



WAGENINGENUR
For quality of life

CO₂-opname in een gesloten kas

Marcel Raaphorst



© 2011 Wageningen, Wageningen UR Glastuinbouw

Wageningen UR Glastuinbouw

Adres : Violierenweg 1, 2665 MV Bleiswijk
: Postbus 20, 2665 ZG Bleiswijk
Tel. : 0317 - 48 56 06
Fax : 010 - 522 51 93
E-mail : glastuinbouw@wur.nl
Internet : www.glastuinbouw.wur.nl

Inhoudsopgave

Samenvatting		5
1	Inleiding	7
	1.1 Doelstellingen	8
	1.2 Aanpak	8
	1.2.1 Methode 1	9
	1.2.2 Methode 2	9
2	Berekeningen gewasopname van CO ₂	11
	2.1 Methode 1: Concentratieverschil kaslucht en luchtslang	11
	2.1.1 Hoeveelheid lucht door de ventilator	11
	2.1.2 Verschil in CO ₂ -concentratie tussen de meetpunten	11
	2.1.3 Resultaten	12
	2.2 Methode 2: Dosering, luchtuitwisseling en concentratiemutaties	15
	2.2.1 CO ₂ -dosering (D)	15
	2.2.2 Concentratie buitenlucht (Cb)	15
	2.2.3 Schatting van de hoeveelheid buitenlucht (x*V)	16
	2.2.4 Berekening CO ₂ opname met methode 2	17
3	Toepassing methode 2 bij Sunergiekas	21
	3.1 Methode	21
	3.2 Resultaten	22
	3.3 Resultaten per fase	23
4	Discussie, conclusies en aanbevelingen	25
	4.1 Discussie	25
	4.1.1 Lichtverzaadiging	25
	4.2 Conclusies	25
	4.2.1 Methode 1	25
	4.2.2 Methode 2	25
	4.2.3 Berekende gewasopname	26
	4.3 Aanbevelingen	26
5	Controle op de CO ₂ -metingen bij Lans	27
6	Controle voor schatting aandeel buitenlucht (x) bij Lans	31

Samenvatting

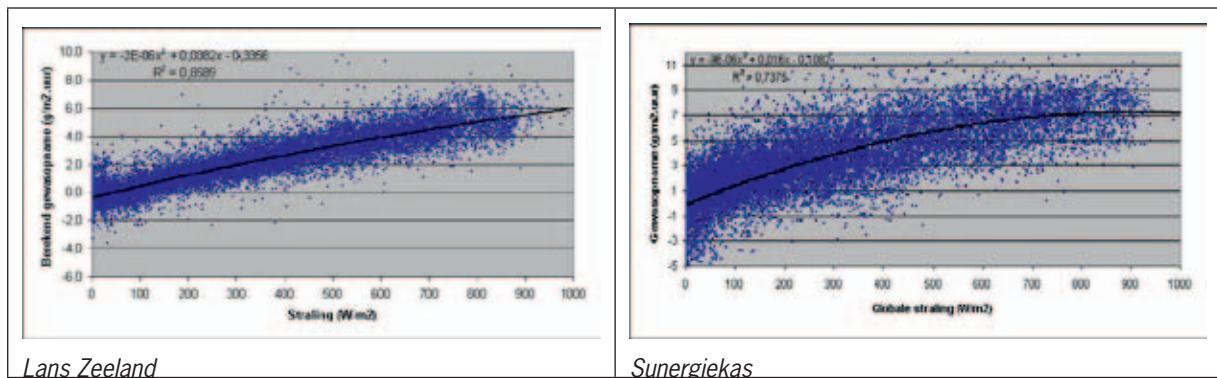
In het kader van Kas als Energiebron wordt onder andere onderzoek gedaan bij Lans Zeeland te Rilland en ook bij het Innovatie en Democentrum (IDC) te Bleiswijk. Voor de gesloten kas van Lans Zeeland en voor de Sunergiekas van het IDC zijn twee methoden ontwikkeld om de gewasopname van CO₂ te meten. Bij methode 1 worden de hoeveelheid en de CO₂-concentratie van de ingeblazen en uitgeblazen lucht van elkaar afgetrokken. Wat resteert is de gewasopname. Bij methode 2 worden de dosering, de verandering van de CO₂-concentratie in de kas en het product van de luchtuitwisseling en het concentratieverschil tussen kas- en buitenlucht met elkaar vergeleken.

Zowel methode 1 als methode 2 zijn toepasbaar voor Lans Zeeland, al gaf methode 1 vanwege zijn eenvoud een nauwkeuriger beeld dan methode 2. Voor de Sunergiekas kan alleen methode 2 worden toegepast omdat CO₂ niet via de luchtslangen, maar via een apart slangenstelsel wordt gedoseerd.

Bij Lans Zeeland volgde in de zomer van 2009 de berekende CO₂-gewasopname de lijn van de globale straling vrijwel altijd op de voet. Toch waren er een aantal dagen waarbij de gewasopname minder hoog lag. Mogelijk kwam dit doordat op sommige van deze dagen net blad was geplukt, maar daar zijn niet alle afwijkingen mee verklaard. Als alle berekende gewasopnamen worden uitgezet tegen de straling, dan blijkt een vrijwel rechte regressielijn te ontstaan (zie figuur a). Aangezien niet exact bekend is hoe groot het luchtdebiet is geweest door de luchtslangen is de absolute waarde aan de Y-as onbetrouwbaar. De verhouding tussen de berekende waarden is echter wel betrouwbaar.

