



CO₂ bij paprika: meerwaarde en beperkingen

Anja Dieleman, Jeroen Zwinkels, Arie de Gelder, Ingrid Kuiper, Feije de Zwart,
Chris van Dijk & Tom Dueck





CO₂ bij paprika: meerwaarde en beperkingen

Anja Dieleman¹, Jeroen Zwinkels², Arie de Gelder¹, Ingrid Kuiper³, Feije de Zwart¹,
Chris van Dijk⁴ & Tom Dueck¹

- ¹ Wageningen UR Glastuinbouw
- ² DLV Plant
- ³ LTO Groeiservice
- ⁴ Plant Research International

© 2007 Wageningen, Wageningen UR Glastuinbouw

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 Wageningen UR Glastuinbouw

Wageningen UR Glastuinbouw

Adres : Bornsesteeg 65, 6708 PD Wageningen
: Postbus 16, 6700 AA Wageningen
Tel. : 0317 - 47 70 01
Fax : 0317 - 41 80 94
E-mail : glastuinbouw@wur.nl
Internet : www.glastuinbouw.wur.nl

Inhoudsopgave

	pagina
Voorwoord	1
Samenvatting 'CO ₂ bij paprika: meerwaarde en beperkingen'	3
1 Inleiding	5
2 Denkbeelden over CO ₂ effecten	7
2.1 Inleiding	7
2.2 Resultaten	7
2.2.1 Respons enquête	7
2.2.2 Resultaten enquête	7
2.3 Conclusies	34
3 Deskstudie effecten van CO ₂	35
3.1 Fotosynthese	35
3.2 Lichtresponscurve	36
3.3 Fotosynthese bij paprika	36
3.4 CO ₂ en energiebelasting	38
3.5 Effect CO ₂ op huidmondjes	39
3.6 Schadelijke effecten van hoog CO ₂	39
3.7 Discussie punten uit de enquêtes	39
3.8 Conclusies	41
4 CO ₂ rekenprogramma	43
4.1 Strategisch inzetten van CO ₂	43
4.2 Elke laatste kilo evenveel effect	43
4.3 Zuivere CO ₂ -dosering	46
4.4 Andere invloedsfactoren	47
5 Fotosynthesemetingen	49
5.1 Inleiding	49
5.2 Materiaal en methoden	49
5.2.1 Plantbelasting	49
5.2.2 Zonnige en hete dagen	49
5.3 Resultaten	50
5.3.1 Plantbelasting	50
5.3.2 Zonnige en hete dagen	51
5.4 Conclusies	53

6	Risico's van rookgassen in kaslucht: vaststellen van effectgrenswaarden	55
6.1	Inleiding	55
6.2	Stikstofoxiden (NO _x)	56
6.2.1	Algemeen	56
6.2.2	Werkingsmechanismen	56
6.2.3	Selectie van relevante gegevens	57
6.2.4	Afleiding effectgrenswaarden voor NO _x	61
6.3	Etheen	62
6.3.1	Algemeen	62
6.3.2	Werkingsmechanismen	63
6.3.3	Selectie van relevante gegevens	63
6.3.4	Afleiding effectgrenswaarden etheen	64
6.4	Relevantie van nieuwe effectgrenswaarden voor de paprikateelt	65
6.5	Consequenties voor de CO ₂ dosering uit WKK's	67
7	Communicatie	69
8	Literatuur	71
	Bijlage I. Vragenlijst enquête	6 pp.

Voorwoord

CO₂ is een belangrijke groeifactor voor planten. Een verhoging van de CO₂ concentratie verhoogt de productie van een paprikagewas. Maar rookgassen doseren kan ook negatieve gevolgen hebben voor groei en productkwaliteit, doordat er gassen vrijkomen die schadelijk kunnen zijn voor het gewas, zoals NO_x en etheen. In opdracht van de landelijke commissie Paprika van LTO Groeiservice hebben DLV Plant, Wageningen UR Glastuinbouw, Plant Research International en LTO Groeiservice in 2007 een project uitgevoerd dat zich richtte op de meerwaarde van CO₂ voor de productie en naar de beperkingen die het doseren van CO₂ via de WKK met zich mee brengt. Het project werd gefinancierd door Productschap Tuinbouw.

In dit project is een enquête gehouden onder paprikatelers, waarin hen gevraagd werd naar hun ideeën over het doseren van CO₂ en de effecten op hun gewas. Naast de enquête is een deskstudie uitgevoerd. Hierin is de kennis die aanwezig is over de effecten van CO₂ op groei en ontwikkeling van paprika samengevat. Om specifieke vragen te beantwoorden is onder een aantal omstandigheden de fotosynthese van paprikaplanten gemeten. Er is een rekenprogramma gemaakt, waarin de effecten van bedrijfsuitrusting, buitenklimaat en kasklimaatinstellingen en CO₂ dosering op de efficiëntie van CO₂ en de productie worden berekend. Dit programma is te downloaden vanaf www.glastuinbouw.wur.nl. Tenslotte is er in dit project gekeken naar de mogelijke risico's van het gebruik van rookgassen, die naast CO₂ ook voor de plant schadelijke stoffen zoals etheen en NO_x bevatten.

Dit project is gefinancierd door Productschap Tuinbouw, en werd begeleid door de paprikatelers Wilbert van den Bosch, Arthur Zwinkels, Wilfred van der Berg en Sjaak van Kester. Wij willen hen van harte bedanken voor hun begeleiding gedurende het project.

Anja Dieleman
Wageningen UR Glastuinbouw
November 2007

Samenvatting 'CO₂ bij paprika: meerwaarde en beperkingen'

In opdracht van de landelijke commissie Paprika van LTO Groeiservice hebben DLV Plant, Wageningen UR Glastuinbouw, Plant Research International en LTO Groeiservice een onderzoek uitgevoerd naar de meerwaarde van het doseren van CO₂ voor de productie en naar de mogelijke beperkingen die het doseren van CO₂ uit rookgassen met zich mee brengt. Het project werd gefinancierd door Productschap Tuinbouw en begeleid door een aantal paprikatelers.

Enquêtes

In discussies met tuinders, zoals die bijvoorbeeld rond de gesloten kas plaatsvinden, blijkt dat er in de praktijk een groot aantal verschillende denkbeelden bestaan over effecten van CO₂. In dit project is aan een groot aantal paprikatelers in Nederland een enquêteformulier gestuurd met vragen over hun strategie van CO₂ doseren, welke effecten ze hiervan verwachten op de ontwikkeling en productie van het gewas en welke factoren een invloed hebben op het doseren van CO₂. Uit de enquête bleek dat de meeste telers met CO₂ doseren starten tussen 1 en 2 uur na zonsopkomst, en ongeveer 2 uur voor zonsondergang stoppen. Op de stelling 'Er zit een duidelijke strategie achter het doseren van CO₂' geeft 82% aan dat ze het er (helemaal) mee eens zijn. Daarbij geeft 92% van de telers aan dat er rekening gehouden wordt met licht, 66% met temperatuur en 56% met RV. Ook de weersomstandigheden en de stand van het gewas bepalen voor de meeste telers hoe er CO₂ gedoseerd wordt. Hieruit blijkt dat het doseren van CO₂ in de kas een complex geheel is waarbij met vele factoren rekening wordt gehouden. Op de stelling 'CO₂ doseren leidt tot meer productie' geeft 94% van de telers aan dat ze het er (helemaal) mee eens zijn. Over hoe CO₂ leidt tot een productiestijging, zijn de meningen sterk verdeeld. Ongeveer een derde van de telers denkt dat door CO₂ doseren het bladoppervlak wordt vergroot, eenderde denkt juist van niet en eenderde weet het niet. Bijna tweederde van de telers denkt dat CO₂ doseren leidt tot meer zetting en zwaardere vruchten, terwijl eenderde aangeeft dat ze het niet weten. Uit deze antwoorden blijkt dat er toch nog veel onbekend is over wat de effecten van CO₂ dosering op het gewas is.

Literatuurstudie

Om die reden is in dit project ook op een rijtje gezet wat al bekend is over de effecten van CO₂ op paprika. Bij een verhoging van de CO₂ concentratie neemt de fotosynthese toe en worden meer assimilaten aangemaakt. Vrijwel alle telers maken daarvan gebruik om met een hoge CO₂ dosering de zetting van de eerste vruchten te bevorderen. Later in de teelt hangt het effect van CO₂ dosering op de zetting op korte termijn af van de plantbelasting op dat moment. Een plant die zwaar belast is en geen assimilaten over heeft voor zetting kan bij een hogere CO₂ dosering en dus hogere fotosynthese op dat moment nog steeds assimilaten te kort komen voor zetting. Op korte termijn zie je dus geen effect. Op termijn van enkele weken als de plantbelasting afgenomen is zal CO₂ dosering wel tot extra zetting leiden. Het effect van CO₂ dosering op vruchtgrootte en vruchtgewicht is gecompliceerd, omdat hierin effecten van temperatuur en aantal gezette vruchten ook een rol spelen. Als het aantal gezette vruchten binnen een korte periode als gevolg van hogere CO₂ concentratie groot is, zijn er per vrucht weinig assimilaten beschikbaar en zal elke vrucht relatief minder kunnen groeien en dus kleiner en lichter blijven. Als eenmaal de vruchten zijn gezet en de zetting een gegeven is, leidt een hogere CO₂ dosering wel tot relatief zwaardere vruchten dan zonder CO₂ dosering.

CO₂ rekenprogramma

Verhogen van de CO₂ concentratie heeft een positief effect op de fotosynthese, met name op lichtrijke dagen. Op die dagen zal echter veel CO₂ verloren gaan via de luchtramen. Het is dus van belang de beperkte hoeveelheid CO₂ zo verstandig mogelijk over de dag te verdelen. De instrumenten die de teler hiervoor ter beschikking staan zijn de buffervulcurve en het bepalen van start- en eindtijdstippen van de doseerperiode. Om te zien wat het effect is van de

instellingen die hiervoor gebruikt worden, is in dit project een rekenprogramma gemaakt. Telers kunnen gegevens over hun eigen bedrijfsuitrusting en klimaatinstellingen invoeren, waarna de effecten van verschillende strategieën van CO₂ doseren op de productie van paprika berekend kunnen worden. Het rekenprogramma is te downloaden vanaf www.glastuinbouw.wur.nl. Met dit programma kan bepaald worden of het op een bepaalde dag gunstig is of niet om de CO₂ vooral rond de middag in te zetten, of dat er juist beter 's ochtends bij kleine ventilatiegebieten CO₂ gegeven kan worden. Het is daarbij een afweging van winst en verlies. Verschuiven van CO₂ dosering van de ochtend naar de middag is zinvol als de winst van zo'n 'verschoven kilo' in de middag groter is dan het verlies in de ochtend.

Fotosynthesemetingen

Bij paprika varieert de plantbelasting gedurende de teelt sterk. Om na te gaan wat het effect hiervan op de fotosynthese is, zijn fotosynthesemetingen gedaan op een praktijkbedrijf aan planten waarvan de helft van de vruchten verwijderd was (plantbelasting 22 vruchten/m²) en planten met een normale plantbelasting (41 vruchten/m²). Uit de metingen bleek dat de planten met een lage plantbelasting dezelfde fotosynthesesnelheid hadden als de planten met een normale plantbelasting. Bij beide groepen planten bleek dat het verhogen van de CO₂ concentratie tijdens de metingen van 350 ppm naar 1100 ppm CO₂ leidde tot een toename van de fotosynthese met ca. 90%.

Uit de praktijk komen aanwijzingen dat op zeer zonnige of hete dagen een verhoging van de CO₂ concentratie nauwelijks of niet tot meerproductie leidt. In dit project is op zonnige en op bewolkte dagen op meerdere momenten van de dag de fotosynthese gemeten. Daaruit bleek dat op bewolkte dagen de fotosynthese gedurende de dag geen verloop vertoonde. Op zonnige dagen echter, bleek de fotosynthesesnelheid aan het einde van de dag lager te zijn dan 's ochtends of aan het begin van de middag, terwijl de omstandigheden in de meetcuve van de fotosynthesemeter hetzelfde waren. Dit geeft aan dat op zonnige dagen de efficiëntie van de planten om licht en CO₂ te gebruiken voor de vorming van assimilaten afneemt gedurende de dag. Dit heeft waarschijnlijk te maken met een beschadiging van het fotosynthesesysteem van de bovenste bladeren van de plant door té veel licht. Gedurende de nacht herstelt dit zich weer.

Risico's van rookgassen

In de glastuinbouw wordt met enige regelmaat schadegevallen met onbekende oorzaak geconstateerd, die grote economische gevolgen kunnen hebben voor de individuele tuinder. Vermoed wordt dat het de rookgassen zijn, die gebruikt worden voor het doseren van CO₂ uit installaties met warmtekrachtkoppeling (WKK's), vooral NO_x en etheen. Tot op heden worden in de glastuinbouw grenswaarden gebruikt bij het vaststellen van de luchtkwaliteitseisen waaraan rookgassen van WKK-installaties moeten voldoen, die begin van de tachtiger jaren zijn vastgesteld. De glastuinbouw heeft sinds die tijd grote ontwikkelingen doorgemaakt. In dit project zijn daarom deze effectgrenswaarden voor NO_x en etheen geëvalueerd. De grenswaarde voor langdurige blootstelling aan etheen blijkt onveranderd laag te zijn. Deze ligt op het niveau van de natuurlijke achtergrondconcentratie van ongeveer 5 ppb. Deze studie geeft echter aan dat de nieuwe grenswaarde voor NO_x (NO + NO₂) ongeveer een factor 10 lager is dan in de jaren 80 werd aangenomen. Voor kortdurende blootstelling aan NO_x is de grenswaarde nu vastgesteld op 40 ppb, voor langdurige blootstelling op 16 ppb. Dit betekent dat om in de toekomst veilig CO₂ te kunnen blijven doseren via de WKK, de kwaliteit van de rookgassen verbeterd moet worden. Om schade aan het gewas te voorkomen is het aan te bevelen een bewakingssysteem te installeren waarmee concentraties van de meest risicovolle componenten op plantniveau gemeten kunnen worden.

1 Inleiding

Het basisproces voor de groei van planten is de fotosynthese. Voor de fotosynthese is de concentratie van CO₂ in de kaslucht van groot belang. Een verdubbeling van de CO₂ concentratie van de buitenwaarde van circa 350 ppm naar 700 ppm kan een verhoging van circa 30-40% van de groeisnelheid van planten opleveren. Bovendien gaan er bij hogere CO₂ concentraties relatief meer assimilaten naar de vruchten en minder naar de vegetatieve delen. In theorie kan bij een aantal gewassen een verhoging tot wel 1200 ppm CO₂ een verhoging van de fotosynthese geven. Hogere waarden worden in de glastuinbouw ook wel toegepast maar het is de vraag of dit nog efficiënt is.

Al meer dan 25 jaar wordt CO₂ dosering in de glastuinbouw toegepast. De CO₂ die in de kas wordt gedoseerd is afkomstig van restgassen van de ketel, WKK, OCAP of zuiver CO₂. De laatste jaren wordt CO₂ steeds bewuster als stuurmaatregel gebruikt en wordt vooral in de zomerperiode meer gedoseerd. Er bestaan echter nog veel vragen over de optimale doseerstrategie: hoeveel kg CO₂ moet gedoseerd worden, welke concentratie moet nagestreefd worden en welke capaciteit van WKK of OCAP aansluiting is daarvoor nodig. Vooral onder condities van veel licht heeft verhoging van de CO₂ concentratie vanuit de plant gezien veel effect. Echter bij deze omstandigheden staan de ramen meestal ook ver open, waardoor veel CO₂ verloren gaat naar buiten en er veel kilo's CO₂ gedoseerd moeten worden om een verhoging van de CO₂ concentratie te krijgen. Verder kunnen rookgassen verontreinigd zijn met bijvoorbeeld etheen of NO_x. Bij welke hoeveelheden leveren deze verontreinigingen schade op voor het gewas? In dit rapport wordt op deze vragen ingegaan.

In discussies met tuinders, zoals die bijvoorbeeld rond de gesloten kas plaatsvinden, blijkt dat er in de praktijk een groot aantal verschillende denkbeelden bestaan over effecten van CO₂. In dit project is aan 411 paprikatelers in Nederland een enquêteformulier gestuurd met vragen over hun strategie van CO₂ doseren, welke effecten ze hiervan verwachten op de ontwikkeling en productie van het gewas en welke factoren een invloed hebben op het doseren van CO₂. In hoofdstuk 2 van dit rapport zijn de resultaten van deze enquêtes weergegeven. Omdat uit de enquêtes bleek dat toch nog veel onbekend is over wat de effecten van CO₂ dosering op het gewas zijn, is in dit project de bestaande kennis op dit gebied op een rijtje gezet. Op basis van onderzoeksrapporten, vakbladartikelen en wetenschappelijke literatuur is een inventarisatie gemaakt van het effect van CO₂ op fotosynthese, groei en ontwikkeling van het gewas, en de mogelijkheden om met CO₂ dosering de ontwikkeling te sturen. Deze inventarisatie is te vinden in hoofdstuk 3.

Dagelijks worden door telers beslissingen genomen over hoeveel (zuivere) CO₂ gedoseerd moet worden, en op welke momenten van de dag dit het beste kan gebeuren. In dit project is een rekenprogramma ontwikkeld dat deze beslissingen ondersteunt. In het programma worden de belangrijkste relaties tussen weersomstandigheden, klimaatinstellingen, CO₂ dosering en productie van het gewas inzichtelijk gemaakt. Telers kunnen gegevens over hun eigen bedrijfsuitrusting en klimaatinstellingen invoeren, waarna de effecten van verschillende strategieën van CO₂ doseren op de productie van paprika berekend kunnen worden. In hoofdstuk 4 van dit rapport wordt het rekenprogramma beschreven. Het programma is te downloaden vanaf www.glastuinbouw.wur.nl. In het rekenprogramma wordt gebruik gemaakt van bekende effecten van lichtintensiteit en CO₂ op de fotosynthese. Er is echter nog relatief weinig bekend over hoe de fotosynthese van paprika wordt beïnvloed door de plantbelasting, en of het gewas op hete en zonnige dagen in staat is gedurende de hele dag even efficiënt met CO₂ om te gaan. Om deze vragen te beantwoorden zijn in dit project fotosynthesemetingen uitgevoerd, die in hoofdstuk 5 staan beschreven.

Rookgassen kunnen naast CO₂ ook voor de plant schadelijke stoffen bevatten zoals NO_x en etheen. Met name als er weinig geventileerd wordt en bij hoge CO₂ dosering zou de concentratie van deze schadelijke stoffen in de kas op kunnen lopen. In het begin van de tachtiger jaren zijn voor een aantal luchtverontreinigende componenten globale grenswaarden vastgesteld om schade aan kasgewassen te voorkomen. Deze grenswaarden worden in de glastuinbouw tot op de dag van vandaag gebruikt bij het vaststellen van de luchtkwaliteitseisen waaraan rookgassen uit WKK-installaties moeten voldoen. De vraag is echter of deze waarden nog voldoende bescherming bieden, gezien de ontwikkelingen die de glastuinbouw sindsdien heeft doorgemaakt. In dit project is op basis van beschikbare literatuur het mogelijke risico van NO_x en etheen in rookgassen geëvalueerd. De bevindingen van deze evaluatie staan beschreven in hoofdstuk 6 van dit rapport.

2 Denkbeelden over CO₂ effecten

2.1 Inleiding

In het project 'CO₂ bij paprika' is een inventarisatie van de denkbeelden en de vragen over CO₂ effecten gehouden. Met name uit discussies rond de gesloten kas blijkt dat er bij telers een grote verscheidenheid aan denkbeelden en vragen leeft over de effecten van CO₂. Een aantal van deze denkbeelden zijn niet mogelijk correct. Er zijn hoogstwaarschijnlijk ook een aantal denkbeelden die theoretisch nog niet te onderbouwen zijn, maar die de moeite waard zijn om ze nader te toetsen.

In dit project is een schriftelijke enquête gehouden om na te gaan wat hun strategie van CO₂ doseren is, welke effecten ze hiervan verwachten op de ontwikkeling en productie van het gewas en welke factoren een invloed hebben op het doseren van CO₂. De vragenlijst bestond uit een aantal open vragen en een aantal meerkeuze vragen waarbij tevens de mening van de ondervraagde gegeven kon worden. De enquête is verstuurd naar 411 bij LTO Groeiservice aangesloten paprikatelers.

De gegevens zijn nader geanalyseerd met het programma SPSS. In de figuren worden de gemiddelden van de open vragen aangegeven met een rondje. Het lijntje in de figuur is een maat voor de variatie van de waarden die op de enquêtes zijn ingevuld. De hoogte van dit lijntje geeft het bereik aan waarbinnen 95% van alle paprikabedrijven een waarde hebben opgegeven.

Daarnaast zijn de resultaten van de meerkeuze vragen weergegeven in cirkeldiagrammen. Onder de cirkeldiagrammen staan de opmerkingen die door de ondervraagden zijn gemaakt.

2.2 Resultaten

2.2.1 Respons enquête

Van de 411 verzonden enquêtes zijn er 129 enquêtes ingevuld teruggekomen. Dit is een respons van 31%. Een respons van 31% is redelijk hoog te noemen voor een schriftelijke enquête. Dit betekent dat het onderwerp leeft bij de paprikatelers.

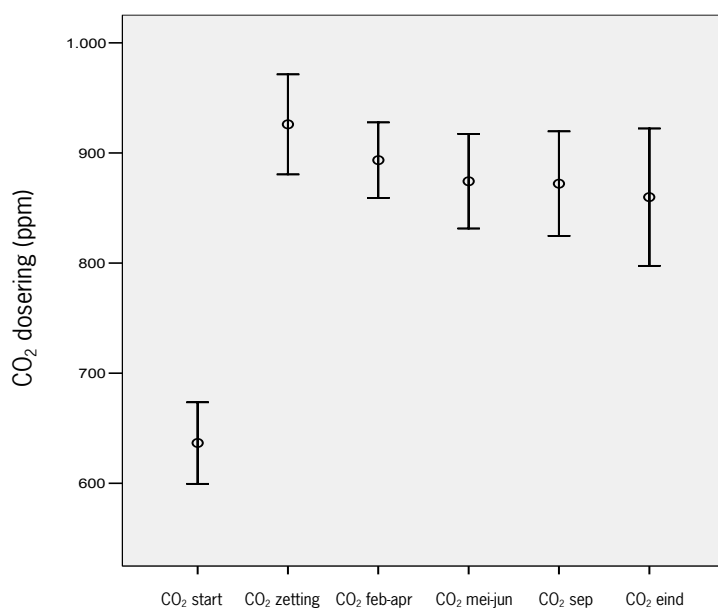
Van de 129 teruggestuurde enquêtes telen 62 telers rode, 38 telers gele, 24 telers groene, 11 telers oranje en 2 telers overige paprika's. Van 4 telers is het onbekend welke kleur ze telen. Totaal komt dat op 141 telers uit. Dat komt doordat er door sommige telers meerdere kleuren paprika worden geteeld.

2.2.2 Resultaten enquête

Alle telers die gereageerd hebben op de enquête doseren CO₂. In Tabel 2.1 staat weergegeven hoeveel CO₂ er gemiddeld wordt gegeven in de verschillende fase van de teelt. Bij de start van de teelt houdt iedereen een 'laag' CO₂ gehalte aan. Het gemiddelde CO₂ gehalte bij de start van de teelt is 636 ppm. Vlak voor de eerste zetting gaat het CO₂ gehalte fors omhoog. Soms wel 3 maal zo hoog dan bij de start van de teelt. Gemiddeld 1,5 maal zo hoog. Het CO₂ niveau gaat in deze fase gemiddeld naar 925 ppm. Nadat het eerste zetsel er aan zit houden de meeste telers een CO₂ gehalte van rond de 900 ppm aan.

Tabel 2.1. *Overzicht aangehouden CO₂ concentraties tijdens de teelt.*

Periode	Aantal antwoorden	Gemiddelde CO ₂ concentratie (ppm)	Standaardafwijking (ppm)
Start van de teelt	105	637	189
Zetting	108	926	236
Februari - april	107	893	177
Mei - juni	105	874	220
Juli - september	104	872	242
Einde van de teelt	96	860	305

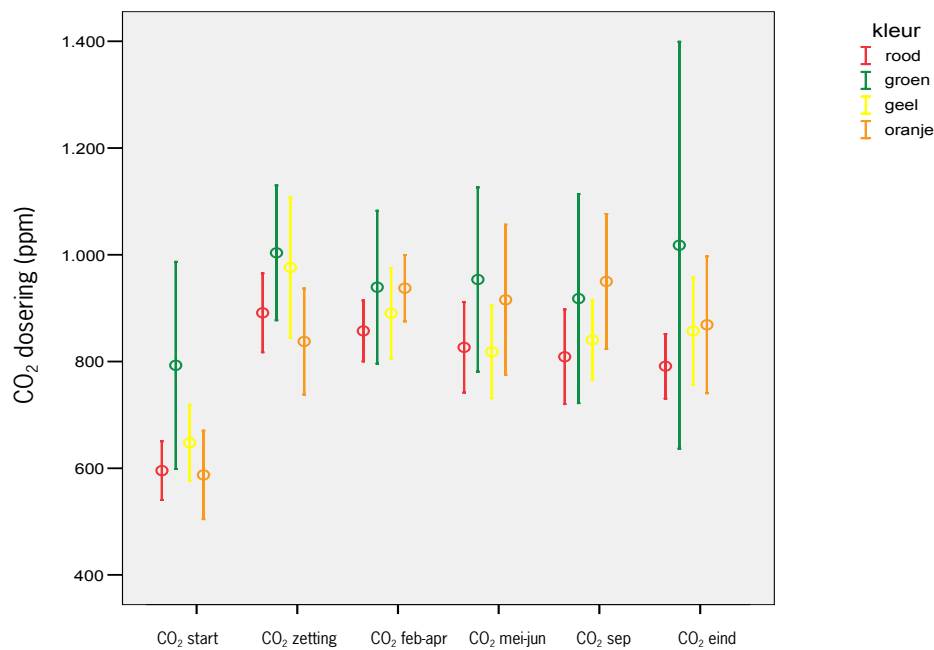
Figuur 2.1. *Overzicht aangehouden CO₂ concentraties tijdens de teelt.*

Gemiddeld wordt de dosering langzaam afgebouwd. Tijdens de zetting en naar het eind van de teelt toe lopen de instellingen het meest uiteen. De variatie is dan het grootst.

In Tabel 2.2 en in Figuur 2.2 staan de verschillende concentraties CO₂ die per teeltfase per kleur worden nagestreefd. Bij groene telers wordt er gemiddeld over de gehele teelt een hoger CO₂ gehalte aangehouden dan bij de rijpe kleuren. Opvallend is dat bij de start van de teelt er door groene telers een 25% hogere concentratie wordt aangehouden dan bij de overige kleuren in dezelfde teeltfase. Bij groen is de variatie ook bij alle teeltfase het grootst. De meningen lopen dus sterk uiteen.

Tabel 2.2. Overzicht verschil in CO₂ concentraties (ppm) tijdens de teelt per kleur.

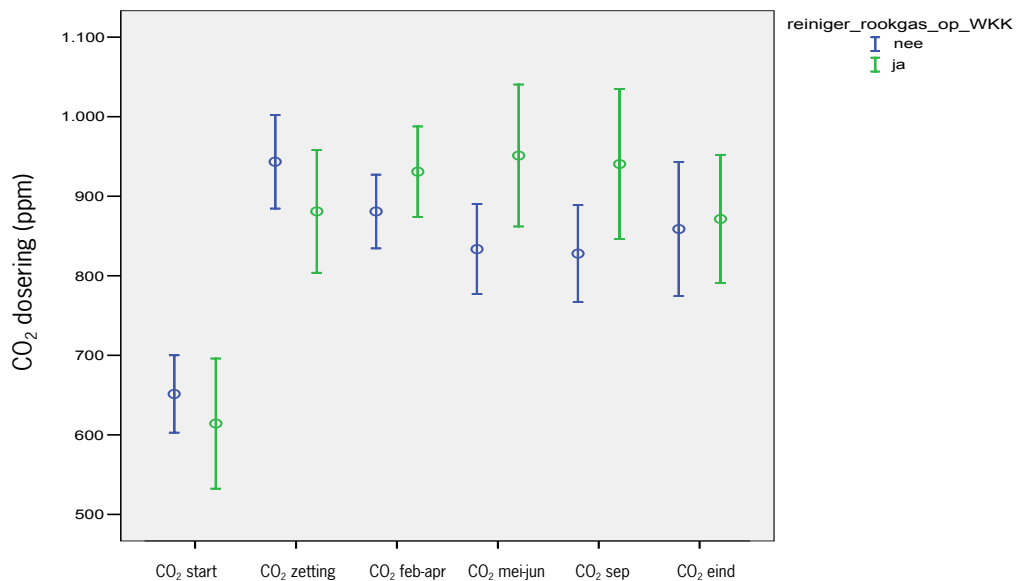
Periode	Rood	Groen	Geel	Oranje
Start van de teelt	590	791	643	600
Zetting	884	958	973	838
Februari - april	867	932	898	938
Mei - juni	849	926	848	925
Juli - september	826	904	885	956
Einde van de teelt	806	976	840	883



Figuur 2.2. Overzicht verschil in CO₂ concentraties tijdens de teelt per kleur.

