekeningen kan het volgende gesteld worden (zie ook overzicht in Tabel 6):

Het verhogen van de doseercapaciteit heeft een sterke invloed op het CO₂ verlies uit de kas, en bevordert slechts in mindere mate de oogst. Daarbij is sterk verhogen van de CO₂-dosering niet raadzaam als de gewasvraag niet verhoogt: verdubbeling van de gift geeft in principe ook een verdubbeling van het CO₂-verlies door ventilatie, terwijl de productiestijging beperkt is (10% bij 200 kg doseercapaciteit).

Zeer gunstig voor de efficiëntie van CO₂-gebruik is om semi-gesloten te telen, want zowel oogst gaat aanzienlijk omhoog en benodigde CO₂-dosering omlaag. Alles draait blijkbaar om reduceren van het ventilatieverlies. Dit vergt echter forse investeringen in infrastructuur van de klimaatbeheersing.

Op korte termijn is het voor efficiënter CO₂-gebruik aantrekkelijker om (a) bij grotere raamstand minder te doseren, (b) tijdelijk minder te doseren (van weekend tot aan kwartaal) door bijv. alleen tot aan buitenluchtconcentratie te doseren, (c) het doseren te verleggen naar de momenten dat de ramen weinig open zijn en het gewas het kan benutten.

Tabel 6 Overzicht van de afname in oogst en CO₂-gift van berekende strategieën bij paprika, ten opzichte van de standaard doseerstrategie van 100 kg doseercapaciteit en 800 ppm setpoint.

Scenario	Doseercapaciteit (kg ha ⁻¹ hr ⁻¹)	Oogst (%)	CO ₂ gift (%)	CO ₂ gift (kg m ⁻² teelt ⁻¹)
Standaard 800 ppm	100	30.3 kg m ⁻²	-	30.4
		% t.o.v. standaard	% t.o.v. standaard	kg CO ₂ t.o.v. standaard
2 dg/wk 400 ppm	100	-8	-27	-5.8
Minder capaciteit & 600 ppm	12.5	-34	-85	-25.8
Meer capaciteit	200	+10	+63	+19.1
600 i.p.v. 800 ppm	100	-9	-15	-4.6
zomerkwartaal -50 kg	50 t.o.v. 100	-7	-24	-7.7
Kieren 4%	100	-13	+9	+2.7
In ochtend doseren	Wel 200 t.o.v. 100	+5	-3	-1.0
Semi-gesloten	100	+20	-49	-14.8
Dosering verlagen boven 20% raam	100	-8	-68	-20.7

Verlagen van de setpoint van 800 naar 600 ppm kost meestal teveel productie vergeleken met wat het aan CO₂-benutting oplevert. Het is beter om te letten op de raamstand en de gewasvraag. Maar als de CO₂-voorziening erg beperkt is op warme zomerdagen, is juist beperkt doseren tot aan de buitenluchtconcentratie slim om het inzakken van de gewasgroei te beperken. Uit scenario met 2 uit 7 dagen een setpoint van 400 i.p.v. 800 ppm blijkt namelijk dat totale dosering dan ca. 2/7 lager wordt en de groei maar licht zakt.

5.3 Conclusies modelberekeningen

Tussen chrysant en paprika komen veel strategieën om CO₂ efficiënter te benutten overeen. Allereerst is berekend dat beide gewassen maximaal ca. 60 kg CO₂ ha⁻¹ uur⁻¹ opnemen. Deze hoeveelheid is maar een fractie van wat vaak gedoseerd wordt.

Bij beide gewassen is het beperken van de dosering bij grote raamstand zinvol, evenals het niet te hoog instellen van het setpoint voor CO₂-concentratie (hooguit 800 ppm). Voor chrysant is voor test van dat setpoint een scenario bij 3 setpoints gedraaid (600, 800 en 1000 ppm), voor paprika niet maar dit gewas gedraagt zich bijna hetzelfde gezien de vergelijkbare CO₂-respons van de fotosynthese.

Opvallend is verder dat verdelen over de dag bij chrysant iets gunstiger is t.o.v. in de ochtend doseren, terwijl dat bij paprika niet zo is. Het gaat weliswaar om kleine verschillen in opbrengst (2-5%), maar omdat de chrysant-berekeningen voor het zomerhalfjaar zijn gedaan is dit resultaat opmerkelijk.

Het meer gesloten houden van de luchtramen, door vernevelen (chrysant) of actieve koeling in semi-gesloten kas (paprika), is zeer gunstig voor beperken van CO₂-verlies door ventilatie en tevens opbrengstverhogend. Zo'n aanpak vergt investering in vernevelinstallatie of airco, hetgeen afgewogen moet worden tegen de voordelen van minder kosten voor CO₂ en de extra opbrengst.

Het regelmatig minder doseren, zoals een tijdje (weekend, kwartaal) maar 50 i.p.v. 100 kg doseercapaciteit of alleen in ochtend, geeft weinig risico op groeivermindering maar kan veel CO₂ besparen. Het is verstandig dit te combineren met perioden dat de mogelijke verliezen vrij groot kunnen zijn, zoals een zomerdag of een warme middag. Gebruik van een aan de klimaatcomputer gekoppeld model zoals OCAP Optimaal kan zo'n aanpak ondersteunen. Voor zuivere CO₂ is dit een zinvolle aanpak.

6 Discussie

6.1 Recente kennis over CO₂-benutting in kas en gewas

Recent experimenteel onderzoek bij WUR heeft aangetoond dat de gebruikelijke ruime CO₂-dosering (tot 200 kg ha⁻¹ uur⁻¹) meer dan gehalveerd kan worden zonder significant oogstverlies (Jansen et al., 2022; Visser et al., 2022; Bijlaard et al., 2023). Die reductie komt voornamelijk op het conto van verlaging als de raamstanden groter worden, zodat ventilatieverlies wordt beperkt. Daarnaast is het raadzaam de plantbelasting af te stemmen op de grootte van CO₂-dosering, die door een betere verdeling over het seizoen beter benut wordt.

Naast die ervaringen op de schaal van het kascompartiment, zijn op plant- en bladschaal door proeven bij Plant Lighting (Boogaart et al., 2019; Hogewoning et al., 2015) en WUR/Delphy (Raaphorst et al., 2022; Dieleman et al., 2003) de fotosynthese en drogestofverdeling naar blad, vrucht en bloemen bekend, zodat de groeimodellen hiermee afdoende geïjkt zijn in hun respons op licht en CO₂.

Om zeer scherp (=minimaal) CO₂ te doseren worden de grenzen van de plant en van onze kennis bereikt. Desalniettemin zijn er kansen die in de literatuur vermeld worden, en die via experimenten of praktijktests mogelijk tot een scherpere dosering kunnen leiden. Enkele aspecten hiervan kwamen in de discussies met de telers aan bod: (1) meer stikstofbemesting toepassen om het gehalte aan Rubisco (dat CO₂ bindt in blad) te verhogen, (2) ver-rood stimuleert strekking maar ook fotosynthese en daarmee de CO₂-benutting, (3) vermijdt grote concentratie-schommelingen van CO₂ want de fotosynthese reageert momentaan en acuut op die concentratie.

Over het mogelijke effect van CO₂ op doorwas en generativiteit bij chrysant is in de vakliteratuur helaas niets gevonden.

De fotosynthese neemt nog toe in het traject van 800 tot 1000 ppm CO₂, zoals bleek uit de gemeten CO₂-respons bij zowel chrysant (alleen de meetserie van maart, zie Hogewoning et al., 2022) als paprika (zie Dieleman et al., 2003). De respons bij paprika is toentertijd bepaald met een -nu verouderde- Licor-6400, en er wordt vermoed dat de positieve respons boven 800 ppm onterecht is als gevolg van lek uit de bladkamer. Aangezien de paprikasimulaties bij hoog licht en hoog CO₂ sink-gelimiteerd waren, werden veel hogere producties dan 30 kg versproductie m⁻² toch al niet bereikt, dus een andere, verlaagde respons had niet veel uitgemaakt voor het resultaat. Dit is echter wel een punt voor nader onderzoek.

Volgens de meer recent bepaalde CO₂-respons bij chrysant bleek evenwel dat 1000 ppm de groei toch nog beperkt stimuleert (+1 tot +5%) t.o.v. 800 ppm, mits er een hoge doseercapaciteit wordt gegeven (anders stijgt door ventilatieverlies de CO₂-concentratie bijna niet).

Hoe solide is de huidige plantenfysiologische kennis over de plantrespons op CO₂? Er is voldoende kennis om CO₂-benutting door het gewas en ventilatieverlies uit de kas mee door te rekenen. Het betreft processen als fotosynthese, drogestof productie, ventilatievoud van de kas. Daarmee is de orde van grootte van dosering versus groei en ventilatieverlies juist. Dit bleek ook uit narekenen van de CO₂-strategieën bij de WUR-proef met tomaat (Visser et al., 2022).

Bloem- en takkwaliteit bij chrysant alsmede vruchtabortie bij paprika worden beslist beïnvloed door de beschikbaarheid van CO₂, maar deze kwaliteitskenmerken zijn met de huidige groeimodellen niet goed te voorspellen. Het taggewicht wel, en die variabele is meegenomen in de scenario's.