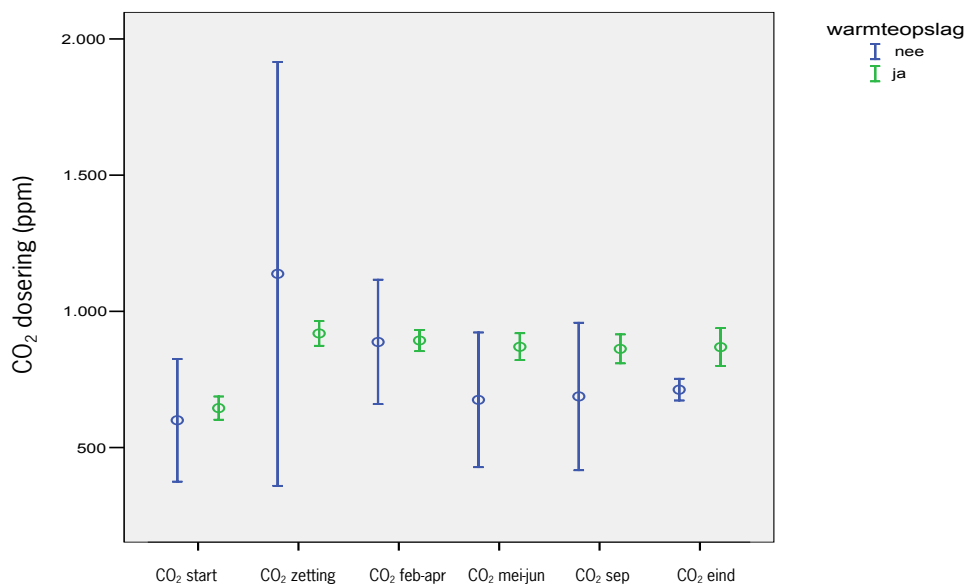
Gele en rode telers zitten veelal de hele teelt rond 900 ppm CO₂.

In Figuur 2.3 is te zien dat telers met een warmtekrachtkoppeling (WKK) over het algemeen vanaf het vroege voorjaar tot in het najaar een iets hoger CO₂ gehalte doseren dan telers zonder WKK. De reden dat er bij de start van de teelt geen hogere concentratie CO₂ wordt aangehouden, is vermoedelijk dat er bij de start van de teelt nog geen WKK-CO₂ wordt gebruikt. Veel telers zijn bij de start van de teelt als de luchtramen nog dicht zijn wat huiverig om WKK-CO₂ te gebruiken in verband met eventuele vervuiling van de CO₂ door NO_x.



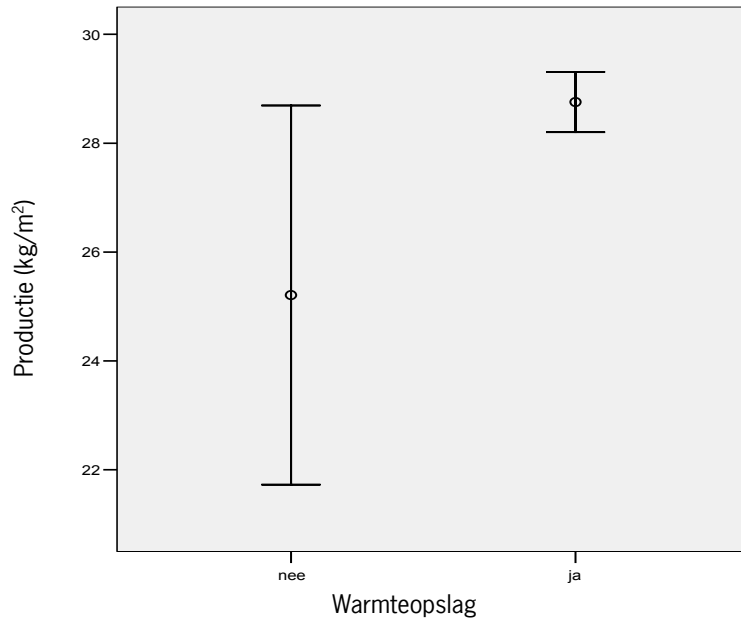
Figuur 2.3. Dosering CO₂ concentraties per teeltfase met en zonder WKK.

In Figuur 2.4 is te zien dat telers met een warmteopslag over het algemeen een hoger CO₂ gehalte doseren dan telers zonder warmteopslag. Alleen vlak voor de eerste zetting doseren telers zonder warmteopslag een hoger CO₂ gehalte dan telers met warmteopslag. Er moet wel worden aangetekend dat er slechts 11 van de 129 telers geen warmteopslag hebben.



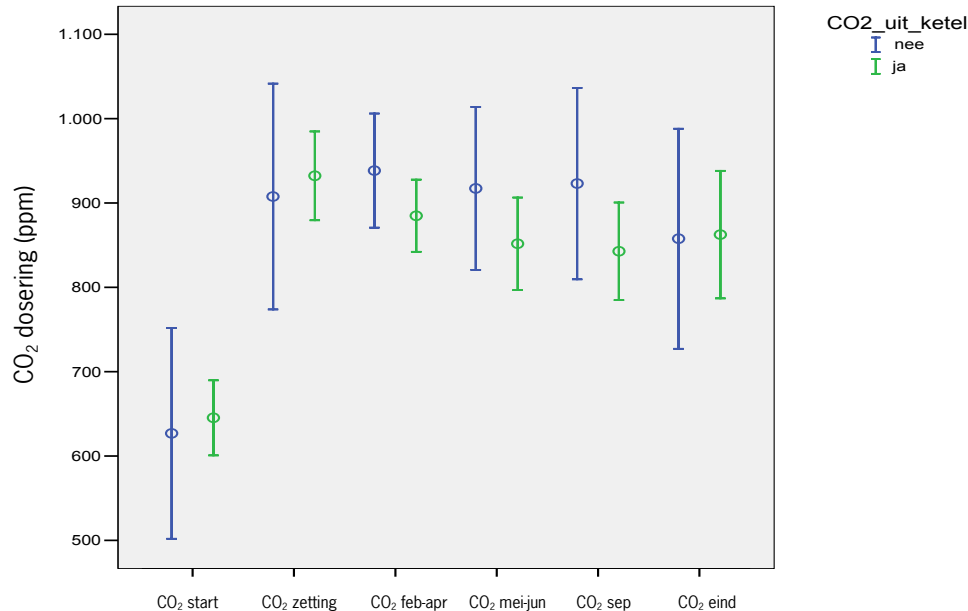
Figuur 2.4. Dosering CO₂ concentraties per teeltfase met en zonder warmteopslag.

In Figuur 2.5 is aangegeven dat de 11 telers zonder warmteopslag een lagere productie hebben, dan telers met een warmteopslag. De variatie is ook een stuk groter bij telers zonder warmteopslag.



Figuur 2.5. Productie met en zonder warmteopslag.

In Figuur 2.6 is te zien dat telers met zuivere CO₂, OCAP-CO₂ of andere CO₂ geen hoger CO₂ gehalte aanhouden dan telers met alleen ketel-CO₂. Wel is de variatie bij telers met zuivere CO₂, OCAP-CO₂ of andere CO₂ groter dan bij telers met alleen ketel-CO₂.



Figuur 2.6. Dosering CO₂-gehalten bij zuivere CO₂, OCAP-CO₂ of andere CO₂ of alleen ketel-CO₂.

Op de vraag hoeveel kg CO₂ er per ha per uur wordt gedoseerd op een zomerse dag onder warme en droge omstandigheden (vochtdeficit > 10) gaven 95 telers een antwoord.

- 11 telers doseren niets (8,7% van de 95 beantwoorders)
- 84 telers doseren wel CO₂.
- 32 telers hebben geen antwoord gegeven.

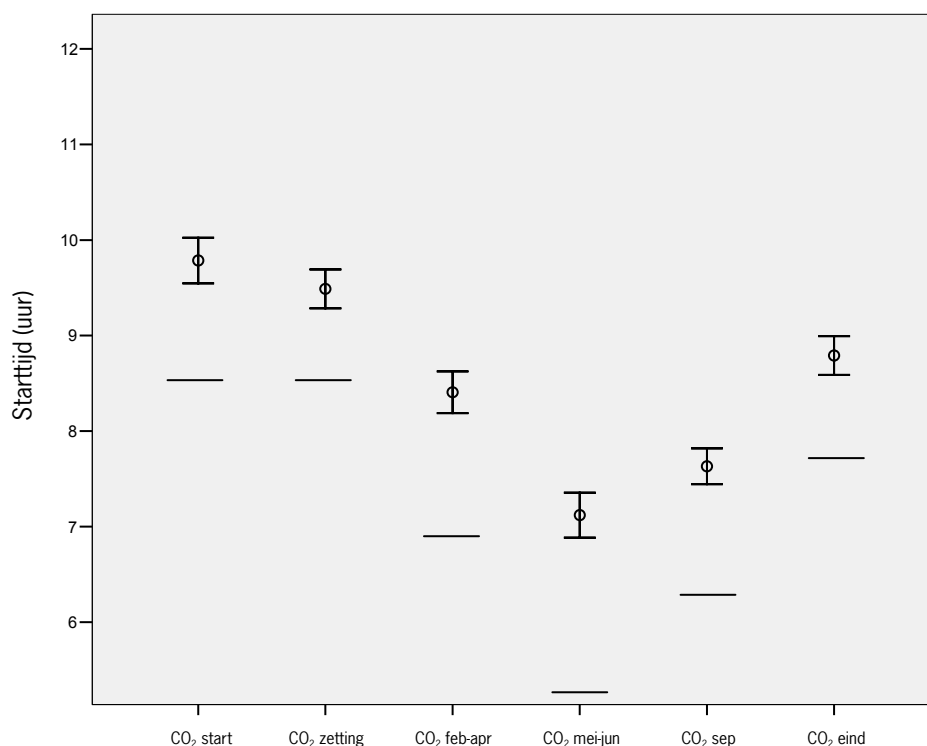
Van de kwekers (84) die wel iets geven is in Tabel 2.3 te zien dat er gemiddeld 136 kg CO₂ per ha per uur wordt gegeven.

Tabel 2.3. Aantal kg CO₂ per ha per uur onder warme en droge omstandigheden (vochtdeficit > 10).

	Minimum CO ₂ dosering (kg ha ⁻¹ uur ⁻¹)	Maximum CO ₂ dosering (kg ha ⁻¹ uur ⁻¹)	Gemiddelde CO ₂ dosering (kg ha ⁻¹ uur ⁻¹)	Standaard afwijking
Dosering in de zomer	10	560	136	98

In Figuur 2.7 staan de starttijden van het CO₂ doseren weergegeven. De meeste telers starten met CO₂ doseren tussen 1 en 2 uur na zon op.

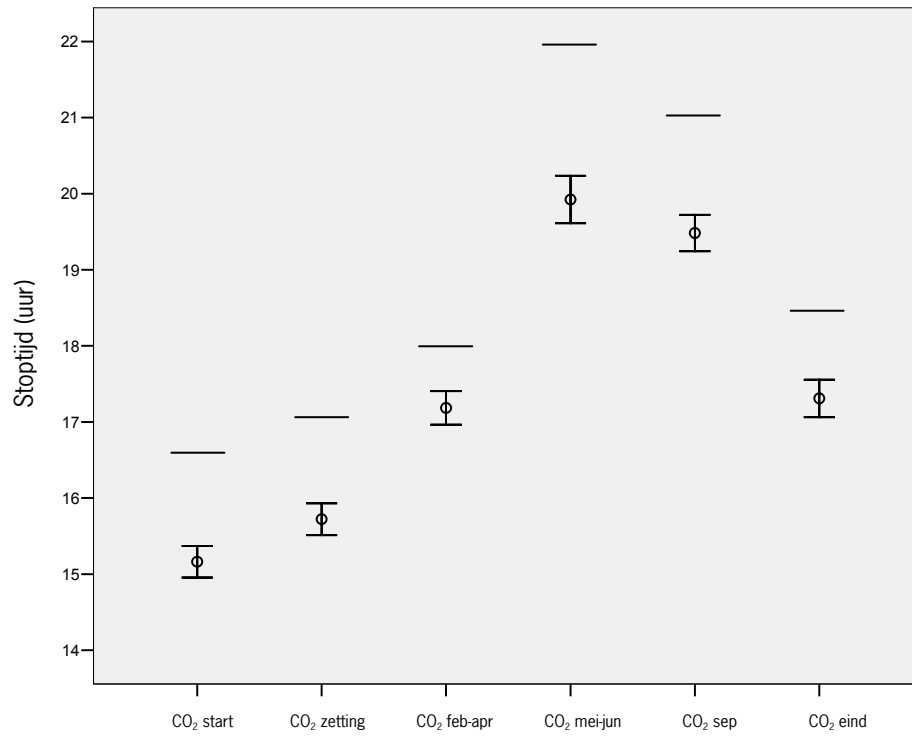
In onderstaande figuur is de horizontale streep het moment van zon op.



Figuur 2.7. Starttijden CO₂-dosering (horizontale streep is het moment van zon op).

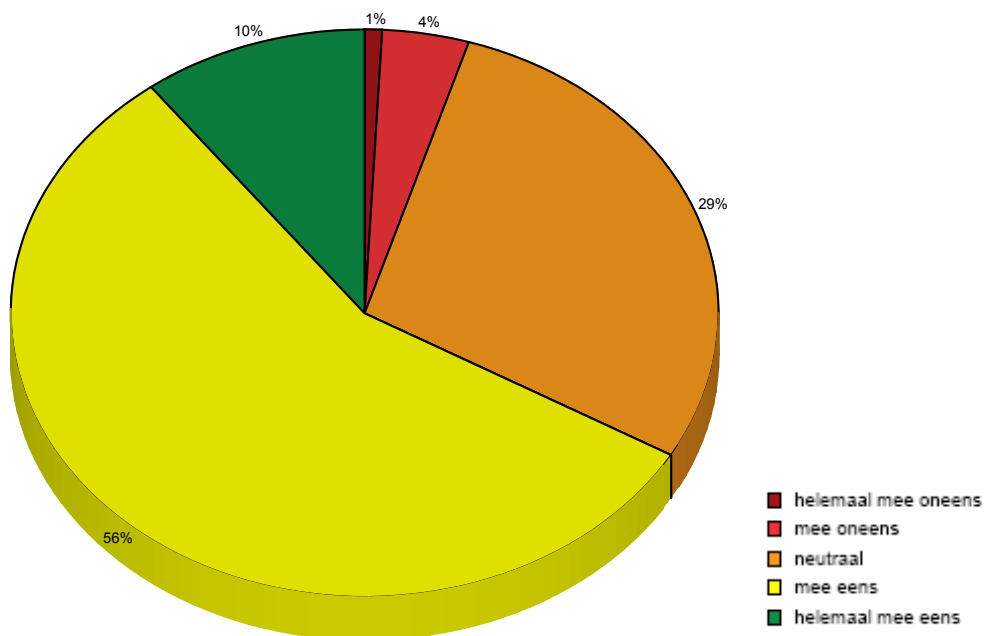
In Figuur 2.8 is te zien dat de meeste telers ongeveer 2 uur voor zon onder stoppen met CO₂ doseren.

In onderstaande figuur is de horizontale streep het moment van zon onder.



Figuur 2.8. Stoptijden CO₂-dosering (horizontale streep is het moment van zon onder).

Op de stelling 'Met de toepassing van CO₂ stuur ik heel gericht' gaf 66% aan het ermee eens of helemaal mee eens te zijn.

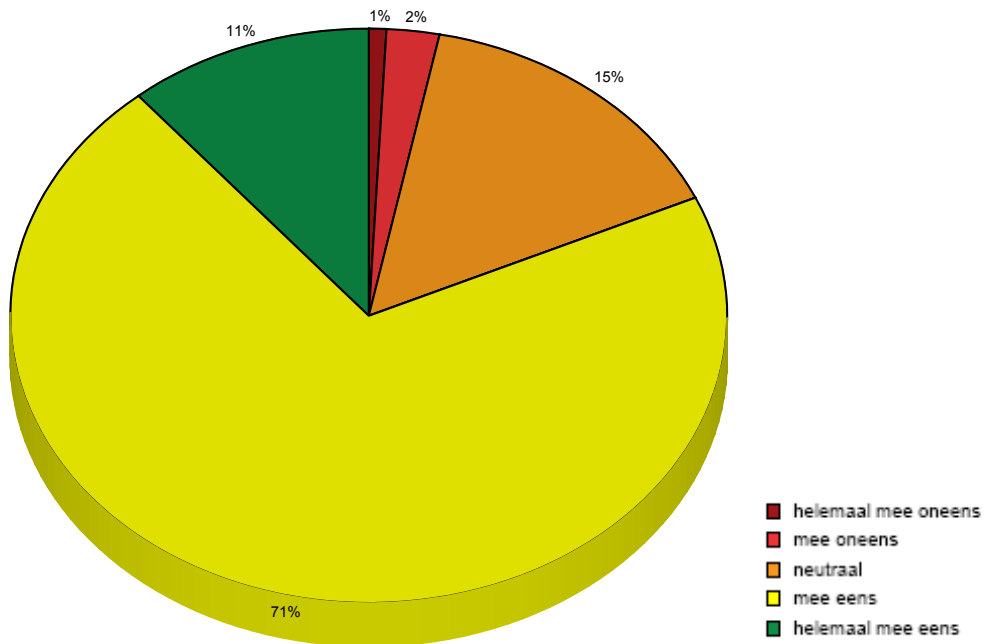


Figuur 2.9. Mening over gericht sturen met CO₂.

Opmerkingen telers:

- Sterk gewas opbouwen met veel CO₂.
- Vooral richting zetting kan er gericht worden gestuurd.
- Licht + water + CO₂ = productie.
- CO₂ is één van de mogelijkheden om het gewas te sturen.
- Temperatuur is veel belangrijker.
- Er wordt gekeken naar de stand van het gewas en het weer.
- Je kan je gewas er niet mee veranderen.
- Vooral zorgen dat CO₂ niet de beperkende factor is.

Op de stelling 'er zit een duidelijke strategie achter het doseren van CO₂' gaf 82% aan het ermee eens of helemaal mee eens te zijn.

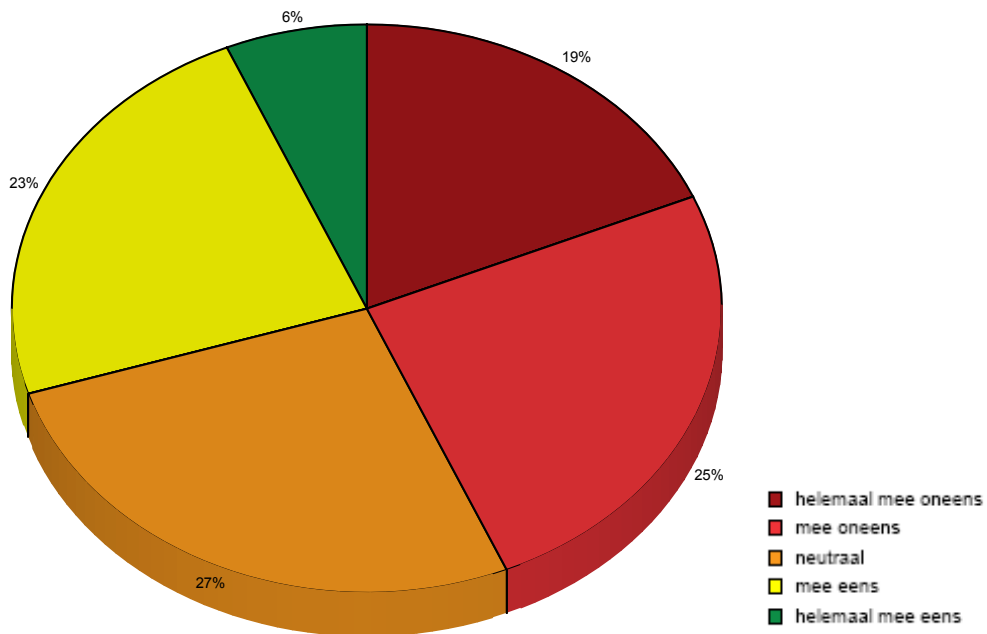


Figuur 2.10. Mening over strategie achter CO₂ dosering.

Opmerkingen telers:

- Met CO₂ kan je het gewas sturen.
- Bij veel licht wordt er meer CO₂ gedoseerd.
- Met CO₂ kan je het gewas generatief sturen.
- CO₂ is productie.
- Hoe meer CO₂, hoe meer productie.
- Je moet opletten dat het CO₂ gehalte in de nacht niet te ver oploopt.
- Op het juiste moment de capaciteit in zetten (voor 10.00 uur en na 17.00 uur).
- Om zetting af te dwingen meer CO₂ geven, voor meer groei minder CO₂ geven.

Op de stelling 'er wordt CO₂ gedoseerd vanwege goede resultaten bij anderen' zijn de meningen sterk verdeeld.

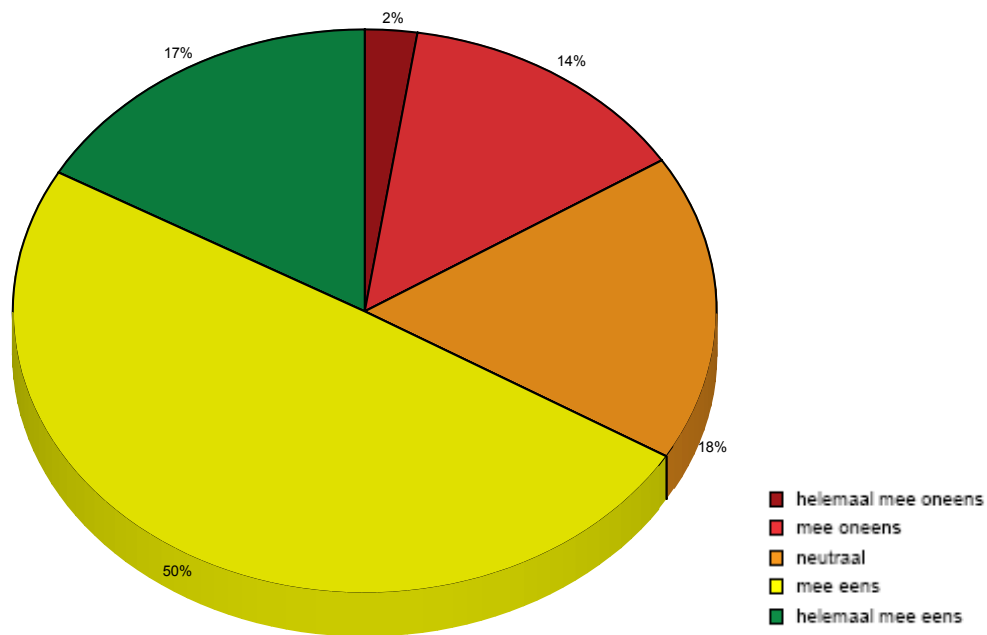


Figuur 2.11. Mening over CO₂ dosering vanwege goede resultaten bij anderen.

Opmerkingen telers:

- Uit onderzoek blijkt een betere groei.
- Ik denk zelf dat het beter is om CO₂ te doseren.
- Met extra zuivere CO₂ kunnen er hogere producties worden gehaald.
- CO₂ is één van de beperkende factoren in de assimilatie; te weinig CO₂ is te weinig assimilatie.

Op de stelling 'er wordt CO₂ gedoseerd omdat het leidt tot meer zetting' gaf 67% aan het ermee eens of helemaal mee eens te zijn.

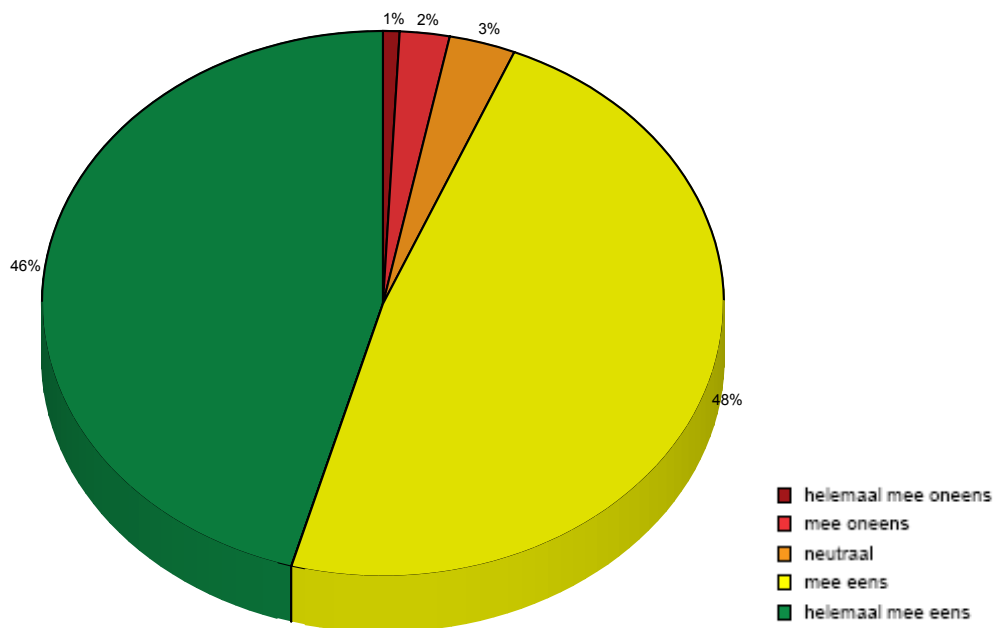


Figuur 2.12. Leidt CO₂ dosering tot meer zetting.

Opmerkingen telers:

- Sturen richting meer generativiteit.
- Proeven uit het verleden hebben dit aangetoond.
- Een sterkere bloemvorming.
- Met veel CO₂ kan een schraal generatief gewas ontstaan.
- Het kan tot meer zetting leiden, maar er zijn meer factoren die bepalend zijn.
- CO₂ kan de zetting stimuleren.
- Met meer CO₂ zal je niet een veel groter zetsel krijgen.
- Als de plant er klaar voor staat leidt het tot meer zetting.
- Bij een bepaalde stand van het gewas zal er zeker meer zetting plaatsvinden.
- Ik denk dat de vruchtjes sterker worden.

Op de stelling 'door het doseren van CO₂ oogst ik meer kg per m²' gaf 94% aan het ermee eens of helemaal mee eens te zijn.

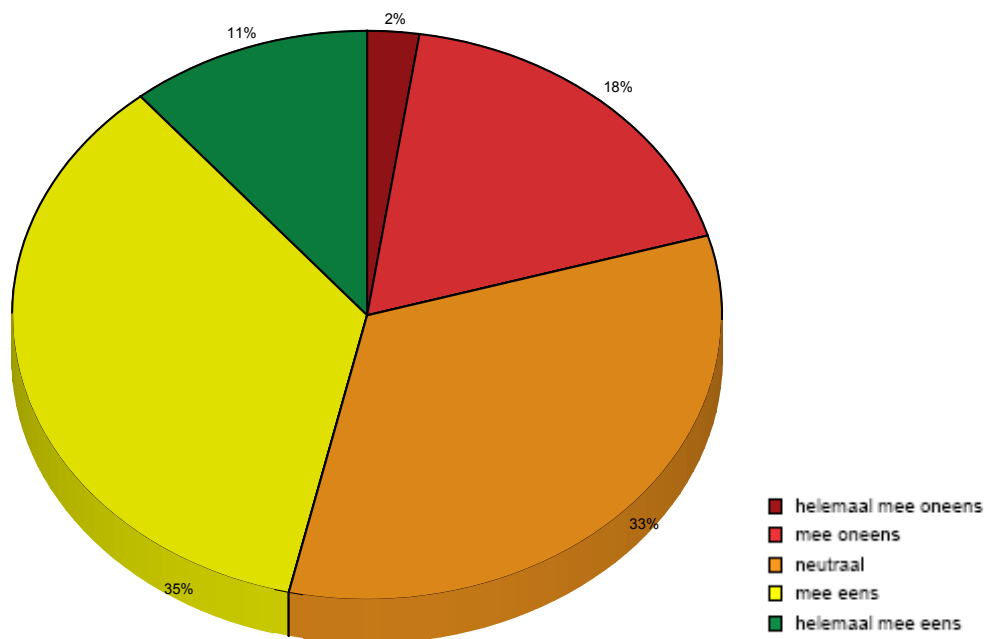


Figuur 2.13. Leidt CO₂ dosering tot meer productie.

Opmerkingen telers:

- CO₂ is een bouwstof voor fotosynthese.
- Dat is al 20 jaar bekend.
- Is wel de bedoeling, maar is moeilijk om te meten.
- Zonder CO₂ is er geen optimaal proces.
- Wat is de winst van de extra CO₂ die we de laatste jaren hebben gedoseerd?
- Maar pas op voor te vroeg beginnen en te lang doorgaan.

Op de stelling 'Door het doseren van CO₂ oogst ik grovere vruchten' gaf 46% aan het ermee eens of helemaal mee eens te zijn. 20% is het daar niet mee eens of helemaal niet mee eens. De rest weet het niet.

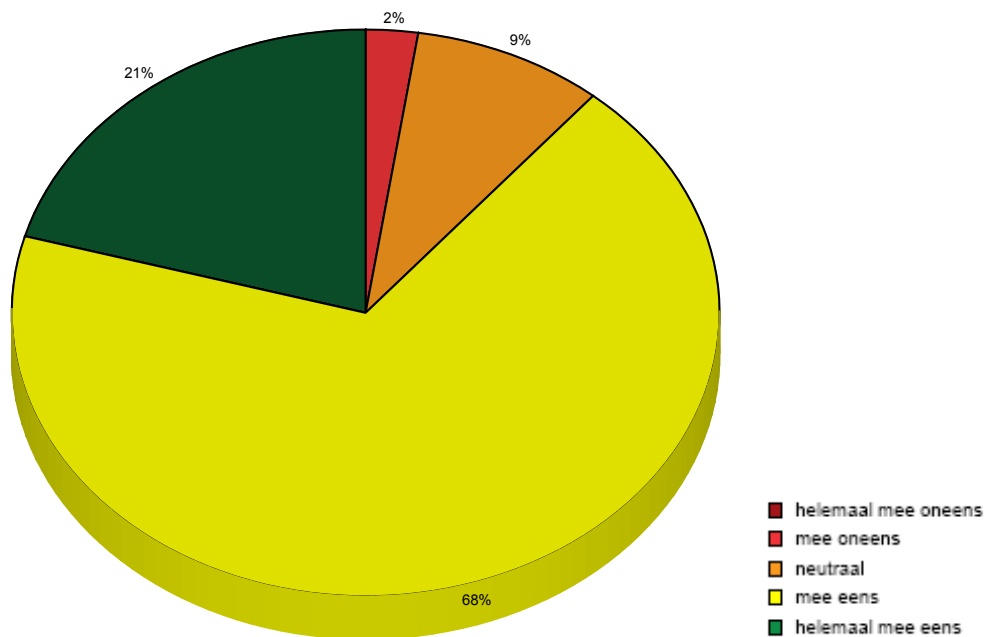


Figuur 2.14. Leidt CO₂ dosering tot grovere vruchten.