6.2 Evaluatie van de modelscenario's

De modeluitkomsten blijken overeen te komen met de verwachtingen die de telers gevoelsmatig hadden, evenwel nu objectief en kwantitatief vastgesteld. Er zijn minstens 10 strategieën mogelijk om de CO₂-benutting door kas & gewas te vergroten, waarbij combinaties nog meer efficiency opleveren (zie volgende alinea).

Een van de strategieën die nu al toegepast kan worden is het beperken van de CO₂-dosering bij grotere raamstand. Die strategie bespaart veel CO₂ en geeft maar zeer beperkt oogstverlies. Eenzelfde strategie is bij eerdere WUR-proeven succesvol gebleken voor een efficiëntere CO₂-benutting (Visser et al., 2019, 2022, Gelder et al., 2012, Bijlaard et al., 2023). In die proeven werd ook in zomerperioden met grote raamstand alleen tot buitenwaarde gedoseerd wat nauwelijks tot groeireductie leidde. Ook in deze berekeningen wordt gepleit om op dergelijke dagen alleen de gewasvraag te doseren, i.e. 60 kg ha⁻¹ uur⁻¹.

Met regelmaat minder doseren, zoals een tijdje (weekend, kwartaal) maar 50 i.p.v. 100 kg doseercapaciteit of alleen in ochtend, geeft ook weinig risico op groeivermindering maar kan veel CO₂ besparen. Zeker in combinatie met de CO₂-besparende overige strategieën zoals raamafhankelijk doseren. Voor zuivere CO₂ is dit een zinvolle en kostenbesparende aanpak. Zij is ook relevant voor de zomerperiode waar vaak ventilatieverlies optreedt, en er geen WKK-CO₂ is zodat de dure, vloeibare CO₂ nodig is. Gebruik van beslissingsondersteunende software (zoals OCAP Optimaal of de CO₂ Optimizer) wordt daarbij aangeraden. Voor WKK-CO₂ is het de vraag hoe de modelsuggesties overgenomen kunnen worden. Er is namelijk geen sturing op de dosering mogelijk, en de vraag naar energie (voor belichting en warmte) bepaalt feitelijk de uitstroom van CO₂. Het bufferen/opslaan van een eventueel overschot aan CO₂ is (nog) niet technisch mogelijk. Dan zal een beperking van de WKK-CO₂ instroom in de kas -bijvoorbeeld via een regelklep - betekenen dat de resterende CO₂ via de schoorsteen onbenut de lucht in verdwijnt.

6.3 Aanbevelingen

Voor chryasant zijn de aanbevelingen (DO's) en ontradingen (DON'Ts) als volgt:

DO's Chryasant:

- CO₂ concentratie van 800 ppm is meestal voldoende voor plant, bij heel veel licht 1000 ppm
- Geef bij grote raamstand (>20%)(dus hoge ventilatievoud) veel minder CO₂, een richtlijn is 60 kg ha⁻¹ uur⁻¹, dit is de max. gewasopname
- Lagere doseringen in langedag en 1^{ste} week van kortedag zijn zinvol
- CO₂ gelijk over dag verdelen, maar niet als raam (ver) open staat
- In lichtperiode half uur later beginnen en eerder stoppen
- Lichtafhankelijke doseercapaciteit, maar houdt wel vast aan 800 ppm setpoint
- Vernevelen: goed voor CO₂-benutting door plant, en minder noodzaak tot luchten

DON'Ts Chryasant:

- Doseren in de lange-dag fase: er komt genoeg uit rest kas
- Hoge pieken in CO₂-concentratie: plant kan er niks mee
- Buitenlucht-CO₂ proberen binnen te halen als er gelijktijdig gedoseerd wordt: leidt tot meer CO₂-verlies
- Hogere concentraties dan 800 ppm op donkere dagen (ondanks belichting): weinig effectief, en plant wordt lui in CO₂-opname

Voor paprika zijn de aanbevelingen veelal vergelijkbaar aan chryasant, aangezien het vaak gaat om hetzelfde effect van een strategie op ventilatieverlies:

DO's paprika:

- Effectiever CO₂ doseren (bv. in ochtend, of alleen wanneer ramen <20% open staan, capaciteit lager in zomer, lichtafhankelijk doseren)
- Niet te hoog setpoint: boven 800 ppm is het effect op groei nihil
- Korte perioden de dosering beperken tot buitenwaarde van CO₂ kan veel CO₂ besparen zonder groot effect op de oogst, bv. in weekend of in periode met veel ventilatie
- Er is wel altijd wat minder oogst: afwegen tegen kosten CO₂

DON'Ts paprika:

- Buiten-CO₂ proberen binnen te halen via trek en tegelijkertijd CO₂ doseren
- Hoge pieken in CO₂-concentratie: plant kan er niks mee
- Doseercapaciteiten van 200 kg in zomerperiode geven veel CO₂-verlies en relatief weinig extra kilo's productie

Voor beide gewassen geldt ook dat rekenen met een CO₂-optimalisatie tool de beslissingen over de CO₂-strategie kan ondersteunen in praktijk. De volgende tools zijn beschikbaar:

- OCAP Optimaal (ondersteund door B-mex)(binnenkort ook voor CO₂ uit ketel en WKK)
- CO₂-optimizer van Ridder

Literatuur

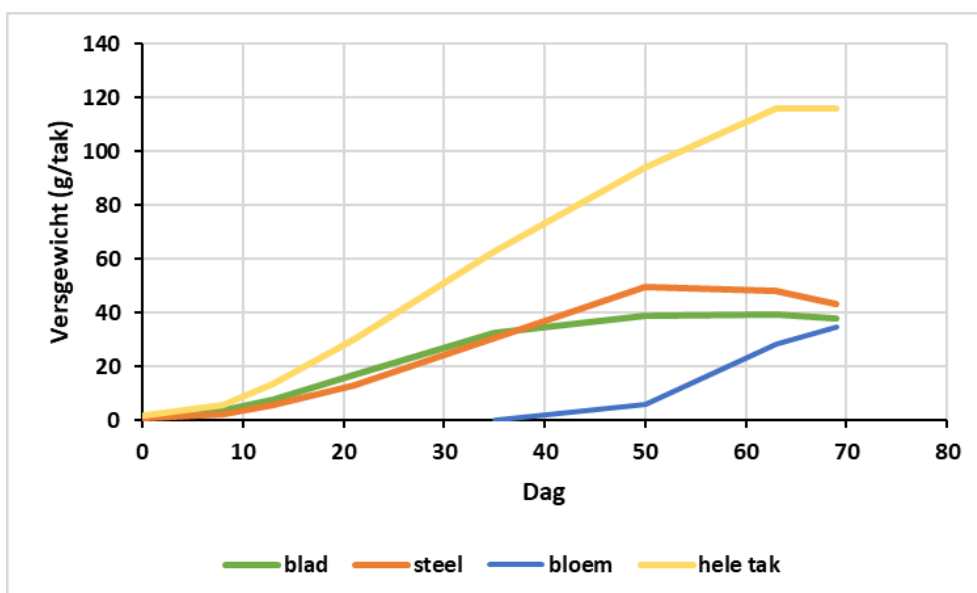
- Besford, R.T., 1993. Photosynthetic acclimation in tomato plants grown in high CO₂. *Vegetatio* 104/105, 441-448.
- Boogaart, S.A.J. van den, Hogewoning, S.W., Muilwijk, R., Trouwborst, G., Rappoldt, C. en Schapendonk, A., 2019. Chrysant in Balans. Rapport Plant Lighting B.V., Bunnik, NL. 78 pp.
- Bijlaard, M., Raaphorst, M., Elings, A., Geurts, J., Kempkes, F. & Janse, J., 2023. Komkommer in de Winterlichtkas: zomerteelt 2021: Onbelichte zomerteelt met gelimiteerd CO₂. Rapport WPR-1196, Wageningen UR Glastuinbouw. 38 pp.
- Cockshull, K.E. & Kofranek, A.M., 1994. High night temperatures delay flowering, produce abnormal flowers and retard stem growth of cut-flower chrysanthemums.
- Dieleman, J.A., Meinen, E., Elings, A., Uenk, D., Uittien, J.J., Broekhuijsen, A.M., De Visser, P.H.B. en Marcelis, L.F.M., 2003. Effecten van langdurig hoog CO₂ op groei en fotosynthese bij paprika. *Nota* 274. Plant Research International.
- García, Nieves, Feije de Zwart, Peter van Weel, Johan Steenhuizen en Marco de Groot, 2017. Stroomstap naar minimaal energieverbruik Alstroemeria. Rapport GTB-1372, Wageningen UR Glastuinbouw.
- Gelder, Arie de, Mary Warmenhoven, Wanne Kromdijk, Esther Meinen, Feije de Zwart, Herbert Stolker, Marc Grootsholten, 2012. Gelimiteerd CO₂ en het nieuwe telen Tomaat. Rapport GTB-1159, Wageningen UR Glastuinbouw.
- Hogewoning, S.W., Persoon, S.H., Trouwborst, G., Pot, C.S. en Sanders, J., 2015. Zuiniger met CO₂ bij gelijkblijvende of hogere productie? Plant Lighting B.V., Bunnik. 55pp.
- Hogewoning, S.W. en Trouwborst, G., 2022. Plantfysiologie, onderzoek en rekenen aan CO₂. Lezing door Plant Lighting B.V.
- Farquhar, G.D., Caemmerer, S., Berry, J.A., 1980. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta* 149, 78-90.
- Geelen, P.A.M., Voogt, J.O. & Van Weel, P.A., 2015. De basisprincipes van het nieuwe telen. Bleiswijk, LTO Glaskracht Nederland, 167 pp.
- Karlsson, M.G., Heins, R.D., Erwin, J.E., Berghage, R.D., Carlson, W.H., Biernbaum, J.A., 1989. Temperature and photosynthetic photon flux influence chrysanthemum shoot development and flower initiation under short-day conditions. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 114, 158-163.
- Marcelis, L.F.M., Elings, A., de Visser, P.H.B. & Heuvelink, E., 2009. Simulating growth and development of a tomato crop. *Acta Horticulturae* 821, 101-110.
- Marcelis, L.F.M., Voogt, W., De Visser, P.H.B., Postma, J., Heinen, M., de Werd, R. & Straatsma, G., 2003. Organische stofmanagement in Biologische kasteelt. Rapport 70, Plant Research International.
- Qian, T., Elings, A., Dieleman, J.A., Gort, G., Marcelis, L.F.M., 2012. Estimation of photosynthesis parameters for a modified Farquhar-von Caemmerer-Berry model using simultaneous estimation method and nonlinear mixed effects model. *Environmental and Experimental Botany* 82, 66-73.
- Raaphorst, Marcel, Arie de Gelder, Lisanne Helmus-Schuddebeurs, Richard van der Stoep en Paul de Veld, 2022. Met LED naar een Perfecte Chrysant. Teelt 16-19. Rapport WPR-1135, Wageningen Plant Research.
- Spaargaren, J.J., 1996. De teelt van jaarrond chrysanten. 212 pp. ISBN 90-9009242-0.
- Steenhuizen, J.W. Bodemademhaling in Alstroemeria bedden (interne notitie WUR Glastuinbouw).
- Visser, Pieter de, Arie de Gelder, Henk Kalkman, Mary Warmenhoven, Feije de Zwart, 2022. Invloed CO₂-dosering op groei bij tomaat. Rapport WPR-1106, Wageningen UR Glastuinbouw.
- Visser, Pieter de, Arie de Gelder, Mary Warmenhoven, Anna Petropoulou, 2019. CO₂ op zoek naar de grens. Rapport WPR-909, Wageningen UR Glastuinbouw.
- Visser, P.H.B. de, Heijden G.W.A.M. van der, Marcelis, L.F.M., Carvalho, S.M.P., Heuvelink, E., 2006. A functional-structural model of chrysanthemum for prediction of ornamental quality. *Acta Horticulturae* 718: 59-66
- Zwart, H.F. de, 1996. Analyzing energy-saving options in greenhouse cultivation using a simulation model. PhD-thesis, Wageningen University.

Bijlage 1 Groeimodel chryasant

Het Intkam model (zie o.a. Marcelis et al., 2009) voor chryasant kent een ontwikkelingsdeel, voor de vorming van plantorganen en tijdstip van bloei, en een drogestofdeel, voor berekening van de gewichten per plant van genoemde organen.

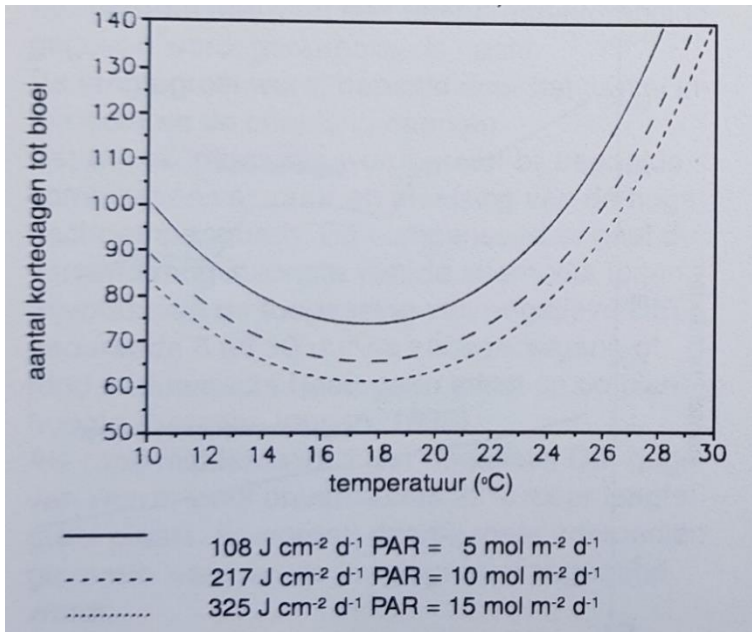
Het ontwikkelingsdeel kent allereerst de twee onderscheidende ontwikkelingsfasen, namelijk Langedag en Kortedag. Tijdens de Langedag (LD) hebben we alleen een verdeling van de nieuw gevormde biomassa naar de wortels, stengels en bladeren. De voorwaarde voor de overgang van de lange naar de korte dag is het totaal aantal bladeren (Spaargaren, 1996). Het totale aantal bladeren dat nodig is voor deze wissel, is afhankelijk van de dagtemperatuur en de daglengte.

Tijdens de tweede grote ontwikkelingsfase waarbij een korte dag (KD) wordt aangehouden – hier gesteld op een lichtperiode van 11 uur- is het aandrijfmechanisme de temperatuursom (TSOM in graaddagen). Deze TSOM laat eerst stengel, wortel en blad ontwikkelen, en later pas de bloem, en deze vormingsnelheden zijn afgeleid uit meetdata van project Perfecte Chryasant waarvan een voorbeeld te zien is in Figuur B1.1.



Figuur B1.1 Gewichtstoename van de verschillende plantdelen van chryasant, zoals gemeten in teelt 19 van project Perfecte Chryasant. Uit meerdere teelten van dit project is de drogestofverdeling in het model afgeleid.

Temperatuur en instraling beïnvloeden zowel de groeiduur tot aan de oogst als de verdelingscoëfficiënten die tot de gewichten per orgaan (Figuur B1.1) leiden. De reactietijd die nodig is vanaf begin korte dag tot het bereiken van rijpe, oogstbare bloemen is afhankelijk van de combinatie van temperatuur en PAR som. Voor chryasant is de snelste bloei, dus de kortste reactietijd, te bereiken bij het optimum bij van 18°C (Figuur B1.2).



Figuur B1.2 Aantal dagen kortedag (KD) tot bloei (reactietijd) is afhankelijk van luchttemperatuur en ontvangen PAR (mol/m²/d), en met deze data van Karlsson (1989) verwerkt in het groeimodel.

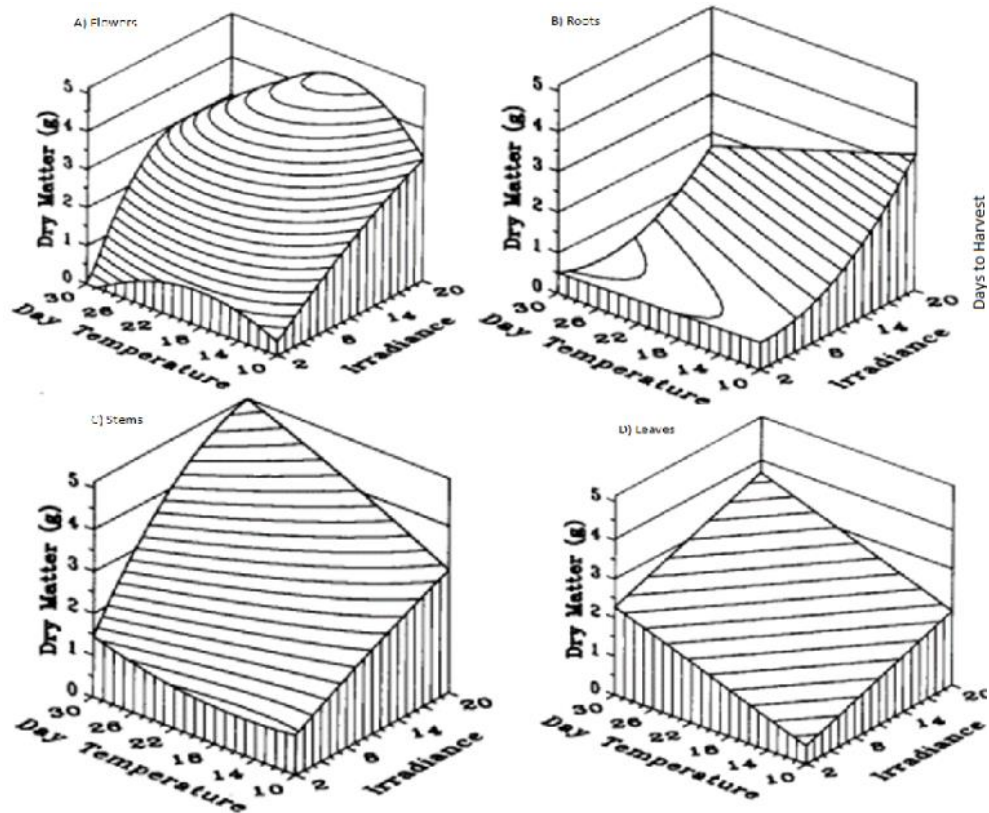
De reactietijd wordt gedefinieerd als de groeiduur (in dagen) van begin korte dag tot bloei. De groeiduur kan berekend worden via de data in Figuur B1.2, als functie van de temperatuur: $\text{duur (in dagen)} = 0.28 x^2 - 9.9 x + 152.6$, waarbij x de gemiddelde etmaaltemperatuur (°C) is en de PARsom $10 \text{ mol m}^{-2} \text{ dag}^{-1}$. Voor al de temperaturen en PAR sommen is deze functie in het model verwerkt, door eerst de kortste groeiduur bij $18 \text{ }^\circ\text{C}$ te nemen, en voor de andere temperaturen met een coëfficiënt te verhogen. Dit werkt als volgt:

Om de negatieve respons van chrysanth bij temperaturen onder en boven het optimum te kunnen simuleren, is een strafvariabele (een 'boete', in Engels 'penalty') gebruikt die volgens onderstaande procedure werkt:

1. Allereerst is de reactietijd bij $18 \text{ }^\circ\text{C}$ uit te drukken in temperatuursom (TSOM). Deze is bij het ras Baltica geschat op $960 \text{ d}^\circ\text{C}$ (daggraden) Hierbij wordt een basistemperatuur van 5 graden aangenomen.
2. Eerst wordt een strafvariabele berekend op basis van bovengenoemde polynoom functie, voor temperatuurafhankelijkheid.
3. De strafvariabele wordt dan gecorrigeerd voor instraling. De correctie gaat ervan uit dat de straf toeneemt naarmate het verschil tussen de dagelijkse stralingssom en de ideale stralingssom ($15 \text{ mol m}^{-2} \text{ dag}^{-1}$) toeneemt.
4. Ten slotte wordt de TSOM-toename berekend als het verschil tussen de temperatuur en de boete.

Met het hierboven beschreven proces wordt de TSOM berekend en vervolgens de Reactietijd.

Het tweede deel van Intkam betreft de drogestofopbouw. Hiervoor wordt eerst de lichtopvang en de resulterende fotosynthese berekend. Het licht opvangende bladoppervlak wordt afgeleid uit de biomassa van het blad, door gebruik te maken van een constante SLA (specific leaf area = oppervlak per gram blad) afgeleid uit de Delphy-proeven. De fotosyntheseberekening volgt de methode van Farquhar et al., (1980) en is geijkt met data van Plant Lighting (o.a. Boogaart et al., 2019). Hierbij heeft de jongste bladlaag boven in het gewas de hoogste fotosynthesecapaciteit en de 2 lagen daar onder een iets lagere capaciteit. De netto assimilaten worden berekend door van de bruto fotosynthese de voor orgaanbouw en onderhoud (onderhoudsrespiratie) benodigde assimilaten aftrekken. Deze bouw- en onderhoudsademhaling zijn redelijk algemeen geldend en zodoende afgeleid uit tomaat (Marcelis et al., 2009). Vervolgens bepalen temperatuur en instraling de verdeling van deze netto assimilaten over de organen. Er is een meervoudig lineair regressiemodel toegepast dat de overeenkomstige verdeling voor de 4 organen (wortels, stengels, bloemen, bladeren) berekent op basis van de dagelijkse temperatuur en straling. Het model is uitgerust met gegevens uit Figuur B1.3. De droge biomassa van elk orgaan is de -in de loop van de tijd- geaccumuleerde groei.



Figuur B1.3 Effect van temperatuur en instraling op drogestofopbouw (g per plant), voor bloem (linksboven), wortels (rechtsboven), stengel (links onder) en bladeren (rechts onder). Bron: Spaargaren, 1996.

Bijlage 2 Groeimodel paprika

Modelopbouw

Het basis groeimodel voor paprika werd gevormd door INTKAM. Hierbij zijn alle basisfuncties behouden, echter de volgende aspecten moesten worden toegevoegd of voor paprika geijkt worden.

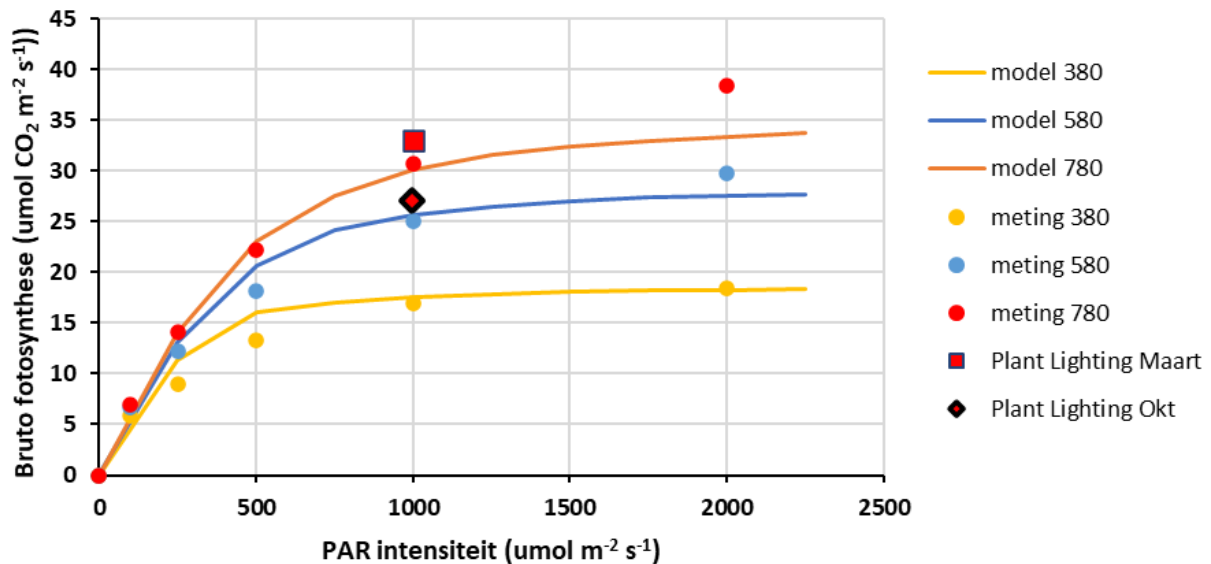
Bij alle ontwikkelingsprocessen is een basistemperatuur van 10 graden aangehouden. De afsplitsing van internodiën en bijbehorend blad en bloem wordt gestuurd door de luchttemperatuur. Vervolgens wordt de ontwikkeling van zowel vruchten als blad gesimuleerd m.b.v. een Richards-vergelijking waarbij de temperatuursom op dagbasis de onafhankelijke variabele is. De Richards-parameters voor vrucht en blad zijn apart gecalibreerd m.b.v. de teeltdata van een paprikaproef in 2002 (Dieleman et al., 2003). De ontwikkelsnelheden leiden tot een vraag (= 'sink') naar assimilaten, en vormen dus de sinksterkte van de plant. De beschikbare assimilaten zullen de vraag meestal maar deels kunnen vervullen, wat dan leidt tot de actuele groei van de plant.

Via de fotosynthese-processen wordt het geabsorbeerde PAR-licht omgezet in assimilaten (suikers of 'sources'), in het model uitgedrukt in grammen koolhydraat (CH₂O). Voor paprika waren slechts enkele fotosynthese-data beschikbaar om het model mee te ijken. De ijking betrof de parameterwaarden voor de parameters J_{max}, V_{cmax}, theta, alpha. De volgende aannamen t.a.v. de andere parameterwaarden zijn gedaan: (1) interne CO₂ is 0.75 x de CO₂-concentratie in de kaslucht, (2) de stomataire geleidbaarheid voor CO₂ wordt herleid uit de geleidbaarheid voor water zoals berekend in Kaspro (daar gebruikt voor de water- en energiebalans van het gewas), (3) de temperatuurinvloeden zijn gebaseerd op Qian et al., (2012), (4) de fotosynthese wordt gereduceerd indien er meer suikeraanbod (sources) is dan suikervraag (sink), (5) er is geen fotosyntheseremming door tekort aan triosefosfaat (dit is de zgn. Ap-reductie).