Opmerkingen telers:

- Een beter gewas leidt tot grovere vruchten.
- Als er meer zetting is a.g.v. CO₂, worden de vruchten kleiner.
- Bij normale dosering worden de vruchten wel grover, bij teveel blijven de vruchten juist fijner.
- Als er op een vegetatief gewas veel CO₂ gedoseerd kan worden krijg je grovere vruchten.

Op de stelling 'Er is een maximaal toelaatbare concentratie CO₂ in de verschillende stadia van de teelt' gaf 89% aan het ermee eens of helemaal mee eens te zijn.

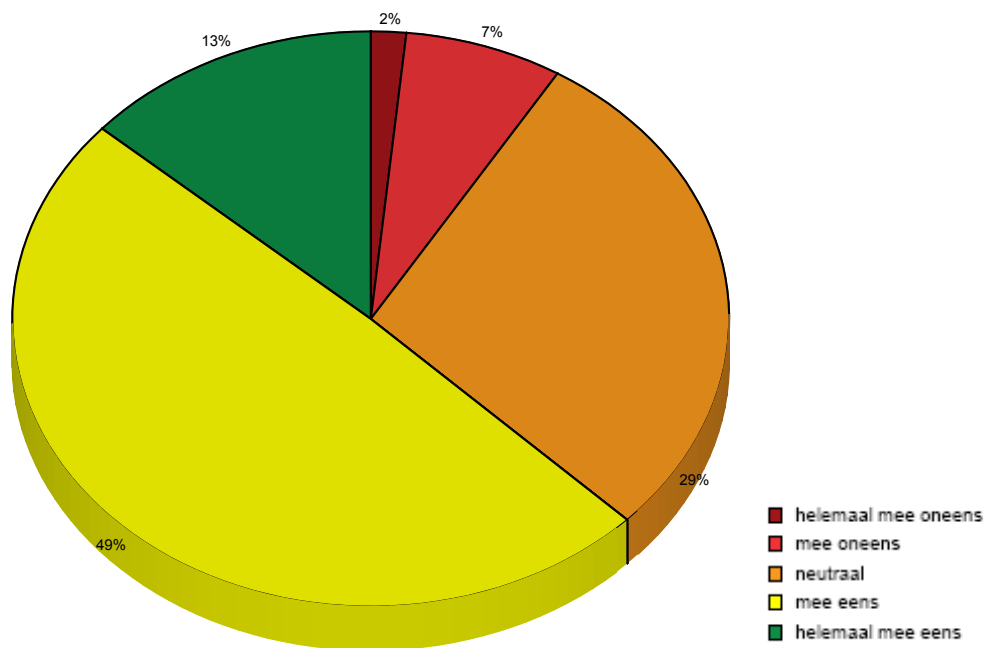


Figuur 2.15. Is CO₂ dosering aan een maximale hoeveelheid gebonden.

Opmerkingen telers:

- Theoretisch zou er geen maximaal toelaatbare concentratie CO₂ moeten zijn. De planten nemen het teveel dan gewoon niet op. Vervuiling in de CO₂ is het grootste probleem.
- Een hoog CO₂ gehalte beperkt de verdamping en kan leiden tot stress.
- In de winter met ketel of WKK CO₂ niet te hoge concentratie aanhouden (<500 ppm).
- Bij een dichte kas opletten boven 1.000 ppm i.v.m. eventuele schadelijke gassen.
- De plant kan uit balans raken door te veel CO₂.

Op de stelling 'door het doseren van CO₂ oogst ik zwaardere vruchten' gaf 62% aan het ermee eens of helemaal mee eens te zijn. 29% vulde neutraal in, en weet het dus niet.

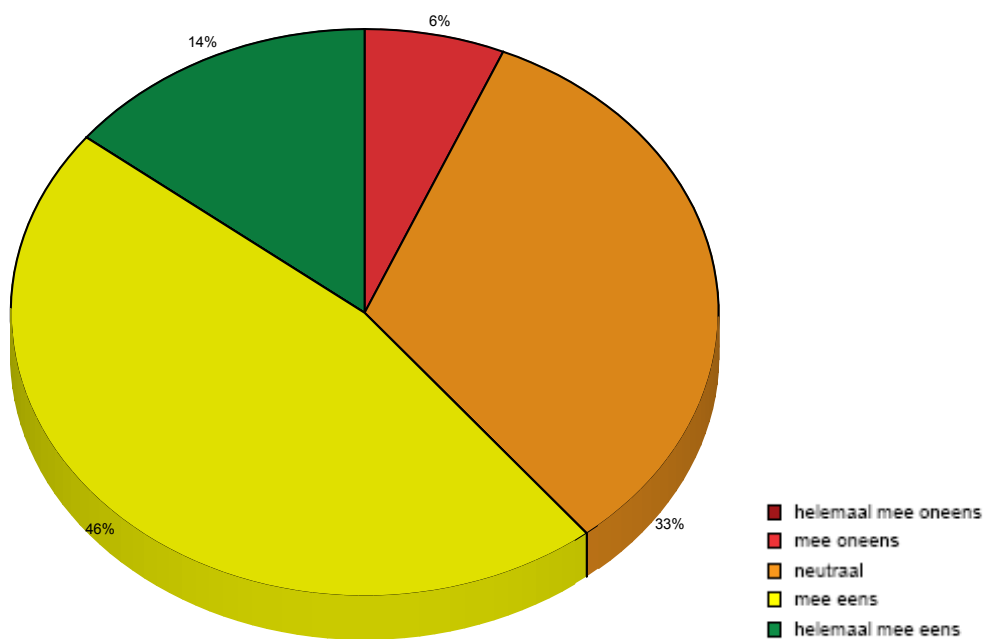


Figuur 2.16. Leidt CO₂ dosering tot zwaardere vruchten.

Opmerkingen telers:

- Dat is meer een raseigenschap, maar er is wel een toename van vruchtgewicht (10%).
- Meer CO₂ geeft meer droge stof.
- Waarschijnlijk wel doordat de vruchten een dikkere vruchtwand krijgen.
- Meer vruchten, dus een lager gemiddeld vrucht gewicht.

Op de stelling 'door het doseren van CO₂ oogst ik meer vruchten per m² gaf 60% aan het ermee eens of helemaal mee eens te zijn. 33% vulde neutraal in, en weet het dus niet.

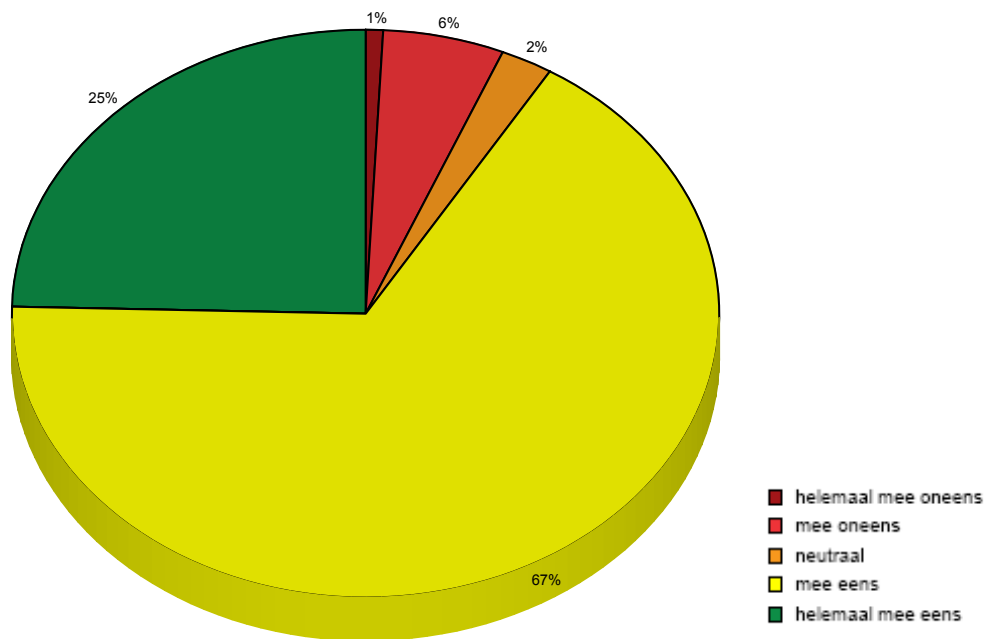


Figuur 2.17. Leidt CO₂ dosering tot meer vruchten.

Opmerkingen telers:

- De planten worden generatiever, dus meer vruchten.

Op de stelling 'bij het doseren van CO₂ houd ik rekening met licht' gaf 92% aan het ermee eens of helemaal mee eens te zijn.

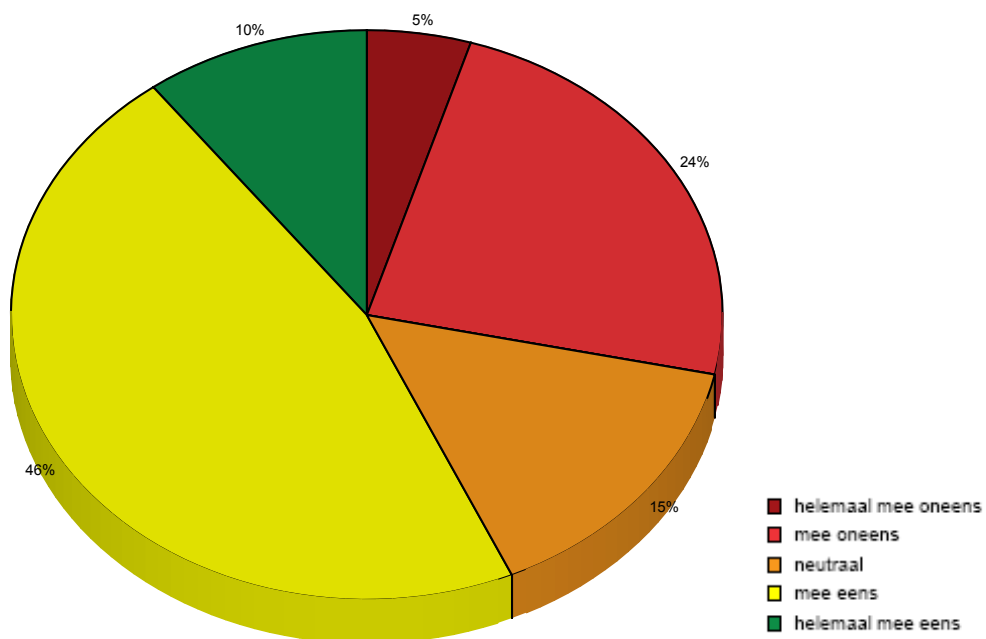


Figuur 2.18. Relatie CO₂ dosering en hoeveelheid licht.

Opmerkingen telers:

- Het heeft geen zin om veel te doseren bij weinig licht.
- Zonder licht doet de plant er niks mee.
- We maken gebruik van een lichtverhoging.

Op de stelling 'bij het doseren van CO₂ houd ik rekening met luchtvochtigheid' gaf 56% aan het ermee eens of helemaal mee eens te zijn.

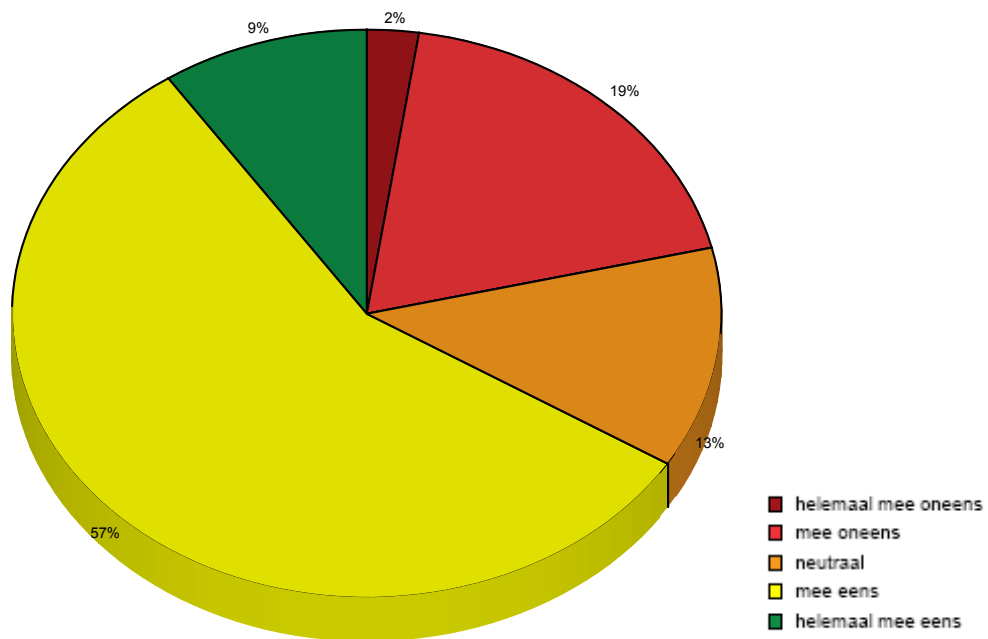


Figuur 2.19. Relatie CO₂ dosering en luchtvochtigheid.

Opmerkingen telers:

- Alleen bij zeer hoog vochtdeficit (>10) wordt er minder CO₂ gedoseerd.
- Bij een lage RV wordt er niet gedoseerd.
- Boven een vochtdeficit van 13 gram gaat de CO₂ uit.

Op de stelling 'bij het doseren van CO₂ houd ik rekening met temperatuur' gaf 66% aan het ermee eens of helemaal mee eens te zijn.

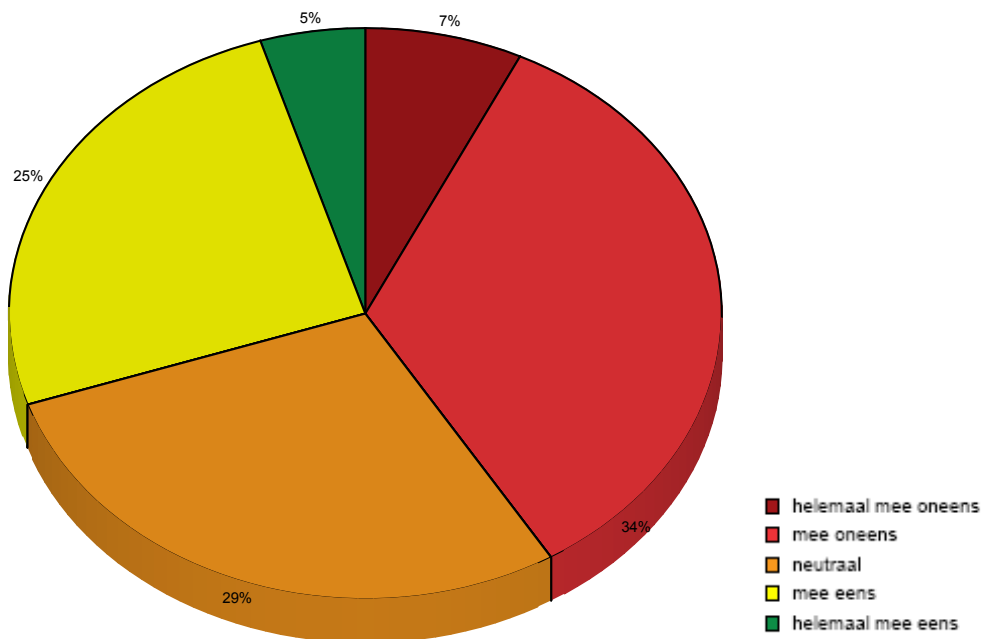


Figuur 2.20. Relatie CO₂ dosering en temperatuur.

Opmerkingen telers:

- Boven 30 °C gaat de CO₂ uit.
- Alleen boven 30 °C planttemperatuur wordt er minder CO₂ gedoseerd.
- Boven 33 °C wordt er geen CO₂ meer gedoseerd.

Op de stelling 'door het doseren van CO₂ vergroot ik het bladoppervlak ten bate van de fotosynthese' gaf 41% aan het ermee oneens of helemaal mee oneens te zijn. 30% gaf aan het ermee eens of helemaal mee eens te zijn, en 29% weet het niet.

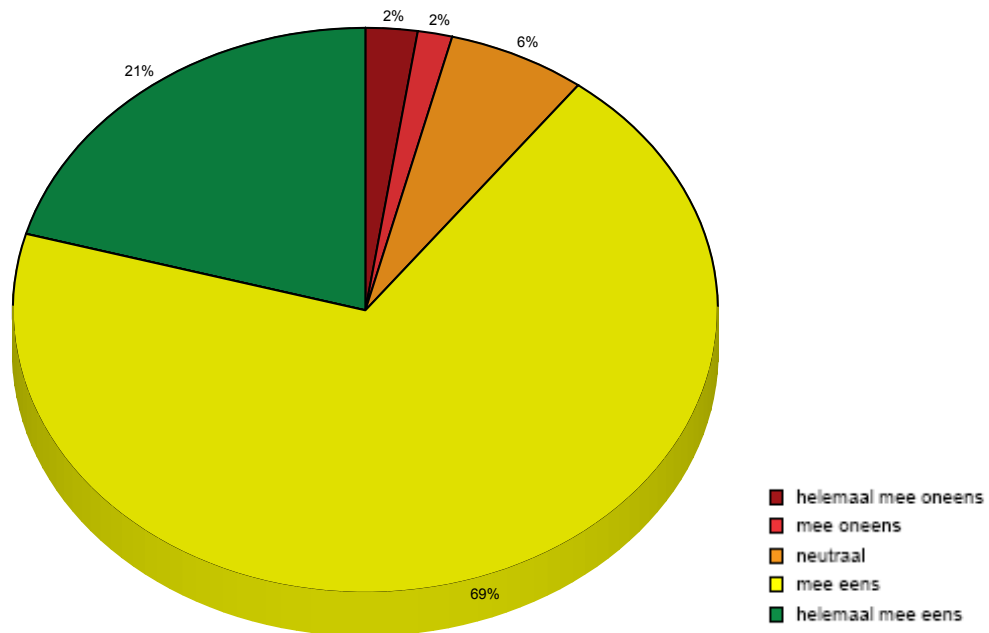


Figuur 2.21. Vergroot CO₂ dosering het bladoppervlak.

Opmerkingen telers:

- De plant kan voldoende CO₂ opnemen, wat dus met een kleiner bladoppervlak kan.
- Veel CO₂ geeft een generatief gewas, dus kleiner blad.

Op de stelling 'door het doseren van CO₂ wordt de fotosynthese vergroot' gaf 90% aan het ermee eens of helemaal mee eens te zijn.

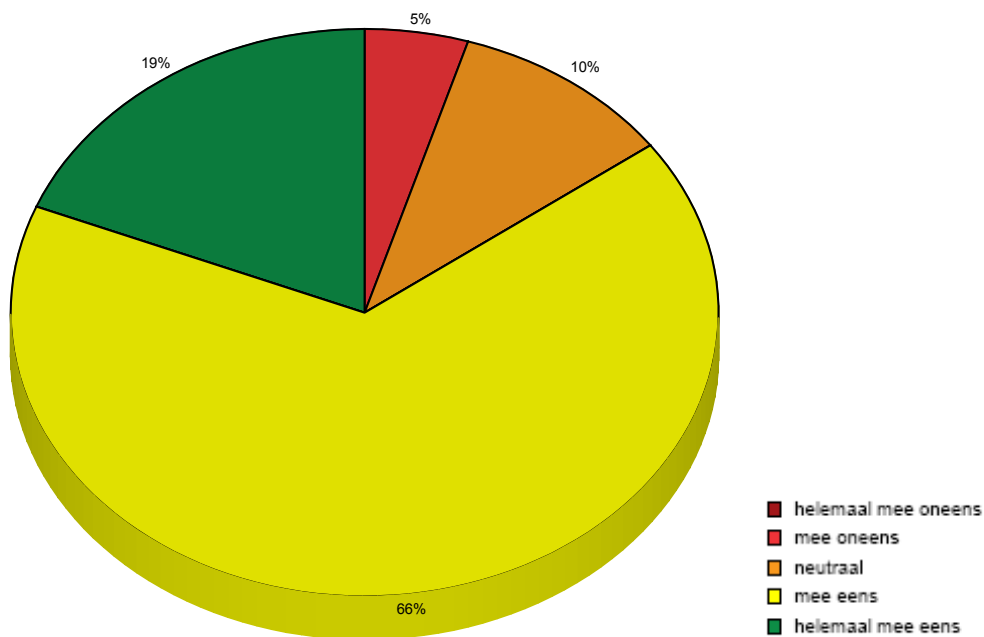


Figuur 2.22. Vergroot CO₂ dosering de fotosynthese.

Opmerkingen telers:

- In samenhang met temperatuur, licht en water.
- Daardoor wordt er meer productie verkregen.
- CO₂ is één van de grondstoffen bij groei.

Op de stelling 'het doseren van CO₂ is afhankelijk van het tijdstip van de dag' gaf 85% aan het ermee eens of helemaal mee eens te zijn.

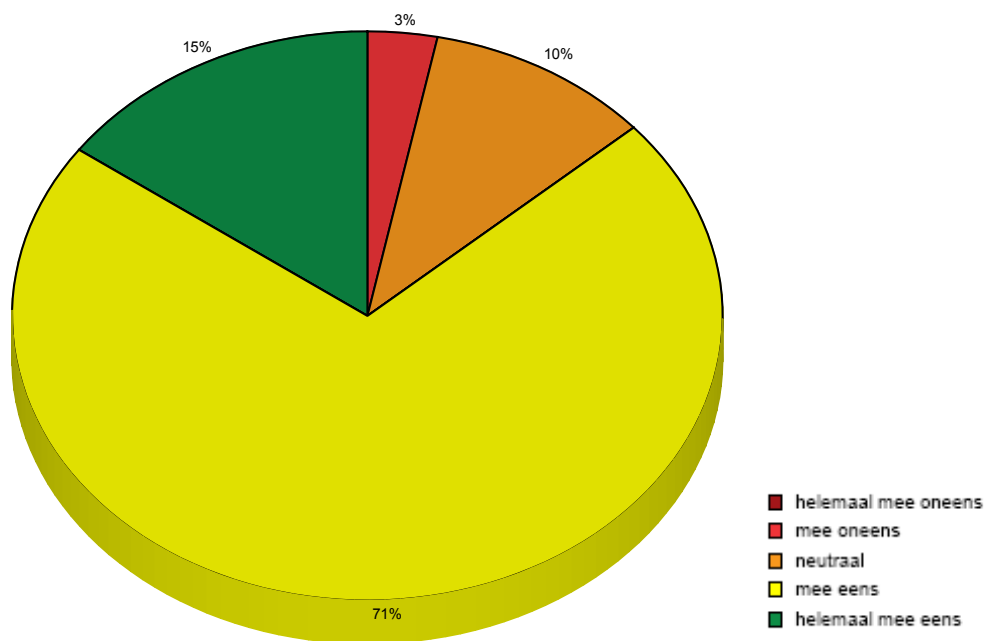


Figuur 2.23. Is CO₂ dosering afhankelijk van tijdstip dosering.

Opmerkingen telers:

- Als het licht is doet een plant er meer mee, en kan je er ook meer mee doen.
- Met meer licht wordt er meer CO₂ gedoseerd.
- Eerst moet het gewas actief zijn, daarna wordt er pas CO₂ gedoseerd.
- Het doseren van CO₂ is afhankelijk van de hoeveelheid licht, op welk moment van de dag dan ook.

Op de stelling 'het doseren van CO₂ is afhankelijk van de weersomstandigheden' gaf 86% aan het ermee eens of helemaal mee eens te zijn.

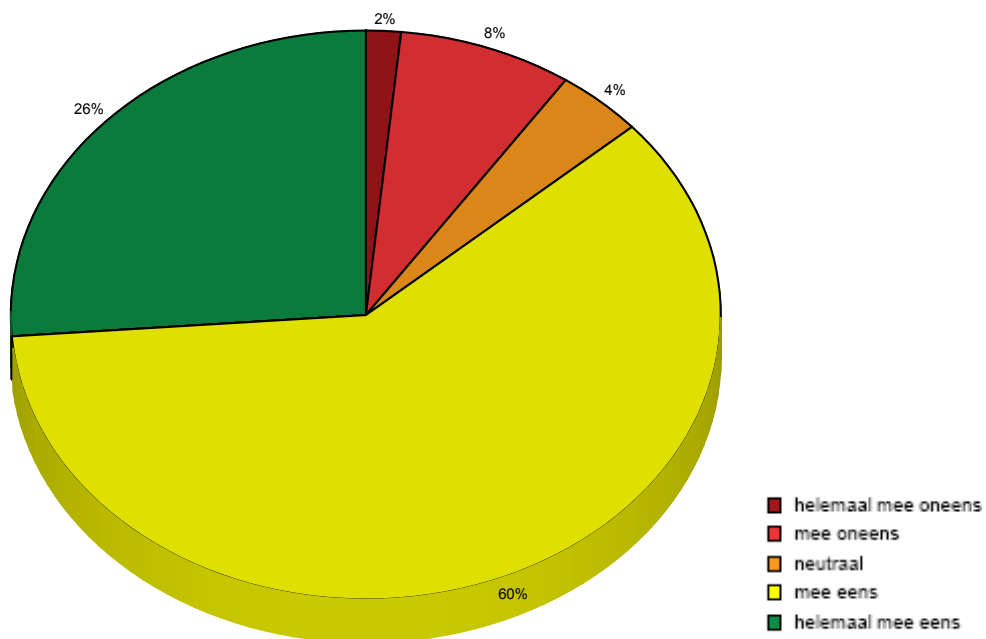


Figuur 2.24. Is CO₂ dosering afhankelijk van weersomstandigheden.

Opmerkingen telers:

- Lichtafhankelijk.

Op de stelling 'het doseren van CO₂ is afhankelijk van de stand van het gewas' gaf 86% aan het ermee eens of helemaal mee eens te zijn.

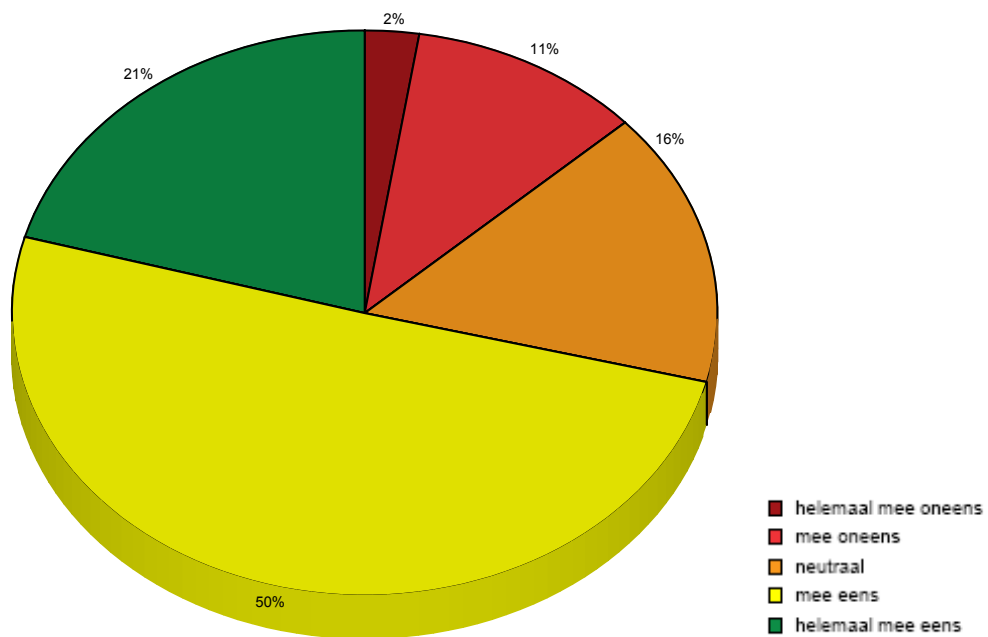


Figuur 2.25. Is CO₂ dosering afhankelijk van de stand van het gewas.

Opmerkingen telers:

- Een vegetatief gewas vraagt meer CO₂.
- Een gewas dat lekker groeit kan veel beter met CO₂ omgaan.
- Groeizame gewassen kunnen meer CO₂ aan dan dunne generatieve gewassen.
- Bij een heel generatief gewas wordt minder CO₂ gedoseerd.
- Ook een slecht groeiend gewas heeft CO₂ nodig om er doorheen te groeien.

Op de stelling 'het doseren van CO₂ is afhankelijk van de buffervulling' gaf 71% aan het ermee eens of helemaal mee eens te zijn.

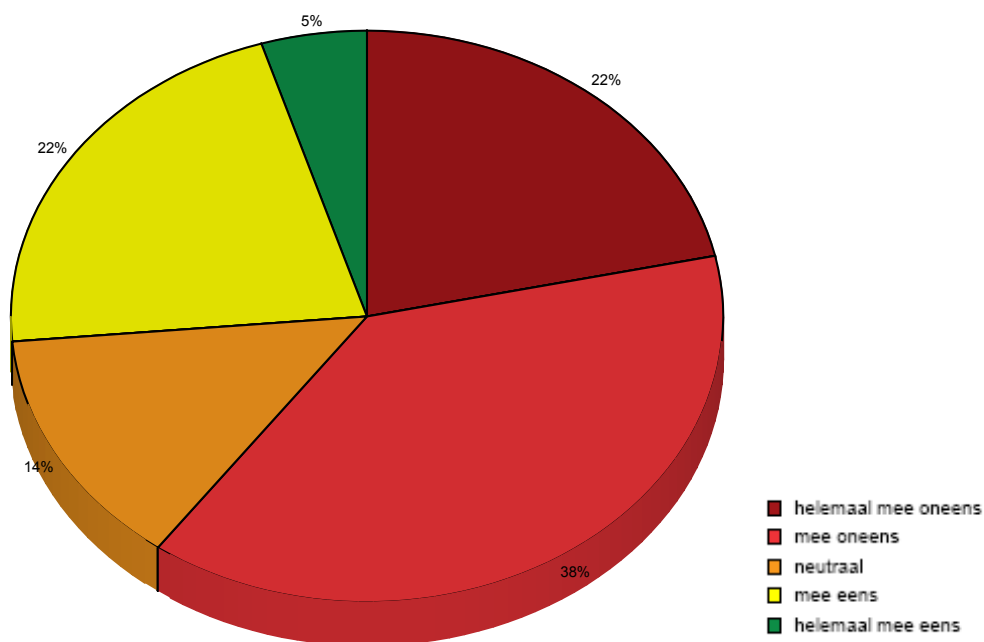


Figuur 2.26. Is CO₂ dosering afhankelijk van de buffervulling.