Resultaat calibratie op teelt in 2002

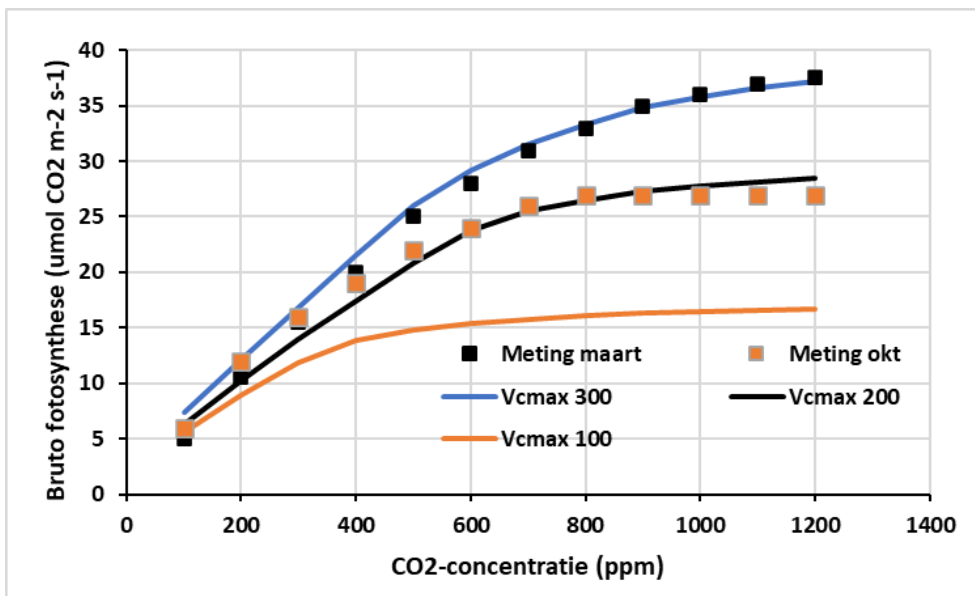
Om de juiste vruchtgrootte in de teelt van 7 februari tot 30 juni 2002 te bereiken is van de 4 Richards-parameters alleen de M-parameter gewijzigd naar 250 gram. Hierna werd steeds een gemiddeld vruchtgewicht van ca. 180 g bereikt, zoals in de teelt.

De Richards-parameters voor blad- en stengelgroei zijn niet bekend uit de literatuur en zijn volledig gebaseerd op de metingen aan blad- en stengelbiomassa in de bovengenoemde proef. Beide organen zijn samengevoegd tot één samengestelde vegetatieve sink, en achteraf is 38% aan blad en 62% aan de stengels toegewezen zoals was gemeten als teeltgemiddelde. De geijkte Richards-vergelijking voor de vegetatieve sink per fytomeer (een 'node') is: $3.6 * (\text{etmaaltemperatuur} - 10) * \text{Richards}(0.0076, 3, 140, 0.011, X+130)$, waarbij X het totaal aan graaddagen is, uitgaande van een basistemperatuur van 10 graden. De fotosynthese is gefit op de lichtrespons en CO₂-respons zoals op 4 momenten in de teelt in 2002 is gemeten (Dieleman et al., 2003), alsmede op enkele waarden uit Hogewoning et al., (2015). De parameterwaarden voor J_{max} en V_{cmax} zijn hiervoor aangepast. Voor zowel de respons op licht (Figuur B2.1) als CO₂ (Figuur B2.2) zijn de modelresultaten na ijking goed vergelijkbaar met de metingen. Hieruit resulteerden de volgende waarden: J_{max} 100, 200, 300, V_{cmax} 100, 150, 300 (voor onderste middelste en bovenste bladeren), alpha 0.3, theta 0.7.



Figuur B2.1 Gemeten (symbolen) en met het geijkte model gesimuleerde fotosynthese als functie van PAR niveau op het blad en 3 CO₂-concentraties (380, 580 en 780 ppm). Metingen bij WUR (3 concentraties) en bij Plant Lighting (voor 600 ppm in oktober en 800 ppm in maart).

Uit de oorspronkelijke data van Plant Lighting, en teruggerekend van netto naar bruto fotosynthese door toevoeging van de onderhoudsademhaling, bleek dat de fotosynthese in de maart-meting nog verhoogde in het traject van 800 naar 1200 ppm. Deze respons is aldus verwerkt in het model.



Figuur B2.2 Metingen van de CO₂-respons van de bruto fotosynthese bij paprika (proef Plant Lighting, zie Hogewoning et al., 2015) en het verloop volgens het fotosynthesemodel bij 3 maximum carboxylatie capaciteiten (V_{cmax}) en 1000 $\mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

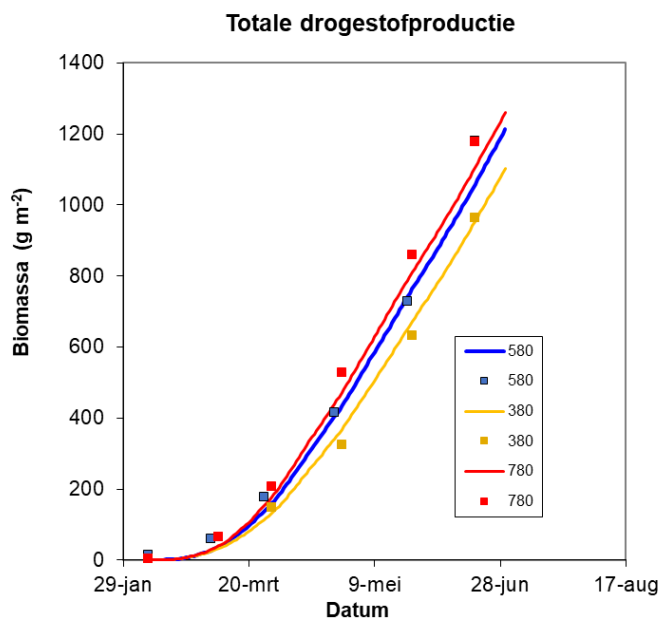
Na inbreng van de parameterwaarden voor de Richards-groei en de fotosynthese, is het model verder geijkt om gesimuleerde en gemeten plantgewichten en oogst gelijk te krijgen. Hiervoor zijn de volgende standardeigenschappen gewijzigd met een correctiefactor:

NodeRate \times 0.43 (NodeRate = afsplitsingsnelheid van een blad+stengel als functie van temperatuursom)

FruitSink x 1.9 (FruitSink = sinksterkte vrucht)

PhotScaling x 1.2 (PhotScaling = fotosynthese maximum)

Vervolgens klopte de voorspelde drogestofproductie met de waarnemingen (Figuur B2.3).



Figuur B2.3 Gesimuleerde (lijnen) en gemeten (blokje) drogestofproductie gedurende de paprikateelt in 2002, voor de 3 constant aangehouden CO₂-concentraties van 380, 580 en 780 ppm.

Literatuur paprika

Dieleman, J.A., Meinen, E., Elings, A., Uenk, D., Uittien, J.J., Broekhuijsen, A.M., De Visser, P.H.B. en Marcelis, L.F.M., 2003. Effecten van langdurig hoog CO₂ op groei en fotosynthese bij paprika. Nota 274. Plant Research International.

Hogewoning, S.W., Persoon, S.H., Trouwborst, G., Pot, C.S. en Sanders, J., 2015. Zuiniger met CO₂ bij gelijkblijvende of hogere productie? Plant Lighting B.V., Bunnik. 55pp.

Hogewoning, S.W. en Trouwborst, G., 2022. Plantfysiologie, onderzoek en rekenen aan CO₂. Lezing door Plant Lighting B.V.

Bijlage 3 CO₂-workshop chrysant

Notulen slot-workshop "CO₂ efficiënt benutten in chrysant"

Datum overleg: 3 november 2023, online

Aanwezig: Nico Kiep (Kiepflower), Rochus van Tuijl (Linflowers), Nico Buurman (Kreling), Dennis Ammerlaan (Ugrant), Marrah Pfister, Dennis Medema, Pieter de Visser (not.)

Vragen/opmerkingen tijdens de presentatie:

Vraag: je zegt dat er 7.5 kg CO₂ per m² per teelt is vastgelegd. Is dat echt netto, en niet bv. alleen fotosynthese en respiratie die weer terug de lucht in gaat.

Antwoord: Ja, netto. Voor een gewas is ca. 40-50 kg CO₂ per m² per jaar heel gewoon

Discussie na de presentatie van de modelberekeningen door WUR (Pieter de Visser):

Resultaten zijn naar verwachting, veel werd al vermoedt maar was meer gevoel, nu objectief uitgerekend. Zo is vernevelen al een bekende aanpak om CO₂-verlies te beperken.

In de BCO van het project OCAP CO₂ Optimizer zat iemand namens de chrysantensector. Inderdaad is de Optimizer tool ook geschikt gemaakt voor chrysant. De Optimizer is nu alleen nog beschikbaar voor OCAP-gebruikers. Maar zal snel voor alle telers beschikbaar zijn. Info bij Kas als Energiebron.

Er lag nog een vraag over het optimaal gebruik van slurven in het bed: van belang om er veel te hebben ivm goede verspreiding van CO₂? Arie en Pieter ondervonden dat CO₂ zich via diffusie zeer snel verspreid (veel sneller dan de plantopname), ook langs de planten in het bed, dus Pieter schat in dat afstanden van ca. 2m tussen slurven volstaan.

Wordt plant in de winter lui mbt CO₂-opname? Want dan is meestal CO₂-concentratie hoog. Pieter ziet daar een risico en hoopt dat concentratie dan niet ineens zakt, bv. door luchten op vocht, want dan zakt fotosynthese echt in. Daar is overigens weinig aan te doen behalve aanhouden van niet te hoog setpoint (dus niet boven 800 ppm). Plant heeft in winter overigens minder CO₂ nodig, want licht is beperkende factor en resulteert sowieso in wat lichter takgewicht.