Opmerkingen telers:

- Met OCAP is het niet afhankelijk van de buffervulling.
- Indien er zuivere CO₂ voorradig is hoeft dit niet, anders wel.
- De buffervulling kan je zelf instellen.
- Als de warmtebuffer vol is houdt het op.
- De buffervulling is juist afhankelijk van de CO₂ dosering.

Op de stelling 'om CO₂ te kunnen doseren wordt zonodig de verwarming extra ingezet' gaf 60% aan het ermee oneens of helemaal mee oneens te zijn.

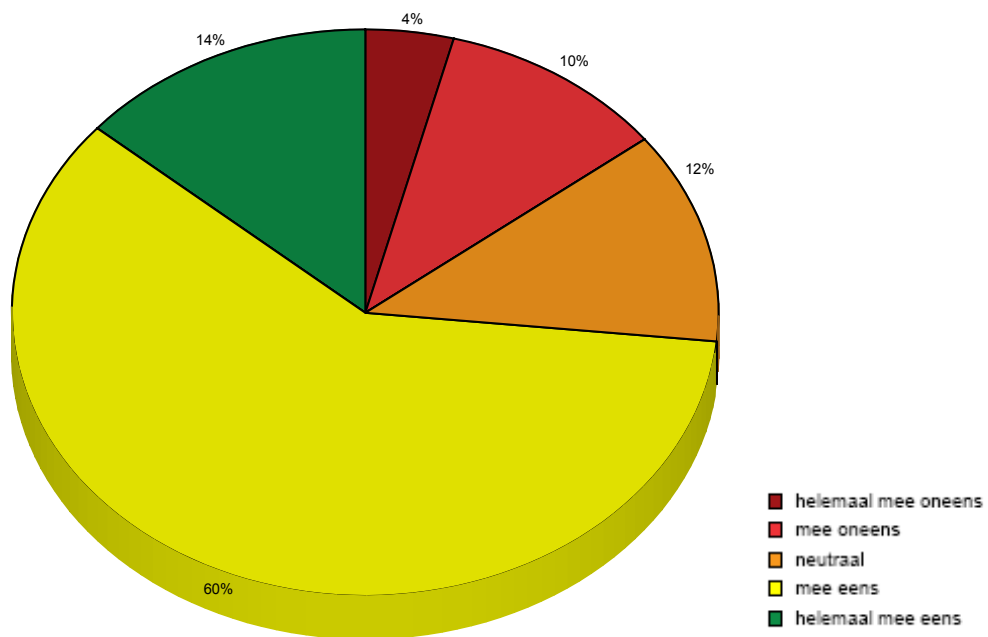


Figuur 2.27. Warmte vernietigen voor CO₂ dosering.

Opmerkingen telers:

- Ja, maar alleen 's nachts.
- Nee, dan wordt er op vloeibare CO₂ overgeschakeld.
- Dat ligt aan de stand van het gewas.
- In de zomer met warm weer wel.
- Vooral in de ochtend wordt de verwarming extra aangezet.
- Warmte vernietigen is te duur met lage zomerprijzen.
- Het gas is te duur om dat te doen.
- Dat gaat ten koste van de teeltomstandigheden.
- Wanneer de buffer te vroeg vol is, een paar uur op de buizen verder gaan.
- Ja, want WKK moet draaien voor stroom.
- Nooit en te nimmer!
- Alleen bij lange warme periode wordt er wel eens warmte vernietigd.

Op de stelling 'het doseren van CO₂ is afhankelijk van het seizoen' gaf 74% aan het ermee eens of helemaal mee eens te zijn.



Figuur 2.28. Is CO₂ dosering afhankelijk van het seizoen.

Opmerkingen telers:

- Aan het begin en aan het eind van het seizoen is licht de beperkende factor.
- In de zomer is het niveau moeilijk te halen.
- Voor de langste dag voorzichtig met CO₂, daarna meer CO₂ doseren.
- Meer licht betekent meer CO₂ nodig.

2.3 Conclusies

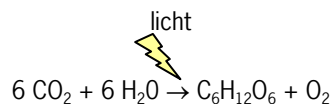
- Alle telers doseren CO₂, dus de telers zien in dat CO₂ doseren iets toevoegt aan de paprikateelt.
- Bij de start van de teelt wordt het minste CO₂ gedoseerd (ongeveer 640 ppm).
- Vlak voor de eerste zetting wordt het hoogste gehalte CO₂ gedoseerd (ongeveer 925 ppm).
- De meeste telers starten met CO₂ doseren tussen 1 en 2 uur na zon op.
- De meeste telers stoppen met CO₂ doseren ongeveer 2 uur voor zon onder.
- Groene telers stellen een hogere CO₂ concentratie in dan telers van rood, geel en oranje paprika's.
- Telers die gebruik maken van zuivere CO₂ of OCAP-CO₂ houden geen hogere concentratie CO₂ aan dan telers die alleen gebruik maken van ketel-CO₂.
- 82% van de telers geeft aan dat er een duidelijke strategie zit achter het doseren van CO₂.
- 92% van de telers houdt rekening met licht bij het doseren van CO₂.
- 66% van de telers houdt rekening met temperatuur bij het doseren van CO₂.
- 56% van de telers houdt rekening met de RV bij het doseren van CO₂.
- 86% van de telers houdt rekening met de weersomstandigheden bij het doseren van CO₂.
- 86% van de telers houdt rekening met de stand van het gewas bij het doseren van CO₂.
- Het doseren van CO₂ is een complex geheel waarbij met vele factoren rekening moet worden gehouden.
- 94% van de telers geeft aan dat het doseren van CO₂ tot meer productie leidt.
- Of deze meerproductie wordt gerealiseerd door meer vruchten, grovere vruchten of zwaardere vruchten, is voor veel telers niet duidelijk, gezien de wisselende antwoorden.
- Er is veel onduidelijkheid of het bladoppervlak door CO₂ doseren wordt vergroot, of juist wordt verkleind.
- Er is veel onbekend over wat het effect van CO₂ op de plant precies is.

3 Deskstudie effecten van CO₂

Deze studie gaat in op de rol van CO₂ in de groei en ontwikkeling van paprika en wat daarover in de literatuur is beschreven. Een uitvoerige beschrijving van de effecten van CO₂ en de wijze van toepassing is te vinden in de brochure **CO₂ in de Glastuinbouw** (Esmeijer, 1999).

3.1 Fotosynthese

Het basisproces voor alle plantengroei is de fotosynthese. De formule hiervoor is



In de fotosynthese wordt CO₂ in aanwezigheid van water (H₂O) met behulp van lichtenergie omgezet in suikers (C₆H₁₂O₆), waarbij zuurstof (O₂) vrijkomt. De gevormde suikers vormen in de plant de bron van energie om vanuit nutriënten het complexe geheel van alle stoffen in de plant op te bouwen. Fotosynthese is afhankelijk van licht, en des te beter de licht condities, des te meer CO₂ door planten geabsorbeerd kan worden. Daarom heeft CO₂ dosering bij de meeste planten ook alleen maar zin als het licht is.

De beperkende factoren voor het proces van fotosynthese kunnen zowel de hoeveelheid CO₂, de intensiteit van het licht als de beschikbaarheid van water zijn. De laatste reden, een tekort aan water komt in de kas in principe niet voor. Bij buitenteelten kan een tekort aan water wel een rol spelen. In de Nederlandse tuinbouw zijn licht en CO₂ de factoren die beperkend kunnen zijn. In de winter is licht de beperkende factor, in de zomer is CO₂ vaak limiterend.

De effecten van CO₂ op de fotosynthese kunnen worden bekeken op verschillende niveaus. De meeste metingen worden gedaan op bladniveau. Met een fotosynthesemeter wordt dan de fotosynthese van een (deel van een) blad gemeten. Tijdens deze metingen kunnen in de bladcuvet variaties in licht, temperatuur of vochtigheid aangebracht worden. Op deze wijze worden responscurves bepaald. Wat deze responsen betekenen voor de fotosynthese op gewasniveau kan vervolgens door modellen worden berekend.

De beschikbare suikers worden gebruikt voor de opbouw van de plant. De ontwikkelingsprocessen per gewas zijn verschillend. Paprika kent het typerende patroon van zetting en ontwikkeling, die samenhangt met de beschikbare assimilaten. Bij de groei van de plant worden suikers gebruikt voor de bouw van cellen in de groene delen en in de vruchten. De hoeveelheid die daarbij gebruikt wordt is afhankelijk van de temperatuur en het aantal groeiende delen. Bij paprika hangt de behoefte aan suikers sterk samen met het aantal en het stadium van de ontwikkelende vruchten. Als de vraag naar suikers in de plant groot is blijft er netto weinig over voor de ontwikkeling van nieuwe bloemen en vruchten. Gevolg is dat er bij een hoge vraag naar suikers in verhouding tot het aanbod aan suikers weinig zetting kan optreden. Als enige weken later door het minder aantal gezette vruchten en door een afname van de vraag van de grotere vruchten de totale vraag naar suikers weer laag is in verhouding tot het aanbod zal de zetting weer toenemen (Marcelis & Baan Hofman-Eijer, 1995; Buwalda *et al.*, 2006). In een paprika gewas ontwikkelen niet alle planten en stengels op een gelijke manier. Er is een grootte variatie in plantontwikkeling, maar alle planten samen geven als geïntegreerd geheel wel het typerende patroon.

3.2 Lichtresponscurve

De bladfotosynthese wordt in onderzoeksrapporten vaak weergegeven als fotosynthesesnelheid als functie van de lichthoeveelheid. Een zogenoemde lichtresponscurve die de volgende algemene formule kent

$$Ass = \left(\varepsilon R + (A_{\max} - R_d) - \sqrt{\left((\varepsilon R + A_{\max} - R_d)^2 - 4\Theta \varepsilon R (A_{\max} - R_d) \right)} \right) / (2\Theta)$$

Waarin:

Ass : bruto CO_2 -assimilatiesnelheid ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

A_{\max} : maximale bruto CO_2 -assimilatiesnelheid bij (zeer) hoge lichtintensiteit ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

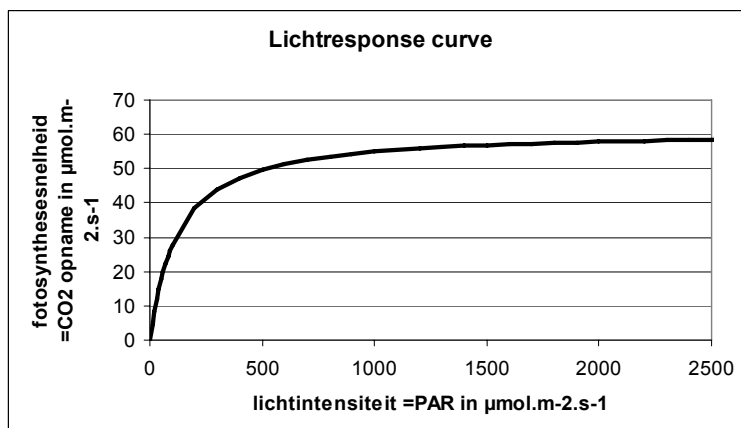
R_d : donkerademhaling, mitochondrische respiratie ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

ε : initiële lichtbenuttingssnelheid ($\mu\text{mol } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} / [\mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{ s}^{-1}]$)

Θ : parameter die de buiging van de curve beschrijft

R : fotosynthetisch actieve straling (PAR, ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$))

Van deze parameters is vooral A_{\max} afhankelijk van de CO_2 concentratie. Het niveau van A_{\max} bepaalt wat het blad maximaal aan suikers via de fotosynthese kan produceren. Als er voldoende licht is zal de fotosynthese worden geremd door de beschikbare CO_2 en is A_{\max} lager. (Bron formule: Farquhar *et al.*, 1980).



Figuur 3.1. Standaard lichtresponscurve van een gewas.

3.3 Fotosynthese bij paprika

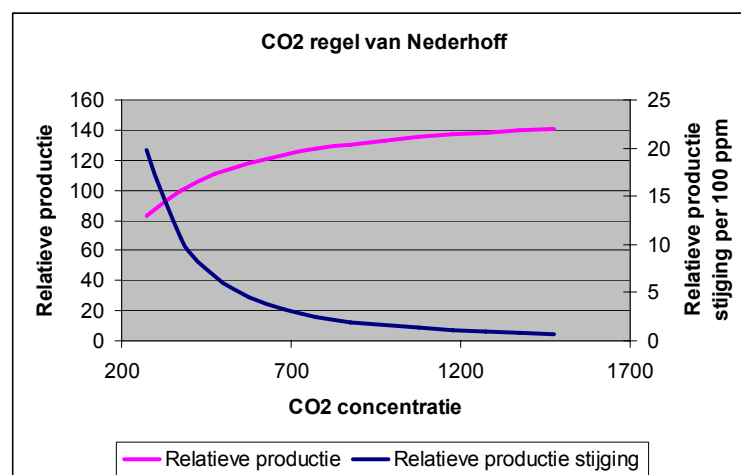
Verschillende onderzoekers hebben gewerkt aan fotosynthese van paprika en de gevolgen op gewasniveau.

Dieleman *et al.* (2003) onderzochten de invloed van een lange periode van hoge CO_2 concentraties op de fotosynthese. Zij vonden geen verandering in de maximale fotosynthesesnelheid als een plant gedurende 20 weken bij 780 ppm CO_2 stond. Wel nam de fotosynthese als gevolg van verhoging van de CO_2 concentratie bij een hoger lichtniveau (2000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) sterker toe dan bij een laag licht niveau (250 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Een temperatuurverhoging van 17 °C naar 27 °C had eveneens een sterker positief effect op de fotosynthese bij veel licht dan bij weinig licht. Dit onderzoek laat zien dat verhoging van de CO_2 concentratie voor de fotosynthese altijd gunstig is en dat bij veel licht een hoge temperatuur (± 25 °C) gunstig is voor de fotosynthese. Bij weinig licht is een lagere temperatuur (± 20 °C) beter. Een vergelijkbaar effect wordt beschreven door Heißner (1997). Bij een lage lichtintensiteit is de optimale temperatuur laag, bij lichtintensiteiten boven de 600 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (125 $W \text{ m}^{-2}$) ligt de optimumtemperatuur rond de 25 °C, maar het verschil met 20 °C is klein.

Nilwik (1980) onderzocht het effect van temperatuur op de netto fotosynthese. De netto fotosynthese was bij vrucht dragende planten het hoogste rond de 26 °C. Bij planten die geen vrucht droegen was de optimumtemperatuur ongeveer 24 °C. De aanwezigheid van een vrucht die assimilaten vraagt is gunstig voor de fotosynthese. Niu *et al.* (2006) vonden in een onderzoek met een temperatuurreeks van 20 tot 40 °C bij een gemiddelde lichthoeveelheid van $16 \pm 3 \text{ mol m}^{-2} \text{ dag}^{-1}$ voor de sierpeper *Capsicum annuum* L. cv Black Pearl dat de netto fotosynthese boven de 25 °C afnam.

Heißner & Kläring (2000) onderzochten het effect van schaduw en plaats van het blad op de netto fotosynthese. Schaduw had geen effect op de op het niveau van de fotosynthese. Jonge bladeren, boven in het gewas hadden een hogere fotosynthese dan oudere bladeren. Grashof *et al.* (2004) nemen echter in hun haalbaarheidsstudie naar het effect van bladplukken op de productie van paprika aan dat alle bladeren gelijk zijn en dat de verschillen in fotosynthese afhankelijk zijn van de hoeveelheid licht die de bladeren ontvangen. Turner and Wien (1994) beschreven dat tussen twee cultivars verschillen zijn te meten in donker ademhaling van de bladeren. Een voor knopval gevoelig ras had een hogere donkerademhaling in volgroeide bladeren dan een minder gevoelig ras. Bladplukken zal per cultivar door verschil in donker ademhaling een verschillend effect hebben. Bij rassen met een hoge donker ademhaling waar netto meer energie wordt gebruikt zal als door bladplukken de donkerademhaling wordt verkleind dit een groter effect hebben dan bij rassen met een lagere donkerademhaling.

Een empirische benadering van de gewasfotosynthese wordt beschreven door Acock *et al.* (1976). Later publiceerde groepen van deze auteurs twee verschillende modellen, Acock in 1991 en Thornley in 1992. Nederhoff (1994) maakte voor haar onderzoek naar de effecten van CO₂ op planten een vergelijking tussen het model van Acock en dat van Thornley. Zij concludeerde dat Acock de werkelijkheid matig benaderde en Thornley redelijk, maar in feite zijn beide voor de praktijk in kassen onvoldoende. Zij komt in haar proefschrift tot een heel praktische CO₂ regel. De relatieve productiestijging als gevolg van een verhoging van de CO₂ concentratie met 100 ppm is 1000 gedeeld door de actuele CO₂ concentratie in het kwadraat maal 1,5. Als de productie bij 375 ppm op 100 wordt gesteld kan de hiermee berekend worden wat de productie zou zijn bij andere waarden. Bij 675 ppm is de productie dan 23 % hoger en bij 975 ppm 33% hoger. De vraag kan gesteld worden of deze vuistregel in de huidige tuinbouwregelingen nog voldoende is om beslissingen over CO₂ dosering op te baseren. Bij de dosering van CO₂ moet naast het effect van extra productie rekening worden gehouden met de kosten van het doseren van CO₂ (Swinkels & De Zwart, 2002; Dieleman *et al.*, 2005).



Figuur 3.2. Relatieve productie en relatieve productiestijging bij toenemende CO₂ concentratie (Bron: Nederhoff, 1994).

In gewasgroeimodellen wordt nu vaak het biochemische model van Farquhar *et al.* (1980) voor de bladfotosynthese toegepast (Farquhar *et al.*, 2001). Dit is een model dat meer gebaseerd is op de processen die bij de fotosynthese

een rol spelen. De empirische benadering is hiermee losgelaten, in plaats daarvan wordt er met een meer verklarende beschrijving gewerkt. Voor de gewasfotosynthese wordt daarbij rekening gehouden met bladoppervlak en lichtdoordringing.

3.4 CO₂ en energiebelasting

In 1973 publiceerde Daunight en Lenz een onderzoek naar het effect van CO₂ concentratie en het aantal vruchten aan de plant op de plantontwikkeling en in het bijzonder op bloemanaanleg en zetting. Planten met vruchten gaven minder bloemen dan planten zonder vruchten. De bloemanaanleg werd versneld en het aantal bloemen nam toe door een hogere CO₂-concentratie. Bij planten met vruchten nam de vegetatieve groei af. Over de verhouding tussen fotosynthese en source-sink (aanbod van en vraag naar assimilaten binnen een plant) heeft Hall (Hall, 1997; Hall & Brady, 1977; Hall & Milthorpe, 1978) voor paprika een reeks artikelen gepubliceerd. Hij liet zien dat vruchten een belangrijke gebruiker van assimilaten zijn en dat ze de vegetatieve groei van de plant kunnen remmen. In de praktijk wordt een fluctuatie in stengelgroei gemeten afhankelijk van de plantbelasting (F. Breugem, pers. med). Marcelis *et al.* (2004) noemen de vegetatieve groei een indicatie voor de verhouding tussen source en sink voor assimilaten. Dit lijkt in tegenspraak met de conclusie van Dieleman *et al.* (2003) dat CO₂ de generatieve groei stimuleert -extra source- zonder de vegetatieve groei te remmen. Extra CO₂ heeft ook volgens Nederhoff (1994) vooral een effect op de vruchtgroei door een betere zetting. De CO₂ effecten op de vrucht zijn relatief sterker dan op het gewas. De effecten van extra CO₂ op de gewasontwikkeling en de vruchtgroei zijn bij paprika blijkbaar afhankelijk van de fase in de zetting en uitgroei van de vruchten. Bij veel vraag vanuit de vruchten is de relatieve groei van de plant gering. Marcelis en Baan Hofman-Eijer (1995) hebben al aangetoond dat de vraag naar assimilaten van jonge vruchten tot ongeveer 20 dagen na het openkomen van de bloem toeneemt tot ongeveer 0.4 g/d en daarna weer daalt tot 0.2 g/d.

In de experimenten voor de gesloten kas werd geen andere verhouding tussen totale droge stof in de vrucht en in de rest van de plant aangetoond (De Gelder *et al.*, 2007). De verdeling tussen vruchten en de rest kwam overeen met waarden die Marcelis *et al.* (2006) vonden voor een normale teelt. Een analyse van dit feit wordt niet gegeven, maar zou wel onderwerp van onderzoek moeten zijn. De hogere CO₂ concentratie in een gesloten kas zou op basis van de eerder genoemde publicaties theoretisch tot relatief meer groei van de vruchten dan van de bladeren en stengels moeten leiden. In een gesloten kas worden naast hogere CO₂ concentraties ook andere klimaatfactoren zoals niveau van luchtvochtigheid en temperatuur gewijzigd. Ook deze factoren kunnen de verhouding tussen totale drogestofhoeveelheid in de vrucht en in de rest van de plant beïnvloeden, waardoor een uitspraak over de oorzaak van een gewijzigde verhouding moeilijk is te doen.

In Denemarken is een klimaatregeling onderzocht waarbij optimale fotosynthese gecombineerd werd met gewasontwikkeling en energiebehoefte (Ottosen *et al.*, 2003). De experimenten voor dit onderzoek werden in juni beëindigd zodat geen uitspraken over een gehele teelt gedaan kunnen worden. In de experimenten werd afhankelijk van de behandeling een waarde van 600 ppm CO₂ nagestreefd of werd lichtafhankelijk de CO₂ dosering verhoogd tot 1200 ppm. De behandelingen met de hoogste gemiddelde CO₂ concentratie hadden de meeste geoogste vruchten, maar deze vruchten waren wel lichter van gewicht. De totale productie nam door de extra CO₂ slechts licht toe en werd ook beïnvloed door de andere temperatuur instellingen per behandeling. In eerder Deens onderzoek vonden Ehler & Karlsen (1993) dat in een herfstteelt een geoptimaliseerde CO₂ doseerstrategie leidde tot een gemiddeld hogere CO₂ concentratie, kleiner blad en meer droge stof in de vruchten. De hogere CO₂ concentratie leidde tot meer zetting en minder abortie. Zij vermelden in de discussie dat een beter begrip gewenst is van de dynamiek van source-sink in de plant.

In het onderzoek van Dieleman *et al.* (2005) naar optimale doseerstrategie werd door verschuiving van de dosering van CO₂ van de middag naar de morgen een productiestijging van slechts 2% bereikt.

De gedachte van source-sink invloed op groei en zetting van paprika is door Buwalda *et al.* (2006) en Schepers *et al.* (2006) in modelberekeningen verwerkt.

Op basis van de literatuur is de veronderstelling gerechtvaardigd dat een verlaging van de CO₂ dosering bij veel licht en een lage plantbelasting een instrument kan zijn om de zetting van paprika's te remmen en zo op termijn een betere vruchtgroei en productie te bereiken. Een verhoging van de CO₂ dosering bij een lage plantbelasting kan leiden tot een te grote zetting, waarvan later vruchten aborteren of vruchten met een laag vruchtgewicht ontstaan. Niet alle planten en stengels hebben gelijktijdig een lage plantbelasting, maar voor het gewas als geheel is wel een gemiddelde lage of hoge plantbelasting te omschrijven.

3.5 Effect CO₂ op huidmondjes

Voor de gasuitwisseling vanuit het blad met de lucht zijn de huidmondjes in een blad de regelende organen. Naast CO₂ opname en O₂ afgifte gaat het merendeel van de verdamping door de huidmondjes. Zowel de verdamping als de CO₂ concentratie in de lucht beïnvloeden de openingstoestand van de huidmondjes.

In het vakblad Groenten en Fruit schreef Nederhoff in 1987 dat een hoge CO₂ concentratie (soms al 950 ppm) kan leiden tot 'onzichtbare' schade in de vorm van groeireductie. Dit wordt veroorzaakt door de gedeeltelijk sluiting van de huidmondjes. In haar proefschrift beschrijft ze voor paprika een verlaging van de geleidbaarheid van de huidmondjes van ongeveer 3% per 100 ppm CO₂ verhoging (Nederhoff, 1994). De lagere geleidbaarheid wordt voor de verdamping gecompenseerd door een iets hogere bladtemperatuur waardoor de verdamping weer toeneemt. Hiermee nuanceert zij haar eerdere stelling. De vraag kan gesteld worden of er zelfs groeiremming is te verwachten door de verlaging van de geleidbaarheid van de huidmondjes. Ramos en Hall (1982) vonden dat de geleidbaarheid van huidmondjes onder invloed van een stijgend vochtdeficit blad-lucht afnam, maar dat de CO₂ opname gelijk bleef. Op de geleidbaarheid voor CO₂ zal de bladtemperatuur geen effect hebben. De opname van CO₂ door de plant wordt door de iets sluitende huidmondjes wel geremd, maar de toename in concentratie verschil tussen CO₂ in de lucht en in de intercellulaire ruimtes van het blad is voldoende om geen negatief effect van verhoging van de CO₂ concentratie op de fotosynthese te krijgen. Een remming van de fotosynthese is eerder te verwachten van een sluiting van de huidmondjes door vochtgebrek.

3.6 Schadelijke effecten van hoog CO₂

Een afzonderlijk aspect van CO₂ dosering is de schade die kan ontstaan door te hoge CO₂ concentraties. In een proef met CO₂ dosering bij het opkweken van groentepplanten nam Klapwijk (Klapwijk & Wubben, 1984) bij paprika waar dat bij zonnig weer in april en mei er bladvergeling optrad bij oudere bladeren als de dosering van zuiver CO₂ op 1500 of 2700 ppm stond. In een proef met het paprikaras Mazurka gaf een hoge CO₂ dosering aanvankelijk een versnelling van de zetting, maar in de periode daarna bleek bij een concentratie van 2500 ppm een zodanige daling van de zetting op te treden dat de voorsprong omkeerde in een vertraging. De schade die ontstond in de vorm van geel verkleurd blad werd geweten aan een te kort aan verdamping (Heij & Rijdsdijk, 1995).

In een voorlichtingsartikel schrijft Potters (2003) dat het soms niet zinvol is om overdag de CO₂-niveaus te verhogen. Een duidelijke onderbouwing van deze mening wordt niet gegeven, of het moet zijn dat de planten een vocht te kort hebben. Dit is echter geen gevolg van de CO₂ maar van de overige teeltomstandigheden.

3.7 Discussie punten uit de enquêtes

Uit de inventarisatie die in het kader van dit project is gedaan (hoofdstuk 2) blijkt een aantal zaken bij telers onduidelijk te zijn of juist vragen op te roepen bij de onderzoekers.

De eerste is de lagere CO₂ dosering bij start van de teelt (Tabel 2.1). Hiervoor wordt geen motivatie gegeven. In onderzoek van Vereecken & Verheul (1985) onder leiding van Elly Nederhoff wordt beschreven dat planten bij CO₂ doseren tot 1000 ppm in het begin van de teelt dikkere en kleinere bladeren vormen. Dit effect is voor paprika in verhouding tot tomaat klein, maar wel aanwezig. Juist het voorkomen van kleine dikke bladeren is reden om niet te

hoog te gaan met doseren. In het begin van de teelt wordt vooral nog vegetatief gestuurd. De plant moet eerst voldoende bladoppervlakte vormen voordat er zetting wordt toegelaten. Een hogere CO₂ dosering zou leiden tot te vroege bloemvorming en zetting gegeven de lichtcondities in de winter. Voor het opgang brengen van de eerste zetting wordt daarom de CO₂ dosering verhoogd om de fotosynthese te maximaliseren, terwijl gelijktijdig de temperatuur wordt verlaagd om de ontwikkeling van nieuwe bladeren te remmen.

In de opmerkingen van de telers bij de verschillende vragen komt de stelling dat meer CO₂ doseren de plant stimuleert tot een meer generatieve groei = meer bloemen in verhouding tot bladeren en stengel geregeld terug. Uit de enquête resultaten blijkt dat het effect van CO₂ doseren op de bladgrootte heel verschillend wordt beoordeeld (Figuur 2.21). In het experiment van Dieleman *et al.* (2003) werd geen invloed gevonden op LAI maar zij geven geen informatie over aantal bladeren en gemiddelde bladgrootte per blad en bij de interpretatie van de ontwikkeling van de LAI bij continu 780 ppm CO₂ kan de vraag worden gesteld of deze na een aanvankelijke toename toch niet achterblijft in ontwikkeling (Figuur 3.2C in Dieleman *et al.*, 2003). Telers kijken meer de bladgrootte van individuele bladeren dan naar de Leaf Area Index, omdat die na het begin van de teelt altijd boven het gewenste niveau van 3 m² blad/m² kas is. CO₂ doseren zal in de praktijk eerder leiden tot kleiner bladeren dan grotere.

Een tweede opmerkelijk fenomeen is het tijdstip van stoppen van de CO₂ dosering. Die valt gemiddeld zijn 1,5 uur voor zon-onder. (Figuur 2.8). De reden hiervoor wordt niet gegeven en is ook niet duidelijk. Plantkundig gezien gaat de fotosynthese door zolang er licht is en is het zinvol CO₂ te doseren tot zon-onder. De motivatie om eerder te stoppen kan divers zijn:

- Er is voldoende CO₂ in de kas als 's avonds de ramen dichtgaan. De plant gebruikt dit niet meer op.
- Voorkomen van een te hoge CO₂ concentratie in de nacht, wat mogelijk negatief werkt op de verdamping
- De warmtebuffer is vol zodat gestopt moet worden met doseren.
- Er wordt door telers een link gelegd met het moment van stoppen van de watergift.

Eén opmerking stelt dat Licht+water+CO₂ = productie. Nu heeft een plant naast licht en CO₂ ook water nodig, maar dat hoeft niet op hetzelfde moment door de plant te worden opgenomen. In een plant is voor de fotosynthese een redelijk buffer hoeveelheid water aanwezig.

Effect van CO₂ dosering op de zetting wordt door 33 % van de telers betwijfeld (Figuur 2.12), terwijl 67 % CO₂ dosering gunstig acht voor de zetting. Vanuit de theorie gezien kun je beide standpunten verdedigen. Voor de lange termijn heeft een hoge CO₂ dosering gunstige effect op de aanmaak van assimilaten en dus op de groei en zetting. In dat licht hebben de telers die CO₂ dosering gunstig achten voor de zetting gelijk. Vrijwel alle telers maken daarvan gebruik om de zetting van de eerste vruchten te bevorderen. Later in de teelt hangt het effect van CO₂ dosering op zetting gemeten op korte termijn af van de plantbelasting op dat moment. Een plant die zwaarbelast is en geen assimilaten over heeft voor zetting zal bij een hogere CO₂ dosering en dus hogere fotosynthese op dat moment nog steeds assimilaten te kort kunnen komen voor zetting. Op korte termijn zie je dus geen effect. Op termijn van enkele weken als de plantbelasting afgenomen is zal CO₂ dosering wel tot extra zetting kunnen leiden. Als echter de bladontwikkeling door de hoge CO₂ dosering als gevolg van adaptatie afneemt en daardoor de fotosynthese capaciteit van de kop wordt verkleind heeft CO₂ dosering op lange termijn indirect een negatief effect.

Het effect van CO₂ dosering op vruchtgrootte en vruchtgewicht is weer een stap gecompliceerder, omdat hierin effecten van temperatuur en aantal gezette vruchten ook een rol spelen. Als het aantal gezette vruchten binnen een korte periode groot is zijn er per vrucht weinig assimilaten beschikbaar en zal elke vrucht relatief minder kunnen groeien en dus kleiner en lichter blijven. Als eenmaal de vruchten zijn gezet en de zetting een gegeven is leidt een hogere CO₂ dosering wel tot relatief zwaardere vruchten dan zonder CO₂ dosering.

Een laatste opmerkelijk punt uit de inventarisatie is het stoppen met CO₂ doseren bij hoog vochtdeficit (Figuur 2.19). De achtergrond hiervan is niet duidelijk. Heißner (1997) toonde aan dat de relatieve groei boven een vochtdeficit van 1 kPa (~7.5 g m⁻³) afneemt. Maar fysiologisch gezien zal de groei bij geen dosering, dus gebrek aan CO₂ sterker afnemen. Een mogelijk verklaring voor de ingreep van de telers kan zijn dat zowel een te grootte verdamping als een hoge CO₂ concentratie de sluiting van de huidmondjes bevorderen. Om de plant toch alle ruimte te geven om te verdampen wordt het effect van CO₂ dosering op de sluiting van de huidmondjes voorkomen. De vraag is of dit effect zodanig groot is dat hierdoor de verdamping wordt bevordert en daardoor de planttemperatuur wordt

verlaagd. Een vergelijkbare gedachte zou de basis zijn voor de keuze om boven 30 °C de CO₂ dosering te stoppen (Figuur 2.20). Vanuit de fotosynthese geredeneerd is er geen reden om de CO₂ dosering te verlagen.

3.8 Concluesies

- De effecten van CO₂ dosering op de productie van paprika zijn voor de fotosynthese gelijk aan die bij andere gewassen. Een verhoging van de CO₂ concentratie is gunstig voor de aanmaak van assimilaten.
- Bij veel licht is de combinatie van voldoende temperatuur en CO₂ gunstig voor de fotosynthese.
- Een continu hoge dosering van CO₂ zal het typerende patroon van zettinggolven bij paprika eerder versterken dan dempen. De CO₂ dosering kan op de plantbelasting worden afgestemd om de zetting, die bij een lage plantbelasting optreedt, te remmen.
- Schade van een te hoge CO₂ concentratie kan optreden bij niveaus boven de 1500 ppm.

4 CO₂ rekenprogramma

In het voorgaande hoofdstuk is ingegaan op de afzonderlijke effecten van temperatuur, licht en CO₂ concentratie op de fotosynthese. In een praktijkkas zijn deze factoren echter vaak niet los verkrijgbaar, maar sterk met elkaar gekoppeld, met name in de zomerperiode. Als er veel licht is zal het in de kas al gauw zo warm worden dat de ramen open moeten. De beschikbare CO₂-doseercapaciteit is dan al gauw niet voldoende om een hoge concentratie te kunnen handhaven. Gecombineerd met het gegeven dat het gewas een bepaalde optimale temperatuur voor de fotosynthese heeft ontstaat er dan een tegenstrijdigheid tussen de wens om een hogere concentratie aan te houden (en dus minder te ventileren) en een gunstige temperatuur (meer ventileren).

Als ook nog wordt meegenomen dat het doseren op het ene moment invloed heeft op de hoeveelheid CO₂ die op een ander moment kan worden gedoseerd wordt het probleem nog complexer. Er is immers op dagbasis een beperkte hoeveelheid CO₂ en door middel van de buffer-vulcurve heb je als tuinder invloed op de periode waarin de meeste CO₂ wordt toegediend. Hierbij moet dan een afweging worden gemaakt of het doseren midden op de dag, waarbij er veel CO₂ verloren gaat door de geopende ramen, toch efficiënter is dan doseren in de randen van de dag. In die randen van de dag blijft de concentratie hoger, maar is de lichtintensiteit lager.

In dit hoofdstuk wordt een simulatiemodel toegelicht waarmee al deze processen met elkaar in verband kunnen worden gebracht. Dit simulatiemodel is voor iedereen beschikbaar door het te downloaden vanaf de site www.glastuinbouw.wur.nl/NL/diensten/. In dit hoofdstuk wordt aan de hand van een voorbeeldsituatie getoond hoe er met dit programma gewerkt kan worden. De belangrijkste boodschap is dat het van belang is ook te hebben voor de toegevoegde waarde van elke laatste kg CO₂. Het motto is dan ook: gebruik elke kg CO₂ alsof het je laatste is.

4.1 Strategisch inzetten van CO₂

Door schone brandstof (aardgas) en goede apparatuur kunnen tuinbouwbedrijven met rookgassen uit ketels en WK-installaties de CO₂-concentratie van de kaslucht verhogen. Gemiddeld genomen ligt de maximale doseercapaciteit rond de 200 kg per ha per uur, maar omdat de bij deze doseercapaciteit vrijkomende warmte niet allemaal in de buffer kan worden opgeslagen, wordt de dosering vaak geknepen. De bufferruimte bepaalt daarmee de maximale hoeveelheid die per dag gegeven kan worden.

Deze begrenzing maakt dat de CO₂-dosering met rookgassen niet simpelweg 's ochtends aangezet en 's avonds uitgezet wordt. Nog even los van het feit dat daardoor de CO₂ concentratie bij kleine raamstanden 's ochtends veel te hoog zou worden, zou de buffer in dat geval rond de middag vol zijn. Met andere woorden; als je gewoon 's ochtends de maximum dosering zou inzetten heb je het CO₂-budget voor een bepaalde dag al rond de middag opgesoupeerd. Dit kan natuurlijk niet de bedoeling zijn. Er is een strategie nodig om de schaarse beschikbare CO₂ in te zetten.

De meest gangbare instrumenten die hiervoor worden gebruikt zijn de buffervulcurve en het uitstellen van de start van de doseerperiode. Om te kunnen zien wat het effect is van de instellingen die hiervoor gebruikt worden, is in dit project een simulatie-tool gemaakt. Met deze CO₂-viewer kun je al experimenterend kijken wat de effecten zijn van je doseerstrategie op de dagelijkse fotosynthese. Zo kun je zien of het op een bepaalde dag gunstig is of niet om de CO₂ vooral rond de middag in te zetten, of dat je juist beter 's ochtends, bij kleine ventilatiedebieten CO₂ zou kunnen geven. Het is daarbij een afwegen van winst en verlies. Verschuiven van CO₂-dosering van de ochtend naar de middag is zinvol als de winst van zo'n 'verschoven kilo' in de middag groter is dan het verlies in de ochtend. Het rekenprogramma kan worden gedownload vanaf www.glastuinbouw.wur.nl/NL/diensten/

4.2 Elke laatste kilo evenveel effect

's Ochtends is het nog koel in de kas en staan de ramen vaak maar met een klein kiertje open. Er is dan niet zoveel CO₂ nodig om de concentratie flink te verhogen. Midden op de dag in de zomer is dat heel anders. Zelfs bij een dosering van 200 kg CO₂ per ha per uur komt de concentratie niet veel hoger dan zo'n 450 tot 500 ppm. Toch is

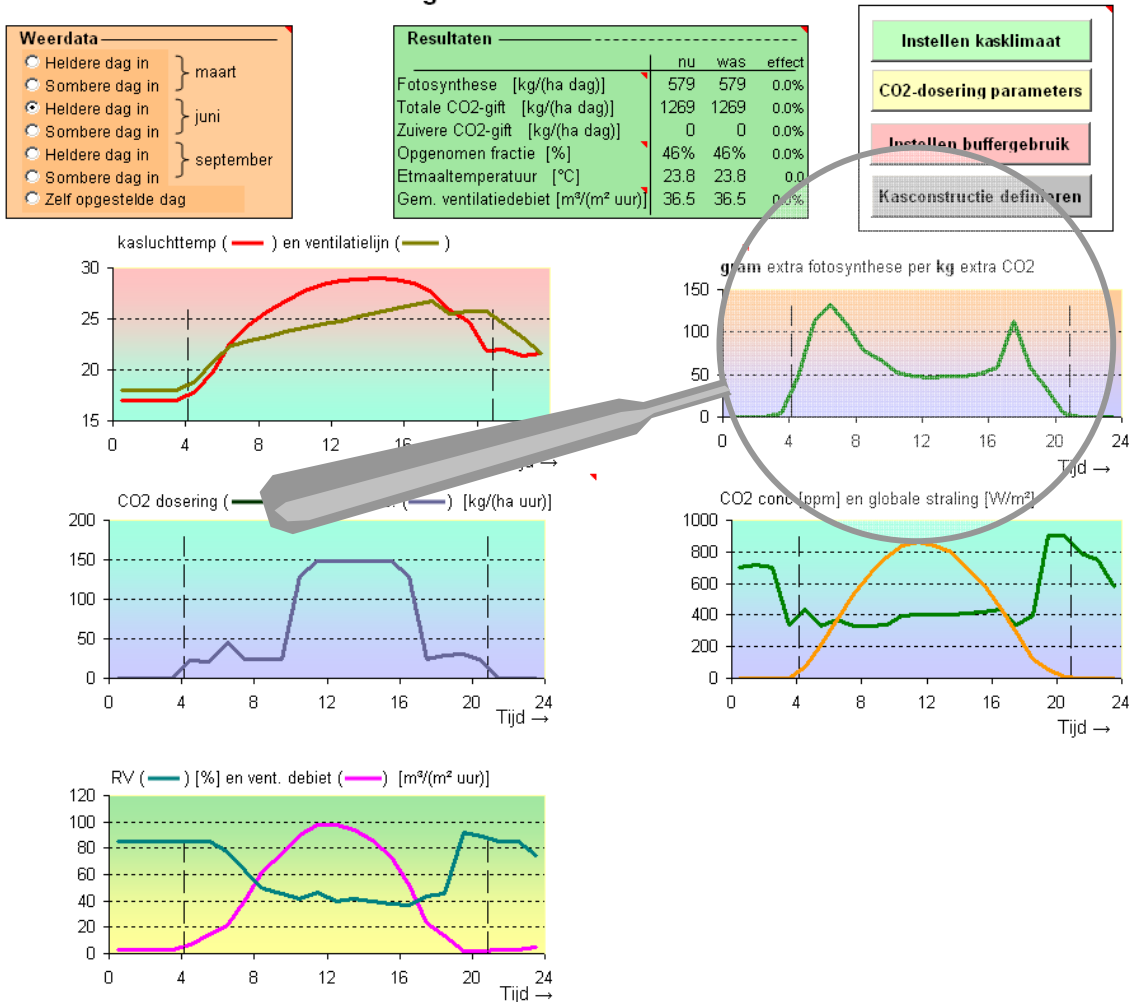
het niet onverstandig om midden op de dag (veel) CO₂ te geven, want door het hoge lichtaanbod heeft het gewas er zeker profijt van, ondanks het relatief kleine effect op de CO₂-concentratie.

Om de CO₂ goed over de dag te verdelen zou je voor elk moment van de dag moeten weten hoe groot het effect van de CO₂-dosering op de fotosynthese is. Dit effect wordt bepaald door de combinatie van CO₂-concentratie-stijging, kasluchttemperatuur en lichtaanbod en is niet eenvoudig te berekenen. Met het nieuwe simulatiemodel kan voor ieder uur van de dag het effect van elke laatste kg CO₂ op de fotosynthese berekend worden, rekening houdend met de buitenomstandigheden, de stook- en ventilatietemperatuur en de doseerstrategie.

Als volgens de berekening van het simulatiemodel het effect van de laatste kg op een bepaald tijdstip erg groot is en op een ander moment veel kleiner, dan is het verstandig te kijken of de dosering in de richting van de waardevolle momenten kan worden verschoven. Zo'n verschuiving kan door het verleggen van de buffer-vulcurve. Het simulatiemodel laat vervolgens zien hoeveel de fotosynthese hierdoor toeneemt en hoe groot na zo'n verschuiving de waarde van elke laatste kg CO₂ is geworden.

De beschikbare CO₂ is optimaal ingezet als overal op de dag de waarde van de laatste kg CO₂ ongeveer even groot is. Daarom is die grafiek het belangrijkste plaatje van het overzichtsscherm. Onderstaand is een screendump van de simulatietool afgebeeld.

Hoofdscherm van de CO₂-dosering viewer



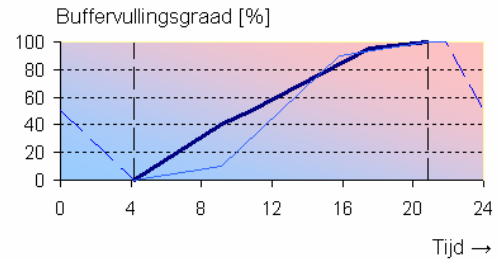
In de getoonde situatie wordt de CO₂ vooral tussen 12:00 en 16:00 uur gegeven. Door de hoge gift in die periode is het effect van elke laatste kg CO₂ in die periode slechts laag (50 gram extra fotosynthese per kg gedoseerde CO₂). En dat terwijl rond 7 uur 's ochtends een extra kilo CO₂ ruim de dubbele hoeveelheid extra fotosynthese levert.

Als in het scherm 'Instellen buffergebruik' de buffervulcurve wordt verlegd, zodat de buffervulling in de ochtend sneller mag oplopen (waardoor de dosering midden op de dag vanzelf wat getemperd wordt), dan blijkt dat de fotosynthese met 2,5% toeneemt.

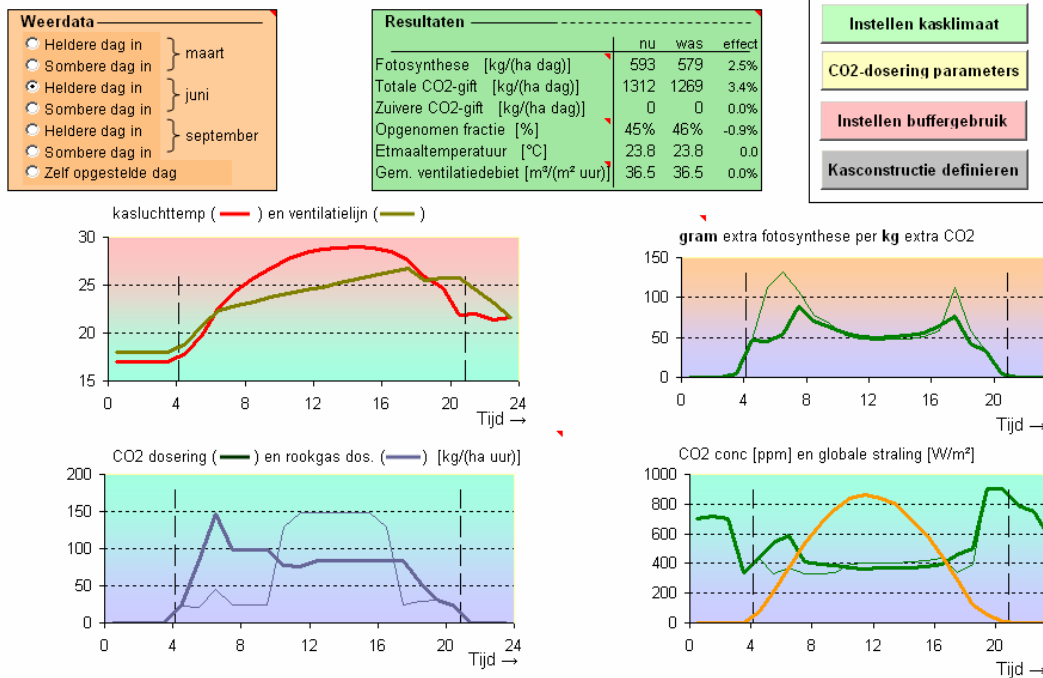
In het grafiekje hiernaast is de verlegging van de vulcurve te zien. Het dunne lijntje is de vorige situatie en de dikke lijn is de nieuwe situatie. Zo begint de doseerperiode op het moment van zonsopkomst.

In het hoofdscherm is in het centrale tabelletje te zien dat de totale CO₂-gift ook nog wat toeneemt (namelijk van 1269 kg/(ha dag) naar 1312 kg/(ha dag)). Dit betekent dat de beschikbare buffercapaciteit (100 m³/ha in dit voorbeeld) ook nog wat efficiënter wordt benut.

Instellingen buffervulcurve			
Maximale vulling na	30 % van de CO ₂ -periode:	40 %	
Maximale vulling na	40 % van de CO ₂ -periode:	50 %	
Maximale vulling na	80 % van de CO ₂ -periode:	95 %	



Hoofdscherm van de CO₂-dosering viewer



Dat de nieuwe bufferstrategie beter is blijkt uit de hogere fotosynthese, maar ook uit de dikke lijn in de grafiek die het effect van de laatste kg CO₂ weergeeft; die is veel vlakker geworden in vergelijking met de vorige situatie (de dunne lijn).

Blijkbaar is op deze dag een vrijwel vlak doseerprofiel van ongeveer 90 kg/(ha uur) (zie grafiek links onder) de verstandigste wijze van CO₂-doseren. De licht en buitentemperatuur gegevens die bij deze dag horen kunnen bekeken worden door bij het kadertje 'weerdata' (links boven in de hoek) de betreffende dag te dubbelklikken. In dit kadertje kan men ook een andere dag kiezen en zelfs een dag helemaal zelf opstellen (bijvoorbeeld met het weer dat voor morgen wordt verwacht)

4.3 Zuivere CO₂-dosering

Nadat de gratis rookgas-CO₂ optimaal verdeeld is, kan er nog overwogen worden extra CO₂ te geven. Dit kan vastgelegd worden via de knop 'CO₂-dosering parameters'. In de vorige grafiek m.b.t. het effect van de laatste kg CO₂ waren er nog waardepieken rond 8:00 en 16:00 uur. Dit zijn de eerst aangewezen perioden waar additionele CO₂ gegeven zou kunnen worden. Onderstaande afbeelding geeft weer hoe dit in het veld 'Extra CO₂-dosering' is toegepast.

Algemene instellingen

Gewenste CO₂ concentratie: 900 [ppm]

Begin de CO₂-dosering: 0 uur na zonsopgang

Stop de CO₂-dosering: 0 uur voor zonsondergang

Ketelrookgassen

Rookgas doseercapaciteit: 180 [kg/(ha uur)]

WK rookgassen

Doseercapaciteit: 0 [kg/(ha uur)]

De WK draait overdag van: 7 tot 16 uur

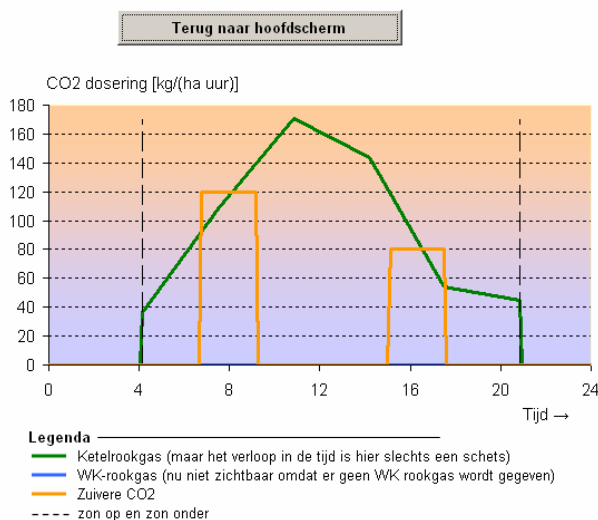
Extra CO₂-dosering

Capaciteit van additionele CO ₂ -dosering	120 kg/ha/uur
Max dosering eerste	15 % van de dos. per. 0 kg/ha/uur
Max dosering volgende	15 % van de dos. per. 120 kg/ha/uur
Max dosering volgende	35 % van de dos. per. 0 kg/ha/uur
Max dosering volgende	15 % van de dos. per. 80 kg/ha/uur
Max dosering laatste	20 % van de dos. per. 0 kg/ha/uur

Instellen kasklimaat

Instellen buffergebruik

Kasconstructie definiëren



Als na parameterisatie van de zuivere CO₂-dosering terug wordt gegaan naar het hoofdscherm, blijkt dat deze additionele CO₂ het meest optimaal is ingezet omdat de grafiek waarin het effect van de laatste kg CO₂ nu (bijna) helemaal vlak loopt.

In de Resultaten-tabel kan worden afgelezen dat de 520 kg zuivere CO₂ die additioneel is gegeven de productie met 83 kg per ha per dag laat toenemen (dat is 5.2%). Zoals altijd leidt een hogere CO₂-concentratie leidt tot een groter verlies, dus de opgenomen fractie van de CO₂ is met de inzet van de additionele CO₂ fors gedaald (van 45% naar 34%).

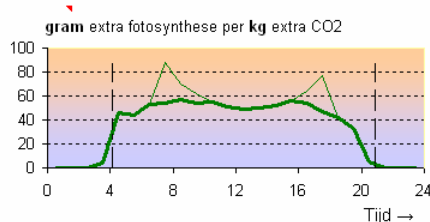
Resultaten	effect			
	nu	was	versch	relatief
Productie [kg/(ha dag)]	1657	1574	83	5.2%
Totale CO ₂ -gift [kg/(ha dag)]	1832	1312	520	39.6%
Zuivere CO ₂ -gift [kg/(ha dag)]	520	0	520	-
Opgenomen fractie [%]	34%	45%	-11	-24.6%
Etmaaltemperatuur [°C]	23.8	23.8	0.0	0.0%
Gem. ventilatie-debiet [m ³ /(m ² uur)]	36.5	36.5	0.0	0.0%

Instellen kasklimaat

CO₂-dosering parameters

Instellen buffergebruik

Kasconstructie definiëren



Of de zuivere CO₂ zijn geld heeft opgebracht hangt af van de waarde van die deze 83 kg extra productie opbrengt. Omdat de uitgroeisnelheid van vruchten het grootst is als vruchten ongeveer op de helft van hun totale uitgroeiduur zijn, komen de assimilaten die vandaag worden voortgebracht vooral in de vruchten die over ongeveer 5 weken verkocht worden. De 83 kg extra versproductie van vandaag moet dus worden vermenigvuldigd met de waarde die over 5 weken verwacht wordt. Wanneer de verwachte waarde bijvoorbeeld € 0.80 per kg bedraagt en de zuivere CO₂ € 0.10 per kg kost dan is de hier getoonde inzet van zuiver CO₂ rendabel. Immers de meerkosten van de zuiver CO₂-dosering bedragen € 52 per hectare en de meeropbrengsten bedragen € 66 per hectare.

4.4 Andere invloedsfactoren

In bovenstaande tekst zijn slechts twee aspecten van de CO₂-dosering besproken. Met de simulatietool kunnen echter nog veel meer andere zaken bekeken worden. Zo kan de rol van CO₂ uit WKK worden meegenomen, het gebruik van schaduwschermen, de verlegging van de ventilatielijnen en de inzet van fogging worden bestudeerd. Bij al deze zaken werkt het programma steeds op dezelfde manier, wat wil zeggen dat er na wijziging van één of meer parameters in het hoofdscherm getoond wordt wat het effect van die wijziging ten opzichte van de vorige situatie is.

In samenwerking met Hortimax werkt Wageningen UR Glastuinbouw aan de automatisering van de werkwijze die hierboven staat uitgewerkt in de kasklimaatcomputer. Dit programma (de CO₂-optimizer) zorgt dan automatisch voor het vlaktrekken van het effect van de laatste kg extra CO₂ en berekent tevens of de toevoeging van zuivere CO₂ z'n geld opbrengt.

Op dit moment werkt Wageningen UR glastuinbouw samen met Hortimax aan programmatuur die automatisch zo'n optimalisatie van de CO₂ dosering uitvoert, inclusief de afweging met betrekking tot de kosten en baten van zuiver CO₂.

5 Fotosynthesemetingen

5.1 Inleiding

Effecten van CO₂ op de plant zijn voornamelijk een gevolg van de effecten van CO₂ op de fotosynthese van de bladeren. In twee eerdere studies zijn fotosynthesemetingen gedaan bij een reeks CO₂ concentraties onder verschillende lichtniveaus (Dieleman *et al.*, 2003; Dieleman & De Zwart, 2004). Daaruit bleek dat naarmate de CO₂ concentratie hoger was (gemeten tot 1100 ppm) de bladfotosynthese hoger was. Dit effect was sterker bij hogere lichtniveaus (Dieleman & De Zwart, 2004). Ook in andere kasgewassen zijn deze relaties vastgelegd. Waar minder over bekend is, is de vraag in hoeverre de fotosynthese afhankelijk is van de assimilatenvraag. De assimilatenvraag wordt bij paprika voor het grootste deel bepaald door het aantal vruchten dat aan de plant hangt (plantbelasting). Om het effect van plantbelasting op de fotosynthese vast te stellen wordt gemeten aan planten met een normale plantbelasting (ca. 41 vruchten per m²) en een lage plantbelasting (ca. 22 vruchten per m²). Daarnaast komen er vanuit de praktijk aanwijzingen dat op zeer zonnige of hete dagen een verhoging van de CO₂ concentratie nauwelijks of niet tot meerproductie leidt. De vraag is wat er op die dagen met de fotosynthese gebeurt, en of de fotosynthese dan 's ochtends en 's middags even efficiënt is. Om deze vragen te beantwoorden, worden op een aantal hete en zonnige dagen en op een aantal dagen met een minder extreem klimaat fotosynthesemetingen uitgevoerd.

5.2 Materiaal en methoden

Alle fotosynthesemetingen zijn uitgevoerd op een praktijkbedrijf waar het ras Ferrari werd geteeld in een 2-stengel-systeem (6,8 stengels per m²). Netto bladfotosynthese werd gemeten met twee draagbare fotosynthesemeters (LCPro, ADC, Verenigd Koninkrijk) aan het zesde blad (van boven geteld) van de plant. Dit is een bijna volgroeid blad, dat niet beschadwd wordt door hoger gelegen bladeren. De fotosynthesemeter meet de CO₂ concentratie en de dampspanning van de lucht die de bladkamer binnenkomt en van de uitgaande lucht. Op basis van het verschil in CO₂ concentratie wordt de netto fotosynthesesnelheid (μmol CO₂ m⁻² s⁻¹) berekend.

5.2.1 Plantbelasting

Om te bepalen wat het effect is van de plantbelasting op de fotosynthese, is in week 22 van 10 planten het aantal vruchten gehalveerd. Van elk vruchtstadium (van net gezet tot bijna oogstbaar) werd de helft verwijderd, zodanig dat er vruchten van alle vruchtstadia aan de stengel bleven. In week 23 is nogmaals vruchtdunning toegepast. In week 24 is aan deze planten en aan 10 planten waarvan geen vruchten verwijderd waren, de fotosynthese gemeten. De plantbelasting van deze planten waarbij geen vruchten verwijderd waren was gemiddeld 41 vruchten per m², van de planten waarvan vruchten verwijderd waren op dat moment gemiddeld 22 vruchten per m². De fotosynthese van 10 planten met lage plantbelasting en 10 planten met normale plantbelasting werd gemeten bij een reeks CO₂ concentraties (350, 600, 850 en 1100 ppm), twee lichtintensiteiten (500 en 1200 μmol PAR m⁻² s⁻¹) en een temperatuur van 28 °C in de meetcuve.