Als er aan einde van kortedag doorwas optreedt, lijkt het beter de CO₂-dosering te stoppen. Vooral van belang als je voor stuks gaat (waar sierkwaliteit van belang is). Discussie is wel dat wrs het risico op doorwas al optreedt als knop zich vormt, dus paar weken eerder. Lastig om dan dosering te minderen want plant groeit dan nog hard en heeft CO₂ nodig....

Daarnaast 1 uur voor sluiten stoppen met doseren om te vermijden dat meekomende schadelijke stoffen zich ophopen onder het doek. En berekening laat zien dat oogst nauwelijks minder is.

Soms moet je de laatste 2-3 weken van de teelt flink belichten voor juiste takgewicht, dus toch wel 14 uur lampen aan. Pieter noemt eerder onderzoek waarin werd gezien dat bloem de plant leegtrekt qua assimilaten, en daar zelfs opslagorganen voor heeft – bv in het merg van de steel. Maar dat er dan minder fotosynthese nodig zou zijn, is wrs rasafhankelijk en afhankelijk van hoe veel groei (en dus assimilatenvoorraad) er tot aan bloei was: Rochus, en mensen bij Delphy, belichten dan nog graag voor het takgewicht. Bloemen nemen een gedeelte van licht weg, maar rest van licht blijft belangrijk, en dus ook de bijbehorende CO₂.

WKK heeft maar 1 stand qua CO₂-dosering, dus die scenario's met minder doseercapaciteiten zijn dan niet te doen. Aangezien je toch niks met de CO₂ kan (geen opslagvat) als het teveel is voor het gewas, is het niet erg dat je of teveel geeft (tenzij planten lui worden of het te hoge concentraties geeft) of hem via de schoorsteen loost.

Als WKK-CO₂ te duur is (door hoge gasprijs bijvoorbeeld) dan moet je overschakelen op andere bron, bv. vloeibaar. De kosten zijn dan bepalend welke bron je kiest.

CO₂-algemeen: hoeveel kun je als teler de CO₂ nu eigenlijk goed beheersen? Geldt voor zowel WKK-CO₂ als CO₂ binnenlaten uit buitenlucht. Doseren van vloeibaar is dan relatief goed beheersbaar, maar erg duur.

Goed om ivm die beheersbaarheid software-ondersteuning te krijgen, via klimaatsoftware of Letsgrow. Nico Kiep heeft software van Hoogendoorn om de kilo's CO₂ te bepalen maar het werkt nog niet en is zelfs voor Hoogendoorn erg complex.

Idee Pieter: aan CO₂ per teler, dus bedrijfsspecifiek rekenen, wat gaat er nu goed of fout? Mbv Letsgrow data. Dit zou in studiegroep eens uitgeprobeerd moeten worden, waarbij telers elkaar adviseren/steunen. Mogelijk inbrengen in LC (landelijke cie).

Er is een lijstje van "do's & dont's" gemaakt. Weten we nu genoeg? Eens goed naar kijken, en dan kijken in LC of er nog onderzoek nodig is.

Er gaat bij WUR 3 jaar onderzoek lopen naar CO₂ uit buitenlucht. Mogelijk kan dan hele doseertechniek eens flink verbeteren want nu nog teveel gebaseerd op het tijdperk dat er meer dan genoeg CO₂ was.

Ook een lijstje met winst of verlies bij reeks CO₂-strategien: eens goed naar kijken, en moet dit niet in praktijk eens uitgeprobeerd worden? Wellicht bij nieuwe proef Perfecte Chrysant. Ook iets voor de LC.

Uitbrengen van een 'factsheet' met de do's & dont's en wat andere bondige adviezen is wenselijk. Daarbij als het eindrapport.

Bijlage 4 CO₂-workshop paprika 12 okt '23

Opmerkingen na voordracht Pieter de Visser (WUR):

Is er geen camera die in beeld kan brengen of de huidmondjes open of gesloten zijn?

Het is belangrijk om te weten wat de huidmondjes doen.

Is er bekend of water op het dek laten stromen effect heeft op de benodigde raamstand en hoeveel moet dat dan zijn?

PPM concentratie in de kas is leidend, en niet de kilo's CO₂ die langs het blad stromen.

Vragen en opmerkingen in het rondje:

Verhouding generatief / vegetatief en de verdeling van de assimilaten neem je niet mee in het model.

Hoe stuur je naar een generatieve plant?

Wat als je geen CO₂ beschikbaar hebt, het CO₂ gehalte in de kas kan dalen tot onder de 200 ppm. Hoe moet je hier mee omgaan? Een teler zette daar met tegenlucht een minimum raamstand erin. Zo liep het CO₂ gehalte meer richting buitenlucht.

Hoe weet je dat je met je WKK CO₂ inbrengt tegen of onder kostprijs? Hoeveel mag je dan doseren en wat mag CO₂ kosten. Dit kan OCAP Optimaal uitrekenen.

Leveringszekerheid van OCAP of zuivere CO₂ is wel echt een belangrijk punt.

Hoe kan je bij OCAP CO₂ je beschikbare uren capaciteit het beste inzetten?

Ervaring van een bedrijf: iets doseren van CO₂ is altijd beter dan niets kunnen doseren.

Back-up CO₂ mag iets kosten, is na te vragen bij OCAP.

CO₂ geven bij lagere VD is effectiever dan bij hogere VD's

Als je tegenlucht gebruikt voor CO₂ moet je de buitentemperatuur wel in de gaten houden. Deze mag niet te koud zijn.

Ervaringen met waarden van CO₂ meters. Bij hogere kastemperaturen geven sommige meters wel hele hoge waarden CO₂ aan. Dit kan eigenlijk niet. Niet iedereen herkend dit. Goed om meters goed te ijken en eventueel even met verschillende afdelingen af te wisselen.

Bij verlagen CO₂ bij raamstand vanaf 20% is het wel goed om de ventilatievoud hierin ook mee te nemen.

Met meer wind is er meer uitwisseling.

Wat is het effect op de plant als de WKK op zondag wordt uitgezet en de CO₂ dus ook. Hoeveel invloed heeft dat?

Wat heeft een plant minimaal aan CO₂ nodig?

CO₂ via buitenlucht aanzuiging. Hoe kun je dit effectief doen? Als OCAP het even niet doet?

Hoe betrouwbaar is mijn CO₂-metinig?

Bedrijfsspecifieke verschillen waar komen die door?

Deze bijeenkomst ging vooral om het efficiënter inzetten van CO₂. Uit de vragen van de deelnemers kwam wel duidelijk naar voren dat er veel vraag is naar de ontwikkelingen rondom CO₂ uit buitenlucht vangen. Ook CO₂ uit rookgas opslaan.

Verder zijn de belangrijkste discussiepunten: Kostprijs, CO₂-bron, Leveringszekerheid

Hieronder: volledige verslag van workshop

Volledige verslag van de workshop CO₂ paprika d.d. 12 oktober 2023:

Wat is nou het belangrijkste voor de plant: de CO₂-concentratie of de kilo's langs het gewas gestroomde CO₂. Pieter: de concentratie, want alleen daar reageert de fotosynthese op. Dus meer lucht aanvoeren naar blad met een lage concentratie heeft geen stimulerend effect op fotosynthese, concentratieverhoging wel.

Uiteraard moet de aanvoer voldoende zijn om de gewenste concentratie op peil te houden.

Hoe erg is het dat CO₂-concentratie nogal schommelt doordat de dosering steeds een piek geeft die daarna flink inzakt (veel bandbreedte in instelling). Pieter: ik kleine afdelingen (bij WUR of Delphy) is dit beter te regelen, in grote kas kun je helaas niet te vaak de dosering aan en uit zetten en zijn schommelingen niet te vermijden. En: ook ruimtelijke verdeling is kritisch, zorg voor een niet te snelle afgifte van CO₂, dus voor een goede verspreiding via de slurven.

Hoe lang duurt het effect van een verhoogde CO₂-concentratie: een paar seconden, een kwartier? Antwoord: is een momentaan proces, de CO₂ gaat namelijk direct van lucht naar bladgroen voor assimilatie. Dus als er licht op een blad valt is daar meteen CO₂ voor nodig. De licht- en de donker-reactie van de fotosynthese zijn ook zeer snel (hooguit een minuut).

Als je het dek sproeit, koel je de kas en kan de kierstand beperkt blijven. Dan verlies je minder CO₂. Is er bekend hoeveel je moet sproeien per m² om voldoende koeling te krijgen? Pieter: collega's van kastechiek weten dat, want is uit te rekenen (1 L water verdampen kost ca. 2400 joules). Komt in rapport.

Komen uitkomsten van commerciële CO₂-optimizer software overeen met die van WUR? Ja, althans voor de OCAP Optimaal, die heeft Pieter vergeleken met WUR-model, ook de basis rekenregels zijn bijna gelijk.