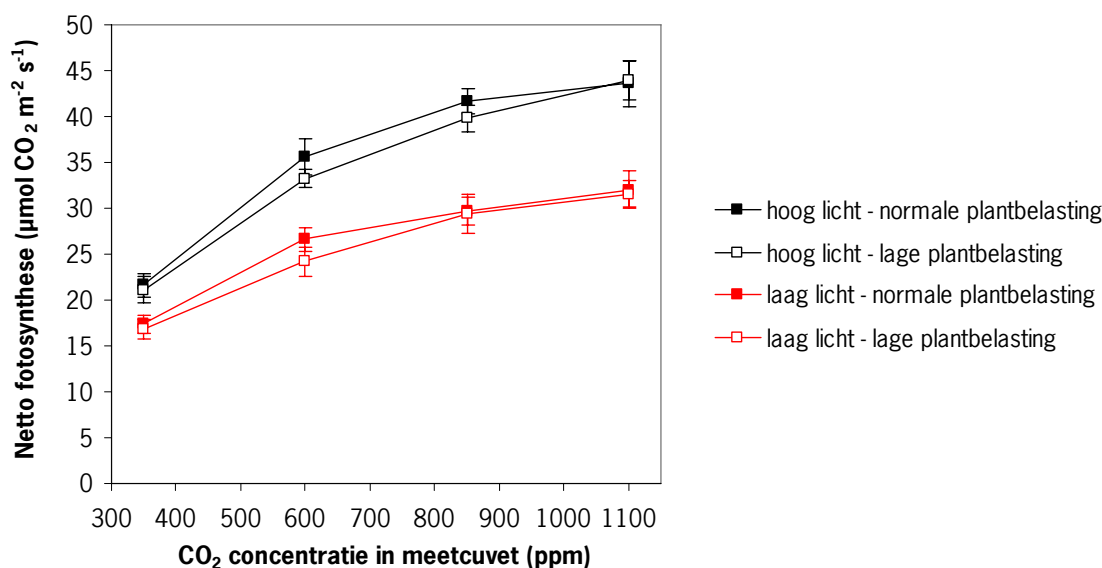
5.2.2 Zonnige en hete dagen

Om te bepalen hoe het verloop van de fotosynthese op zonnige/hete dagen is in vergelijking tot dagen met een meer gematigd klimaat is in de periode half juli tot begin september fotosynthese gemeten op 5 zonnige dagen en op 4 bewolkte dagen. De fotosynthese werd gemeten bij een reeks CO₂ concentraties (350, 600, 850 en 1100 ppm), twee lichtintensiteiten (500 en 1200 μmol PAR m⁻² s⁻¹) en een temperatuur van 33 °C in de meetcuve. De metingen werden op drie tijdstippen van de dag gedaan: 's ochtends tussen 9 uur en 11 uur, begin van de middag tussen 12 uur en 2 uur en aan het einde van de middag tussen 3 uur en 5 uur. Op zowel de zonnige als bewolkte dagen zijn straling buiten, stralingssom, schermstand, kasluchttemperatuur en vochtdeficit gemeten. Op de zonnige dagen was het energiescherm (Phormilux, transmissie 85%) gedurende een aantal uren gesloten.

5.3 Resultaten

5.3.1 Plantbelasting

De metingen aan de fotosynthese van planten met een normale plantbelasting (41 vruchten per m²) en planten met een lage plantbelasting (22 vruchten per m²) zijn uitgevoerd bij een reeks CO₂ concentraties en twee lichtintensiteiten om na te gaan of de effecten van plantbelasting onder alle omstandigheden hetzelfde waren. In Figuur 5.1 is te zien dat het verwijderen van vruchten geen effect heeft op het niveau van de fotosynthese. De planten met een lage plantbelasting hebben onder alle geteste condities dezelfde fotosynthese als de planten met een normale plantbelasting.



Figuur 5.1. Verloop van de netto fotosynthesesnelheid van paprikabladeren bij een reeks CO₂ concentraties in de meetcuve. De metingen zijn uitgevoerd bij 500 µmol PAR m² s⁻¹ (laag licht) en 1200 µmol PAR m² s⁻¹ (hoog licht) en 28°C in de meetcuve aan planten met een normale of lage plantbelasting.

Voor een aantal (vollegrondsgewassen) zijn er onderzoeken geweest naar de effecten van plantbelasting op fotosynthese. In veel gevallen werd gevonden dat de fotosynthese beïnvloed kon worden door de plantbelasting. Wanneer de assimilatenvraag hoger was, nam de fotosynthese toe. Als er vruchten verwijderd werden, nam de fotosynthese af (Gifford & Evans, 1981). Door Marcelis (1991) werd de fotosynthese gemeten aan jonge komkommerplanten met 0, 1, 3, 5 of 7 vruchten per plant. Daaruit bleek dat de fotosynthese alleen lager was als alle vruchten verwijderd waren. De fotosynthese verschilde niet aantoonbaar tussen planten met 7 vruchten of 1 vrucht. Dit geeft aan dat alleen een zeer sterke afname van de assimilatenvraag leidt tot een afname van de fotosynthesesnelheid.

In Figuur 5.1 is verder te zien dat de fotosynthese van de paprikabladeren toeneemt bij toenemende CO₂ concentratie in de meetcuve van de fotosynthesemeter. Naarmate de CO₂ concentratie hoger is, is de toename van de fotosynthese kleiner als de CO₂ concentratie verder toeneemt. Echter, ook als de CO₂ concentratie toeneemt van 850 naar 1100 ppm neemt de fotosynthese van het blad nog met 7% toe.

Bij hoog licht (1200 µmol PAR m² s⁻¹) is de fotosynthese van de bladeren hoger dan bij laag licht (500 µmol PAR m² s⁻¹). Daarnaast is in de figuur ook te zien dat het effect van een stijging van de CO₂ concentratie op de fotosynthese sterker is bij hoog licht dan bij laag licht. Bij laag licht neemt de bladfotosynthese met 86% toe als de CO₂ concentratie toeneemt van 350 naar 1100 ppm, terwijl de toename bij hoog licht 101% is.

5.3.2 Zonnige en hete dagen

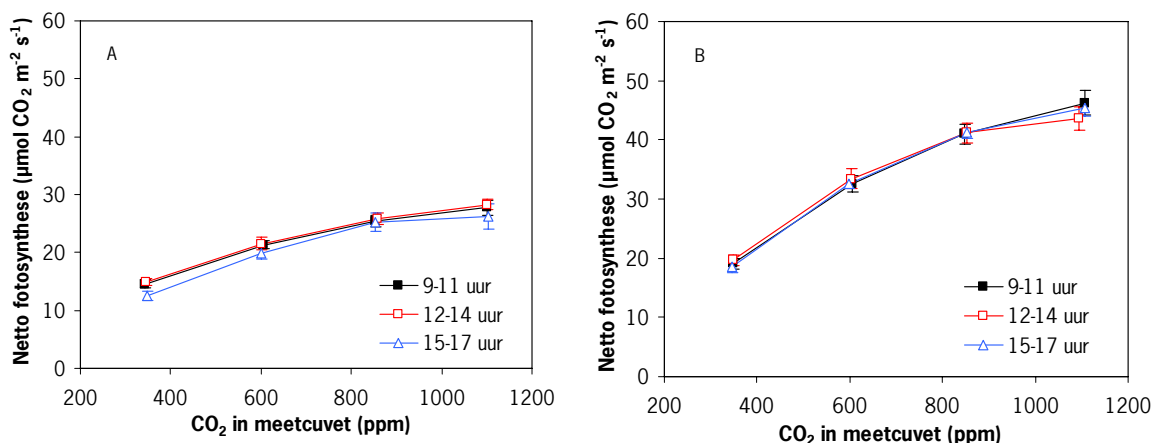
Het klimaat op de 'zonnige' en 'bewolkte' dagen vertoonde duidelijk verschillen (Tabel 5.1).

Tabel 5.1. Eigenschappen van het kasklimaat op 'zonnige' en 'bewolkte' dagen waarop fotosynthesemetingen gedaan zijn.

Eigenschap		Zonnig	Bewolkt
Stralingsom buiten ($\text{J cm}^{-2} \text{ dag}^{-1}$)		> 1650	< 1125
	min - max	1650 - 2400	500 - 1125
Stralingsom ¹ binnen ($\text{MJ PAR m}^{-2} \text{ dag}^{-1}$)		> 25	< 17.7
	min - max	25 - 37.4	8 - 17.7
Gemiddelde kasluchttemperatuur ($^{\circ}\text{C}$) tussen 9:00 en 17:00 uur	min - max	26.5 - 29	23 - 25.5
Gemiddeld vochtdeficit (g m^{-3}) tussen 9:00 en 17:00 uur	min - max	6 - 7.5	2.4 - 5
Gemiddelde CO_2 concentratie (ppm) tussen 9:00 en 17:00 uur	min - max	410 - 550	575 - 900

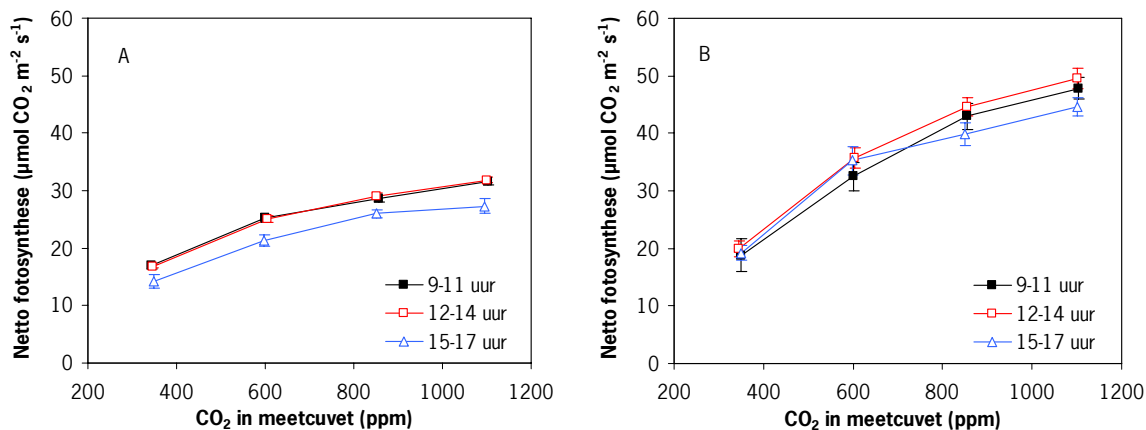
¹ Berekend met een kastransmissie van 70%, gecorrigeerd voor gebruik van energiescherm op zonnige dagen.

Op zowel zonnige als bewolkte dagen is de fotosynthese gemeten bij een reeks CO_2 concentraties en twee lichtniveaus (500 en $1200 \mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). De resultaten van de metingen op bewolkte dagen laten zien dat er geen verloop is van de fotosynthese gedurende de dag (Figuur 5.2). Bij de metingen bij $500 \mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ wijkt alleen de meting bij 350 ppm CO_2 aan het einde van de dag af van de metingen eerder op de dag, voor de overige CO_2 concentraties zijn er geen verschillen.



Figuur 5.2. Netto fotosynthesesnelheid van paprikabladeren gemeten op bewolkte dagen bij een lichtintensiteit van $500 \mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (A) of $1200 \mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (B) en een temperatuur van 33°C in de meetcuve. De metingen zijn gedaan op drie tijdstippen gedurende de dag, tussen 9 en 11 uur, tussen 12 en 14 uur en tussen 15 en 17 uur.

Op zonnige dagen is de fotosynthese gemeten bij een lichtintensiteit van $500 \mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{s}^{-1}$ in de meetcuvet aan het einde van de dag lager dan 's ochtends en aan het begin van de middag (Figuur 5.3A). Als de fotosynthese op zonnige dagen gemeten wordt bij $1200 \mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{s}^{-1}$ in de meetcuvet wordt er geen verloop van de fotosynthese gedurende de dag gemeten (Figuur 5.3B).



Figuur 5.3. Netto fotosynthesesnelheid van paprikabladeren gemeten op zonnige dagen bij een lichtintensiteit van $500 \mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (A) of $1200 \mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (B) en een temperatuur van 33°C in de meetcuvet. De metingen zijn gedaan op drie tijdstippen gedurende de dag, tussen 9 en 11 uur, tussen 12 en 14 uur en tussen 15 en 17 uur.

Uit deze resultaten blijkt dat paprikaplanten op bewolkte dagen gedurende de hele dag even efficiënt met licht en CO_2 om kunnen gaan. In de meetcuvet van de fotosynthesemeter worden vaste omstandigheden aangelegd tijdens de fotosynthesemetingen. Op bewolkte dagen is ook aan het einde van de dag de fotosynthese onder die vaste omstandigheden even hoog als aan het begin van de dag.

Op zonnige dagen treedt waarschijnlijk beschadiging van het fotosynthese-apparaat van de bovenste bladeren door té veel licht op, een fenomeen dat foto-inhibitie genoemd wordt. Door de beschadigingen wordt het opgevangen zonlicht niet meer volledig nuttig gebruikt voor de fotosynthese, maar gaat het gedeeltelijk verloren als warmte. Het effect van foto-inhibitie op de fotosynthese, en daarmee uiteindelijk op de productie, hangt af van de lichtintensiteit. Bij hoog licht leidt foto-inhibitie niet tot afname van de fotosynthesesnelheid omdat dan het proces dat schade opgelopen heeft (de reactiecentra van fotosysteem II) dan niet beperkend is voor de fotosynthesesnelheid. Dit is ook te zien in Figuur 5.3B. Bij minder licht echter, zal foto-inhibitie zichtbaar worden in een afname van de fotosynthesesnelheid, zoals te zien is in Figuur 5.3A. De beschadiging van fotosysteem II als gevolg van foto-inhibitie is momentaan. Als de lichtintensiteit afneemt, duurt het herstel over het algemeen nog enkele uren (Powles *et al.*, 1983). De groeiomstandigheden spelen een belangrijke rol bij het optreden van foto-inhibitie. Zo is een plant die bij weinig licht is geteeld gevoeliger voor foto-inhibitie dan een plant die al een aantal dagen bij zonnige omstandigheden heeft gestaan (Powles, 1984; Anderson & Osmond, 1987). Om die reden kan het verstandig zijn de eerste dagen met hoge instraling na een relatief donkere periode te schermen. Als de bladeren zich na enkele dagen hebben aangepast aan de hogere stralingsniveaus is het niet meer nodig om te schermen om beschadiging door hoge instraling te voorkomen.

5.4 Conclusies

Uit de fotosynthesemetingen die zijn gedaan aan planten met volledige plantbelasting (12 vruchten per stengel) en gehalveerde plantbelasting (6 vruchten per stengel) blijkt dat:

- halveren van de plantbelasting geen effect heeft op de fotosynthese;
- wanneer de CO₂ concentratie toeneemt van 350 ppm naar 1100 ppm, de fotosynthese van de bovenste bladeren met 86% (bij 500 μmol PAR m⁻² s⁻¹ licht) of 101% (bij 1200 μmol PAR m⁻² s⁻¹ licht) toeneemt.

Uit de fotosynthesemetingen die zijn gedaan op zonnige en bewolkte dagen blijkt dat:

- De bladeren op bewolkte dagen gedurende de hele dag even efficiënt omgaan met licht en CO₂.
- De bladeren op zonnige dagen schade kunnen ondervinden van (te) hoge lichtintensiteiten. Dat houdt in dat aan het einde van de dag de fotosynthese bij dezelfde omstandigheden lager is dan aan het begin van de dag. De hoeveelheid CO₂ die dan opgenomen wordt, is dan lager dan verwacht zou worden.

6 Risico's van rookgassen in kaslucht: vaststellen van effectgrenswaarden

6.1 Inleiding

In de glastuinbouw wordt met enige regelmaat schade aan gewassen geconstateerd waarvan de oorzaak onbekend is. Dergelijke onverklaarbare schades kunnen grote economische gevolgen hebben voor de individuele tuinder en vormen een onzekere factor voor de toekomst. Vermoed wordt dat de rookgassen die in de kas worden gevoerd voor het doseren van CO₂ hierbij een rol spelen. De positieve effecten van het doseren van CO₂ met behulp van rookgassen zijn algemeen bekend: hogere productie en/of betere kwaliteit. Er zijn echter aanwijzingen dat er ook negatieve effecten op groei en productkwaliteit kunnen optreden. Deze worden vooral toegeschreven aan de effecten van rookgassen uit installaties met warmtekrachtkoppeling (WKK's). Hierbij spelen vooral NO_x en etheen een rol. Uit praktijkwaarnemingen zijn voorbeelden bekend zoals het afvallen van bloemen en/of vruchten door etheen bij komkommer, paprika en tomaat. Van NO_x is bekend dat het van verminderde groei en productieverlies tot bladverbranding kan leiden.

Om eventuele schade aan gewassen te voorkomen zijn er eisen gesteld aan de maximaal toelaatbare concentraties van enkele toxische componenten in de rookgassen. Door middel van een rookgasreiniginginstallatie moet worden voorkomen dat deze grenswaarden worden overschreden. Desondanks komen met enige regelmaat schadegevallen voor. Hierbij gaat het soms om incidentele schades, meestal het gevolg van een korte blootstelling aan ongereinigde of onvoldoende gereinigde rookgassen door een technische storing aan de installatie. Daarnaast komen ook minder eenduidig te verklaren schades voor zoals achterblijvende groei of minder kwaliteit ed. Dit duidt op een meer chronische blootstelling die niet direct te herleiden is naar een storing in de installatie omdat de betreffende machines technisch gezien probleemloos draaien.

In het begin van de tachtiger jaren hebben het toenmalige Instituut voor Plantenziektenkundig Onderzoek (IPO) en het Proefstation voor Bloemisterij en Glasgroente voor een aantal luchtverontreinigingscomponenten globale effectgrenswaarden vastgesteld om schade aan kasgewassen te voorkomen. De grenswaarden geven de concentratie op plantniveau weer en zijn gebaseerd op literatuurgegevens en begassingsonderzoek dat is uitgevoerd onder relatief gevoeligmakende omstandigheden (weinig licht, gesloten luchtramen).

Tot op de dag van vandaag worden in de glastuinbouw deze grenswaarden gebruikt bij het vaststellen van de luchtkwaliteitseisen waaraan rookgassen van WKK-installaties moeten voldoen. Daarvoor zijn de grenswaarden terugerekend naar nog toelaatbare concentraties in onverdunde rookgassen (Kiel *et al.*, 1991). In het licht van bovenstaande problematiek doet zich de vraag voor of deze grenswaarden nog voldoende bescherming bieden gezien de ontwikkeling die de glastuinbouw heeft doorgemaakt. Dit betreft vooral schaalvergroting, gebruik van nieuwe, meer dichte kassen, complexere installaties zoals WKK's en de grote verscheidenheid aan plantensoorten en rassen die worden geteeld. Ook het onderzoek heeft sinds die tijd niet stilgezeten en heeft nieuwe en relevante informatie gegenereerd over de effecten van NO_x en etheen op gewassen. Duidelijk is al wel dat de grenswaarden die begin jaren 90 zijn vastgesteld, in wetenschappelijke zin niet meer up-to-date zijn. Ook binnen de sector bestaat behoefte aan meer informatie met betrekking tot effectgrenswaarden om schade, vooral aan het gewas paprika te voorkomen.

Gereinigde rookgassen van gasmotor(en) van WKK-installaties bevatten naast CO₂ ook componenten als koolmonoxide (CO), stikstofoxiden (NO_x) en koolwaterstoffen (o.a. etheen). Door het gebruik van aardgas komt vrijwel geen SO₂ vrij. Vooral NO_x en etheen zijn potentieel schadelijk voor een teelt en kunnen in de kas vrijkomen bij de dosering van CO₂ uit WKK-installaties. Op grond van bestaande informatie is er voor gekozen de evaluatie op basis van relevante literatuur te richten op de componenten NO_x (Paragraaf 6.2) en etheen (Paragraaf 6.3).

Afhankelijk van de uitkomst van de evaluatie wordt een advies gegeven met betrekking tot het naar beneden bijstellen van de effectgrenswaarden voor NO_x en etheen (Paragraaf 6.4) en de consequenties hiervan voor het doseren van CO₂ door middel van rookgassen uit WKK-installaties in de paprikateelt (Paragraaf 6.5).

In de literatuur worden voor concentraties voor gasvormige componenten eenheden gehanteerd op basis van volume (ppm, ppb) of massa ($\mu\text{g m}^{-3}$). In dit rapport worden concentraties uitgedrukt in de volume-eenheden ppm (parts per million) of ppb (parts per billion) tenzij anders vermeld.

Voor omrekeningen zijn de volgende conversiefactoren gebruikt:

NO (stikstofmonoxide): 1 ppm = 1000 ppb = 1230 $\mu\text{g m}^{-3}$
 NO₂ (stikstofdioxide): 1 ppm = 1000 ppb = 1880 $\mu\text{g m}^{-3}$
 NO_x: mengsel van NO en NO₂, concentratie wordt uitgedrukt in ppm/ppb
 C₂H₄ (etheen): 1 ppm = 1000 ppb = 1150 $\mu\text{g m}^{-3}$

6.2 Stikstofoxiden (NO_x)

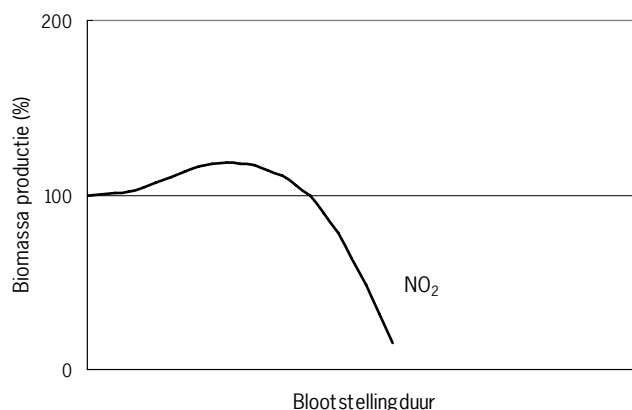
6.2.1 Algemeen

NO_x bestaat uit een mengsel van stikstofmonoxide (NO) en stikstofdioxide (NO₂) en komt van nature voor in de lucht, voornamelijk geproduceerd door bacteriën. NO_x wordt ook als gevolg van menselijk handelen geëmitteerd naar de lucht. Belangrijkste bronnen zijn het verkeer en de verwarming van gebouwen. Bij verbrandingsprocessen ontstaat door oxidatie van de stikstof uit de lucht hoofdzakelijk NO en slechts een geringe hoeveelheid NO₂. Eenmaal in de atmosfeer kan onder invloed van licht en in aanwezigheid van koolwaterstoffen en ozon een deel van de NO door fotochemische reacties worden omgezet in NO₂. Een relatief geringe hoeveelheid NO₂ komt vrij bij bepaalde chemische productieprocessen (o.a. kunstmestproductie). In tuinbouwkassen zijn de rookgassen die in de kas worden gevoerd voor het doseren van CO₂ de belangrijkste bron van stikstofoxiden (Van Dijk *et al.*, 2003).

6.2.2 Werkingsmechanismen

Planten kunnen NO_x via de huidmondjes opnemen vanuit de lucht. Omgevingscondities die van invloed zijn op de openingstoestand van de huidmondjes zijn dan ook bepalend voor de reactie van planten. Er zijn ook indicaties dat de opname van NO en NO₂ ook via de cuticula plaats kan vinden (Wellburn, 1990). Uit de door de plant opgenomen NO en NO₂ (NO_x) ontstaan nitraat en nitriet die vervolgens enzymatisch¹ worden omgezet in aminozuren en proteïnen. De gevoeligheid van een plant voor NO_x wordt bepaald door de effectiviteit van deze omzettingen (detoxificatie). Als NO of NO₂ onvoldoende snel worden omgezet kan dat leiden tot schade aan de plant. De omzetting van nitriet tot aminozuren is gekoppeld aan de lichtreactie van de fotosynthese. Dit zou verklaren waarom NO_x schadelijker is in het donker (minder detoxificatie) dan in het licht. De assimilatie van lage concentraties van NO₂ in inbouw in aminozuren (Morgan *et al.*, 1992) laten zien dat stikstof uit de lucht een bijdrage kan leveren aan de stikstof budget in de plant. Met andere woorden, lage NO_x concentraties kunnen een stimulerende werking hebben op planten, echter toenemende concentraties worden snel toxisch en kunnen tot o.a. groeiremming leiden (zie Figuur 6.1).

¹ Stikstof uit de lucht kan worden geassimileerd door planten. NO₂, NO, HNO₂ en HNO₃ kunnen worden ingebouwd in de plant via NO₃⁻ → NO₂⁻ → (NH₃ ↔ NH₄⁺) ↔ glutamaat ↔ glutamine ↔ andere aminozuren, amides, en eiwitten. Betrokken enzymen zijn nitraat reductase (NR), nitriet reductase (NiR) en glutamine synthetase (GS). Glutamaat dehydrogenase (GDH) speelt een rol in de interne metabolisme van NH₄⁺.



Figuur 6.1. Schematische voorstelling van de biomassa productie in relatie tot de blootstellingsduur aan NO_2 .

Met betrekking tot effecten van NO_x kan onderscheid worden gemaakt tussen acute, vaak zichtbare schade als gevolg van een korte blootstelling aan hoge concentraties en chronische schade na een langdurende blootstelling aan relatief lage concentraties. De omvang van chronische schade is meestal onbekend omdat deze vaak niet direct zichtbaar is. Op langere termijn kan het echter leiden tot productieverlies en mindere kwaliteit.

Acute (zichtbare) symptomen als gevolg van blootstelling aan NO treden pas op bij relatief hoge concentraties (>1 ppm) gedurende korte tijd. In kassen is dit vaak het gevolg van een plotseling optredende storing in de installatie (incident). Chronische blootstelling kan negatieve effecten veroorzaken op de fotosynthese en uiteindelijk leiden tot groeireductie. NO_2 concentraties hoger dan 200 ppb kunnen acute en zichtbare beschadiging tot gevolg hebben. De symptomen zijn niet specifiek. Andere luchtverontreinigingscomponenten zoals SO_2 , Cl , O_3 maar ook bijvoorbeeld magnesiumgebrek kunnen dezelfde symptomen veroorzaken. Een chronische blootstelling aan NO_2 kan leiden tot niet direct zichtbare symptomen zoals groeireductie, verstoring van de waterhuishouding en verhoogde gevoeligheid voor indirecte effecten (pathogenen, vorst, droogte).

6.2.3 Selectie van relevante gegevens

De evaluatie van de wetenschappelijke literatuur van 1980 tot heden heeft één relevante publicatie opgeleverd, namelijk van de World Health Organization (Anonymus, 2001). De WHO heeft in de betreffende studie alle bestaande wetenschappelijke informatie over effecten van NO_x op planten geëvalueerd en op grond daarvan een effectgrenswaarde voor stikstofoxiden in relatie tot planten afgeleid. Onderstaande paragraaf is gebaseerd op deze WHO studie.

Stikstof dioxide (NO_2)

In Tabel 6.1 worden de laagste effectieve blootstellingsniveaus (combinatie van concentratie en tijd waarbij een negatief effect is waargenomen) weergegeven voor NO_2 . Effectieve blootstellingsniveaus bij extreem hoge concentraties zijn meegenomen. Bij de weergave is onderscheid gemaakt tussen drie typen effecten en verschillende perioden van blootstelling:

Type effecten:

- biochemisch, b.v. enzymactiviteit, chlorofyl gehalte
- fysiologisch, b.v. CO_2 assimilatie, stomataire geleidbaarheid
- groei aspecten, b.v. biomassa, reproductie, stressgevoeligheid

Blootstellingduur:

- korte termijn (uren): < 8 uur
- luchtverontreinigingsepisoden (dagen): 8 uur tot 2 weken
- groeiseizoen, of winterseizoen (maanden): ca. 2 weken tot 6 maanden
- lange termijn (jaar): > 6 maanden

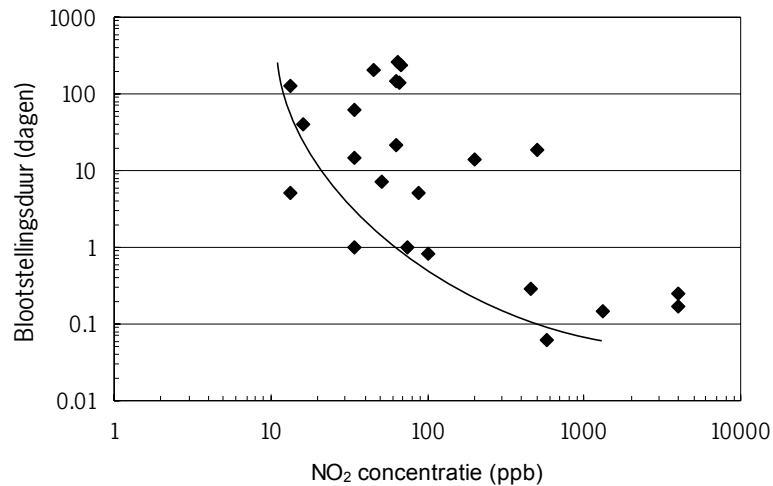
De meeste waarnemingen hebben betrekking op gewassen, waarbij een groeistimulatie werd geconstateerd na blootstelling aan NO₂. Op biochemisch niveau werd meerdere malen een verhoging van de nitraat reductase (NR) activiteit waargenomen. Dit werd geïnterpreteerd als een aanduiding dat planten in staat zijn NO₂ te assimileren. Wanneer de verhoogde NR enzymactiviteit en biomassa productie buiten beschouwing worden gelaten, zou een algemene effectgrenswaarde veel hoger uitvallen. Echter, een verhoging van de biomassa productie wordt gezien als een ongewenst effect in veel typen van natuurlijk vegetatie. Daarnaast stellen Pearson & Stewart (1993) dat detoxificatie van NO_x als een potentieel ongewenste effect moet worden gezien omdat het leidt tot verzuring in cellen wat niet altijd door de plant kan worden gecompenseerd.

Tabel 6.1. *Laagste effectieve concentraties (in ppb) en blootstellingsduur waarbij NO₂ significante effecten heeft veroorzaakt bij verschillende plantensoorten (uit Anon., 2001)².*

Soort	Duur	Concentratie (ppb)	Effect
<i>Lange termijn</i>			
Douglasspar	8 md	68	verminderde WUE
Grassen	7 md	45	veranderde groei
Berk	5 md	64	groei stimulatie
Mossen	37 wk	65	bladschade
<i>Groeiseizoen of winter</i>			
Grove den	39 dgn	27	verandering aminozuren
Gras	140 dgn	66	verhoogde GDH activiteit
Tomaat	19 dgn	500	reductie nitraat gehalte
Berk	22 dgn	64	verhoogde water verlies
Boon	15 dgn	35	verhoogde donker respiratie
Koolzaad	130 dgn	14	groei stimulatie
Boon	62 dgn	35	biomassa toename
Radijs	40 dgn	16	groei stimulatie
<i>Luchtverontreiniging-episoden</i>			
Picea rubens	1 dgn	74	verhoogde NR activiteit
Kroosvaren	7 dgn	51	verhoogde NR activiteit
Mossen	1 dgn	35	verhoogde NR activiteit
Sojaboon	5 dgn	88	verhoogde donker respiratie
Boon	20 uur	101	verhoogde donker respiratie
Zonnebloem	14 dgn	199	reductie NAR
Weymouthden	5 dgn	13	naald necrose
<i>Korte termijn</i>			
Mais	6 uur	3989	verhoogde NiR activiteit
Tuinboon	4 uur	3989	verandering aminozuren
Erwt	7 uur	452	verhoogde etheen productie
Alfalfa, haver	1.5 uur	585	fotosynthese remming
Tabak	3.5 uur	1330	blad necrose

² Indien er sprake was van een niet-continue blootstelling werd voor de perioden waarin niet werd gedoseerd een NO₂ concentratie verondersteld van 5 ppb. Deze aanname zou kunnen resulteren in zowel een over- als onderschatting van de gemiddelde concentratie afhankelijk van de werkelijke achtergrondconcentratie gedurende het experiment.

Voor het vaststellen van effectgrenswaarden voor de invloed van NO_2 op planten is door de WHO gebruik gemaakt van de zogenaamde envelopbenadering. De effectieve blootstellingen uit Tabel 6.1 zijn grafisch weergegeven (Figuur 6.2) waarna de effectgrenslijn is getrokken net onder de laagste effectieve blootstellingen. De effectgrenslijn kan worden beschouwd als een verzameling van blootstellingen, gedefinieerd naar concentratie en tijd, waarboven planten wel en waaronder planten geen risico lopen beschadigd te worden door NO_2 . De envelopbenadering is de tot nu toe meest gebruikte methode bij de afleiding van effectgrenswaarden voor de effecten van luchtverontreinigingscomponenten op planten (McCune, 1969; Jacobson, 1977; Posthumus *et al.*, 1989; Tonneijck, 1989; Van der Eerden & Van Dijk, 1993).



Figuur 6.2. *Laagste effectieve blootstellingsniveaus van NO_2 op biochemische processen, fysiologie of groei van verschillende plantensoorten. NB. Verticale en horizontale as zijn op log-schaal.*

Uit Figuur 6.2 blijkt dat de WHO niet heeft gekozen voor de absolute effectgrenslijn net onder de laagste effectieve blootstellingen. Er zijn enkele waarnemingen die betrekking hadden op marginale necrose op de naalden op twee van de acht klonen van *Pinus strobus* zaailingen (Yang *et al.*, 1983) buiten beschouwing gelaten. Uitsluiting van deze waarnemingen resulteerde in hogere acceptabele blootstellingsniveaus gebaseerd op meerdere waarnemingen. Op basis van de effectgrenslijn is een schatting gemaakt voor 'geen-effect niveaus' voor 1 jaar, 1 dag en 1 uur, van respectievelijk 11, 106 en 532 ppb. Uiteraard kent schatten van effectgrenswaarden een aantal arbitraire aspecten maar belangrijkste conclusie is dat er voor zover nu bekend geen wetenschappelijk informatie is over effectieve blootstellingen beneden deze effectgrenswaarden. Met andere woorden: er zijn geen aanwijzingen dat planten risico lopen beschadigd te worden indien de NO_2 concentraties beneden de aangegeven effectgrenswaarden blijven.

Stikstof oxide

Om praktische redenen is het meeste onderzoek naar effecten van NO op planten uitgevoerd met kasgewassen, vooral tomaat. Nagenoeg alle experimenten waren gericht op fotosynthese of enzymatische processen, slechts enkele experimenten waren gericht op groeigerelateerde effecten (Tabel 6.2). De interpretatie van de beschikbare gegevens wordt bovendien bemoeilijkt doordat bij begassing met NO altijd in een zeker mate oxidatie van NO naar NO_2 plaatsvindt. Planten worden dus aan een mengsel van NO en NO_2 blootgesteld. NO en NO_2 hebben verschillende eigenschappen, zowel wat het werkingsmechanisme op cellulair niveau betreft (Wellburn, 1990) als de eigenschappen die betrekking hebben op de gasuitwisseling tussen plant en atmosfeer (D. Fowler, pers. mededeling, Saxe, 1986). De effecten van beide componenten op planten zijn dan ook verschillend. De beschikbare studies geven geen eenduidig antwoord op de vraag welke component het meest toxisch voor planten is. Eerdere studies toonden aan dat NO sneller een remming van de fotosynthese veroorzaakt dan NO_2 (in ppm gebied) maar het *overall* effect op de fotosynthese was minder (Hill & Bennet, 1970). Uit meer recente studies naar effecten op de fotosynthese (Saxe,

1994) bleek dat NO meer toxisch was dan NO₂. Er is weinig informatie over effecten van beide componenten bij lage concentraties, maar de informatie die er is lijkt het idee te bevestigen dat NO meer toxisch is dan NO₂. Morgan *et al.* (1992) ontdekten dat NR activiteit in bryofyten werd geremd door NO en gestimuleerd door NO₂.

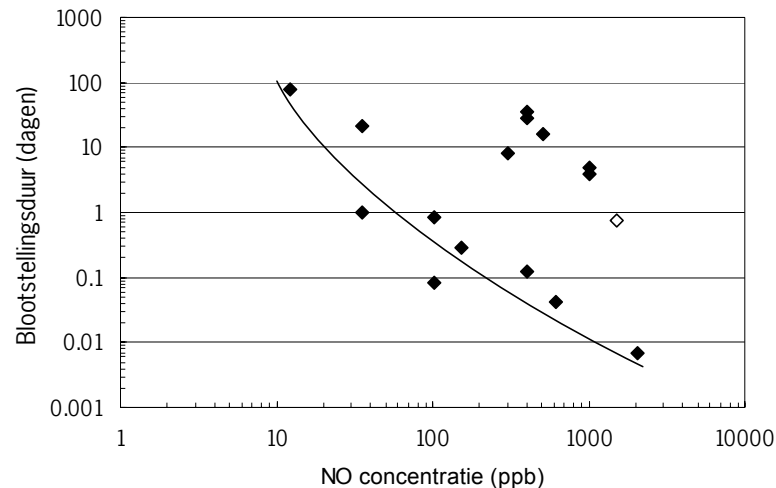
In lange-termijn begassingsexperimenten hebben Lane & Bell (1984) een aantal grassoorten blootgesteld aan relatieve lage concentraties van NO, NO₂, SO₂, SO₂ + NO₂ en NO + NO₂ + SO₂. De NO concentratie bedroeg ca. 12 ppb wat in enkele gevallen resulteerde in groeireducties van meer dan 30% (Anderson & Mansfield, 1979). Een interactie tussen NO en NO₂+SO₂ was één keer waargenomen.

Tabel 6.2. *Laagste effectieve concentraties (in ppb) en blootstellingsduur waarbij NO significante effecten heeft veroorzaakt bij verschillende plantensoorten (uit Anon., 2001).*

Soort	Duur	Concentratie (ppb)	Effect
<i>Groeiseizoen</i>			
Mossen	21 dgn	36	nitraat reductase remming
Tomaat	28 dgn	407	nitriet reductase remming
Sla	16 dgn	508	biomassa reductie
Grassen	35 dgn	407	groei reductie
Tomaat	80 dgn	12	biomassa reductie
<i>Luchtverontreiniging-episoden</i>			
Sla	8 dgn	305	nitriet reductase remming
Mossen	24 uur	36	nitraat reductase remming
Paprika	18 uur	1524	nitriet reductase remming
Kamerplanten (8 soorten)	4 dgn	1016	fotosynthese remming
Tomaat	20 uur	102	fotosynthese remming
Sla	5 dgn	1016	biomassa reductie
<i>Korte termijn</i>			
Erwt	7 uur	153	verhoogde etheen productie
Tomaat	3 uur	407	nitriet reductase remming
Haver	1 uur	610	fotosynthese remming
Sla	10 min	2033	fotosynthese remming
Tomaat	2 uur	102	fotosynthese remming

Zoals ook voor NO₂ is voor het vaststellen van effectgrenswaarden voor de invloed van NO op planten gebruik gemaakt van de zogenaamde envelopbenadering waarbij wordt opgemerkt dat de experimentele basis voor een schatting van effectgrenswaarden voor NO matig is. De effectieve blootstellingen uit Tabel 6.2 zijn grafisch weergegeven (Figuur 6.4) waarna de effectgrenslijn is getrokken net onder de laagste effectieve blootstellingen. Ook hier geldt dat de WHO niet heeft gekozen voor de absolute effectgrenslijn net onder de laagste effectieve blootstellingen. Er zijn enkele waarnemingen buiten beschouwing gelaten. Uitsluiting van deze waarnemingen resulteerde in hogere acceptabele blootstellingsniveaus gebaseerd op meerdere waarnemingen. Op basis van de effectgrenslijn is een schatting gemaakt voor 'geen-effect niveaus' voor 1 jaar, 1 dag en 1 uur, van respectievelijk <16, 80-160 en 160-800 ppb.

De WHO concludeerde dat er eigenlijk meer informatie over effecten van NO beschikbaar zou moeten komen op basis waarvan effectgrenswaarden kunnen worden afgeleid. Duidelijk is wel dat NO niet genegeerd mag worden als potentieel toxische component voor planten omdat effecten van NO worden waargenomen bij in Europa voorkomende concentraties. Het ontbreekt aan kennis om aparte effectgrenswaarden voor NO en NO₂ vast te stellen.



Figuur 6.3. Laagste effectieve blootstellingsniveaus van NO op biochemische processen, fysiologie of groei van verschillende plantensoorten. Het open symbool heeft betrekking op een effect bij paprika. NB. Verticale en horizontale as zijn op log-schaal.

Stikstof oxide en stikstof dioxide

Zoals in de vorige paragraaf al is aangegeven hebben NO en NO₂ verschillende eigenschappen wat werkingsmechanisme en gasuitwisseling betreft en ook de effecten die beide componenten op planten veroorzaken zijn verschillend. Omdat op basis van de huidige kennis niet duidelijk is welke component het meest toxisch voor planten is gaat de WHO er vanuit dat NO en NO₂ even toxisch zijn en additief werken. De veronderstelling dat het effect van NO en NO₂ additief is, zou kunnen resulteren in een onderschatting van het totale effect, maar er is onvoldoende informatie om dit te kwantificeren.

Stikstof oxiden en koolstofdioxide

In het algemeen resulteert een verhoging van de CO₂ concentratie in een toename van de biomassa productie. Stikstof kan ook limiterend zijn, daarom wordt er verondersteld dat een stikstofbemesting door lage concentraties van NO_x een meer dan additief effect met CO₂ zou kunnen hebben. Er is echter geen experimentele ondersteuning voor deze gedachte en bovendien komt een stikstof tekort in de kas niet vaak voor. De groeistimulatie door extra stikstof uit NO_x zou ook beperkt kunnen blijven omdat andere nutriënten beperkend worden.

In rookgassen die benut worden vanwege de CO₂, is NO_x (waarin NO dominant is) een belangrijke bron van verontreiniging. Het bemestende effect van verhoogde concentraties aan CO₂ kunnen verdwijnen in de aanwezigheid van NO_x in concentraties van 1000 ppb en hoger (Caporn *et al.*, 1994; Mortensen, 1985; Anderson & Mansfield, 1979; Bruggink *et al.*, 1988; Saxe & Voight Christensen, 1984). De CO₂ en NO_x concentraties die in deze experimenten zijn gebruikt zijn echter relatief hoog en hebben daarom geen invloed op het niveau van de effectgrenswaarde. De effectgrenswaarde wordt namelijk bepaald door de laagste effectieve blootstellingsniveaus. Alleen experimenten met lagere blootstellingsniveaus kunnen eventueel leiden tot bijstelling van de effectgrenswaarde.

6.2.4 Afleiding effectgrenswaarden voor NO_x

In het WHO document wordt voorgesteld uitsluitend effectgrenswaarden af te leiden voor NO_x, in plaats van afzonderlijke effectgrenswaarden voor NO en voor NO₂. Interacties met andere luchtverontreinigingscomponenten zoals ozon en SO₂ zijn meegenomen bij de vaststelling van de effectgrenswaarden voor NO_x.

Lange-termijn blootstelling

In eerder door de WHO vastgestelde richtlijnen (Anon., 1987) werd een effectgrenswaarde voor NO₂ voorgesteld van 16 ppb als jaargemiddelde. Op basis van de meest recente evaluatie, wordt door de WHO een effectgrenswaarde van 8-11 ppb voorgesteld voor NO₂ alleen, of in combinatie met SO₂ en O₃. Voor NO₂ geldt dat een combinatie met andere luchtverontreinigingscomponenten de aard van het effect kan veranderen, maar niet het niveau van de NO₂ effectgrenswaarde.

Een effectgrenswaarde voor NO kan alleen worden geschat door middel van extrapolatie. Voor een jaargemiddelde concentratie zou dit uitkomen op ca. 12-16 ppb. Om schade aan planten te voorkomen als gevolg van blootstelling aan NO en NO₂, zou een lange-termijn effectgrenswaarde onder de 12 ppb moeten liggen. Experimentele gegevens laten echter zien dat een meerderheid van de plantensoorten niet negatief wordt beïnvloed door NO_x bij een concentratie van 16 ppb. In het WHO document wordt daarom voorgesteld de effectgrenswaarde voor een lange-termijn blootstelling aan NO_x vast te stellen op 16 ppb, als jaargemiddelde.

Korte-termijn blootstelling

In eerder door de WHO vastgestelde richtlijnen (Anon., 1987) werd een effectgrenswaarde voor korte-termijn effecten gebaseerd op een blootstelling van 4 uur. De WHO stelt nu voor dit te wijzigen in een effectgrenswaarde gebaseerd op een 24-uurs gemiddelde. Bij een 24-uurs gemiddelde kan worden aangenomen dat het betrekking heeft op zowel piek concentraties voor een aantal uren als voor luchtverontreinigingsepisoden gedurende een aantal dagen. Daarnaast heeft een 24-uurs gemiddelde betrekking op zowel blootstellingen overdag als 's nachts. Experimentele data geven aan dat de effectgrenswaarde voor NO_x rond 106 ppb ligt of ca. 40 ppb indien NO_x in combinatie met SO₂ en/of O₃ voorkomt. In de wetenschap dat korte-termijn episoden van verhoogde NO_x concentraties in de buitenlucht over het algemeen voorkomen in combinatie met verhoogde concentraties van O₃ of SO₂, stelt de WHO een effectgrenswaarde voor een korte-termijn blootstelling aan NO_x vast van 40 ppb, als 24-uurs gemiddelde.

Tabel 6.3. *Effectgrenswaarden ter voorkoming van negatieve effecten op planten als gevolg van blootstelling aan NO_x (NO + NO₂, uitgedrukt als NO₂ in ppb; Uit: WHO, 2001³).*

Blootstellingsduur	Effectgrenswaarde (ppb)
Kortdurend (24-uurs gemiddelde)	40
Langdurend (jaargemiddelde)	16

6.3 Etheen

6.3.1 Algemeen

Over het belang van etheen voor planten is veel bekend (Abeles *et al.*, 1992). De biologische activiteit van etheen werd rond de vorige eeuwwisseling al duidelijk door waarnemingen van beschadiging aan planten als gevolg van

³ In het WHO document worden alle concentraties voor NO en NO₂ uitgedrukt in microgram per kubieke meter (µg m⁻³). In dit rapport zijn de concentraties omgerekend naar ppb's. De conversiefactoren voor NO en NO₂ zijn echter verschillend (zie kader Paragraaf 6.1). Omdat de exacte verhouding tussen NO en NO₂ niet bekend is wordt, zoals ook in het WHO document, de omrekeningsfactor voor NO₂ gebruikt wat impliceert dat NO_x volledig uit NO₂ zou bestaan. Hoewel dit feitelijk onjuist is maakt het voor de toetsing aan de effectgrenswaarde niet uit omdat de toxiciteit van NO en NO₂ aan elkaar gelijk worden gesteld. Dit sluit ook beter aan bij de meetapparatuur die in kassen wordt gebruikt voor het meten van NO en NO₂ waarbij de concentraties in ppb worden uitgedrukt. Deze worden vervolgens softwarematig gesommeerd en opgeslagen als NO_x concentratie, ook in ppb.

blootstellingen aan deze component in de omgevingslucht. Vervolgens werd in onderzoek aangetoond dat etheen toegepast kan worden om de groei en ontwikkeling van gewassen te manipuleren, dat planten zelf etheen produceren en dat het een endogene groeiregulator is. Etheen in de omgevingslucht is dus zowel van antropogene als van biogene oorsprong. Overigens kunnen ook wortels blootstaan aan etheen als gevolg van de productie hiervan door bodemschimmels.

Hoewel etheen continu in kleine hoeveelheden wordt gevormd door alle plantorganen en weefsels, blijven de belangrijkste effecten ervan vooral beperkt tot de eindfase van de ontwikkeling zoals het afrijpen van fruit, veroudering en bladval. Daarnaast kan weefselbeschadiging aanleiding geven tot een versnelde productie van etheen (stress etheen) door planten. Etheen kan daarom beschouwd worden als een voor planten 'ongewone' luchtverontreinigingscomponent aangezien het een endogene groeiregulator is en in versterkte mate door planten wordt gevormd onder invloed van een groot scala van stress-factoren inclusief blootstellingen aan etheen zelf.

Etheen is toxisch voor planten bij lage concentraties maar zelden bij relatief hoge concentraties (Abeles, 1985). In deze zin wijkt etheen dus af van andere luchtverontreinigingscomponenten zoals ozon, zwaveldioxide en ammoniak, die soms positieve effecten kunnen veroorzaken bij lage concentraties maar altijd toxisch zijn bij hogere niveaus.

6.3.2 Werkingsmechanismen

Met betrekking tot etheen is een groot aantal negatieve effecten beschreven voor verschillende plantensoorten na zowel kort- als langdurende blootstellingen aan verschillende concentraties. De reacties van planten op blootstellingen aan etheen blijken zeer divers te zijn. Effecten kunnen hierbij variëren van het afsterven van plantedelen tot zeer subtiele veranderingen op fysiologisch en biochemisch niveau en betreffen onder meer veranderingen van de fotosynthese, epinastie (schuin neerwaarts buigen van de bladsteel, omkeerbaar), afwijkingen en reductie van de groei, bloemafwijkingen, veroudering en bladval. De waargenomen effecten kunnen globaal in drie categorieën worden verdeeld (US Department of Health, Education and Welfare, 1970):

- (1) acute effecten zoals beschadiging en afsterven van bladweefsel;
- (2) chronische effecten zoals chlorose zonder het afsterven van cellen en
- (3) reductie en afwijkingen van de groei als tekenen van veranderingen van het normale groeipatroon zonder duidelijke symptomen op de bladeren.

Behalve van de blootstellingsvariabelen zoals concentratie en duur van de blootstelling, zijn de aard en intensiteit van de effecten ook afhankelijk van planteigenschappen en omgevingscondities. Abeles *et al.* (1992) onderscheiden hierbij effecten als gevolg van verhoogde concentraties in het plantenweefsel ('concentration response') en effecten als gevolg van de veranderde gevoeligheid van weefsels voor reeds aanwezig etheen ('sensitivity response'). Vooral oudere plantenweefsels zijn gevoelig voor etheen. Ook plantensoorten kunnen verschillen in gevoeligheid voor etheen (Heck *et al.*, 1970). Omgevingscondities bepalen eveneens de wijze waarop planten reageren. Zo zullen die factoren die invloed hebben op de openingstoestand van de huidmondjes, de reactie van planten op etheen mede bepalen omdat deze component door bladeren via de huidmondjes wordt opgenomen.

6.3.3 Selectie van relevante gegevens

De evaluatie van de wetenschappelijke literatuur van 1980 tot heden heeft twee relevante publicaties opgeleverd (Tonneijck & Van Dijk, 1994; 2000). In de studie uit 1994 worden op basis van literatuurgegevens toxicologische advieswaarden voor de effecten van atmosferisch etheen op planten afgeleid. De studie uit 2000 betreft een update van de eerdere studie. Onderstaande paragraaf is gebaseerd op beide studies.

De volgende effectparameters zijn door Tonneijck & Van Dijk (1994) aangemerkt als relevant voor het afleiden van toxicologische advieswaarden: reductie van groei en opbrengst, remming van de fotosynthese, verwelking, chlorose, afwijkende groei en abscissie van plantedelen. Epinastie werd ook beschouwd als een relevant effect ondanks het omkeerbare karakter ervan. Het optreden van epinastische krommingen kan namelijk aanleiding geven tot een vermindering van de fotosynthese.

Hoewel er veel bekend is over de effecten van etheen op planten, zijn lang niet alle gegevens relevant voor het afleiden van toxicologische advieswaarden. Tonneijck & van Dijk (1994) hebben de beschikbare informatie aan een selectie onderworpen waarbij experimentele gegevens die betrekking hebben op een van de onderwerpen in onderstaande opsomming buiten beschouwing zijn gelaten:

- Blootstellingen aan concentraties groter dan 1 ppm.
- Blootstellingen waarvan hetzij de concentratie hetzij de blootstellingsduur niet is vermeld.
- Blootstellingen van intacte planten in gesloten systemen zonder luchtventilatie. In dergelijke experimenten is de etheenconcentratie namelijk niet constant en is er door het ontbreken van iedere luchtcirculatie sprake van een relatief grote weerstand voor de opname van deze component door de planten.
- Gegevens die betrekking hebben op het blootstellen van delen van planten zoals stengels of agrarische producten. Hierbij moet worden gedacht aan gevallen waarbij planten of geoogste producten bewust worden blootgesteld aan etheen om bepaalde processen in gunstige zin te beïnvloeden zoals versnelde afrijping, ontbladering, uitdunning van bloemen en vruchten en het bevorderen van vruchtabscissie voorafgaand aan mechanisch oogsten (Acedo & Bautista, 1993; Reid, 1985).
- Niet-effectieve blootstellingen en blootstellingen met een positief effect.

Na selectie bleven alleen die gegevens over die betrekking hadden op blootstellingen van intacte planten aan etheen in systemen met luchtcirculatie. Deze gegevens zijn in principe relevant en van voldoende omvang voor het afleiden van toxicologische advieswaarden. Indien in één onderzoek voor een specifieke effectparameter bij eenzelfde plantensoort of cultivar verschillende effectieve concentratieniveaus bij dezelfde blootstellingsduur werden gevonden, werd voor de berekening alleen het laagste concentratieniveau gebruikt. Hetzelfde gold voor verschillende effectieve blootstellingsduren bij dezelfde concentratie.

6.3.4 Afleiding effectgrenswaarden etheen

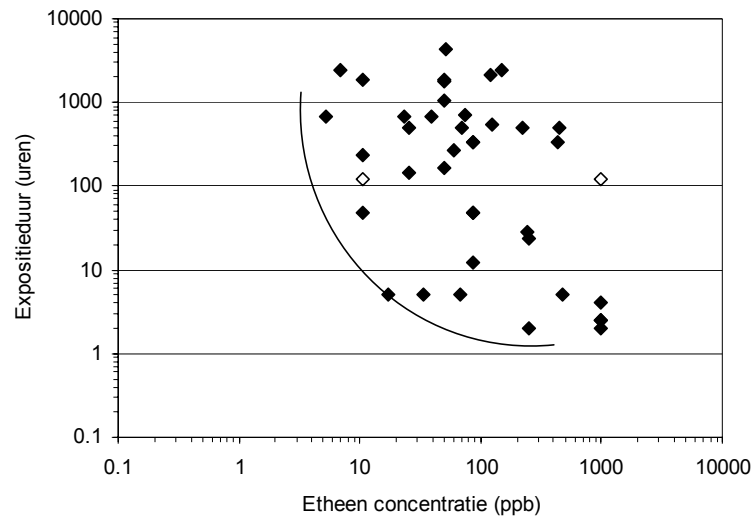
In de studie van Tonneijck & Van Dijk uit 1994 zijn op basis van de geselecteerde gegevens op twee manieren effectgrenswaarden voor etheen afgeleid. Na correctie voor de blootstellingsduur werden met behulp van de statistische methode van Aldenberg & Slob (1993) maximaal toelaatbare risiconiveaus (MTR) berekend. Deze statistische methode maakt gebruik van de verschillen in gevoeligheid tussen soorten. Voor blootstellingsperioden van acht uur (kortdurende blootstelling) en vier weken (langdurende blootstelling) werden grenswaarden berekend van respectievelijk 12,4 en 3,3 ppb etheen (Tabel 6.4).

De tweede methode betreft het vaststellen van de effectgrenslijn voor de invloed van etheen op planten via de zogenaamde envelopbenadering. De effectieve blootstellingen worden grafisch weergegeven waarna de effectgrenslijn kan worden getrokken net onder de laagste effectieve blootstellingen. De effectgrenslijn kan worden beschouwd als een verzameling van blootstellingen, gedefinieerd naar concentratie en tijd, waarboven planten wel en waaronder planten geen risico lopen beschadigd te worden door etheen. De op deze wijze bepaalde grenswaarden (Tabel 6.4) bedroegen 11,3 ppb voor acht uur en 5,3 ppb etheen voor vier weken en kwamen daarmee redelijk overeen met de berekende maximaal toelaatbare risiconiveaus van 12,4 en 3,3 ppb.

Tabel 6.4. Advieswaarden (ppb) ter bescherming van planten tegen negatieve effecten van etheen (Uit: Tonneijck & Van Dijk, 1994; 2000).

Blootstellingsduur	Effectgrenswaarde (envelopmethode)		Maximaal toelaatbaar risiconiveau (berekend)	
	1994	2000	1994	2000
Kortdurend (8 uur)	11,3	11,3	12,4	12,4
Langdurend (4 weken)	5,3	5,3	3,3	3,5

In 2000 is op basis van dezelfde selectie criteria de literatuurgegevens geactualiseerd wat resulteerde in toevoeging van enkele effectieve blootstellingsniveaus van etheen. Op basis van deze informatie zijn de advieswaarden opnieuw berekend volgens de methode van Aldenberg & Slob (1993) en de envelopmethode (Figuur 6.4). De advieswaarden blijken nauwelijks gewijzigd ten opzichte van die welke eerder werden geformuleerd (Tabel 6.4). Het enige verschil is dat het berekende maximaal toelaatbare risiconiveau voor een langdurende blootstelling is toegenomen van 3,3 naar 3,5 ppb.



Figuur 6.4. Effectieve blootstellingsniveaus van etheen met de effectgrenslijn voor het 100 % beschermingsniveau. De twee open symbolen hebben betrekking op effecten bij paprika (Uit: Tonneijck & Van Dijk, 2000).

De effectgrenswaarden bleken nauwelijks gewijzigd ten opzichte van die welke in 1994 waren afgeleid. Op basis van deze informatie is door Tonneijck & van Dijk voorgesteld de effectgrenswaarden voor effecten van atmosferisch etheen op planten te hanteren zoals weergegeven in Tabel 6.5.

Tabel 6.5. Effectgrenswaarden ter voorkoming van negatieve effecten op planten als gevolg van blootstelling aan etheen (Uit: Tonneijck & Van Dijk, 2000).

Blootstellingsduur	Effectgrenswaarde
Kortdurend (8 uur)	11 ppb
Langdurend (4 weken)	5 ppb

6.4 Relevantie van nieuwe effectgrenswaarden voor de paprikateelt

Binnen de paprikasector wordt onderkend dat CO₂ doseren met behulp van rookgassen uit vooral WKK installaties soms tot negatieve effecten op groei en productkwaliteit kan leiden. Er bestaat behoefte aan meer informatie met betrekking tot de relevantie van de huidige effectgrenswaarden en de mogelijkheden om schade aan het gewas te voorkomen.

Effectgrenswaarden specifiek voor paprika kunnen alleen afgeleid worden indien er voldoende kwantitatieve (experimentele) gegevens over effecten van NO_x en etheen op paprika beschikbaar zijn. Deze zijn echter maar zeer beperkt aanwezig en beperken zich tot een enzymatische reactie na blootstelling aan NO en het afvallen van plantendelen na blootstelling van etheen (zie Tabel 7). Uit de praktijk zijn wel incidenten bekend waarbij het plotseling afvallen van bloemknoppen en/of vruchten en groeiwijkingen bij paprika vaak is toegeschreven aan een kortdurende blootstelling aan een relatief hoge concentratie etheen. Van dergelijke schadegevallen is echter niet bekend wat de concentratie en blootstelduur is geweest en zijn daarom niet bruikbaar voor het afleiden van effectgrenswaarden. De set van gegevens die betrekking hebben op paprika is te beperkt om effectgrenswaarden uit af te leiden.

Tabel 6.6. *Overzicht van effecten van NO en etheen op paprika met bijbehorende blootstellingsgegevens (Uit: Anon., 2001 en Beaudry & Kays, 1988).*

Component	Effect-parameter	Concentratie (ppb)	Expositie-duur (uren)	Effect
NO (stikstofmonoxide)	Nitrietreductase	1524	18	remming
C ₂ H ₄ (etheen)	Abscissie bloemknoppen	10	120	54%
		100	120	81%
		1000	120	100%
	Abscissie vruchten (<10mm)	10	120	90%
		100	120	90%
		1000	120	100%
	Abscissie bladeren	10	120	geen
		100	120	geen
		1000	120	22%

Om schade aan kasgewassen te voorkomen worden in de glastuinbouw, en dus ook in de paprikateelt, tot op de dag van vandaag de door het toenmalige Instituut voor Plantenziektenkundig Onderzoek (IPO) en het Proefstation voor Bloemisterij en Glasgroente afgeleide generieke grenswaarden gebruikt (Anon., 1999; Tabel 6.7). Deze algemene grenswaarden zijn gebaseerd op:

- Experimenteel onderzoek gedurende de winterperiode (weinig licht) met gesloten ramen. Gewassen zijn onder die omstandigheden relatief gevoelig voor luchtverontreinigingscomponenten.
- Literatuurgegevens van verschillende effectparameters bij verschillende plantensoorten.
- Er wordt onderscheid gemaakt tussen acuut en chronisch zonder definiëring van de blootstelduur.