Jan: OCAP Optimaal berekent per uur of de kosten voor CO₂ opwegen tegen de opbrengsten van de extra kilo's product. Input zijn de data uit Letsgrow van de teelt, en er is een weersvoorspelling voor komende 1-2 dagen. Uiteraard wordt ventilatieverlies meegenomen. Het programma was al klaar voor vloeibare CO₂, is binnenkort ook te gebruiken voor CO₂ van ketel en WKK. Je kunt scenario's kiezen als (1) ik wil niet 100% maar bv. 80% van de CO₂-vraag doseren, (2) hoeveel CO₂ heeft gewas op jaarbasis nodig, en dat gaat het programma optimaal over het jaar verdelen/doseren, (3) wat is de productie zonder CO₂-dosering.

Vraag: kan ik dan de inzet van CO₂ uit WKK optimaliseren, bv. hoeveel mag ik onder het optimale gaan zitten? Antwoord: hangt helemaal van kosten voor die CO₂ af, want betaalt zich dat terug in productie, en dat rekent het programma inderdaad uit.

Niet nodig om bij zon-op meteen te gaan doseren omdat er in de nacht wat opbouw van CO₂ in kas zit.

Vraag: is er dan geen tijd nodig tussen de licht- en de donkerreactie van de fotosynthese. Antwoord: nee, die volgen elkaar zeer snel (<1 min) op. Inderdaad vinden telers dat zo gauw er licht op blad valt er een CO₂-vraag ontstaat, je ziet de concentratie direct dalen.

Rondje:

Jan: reken ook in hoeveelheden die je nodig hebt. Hier kan software van OCAP optimaal mee helpen.

Hoe precies bouw je de CO₂-dosering af boven 20% raamstand, lineair? Ja, lineair, dus van 100% dosering bij 20% raam tot 0% dosering bij 100% raam.

Een vraag over effect ventilatievoud op CO₂-verlies: inderdaad zal bij meer wind en dus ventilatie bij 20% raam er meer CO₂ verloren gaan dan bij 20%raam en geen wind. Maar net als in elke echte kas, doet model raam ook alleen zo ver open als de temperatuur te hoog wordt, en de raamstand is dan minder bij meer wind. Voor de modelberekeningen maakt het dus weinig. Het model heeft een gemiddeld buitenklimaat, met een aannemelijke variatie in windsnelheid van uur tot uur.

Hoe goed zijn de CO₂-sensoren eigenlijk? Zijn ze nog betrouwbaar als luchttemperatuur 33 graden is? Pieter: onbekend, de sensoren die WUR gebruikt kunnen daar tegen. Iemand mat wel eens 1200 ppm terwijl en niet gedoseerd werd. Dat is een veel te hoge waarde, zou hoogstens 400 ppm moeten zijn. Ga er van uit dat de buitenlucht ongeveer 420 ppm in winter halfjaar heeft, in zomer wat lager. Advies: regelmatig de sensoren ijken. En waar hang je de sensor? Vooral in buurt van meest actieve blad. Ideaal: een onderzoeker komt met mobiele sensoren van goede kwaliteit eens langs, om te vergelijken met de meetbox-sensor.

CO₂-concentratie lijkt bij telers toch vaak te schommelen, bijvoorbeeld wel tussen 400 en 600 ppm. Dat is dus niet alleen effect van het aanstaan van de dosering of niet, maar ook van de raamstand in combinatie met de windsnelheid buiten: zo kan buitenlucht naar binnen en verdwijnt CO₂ van binnen naar buiten. Dus bij wind op de ramen, let goed op voor teveel verliezen.

Vraag: hoe generatiever je stuurt, hoe meer CO₂ nodig is voor groei van de vruchten. Kan dat niet meegenomen worden in berekeningen? Ja, aandachtspunt want modelberekening was nu beperkt tot één teelt met een zekere generatief/vegetatief verhouding. De assimilatenverdeling tussen vruchten en vegetatief zit WEL in het model, want vruchten en blad/stengel hebben hun eigen actieve vraag naar assimilaten. Effect op CO₂-vraag zal Pieter in discussie van rapport meenemen.

Als er minder stengels per m² zijn, is de koeling door gewas minder en zal plant eerder de huidmondjes sluiten. Dus dan is geen CO₂ nodig. Zou in advies meegenomen mogen worden.

Met aanzuigen van buitenlucht kon teler (had toen geen vloeibaar CO₂) van half maart tot begin mei CO₂ best op peil houden (ca. 350ppm) terwijl dit anders tot 200 ppm zakt. De truc was om in de kas geen tegendruk te geven (apparaten uit) zodat buitenlucht makkelijker de weg naar binnen vindt. Met 10% luchtraam kon er toch wel 100-150 ppm bijkomen in kas, maar werkt niet bij kleine raamstand van ca. 4%. Dit lijkt tegenstrijdig met modelberekening (waar een kier juist de CO₂ in de kas verlaagde) maar die kier was er tegelijkertijd met CO₂-dosering en dan verlies je CO₂ doordat CO₂ van hoge (binnen) naar lage (buiten) concentratie gaat.

Bij een teler lag OCAP er 2 weken uit, en is in 1 afdeling toch gedoseerd met ca. 50 kg/ha/uur (tot aan 10% lucht). Alleen enkele uren in de ochtend. Zetting was met 6-7 per week per m² in orde, dus ook kleine dosering is zinvol. De naburige afdeling zonder CO₂ in die weken (zakt tot 200 ppm), heeft de schade nooit kunnen inhalen. Buitenlucht aanzuigen was geen optie, te koude lucht.

Op sommige zomerdagen is OCAP-beschikbaarheid maar 50-75%, dus dan moet je als teler de CO₂ wel efficiënt gebruiken.

Teler wilt in zomer toch wel 100 kg/ha/uur kunnen doseren maar dan is OCAP wel heel duur. Dus dan zijn kosten hoger dan wat het aan oogst oplevert.

Toch wil men -als OCAP niet levert- mogelijkheid om dan dure CO₂ in te kopen, zeg maar om teelt te redden.

Jan: OCAP blijkt daarvoor een speciaal -duur- backup-contract te bieden, maar ook hier is levering beperkt want het gaat maar om 600 ton CO₂, die in no time op is.

Door een lang contract voor CO₂-levering af te spreken zou je misschien een lagere prijs kunnen bedingen.

Jan: maar normaliter is OCAP-contract al meestal minimaal 5 jaar, dus dat gaat niet werken.

Teler stookt op biomassa, in buitengebied zonder OCAP, dus er moet vloeibare CO₂ aangevoerd worden.

Leveringszekerheid valt – vooral in zomer – nogal tegen. Apparaat voor CO₂ onttrekken uit het rookgas van de biomassa is een te hoge investering.

Teler geeft in ochtend niet veel CO₂ (ca. 30-40 kg per ha), maar juist in middag, tot aan 120 kg WKK en 60 kg zuivere CO₂. Dan wel ramen dichthouden, en zorgen dat plant alles assimileert. Wel in ochtend plant goed activeren, zodat die tegen wat warmte in middag kan (goed verdampen dus).

Doseren zou je moeten minderen als het vochtdeficiet (VD) niet goed is (te laag: geen actieve plant; te hoog: toegeknepen huidmondjes). Een ander zegt dat VD vooral iets zegt over de bergingsmogelijkheid voor water, en die is natuurlijk hoog bij hoge temperatuur: dus is de temperatuur dan niet het probleem? Pieter: huidmondjes gaan wel degelijk dicht bij hoog VD – los van de temperatuur – en is CO₂-gift weinig zinvol. Met een infrarood camera is te zien of bladtemperatuur hoger wordt dan ruimtetemperatuur: teken dat huidmondjes dicht zijn. Dus de tools zijn er voor telers.

Gedrag van huidmondjes is dus van belang voor CO₂-dosering: Letsgrow zegt dit te kunnen voorspellen, sensorbedrijven zeggen dit te kunnen meten. Maar in wetenschap bestaan nog twijfels of die beloftes wel kloppen, het blijft moeilijk. Er zijn nieuwe veelbelovende sensoren, worden nu getest, o.a. bij NPEC in Wageningen.

Als laatste in het rondje: Dennis Medema, coördinator bij onderzoeksprogramma Kas als Energiebron, Glastuinbouw Nederland. Gezien de grote opkomst hier, aardig om even te peilen wat de verdere behoefte aan kennis nog is bij de telers, bijv.:

Nog enkele scenario's doorrekenen (ja, bv. open vs. vol/gesloten gewas, en meer generatief, meer/minder vruchten)

Een demonstratieproef, bijv. bij WUR of Delphy, met zuivere CO₂, om effect op gewas echt te testen

Telers die het B-mex rekenprogramma OCAP-optimaal (nu ook voorzien van ketel- en WKK-CO₂) gaan testen en evalueren

Ja, er leven vragen of je met dat B-mex model kan sturen op CO₂, met name wanneer die voldoende waard is om ingezet te worden (wanneer levert het meer op dan het kost)

Toch leeft de vraag of je op een zonnige zondag niet gewoon de CO₂-dosering kan stoppen, wat betekent dat voor het gewas? Dat zit niet in de rekenprogramma's. Dus dat vraagt om echte proeven, met een praktijkconforme plantbelasting en productie. Iets voor de nu ingeplande CO₂-testfaciliteit bij WUR (IDC-CO₂)!