Tabel 6.7. *Door het toenmalige Instituut voor Plantenziektenkundig Onderzoek (IPO) en het Proefstation voor Bloemisterij en Glasgroente afgeleide effectgrenswaarden (ppb) ter voorkoming van beschadiging van kasgewassen (Anon., 1999).*

Gas	Acuut (ppb)	Chronisch (ppb)
Ozon (O ₃)	100	28
Etheen (C ₂ H ₄)	50	8
Stikstofmonoxide (NO)	1000	250
Stikstofdioxide (NO ₂)	600	132
Zwavel dioxide (SO ₂)	70	15
Ammoniak (NH ₃)	3300	197

In het licht van de bovenstaand geschetste problematiek deed zich de vraag voor of deze algemene grenswaarden nog voldoende bescherming bieden gezien de ontwikkeling die de glastuinbouw heeft doorgemaakt. Dit betreft vooral schaalvergroting, gebruik van nieuwe, meer dichte kassen, complexere installaties zoals WKK's. Dit vormde de aanleiding voor deze studie waarvoor is nagegaan of er na vaststelling van de grenswaarden door IPO en PBG nog relevante informatie met betrekking tot NO_x en etheen beschikbaar is gekomen. Op grond van de resultaten van deze studie wordt voorgesteld de grenswaarden ter bescherming van kasgewassen voor NO_x en etheen bij te stellen naar concentraties zoals in Tabel 6.8 zijn weergegeven.

Tabel 6.8. Voorstel voor effectgrenswaarden (ppb) ter voorkoming van negatieve effecten op planten als gevolg van blootstelling aan NO_x en etheen (deze studie).

Gas	Concentratie (ppb)	Tijdsduur
Stikstofoxiden (NO_x)	40	24-uur
	16	Jaar
Etheen (C_2H_4)	11	8 uur
	5	4 weken

De voorgestelde effectgrenswaarden zijn afgeleid uit gegevens van begassingsexperimenten onder laboratoriumcondities aan veel verschillende plantensoorten. Onderstaand wordt een toelichting gegeven over de relevantie van de effectgrenswaarden voor planten in het algemeen en kasgewassen zoals paprika in het bijzonder:

- De experimentele gegevens die ten grondslag liggen aan de voorgestelde effectgrenswaarden hebben betrekking op verschillende effectparameters zoals reductie van groei en opbrengst, remming van de fotosynthese, remming enzymatische processen, verwelking, chlorose en afwijkende groei. Effecten op deze algemene fysiologische en biochemische processen zijn bij veel verschillende plantensoorten vastgesteld. De respons van paprika wijkt daar waarschijnlijk niet sterk van af. Dit blijkt ook uit de beperkte effectgegevens die van paprika bekend zijn (zie Figuur 3 en 4). Het is dus aannemelijk dat deze algemene grenswaarden ook voldoende bescherming bieden voor de paprikateelt.
- De effectgrenswaarde voor langdurende blootstelling aan etheen is laag en ligt op het niveau van de natuurlijke achtergrondconcentratie van ca. 4 ppb.
- De effectgrenswaarden zijn afgeleid uit gegevens van begassingsexperimenten onder laboratorium- of kascondities. In deze omstandigheden zijn planten gevoeliger voor etheen dan in de veldsituatie. Deze conclusie wordt ondersteund door Abeles & Heggstad (1973) die fytoxische effecten van lage concentraties van etheen waarnamen in groeikamers terwijl planten buiten normaal leken te functioneren bij blootstellingen aan vergelijkbare concentraties. De effectgrenswaarden zijn dan ook meer relevant voor kasgewassen, waaronder paprika dan voor planten in een veldsituatie.
- Op grond van het vorige punt kan worden geconcludeerd dat de effectgrenswaarden een overschatting zijn van de fytoxische effecten in de veldsituatie.
- In de meeste experimenten was sprake van continue blootstelling terwijl blootstelling aan rookgassen in kassen als gevolg van CO_2 dosering een discontinu karakter heeft. Het is aannemelijk dat planten minder sterk reageren op een dergelijke discontinue blootstelling dan op een continue o.a. als gevolg van het optreden van herstelmechanismen (Tonneijck *et al.*, 2000; Van Raay, 1980).

6.5 Consequenties voor de CO_2 dosering uit WKK's

Uit concentratiemetingen in kassen (Van Dijk *et al.*, 2003) werd geconcludeerd dat telers door toepassing van rookgassen voor CO_2 dosering uit WKK installaties een risico introduceren wat betreft de kasluchtkwaliteit. Uit de metingen bleek dat de NO_x concentraties hoog kunnen oplopen met mogelijk nadelige gevolgen voor het gewas. Door de tendens naar meer gesloten kassen en het doseren met hogere CO_2 concentraties zal het risico van het

'meedoseren' van risicovolle componenten groter worden. Een verhoogd risico wil niet zeggen dat er per definitie negatieve effecten aan het gewas zullen optreden. Dit hangt namelijk niet alleen af van het concentratieniveau maar ook van factoren zoals de gevoeligheid van de plantensoort voor de betreffende component, de klimaatsomstandigheden in de kas en eventuele andere stressoren (andere luchtverontreinigingscomponenten, ziekten en plagen).

Om het risico op schade aan gewassen binnen aanvaardbare grenzen te houden moet de luchtkwaliteit in kassen aan bepaalde eisen voldoen. Deze studie heeft duidelijk gemaakt dat er voldoende aanleiding is om de effectgrenswaarden voor vooral NO_x en in mindere mate voor etheen naar beneden bij te stellen. De verwachting is dat indien de effectgrenswaarden niet meer worden overschreden dit voldoende bescherming biedt voor een schadevrije teelt van kasgewassen in het algemeen en de teelt van paprika in het bijzonder.

Uit het onderzoek van Van Dijk *et al.* (2003) bleek ook dat kans op schadelijke effecten afhankelijk is van factoren als bedrijf, seizoen en component. Het stellen van generieke kwaliteitseisen aan WKK's alleen is dus onvoldoende om problemen van slechte luchtkwaliteit bij CO_2 dosering uit WKK's te beheersen. Ter voorkoming van schade wordt aanbevolen de ontwikkeling van een monitoringsysteem in gang te zetten voor continue bewaking van NO_x en etheen concentraties op plantniveau bij CO_2 dosering door middel van rookgassen. Inzicht in de concentraties maakt duidelijk of effectgrenswaarden dreigen te worden overschreden. Op dergelijke momenten kan nog worden ingegrepen in tegenstelling tot de huidige situatie waarbij problemen pas aan het licht komen als de productie en/of kwaliteit van het gewas achterblijven. Het verloop van de NO_x concentraties (mogelijk ook van etheen) liep niet parallel met het verloop van de CO_2 concentratie. Blijkbaar geldt voor NO_x concentraties een andere dynamiek dan voor CO_2 . Op grond hiervan is het niet aan te bevelen de CO_2 concentratie in de kas als maatstaf te nemen voor het inschatten van risicovolle concentraties aan rookgassen (NO_x en etheen) in de kas.

Samenvattend kan geconcludeerd worden dat de kwaliteit van rookgassen voor CO_2 dosering verbeterd moet worden om veilig te kunnen doseren in de toekomst. Dit betekent dat er technische verbeteringen nodig zijn met betrekking tot de emissies van de installaties en/of de reinigingstechniek. Verder is het aan te bevelen een bewakingssysteem te installeren waarmee concentraties van de meest risicovolle componenten op plantniveau kunnen worden gemeten.

7 Communicatie

Over dit project zijn de volgende artikelen in de vakpers verschenen:

'CO₂ bij paprika: meerwaarde en beperkingen', Gewasnieuws Paprika 95(5), 16 december 2006, door Anja Dieleman

'Enquete CO₂ in paprika', Gewasnieuws Paprika 10(1), 3 februari 2007 door Peter Graven

'Resultaten enquetes CO₂ paprika', Gewasnieuws Paprika 10(3), 26 mei 2007 door Anja Dieleman, Jeroen Zwinkels en Arie de Gelder.

'Veilig CO₂ blijven doseren uit WKK', Groenten & Fruit 31, 2007, pagina's 16 en 17, door Tom Dueck en Chris van Dijk

'Effectgrenswaarden van rookgassen in de kas', Gewasnieuws Paprika 10(4), 21 juli 2007, door Tom Dueck

'Geen vertrouwen meer in CO₂ uit eigen WKK', Vakblad voor de Bloemisterij 32, 2007, pagina's 36 en 37, door Harmen Kamminga.

'Effect CO₂ op ontwikkeling paprika is complex', Groenten & Fruit 34, 2007, pagina's 18 en 19, door Arie de Gelder, Anja Dieleman en Jeroen Zwinkels.

'Beïnvloedt de plantbelasting de fotosynthese?', Gewasnieuws Paprika 10 (5): 6, 29 september 2007, door Anja Dieleman

Nieuwe simulatietool voor optimaal CO₂ doseren: 'CO₂-viewer', door Feije de Zwart. www.glastuinbouw.wur.nl. Hier is ook het rekenprogramma te downloaden.

8 Literatuur

- Abeles, F.B. & H.E. Heggestad, 1973.
Ethylene: an urban air pollutant. *Journal of the Air Pollution Control Association* 23:517-521.
- Abeles, F.B., P.W. Morgan & M.E. Salveit Jr, 1992.
Ethylene in plant biology, Academic Press Inc., San Diego, USA.
- Acocock, B., D.W. Hand, J.H.M. Thornley & J. Warren Wilson, 1976.
Photosynthesis in stands of green peppers. An application of empirical and mechanistic models to controlled-environment data. *Annals of Botany* 40: 1293-1307.
- Acocock, B., 1991.
Modeling canopy photosynthetic response to carbon dioxide, light interception, temperature and leaf traits. In: K.J. Boote & R.S. Loomis (eds). *Modeling crop photosynthesis from biochemistry to canopy*. Crop Science Society of America, Madison, USA, CSSA special publication 19: 41-55.
- Aldenberg, T. & W. Slob, 1993.
Confidence limits for hazardous concentrations based on logistically distributed NOEC toxicity data. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 25:48-63.
- Anderson, L.S. & T.A. Mansfield, 1979.
The effects of nitric oxide pollution on the growth of tomato. *Environmental Pollution* 20:113-121.
- Anderson, J.M. & C.B. Osmond, 1987.
Shade-sun responses: compromises between acclimation and photoinhibition. In: *Photoinhibition*, Kyle, D.J., Osmond, C.B., Arntzen, C.J. (Eds.). Elsevier, Amsterdam: 1-38.
- Anonymus, 1987.
The effects of nitrogen on vegetation. In: *Air quality guidelines for Europe*. Copenhagen, WHO Regional Office for Europe, 1987, pp. 373-385 (WHO Regional Publications, European Series, No. 23).
- Anonymus, 1999.
CO₂ in de glastuinbouw. Brochure van het Proefstation voor Bloemisterij en Glasgroente. Aalsmeer/Naaldwijk. 126 pp.
- Anonymus, 2001.
Air Quality Guidelines for Europe 2000, second edition. World Health Organization, Regional Publications, European Series No. 91. Regional Office for Europe, Copenhagen.
- Beaudry, R.M. & S.J. Kays, 1988.
Effect of ethylene source on abscission of pepper plant organs. *HortScience* 23:742-744.
- Bruggink, G.T., H.G. Wolting, J.H.A. Dassen & V.G.M. Bus, 1988.
The effect of nitric oxide fumigation at two CO₂ concentrations on net photosynthesis and stomatal resistance of tomato (*Lycopersicon lycopersicum* L. cv. Abunda). *New Phytologist* 110:185-191.
- Buwalda, F., E.J. van Henten, A. de Gelder, J. Bontsema & J. Hemming, 2006.
Toward an optimal control strategy for sweet pepper cultivation. 1. A dynamic crop model. *Acta Hort.* 718: 367-374.
- Caporn, T.M., D.W. Hand, T.A. Mansfield & A.R. Wellburn, 1994.
Canopy photosynthesis of CO₂-enriched lettuce (*Lactuca sativa* L.). Response to short-term changes in CO₂, temperature and oxides of nitrogen. *New Phytologist* 126:45-52.
- Daunight, H.J. & F. Lenz, 1973.
Das Verhlaten von Paprikapflanzen mit unterschiedlichem Fruchtbehang bei behandlung met 3 CO₂ Konzentrationen. *Gartenbauwissenschaft* 38: 533-546.
- Dieleman, J.A., E. Meinen, A. Elings, D. Uenk, J.J. Uittien, A.G.M. Broekhuijsen, P.H.B. de Visser & L.F.M. Marcelis, 2003.
Effecten van langdurig hoog CO₂ op groei en fotosynthese bij paprika. Nota 274, Plant Research International, 32 pp.
- Dieleman, J.A. & H.F. de Zwart, 2004.
Optimaal besturen van temperatuur en CO₂ op basis van fotosynthese en energie. Nota 323, Plant Research International, 47 pp.

- Dieleman, J.A., E. Meinen, L.F.M. Marcelis, H.F. de Zwart & E.J. van Henten, 2005.
Optimisation of CO₂ and temperature in terms of crop growth and energy use. *Acta Horticulturae* 691: 149-154.
- Ehler, N. & P. Karlsen, 1993.
Optico- A model based real-time expert system for dynamic optimization of CO₂ enrichment of greenhouse vegetable crops. *Journal of Horticultural Science* 68(4): 485-494.
- Esmeijer, M. (red), 1999.
CO₂ in de Glastuinbouw, uitgave van PBG Aalsmeer/Naaldwijk. (In 2007 opgegaan in Wageningen UR Glastuinbouw).
- Farquhar, G.D., S. von Caemmerer & J.A. Berry, 1980.
A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C3 species. *Planta* 149: 78-90.
- Farquhar, G.D., S. von Caemmerer & J.A. Berry, 2001.
Models of photosynthesis. *Plant Physiology* 125: 42-45.
- Gelder, A. de, M. Raaphorst, M. de Hoon & F. Breugem, 2007.
Paprikateelt in de gesloten kas. Wageningen UR Glastuinbouw. Rapport project 32415022.
- Grashof, K., C. Stanghellini, F. Kempkes, A. Elings, E. van Os & L. Marcelis, 2004.
Energie besparing door bladplukken bij paprika: Haalbaarheidsstudie op basis van modellen. Wageningen UR, Plant Research International, nota 310.
- Hall, A.J., 1977.
Assimilate Source-Sink Relationships in *Capsicum annuum* L. I. The dynamics of growth in fruiting and deflorated plants. *Australian Journal of Plant Physiology* 4: 623-636.
- Hall, A.J. & C.J. Brady, 1977.
Assimilate Source-Sink Relationships in *Capsicum annuum* L. II. Effects of fruiting and defloration on the photosynthetic capacity and senescence of leaves. *Australian Journal of Plant Physiology* 4: 771-783.
- Hall, A.J. & F.L. Milthorpe, 1978.
Assimilate Source-Sink Relationships in *Capsicum annuum* L. III. The effects of fruit excision on photosynthesis an leaf an stem carbohydrates. *Australian Journal of Plant Physiology* 5: 1-13.
- Heck, W.W., R.H. Daines & I.J. Hindawi, 1970.
Other phytotoxic pollutants. In: J.S. Jacobson & A.C. Hill (Eds.), *Recognition of air pollution injury to vegetation: A pictorial atlas*. Air Pollution Control Association, Pittsburg, F1-F24.
- Heij, G. & T. Rijdsdijk, 1995.
Te veel CO₂ kost productie. *Groenten en Fruit* 29: 15.
- Heißner, A. & H.P. Kläring, 2000.
Räumliche und zeitliche Verteilung der Blattphotosynthese in einem Paprikabestand (*Capsicum annuum* L.). *Gartenbauwissenschaft* 65(2): 147-153
- Heißner, A., 1997.
Der CO₂-Gaswechsel von Paprikapflanzen in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke, der CO₂-Konzentration, der Lufttemperatur und dem Dampfdrucksättigungsdefizit der Luft: Messungen und Modell. *Gartenbauwissenschaft* 62(2): 78-90.
- Hill, A.C. & J.H. Bennet, 1970.
Inhibition of apparent photosynthesis by nitrogen oxides. *Atmospheric Environment* 4: 341-348.
- Jacobson, J.S., 1977.
The effects of photochemical oxidants on vegetation. *Verein Deutscher Ingenieure - Berichte* 270: 163-173.
- Kiel, A., E.M. Nederhof & T. Rijdsdijk, 1991.
Berekening toegestane concentratie schadelijke gassen in rookgas t.b.v. CO₂ bemesting in de glastuinbouw. Uit: COGEN Projects Rapport CO₂ bemesting met rookgassen van W/K-gasmotoren. November 1998, Driebergen-Rijsenburg.
- Klapwijk, D. & C.F.M. Wubben, 1984.
Het effect van CO₂ bij de opweek van tomaat, komkommer en paprika. PTG intern verslag no 23.
- Lane, P.I. & J.N.B. Bell, 1984.
The effects of simulated urban air pollution on grass yield. Part 2. Performance of *Lolium perenne*, *Phleum pratense* and *Dactylus glomerata* fumigated with SO₂, NO₂ and/or NO. *Environmental Pollution* 8:97-124.

- Marcelis, L.F.M., A. Elings, M.J. Bakker, E. Brajeul, J.A. Dieleman, P.H.B. de Visser & E. Heuvelink 2006.
Modelling dry matter production and partitioning in sweet pepper. *Acta Horticulturae* 718: 121-128.
- Marcelis, L.F.M., E. Heuvelink, L.R. Baan Hofman-Eijer, J. den Bakker & L.B. Xue, 2004.
Flower and fruit abortion in sweet pepper in relation to source and sink strength. *Journal of Experimental Botany* 55(406): 2261-2268.
- Marcelis, L.F.M & L.R. Baan Hofman-Eijer, 1995.
Growth analysis of sweet pepper fruits (*Capsicum annuum* L.). *Acta Horticulturae* 412: 470-478.
- McCune, D.C., 1969.
On the establishment of air quality criteria, with reference to the effects of atmospheric fluorine on vegetation. *Air Quality Monograph* 69-3, American Petroleum Institute, New York, 33 pp.
- Morgan, S.A., J.A. Lee & T.W. Ashenden, 1992.
Effects of nitrogen oxides on nitrate assimilation in bryophytes. *New Phytologist* 120:89-97.
- Mortensen, L.M., 1985.
Nitrogen oxides produced during CO₂ enrichment. II. Effects on different tomato and lettuce cultivars. *New Phytologist* 101: 411-415.
- Nederhoff, E., 1994.
Effects of CO₂ concentration on photosynthesis, transpiration and production of greenhouse fruit vegetable crops. *Dissertatie Wageningen Universiteit*
- Nederhoff, E., 1987.
CO₂ doseren: wanneer, hoelang en hoeveel? *Groenten en Fruit* 32-35.
- Nilwik, H.J.M., 1980.
Photosynthese of whole sweet pepper plants 2. Response to CO₂ concentration, irradiance and temperature as influenced by cultivation conditions. *Photosynthetica* 14(3): 382-391.
- Niu, G., D. Rodriguez & Y.T. Wang, 2006.
Impact of drought and temperature on growth and leaf gas exchange of six bedding plant species under greenhouse conditions. *HortScience* 41(6): 1408-1411.
- Ottosen, C.A., E. Rosenqvist & L. Sørensen, 2003.
Effect of a dynamic climate control on energy saving, yield and shelf life of spring production of bell peppers (*Capsicum annuum* L.) *European Journal of Horticultural Science* 68(1): 26-31.
- Pearson, J. & G.R. Stewart, 1993.
The deposition of atmospheric ammonia and its effects on plants. *Tansley Review* 56. *New Phytologist* 125: 283-305 .
- Potters, J., 2003.
CO₂-dosering in de zomer. *Groenten en Fruit* 33: 26-27.
- Posthumus, A.C., A.E.G. Tonneijck & L.J. van der Eerden, 1989.
Exposure-effect relationships for plants in relation to several air pollutants. In: L. Brasser & W. Mulder (Eds.), *Proceedings of the 8th World Clean Air Congress, The Hague*. Elsevier, Amsterdam, 13-18.
- Powles, S.B., 1984.
Photoinhibition of photosynthesis induced by visible light. *Annual Review of Plant Physiology* 35: 15-44.
- Powles, S.B., J.A. Berry & O. Björkman, 1983.
Interaction between light and chilling temperature on the inhibition of photosynthesis in chilling sensitive plants. *Plant Cell and Environment* 6: 117-123.
- Ramos, C. & A.E. Hall, 1982.
Relationships between leaf conductance, intercellular CO₂, partial pressure and CO₂ uptake rate in two C₃ and two C₄ plant species. *Photosynthetica* 16(3): 343-355.
- Saxe, H. & O. Voight Christensen, 1984.
Effects of carbon dioxide with and without nitric oxide pollution on growth, morphogenesis and production time of potted plants. *Acta Horticulturae* 162:179-186.
- Saxe, H., 1986.
Effects of NO₂ and CO₂ on net photosynthesis, dark respiration and transpiration of potplants. *New Phytologist* 103: 185-197.

- Saxe, H., 1994.
Relative sensitivity of greenhouse pot plants to long-term exposures of NO and NO₂-containing air. *Environmental Pollution* 85: 283–290.
- Schepers, H., W. Kromdijk & O. van Kooten, 2006.
The conveyer belt model for fruit bearing vegetables: application to sweet pepper yield oscillations. *Acta Horticulturae* 718: 43-50.
- Swinkels, G.L.A.M. & H.F. de Zwart, 2002.
Optimaal gebruik van CO₂ in de glasgroententeelt. Wageningen IMAG nota P 2002-68.
- Thornley, J.H.M., D.W. Hand & J. Warren Wilsen, 1992.
Modeling light absorption and canopy net photosynthesis of glasshouse row crops and application to cucumber. *Journal of Experimental Botany* 43: 383-391.
- Tonneijck, A.E.G. & C.J. van Dijk, 1994.
Toxicologische advieswaarden voor effecten van etheen op planten. AB-DLO rapport 15, Wageningen.
- Tonneijck, A.E.G. & C.J. van Dijk, 2000.
Effecten van etheen op planten rond lokale bronnen. Een risico-evaluatie. *Plant Research International Nota* 42, Wageningen, 22 pp.
- Tonneijck, A.E.G., 1989.
Evaluation of ozone effects on vegetation in The Netherlands. In: T Schneider, S.D. Lee, G.J.R. Wolters & L.D. Grant (Eds.), *Atmospheric ozone research and its policy implications. Studies in Environmental Science* 35. Elsevier, Amsterdam, 251-260.
- Turner, A.D. & H.C. Wien, 1994.
Photosynthesis, dark respiration and bud sugar concentrations in pepper cultivars differing in susceptibility to stress-induced bud abscission. *Annals of Botany* 73: 623-628.
- US Department of Health, Education and Welfare, 1970.
Air quality criteria for hydrocarbons. National Air Pollution Control Administration, Washington D.C., 85 pp.
- Van der Eerden, L.J. & C.J. van Dijk, 1993.
Effecten van atmosferische fluoriden op planten. Evaluatie van de wetenschappelijke basis voor normstelling. CABO-DLO rapport 185, CABO-DLO, Wageningen, 45 pp.
- Van Dijk, C.J., J.P. van der Knaap, T.J. Dijkstra, J.J. Hanemaaijer & A.E.G. Tonneijck, 2003.
Rookgasschade in beeld? *Plant Research International Nota* 255, Wageningen, 26 pp.
- Vereecken, P. & M. Verheul, 1985.
Adaptatie verschijnenselen bij CO₂-dosering. Doctoraal verslag Landbouw Universiteit Wageningen.
- Wellburn, A.R., 1990.
Why are atmospheric oxides of nitrogen usually phytotoxic and not alternative fertilizers? *Tansley Review* 24. *New Phytologist* 115: 395–429.
- Yang, Y.S., J.M. Skelly & B.I. Chevone, 1983.
Effects of pollutant combinations at low doses on growth of forest trees. *Aquilo. Serie Botanica* 19: 406–418.

Bijlage I. Vragenlijst enquête

Vragenlijst voor Paprikatelers t.b.v. CO₂ project Paprika

Bedrijfsnaam:
Contactpersoon:
Adres:
Postcode:
Woonplaats:
Telefoonnummer contactpersoon:
Oppervlakte glas:
Ras(-sen) in 2006:

Vragen

- ◆ Wat was de productie in 2006
Kleur: kg/m²
- ◆ Teeltsysteem:
 - Matten op grond
 - Matten op goten
 - V-systeem rijen per kapmaat van meter.
 - Traditioneel systeem paden per kapmaat van meter.
 -
 -
- ◆ Aantal stengels per plant:
.....
- ◆ Aantal stengels per m²:
.....
- ◆ Bouwjaar glasopstanden:
.....
- ◆ Is er een warmteopslag aanwezig
 - Ja m³/ha
 - Nee
- ◆ Hoe wordt er CO₂ gedoseerd?
 - via de ketel
 - Wat is het NO_x gehalte op het branderrapport
.....
 - Wat is de leeftijd van uw brander?
.....

- 0 rookgasreiniger op WKK
 - Leverancier
 - Sinds (jaar)
 - Vermogen WKK.....
 - Type reiniger
 - Hebt u ooit het vermoeden gehad gewasschade of minder productie te hebben gehad door rookgassen?... ja / nee
 - Indien ja, schadebeeld
- 0 als zuivere CO₂
via leverancier:
- 0 via OCAP
- 0 anders

- ◆ Wat was uw totale gasverbruik in 2006 per kg/m²?
 - Jaar 2006 (van 1 januari t/m 31 december 2006) en
 - Teeltseizoen 2006

- ◆ Hoeveel kg CO₂ wordt er in de verschillende perioden van de teelt gedoseerd?
 - start teelt..... kg/m² tot..... ppm
 - vlak voor eerste kg/m² tot..... ppm
 - februari – april..... kg/m² tot..... ppm
 - mei – juni..... kg/m² tot..... ppm
 - juli – september kg/m² tot..... ppm
 - einde teelt..... kg/m² tot..... ppm

(Toelichting: 1 m³ gas bevat ongeveer 1,8 kg CO₂)

- ◆ Wat is volgens u de maximaal te doseren hoeveelheid CO₂ in de verschillende stadia van de teelt? Welke instelling wordt nagestreefd?
 - start teelt..... ppm
 - vlak voor eerste zetting..... ppm
 - februari – april..... ppm
 - mei – juni..... ppm
 - juli – september..... ppm
 - einde teelt..... ppm

- ◆ Wat zijn de starttijden/stoptijden van het CO₂ doseren?

- start teelt.....	Start	Stop
- vlak voor eerste zetting...	Start	Stop
- februari – april.....	Start	Stop
- mei – juni.....	Start	Stop
- juli – september.....	Start	Stop
- einde teelt.....	Start	Stop

- ◆ Wat is de branderstand gemiddeld bij het doseren op een mooie (zonnige) dag?
.....

- ◆ Hoeveel kg CO₂ wordt er in de zomer per ha per uur onder warme en droge omstandigheden (vochtdeficit >10) gedoseerd?
.....

- ◆ **Mijn gedachte over de te volgen strategie(ën) voor het doseren van CO₂ gedurende de dag is (noem factoren die bepalen wanneer en hoeveel u doseert)**.....
.....
.....
.....
.....

Hieronder volgen een aantal stellingen, die van toepassing kunnen zijn op uw situatie en waarover uw mening wordt gevraagd.

U kunt uw antwoord kort toelichten.

- Met de toepassing van CO₂ stuur ik heel gericht

Helemaal mee eens	Mee eens	Neutraal	Mee oneens	Helemaal mee oneens

Toelichting :

- Er is een duidelijke strategie achter het doseren van CO₂

Helemaal mee eens	Mee eens	Neutraal	Mee oneens	Helemaal mee oneens

Toelichting :

- Er wordt CO₂ gedoseerd omdat andere collega's er goede resultaten mee halen

Helemaal mee eens	Mee eens	Neutraal	Mee oneens	Helemaal mee oneens

Toelichting :

- Er wordt CO₂ gedoseerd omdat het leidt tot meer zetting

Helemaal mee eens	Mee eens	Neutraal	Mee oneens	Helemaal mee oneens

Toelichting :

- Door het doseren van CO₂ oogst ik meer kg per m²

Helemaal mee eens	Mee eens	Neutraal	Mee oneens	Helemaal mee oneens

Toelichting :

- Door het doseren van CO₂ oogst ik grovere vruchten

Helemaal mee eens	Mee eens	Neutraal	Mee oneens	Helemaal mee oneens

Toelichting :

- Er is een maximaal toelaatbare concentratie CO₂ in de verschillende stadia van de teelt

Helemaal mee eens	Mee eens	Neutraal	Mee oneens	Helemaal mee oneens

Toelichting :

- Door het doseren van CO₂ oogst ik zwaardere vruchten

Helemaal mee eens	Mee eens	Neutraal	Mee oneens	Helemaal mee oneens

Toelichting :

- Door het doseren van CO₂ oogst ik meer vruchten per m²

Helemaal mee eens	Mee eens	Neutraal	Mee oneens	Helemaal mee oneens

Toelichting :

- Bij het doseren met CO₂ houd ik rekening met licht

Helemaal mee eens	Mee eens	Neutraal	Mee oneens	Helemaal mee oneens

Toelichting :

- Bij het doseren met CO₂ houd ik rekening met luchtvochtigheid

Helemaal mee eens	Mee eens	Neutraal	Mee oneens	Helemaal mee oneens

Toelichting :

- Bij het doseren met CO₂ houd ik rekening met temperatuur

Helemaal mee eens	Mee eens	Neutraal	Mee oneens	Helemaal mee oneens

Toelichting :

- Door het doseren van CO₂ vergroot ik het bladoppervlak ten bate van de fotosynthese

Helemaal mee eens	Mee eens	Neutraal	Mee oneens	Helemaal mee oneens

Toelichting :

- Door het doseren van CO₂ wordt de fotosynthese vergroot

Helemaal mee eens	Mee eens	Neutraal	Mee oneens	Helemaal mee oneens

Toelichting :

- Het doseren van CO₂ is afhankelijk van het tijdstip van de dag

Helemaal mee eens	Mee eens	Neutraal	Mee oneens	Helemaal mee oneens

Toelichting :

- Het doseren van CO₂ is afhankelijk van de weersomstandigheden

Helemaal mee eens	Mee eens	Neutraal	Mee oneens	Helemaal mee oneens

Toelichting :

- Het doseren van CO₂ is afhankelijk van de stand van het gewas

Helemaal mee eens	Mee eens	Neutraal	Mee oneens	Helemaal mee oneens

Toelichting :