En ja, er zijn vragen over hoe buitenlucht-CO₂ in te zetten, die is ruim beschikbaar maar kan er nu technisch en hoe groot zijn de investeringen: Dennis: er komt nu een 3-jarig onderzoek waarin bij WUR die techniek getest gaat worden, i.s.m. meerdere technische bedrijven. Kostprijs zou naar beneden moeten, nu ca. 500-700 euro per ton CO₂. Mooie is dat die techniek de CO₂ in een batterij een tijdje kan opsparen, en dat het zowel voor rookgas als voor buitenlucht te gebruiken is. Nadeel is dat het energie kost om CO₂ weer uit de opslag (batterij zo groot als een scheepscontainer) te halen. Test en evaluatie gaan nu lopen.

We denken dat het goed is dit, na inzage in verslag van het huidig overleg, te bespreken in de nieuwe, landelijke gewas coöperatie paprika. En dan vervolgstappen doen.

Hier en daar wordt het mooi samengevat: (1) wat is de CO₂ waard die ik doseer, gebruik modellen om dit goed af te wegen, (2) verklaar de verschillen tussen bedrijven [Jan noemt voorbeeld van teler die maar 60% doseert, maar wel 300 ppm meer in de kas realiseert, hoe doe je dat?], ligt dat aan hun strategie of zijn soms de CO₂-sensoren gewoon fout, (3) optimaliseer de techniek van buitenlucht-gebruik, (4) wat kan de plant aan qua lage CO₂, is 50 kg echt minimaal nodig, en hoe lang kun je zonder (wrs. is proef nodig want nu oude getallen)

Dit leidt dan tot vervolg, voor antwoord op al die vragen: 1. Gebruik van Optimizers zoals OCAP-optimaal, 2. Werkgroepjes telers om bedrijfsspecifieke CO₂-efficiënties te vergelijken, 3. Kasproeven. Deze worden besproken in de landelijke commissie.



Chrysant

Facts:

Het chrysantengewas heeft in de zomer maximaal ca. 60 kg CO₂ ha⁻¹ uur⁻¹ nodig voor voldoende fotosynthese en groei. Een doseercapaciteit van maximaal 100 kg is dan ruim voldoende. Grotere capaciteiten geven een groot CO₂-verlies bij raamstanden groter dan ca. 20%, tot wel 74% van de gift.

Een combinatie van verhogen setpoint (800 -> 1000 ppm) en doseercapaciteit (100 -> 200 kg) levert vrijwel geen opbrengstverhoging meer op (+1%) t.o.v. het alleen verhogen van de doseercapaciteit (+23%). Wel zijn de CO₂-verliezen door ventilatie aanzienlijk meer bij hoger setpoint (78% van de gift), terwijl het verlies al veel was bij verhogen doseercapaciteit alleen. Deze data zijn voor het zomerhalfjaar waarin veel gelucht moet worden voor temperatuur: in het winterhalfjaar is er uiteraard minder ventilatie en verlies.

Een setpoint van 800 ppm is voldoende, maar is op zomerdagen niet houdbaar tenzij men veel CO₂-verlies op de koop toe neemt.

Enkele CO₂-strategieën om de benutting van CO₂ te verhogen zijn:

- (a) vernevelen bespaart CO₂ én verhoogt de opbrengst,
- (b) dosis beter over hele dag verspreiden dan veel in halve dag,
- (c) technieken om scherper te doseren zoals licht- en raamstand-afhankelijk en eerder stoppen op de dag.

Deze CO₂-besparende scenario's verminderen de CO₂-gift met 2 tot 19%, t.o.v. onze standaard strategie met continue 100 kg CO₂ ha⁻¹ uur⁻¹ en 800 ppm. Zij realiseren opbrengstverschillen t.o.v. de standaard van -7 tot +7%.

Het takgewicht gaat te ver omlaag bij een setpoint van 600 ppm in combinatie met 100 kg ha⁻¹ uur⁻¹. Zo'n setpoint geeft een betere CO₂-benutting door de lagere concentratie van geventileerde kaslucht. Dan is het raadzaam om een lagere plantdichtheid aan te houden dan bij 800 ppm setpoint (dus < 64 planten m⁻²).



Do's & dont's

Voor chrysanth zijn de aanbevelingen (DO's) en onverstandige zaken (DON'Ts) als volgt:



DO:

CO₂ concentratie van 800 ppm is meestal voldoende voor plant, bij heel veel licht

1000 ppm

Geef bij grote raamstand (>20%)(dus hoge ventilatievoud) veel minder CO₂, een richtlijn is 60 kg ha⁻¹ uur⁻¹, dit is de max. gewasopname

Lagere doseringen in langedag en 1^{ste} week van kortedag zijn zinvol

CO₂ gelijk over dag verdelen, maar niet als raam (ver) open staat

In lichtperiode half uur later beginnen en eerder stoppen

Lichtafhankelijke doseercapaciteit, maar houdt wel vast aan 800 ppm setpoint

Vernevelen: goed voor CO₂-benutting door plant, en minder noodzaak tot luchten

DONT:

Doseren in de lange-dag fase: er komt genoeg uit rest kas

Hoge pieken in CO₂-concentratie: plant kan er niks mee

Buitenlucht-CO₂ proberen binnen te halen als er gelijktijdig gedoseerd wordt: leidt tot meer CO₂-verlies

Hogere concentraties dan 800 ppm op donkere dagen (ondanks belichting): weinig effectief, en plant wordt lui in CO₂-opname

TIP:

Rekenen met een CO₂-optimalisatie tool de beslissingen over de CO₂-strategie kan ondersteunen in praktijk.

Denk aan de volgende tools: (1) OCAP Optimaal, (2) CO₂-optimizer van Ridder

Paprika



Facts:

Het verhogen van de doseercapaciteit heeft een sterke invloed op het CO₂ verlies uit de kas, en bevordert slechts in mindere mate de oogst. Daarbij is sterk verhogen van de CO₂-dosering niet raadzaam als de gewasvraag niet verhoogt: verdubbeling van de gift geeft in principe ook een verdubbeling van het CO₂-verlies door ventilatie, terwijl de productiestijging beperkt is (10% bij 200 kg doseercapaciteit).

Zeer gunstig voor de efficiëntie van CO₂-gebruik is om semi-gesloten te telen, want zowel oogst gaat aanzienlijk omhoog en benodigde CO₂-dosering omlaag. Alles draait blijkbaar om reduceren van het ventilatieverlies. Dit vergt echter forse investeringen in infrastructuur van de klimaatbeheersing.

Zonder investeringen is het direct realiseren van efficiënter CO₂-gebruik mogelijk door:

- a. bij grotere raamstand minder te doseren,
- b. tijdelijk minder te doseren (van weekend tot aan kwartaal) door bijv. alleen tot aan buitenluchtconcentratie te doseren,
- c. het doseren te verleggen naar de momenten dat de ramen weinig open zijn en het gewas het kan benutten.

Verlagen van de setpoint van 800 naar 600 ppm kost meestal teveel productie vergeleken met wat het aan CO₂-benutting oplevert. Het is beter om te letten op de raamstand en de gewasvraag. Maar als de CO₂-voorziening erg beperkt is op warme zomerdagen, is juist beperkt doseren tot aan de buitenluchtconcentratie slim om het inzakken van de gewasgroei te beperken. Uit het scenario met 2 uit 7 dagen een setpoint van 400 i.p.v. 800 ppm blijkt namelijk dat de totale dosering dan ca. 2/7 lager wordt en de groei maar licht zakt.

Do's & dont's

DO's:

- Effectiever CO₂ doseren (bv. in ochtend, of alleen wanneer ramen <20% open staan, capaciteit lager in zomer, lichtafhankelijk doseren)
- Niet te hoog setpoint: boven 800 ppm is het effect op groei nihil
- Korte perioden de dosering beperken tot buitenwaarde van CO₂ kan veel CO₂ besparen zonder groot effect op de oogst, bv. in weekend of in periode met veel ventilatie
- Er is wel altijd wat minder oogst: afwegen tegen kosten CO₂

DONT:

- Buiten-CO₂ proberen binnen te halen via trek en tegelijkertijd CO₂ doseren
- Hoge pieken in CO₂-concentratie: plant kan er niks mee
- Doseercapaciteiten van 200 kg in zomerperiode geven veel CO₂-verlies en relatief weinig extra kilo's productie

TIP:

Rekenen met een CO₂-optimalisatie tool de beslissingen over de CO₂-strategie kan ondersteunen in praktijk. Denk aan de volgende tools: (1) OCAP Optimaal, (2) CO₂-optimizer van Ridder.

To explore
the potential
of nature to
improve the
quality of life



Wageningen University & Research,
BU Glastuinbouw
Postbus 20
2665 ZG Bleiswijk
Violierenweg 1
2665 MV Bleiswijk
T +31 (0)317 48 56 06
www.wur.nl/glastuinbouw

Rapport WPR-1282

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 7.600 medewerkers (6.700 fte) en 13.100 studenten en ruim 150.000 Leven Lang Leren-deelnemers behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.