Bij de Sunergiekas was de berekende gewasopname aan meer ruis onderhevig. Dit uitte zich in een lijn die schommelde rond de lijn van de globale straling. In figuur a blijkt bovendien dat de gewasopname boven 500 W/m² globale straling minder sterk stijgt.

Figuur a: Berekende gewasopname uitgezet tegen de globale straling bij Lans Zeeland en de Sunergiekas



Het aantal uren dat met een lage CO₂-concentratie (<400 ppm) werd geteeld was bij de Sunergiekas 0 en bij Lans Zeeland overdag 140 uur en dan vooral bij lage lichtniveaus in de morgen en de avond. De berekende gewasopname was gedurende deze uren veel lager dan bij hoge CO₂-concentraties, maar het aantal gemeten uren is te laag om aan te geven hoe groot de invloed van CO₂ is geweest.

Hoewel sommige uitzonderingen nog niet zijn verklaard en mogelijk moeten worden toegekend aan (tijdelijk) foutieve metingen, lijkt het erop dat de fotosynthese bij een tomatengewas tot een temperatuur van 30°C nauwelijks aan hittestress onderhevig is. Om hier meer zekerheid over te krijgen zou bij een vervolgonderzoek vooral meer aandacht moeten worden besteed aan de gerealiseerde luchtuitwisseling.

1 Inleiding

Koeling en verwarming met behulp van warmtepompen en opslag van warmte en koude in de aquifer wordt ook wel (semi)-gesloten of geconditioneerd telen genoemd. Aangezien in geconditioneerde kassen het gebruik van fossiele energie kan worden beperkt, heeft Wageningen UR Glastuinbouw met financiering van het programma Kas als Energiebron teeltbegeleiding en monitoring uitgevoerd bij verschillende conditionerende bedrijven. In dit kader zijn vier rapporten verschenen:

1. CO₂-opname in een gesloten kas,
2. Conditionering bij biologische vruchtgroenten,
3. Teeltbegeleiding semi-gesloten Phalaenopsis,
4. Teeltbegeleiding geconditioneerde tomaat.

Dit rapport is de eerste uit de serie, waarin een verslag wordt gedaan over de gemeten en berekende momentane CO₂-opname door het gewas in een gesloten kas. De betreffende gesloten kas is onderdeel van het bedrijf van Lans Zeeland te Rilland. Het unieke van deze kas is dat het slechts enkele luchtramen bevat. De uitwisseling van kaslucht en buitenlucht kan zeer constant worden gehouden met behulp van ventilatoren en luchtkleppen.

Gedurende het eerste jaar van het project (2008) viel het op dat de CO₂-concentratie bij de gesloten kas van nauwelijks schokken vertoonde zoals dat gebruikelijk is op bedrijven met luchtramen. Overdag vormde de grafiek met de CO₂-concentratie bij wijze van spreken een spiegelbeeld met de lijn van de globale straling (zie Figuur 1). Ofwel, bij een constante dosering en een constante hoeveelheid buitenlucht was de CO₂-concentratie omgekeerd evenredig met de straling. Hiermee ontstond het idee dat dit bedrijf zeer geschikt zou kunnen zijn om de gewasopname van CO₂ te volgen.



Figuur 1. Straling (W/m²) en CO₂-concentratie (ppm) gedurende twee etmalen in 2008

Een vergelijkbare situatie betreft de Sunergiekas van het Innovatie en Democentrum (IDC) te Bleiswijk. Hier wordt in een kas van 500 m² zonder luchtramen buitenlucht gedoseerd. De hoeveelheden ingebrachte buitenlucht en zuivere CO₂ worden continu gemeten, zodat de hoeveelheid door het gewas opgenomen CO₂ relatief eenvoudig zou kunnen worden geschat.

1.1 Doelstellingen

- Het opzetten van momentane meting van de gewasopname van CO₂.
- Het vergelijken van de gewasopname met straling en CO₂-concentratie.

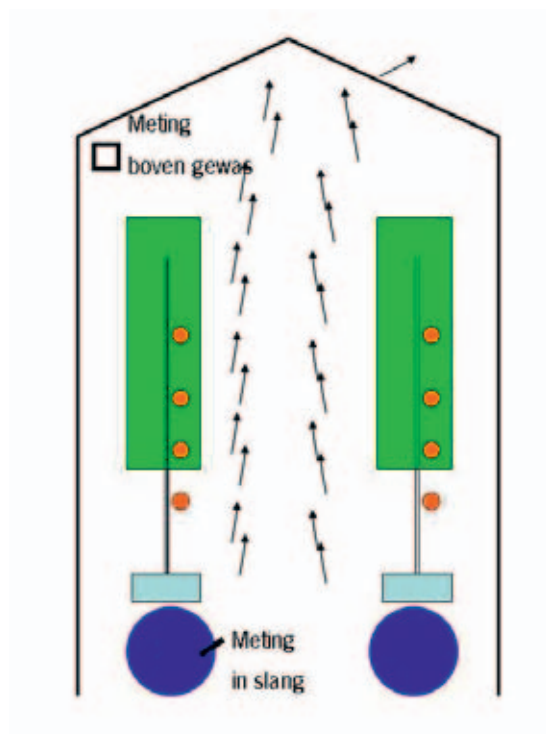
1.2 Aanpak

In het bedrijf van Lans Zeeland zijn twee extra CO₂-meters geplaatst (zie Figuur 2) en aanvullende metingen vanuit de klimaatcomputer verzameld. De voor dit onderzoek gebruikte metingen uit de klimaatcomputer zijn:

- Globale straling buiten de kas (W/m²)
- CO₂ concentratie in de kas (ppm)
- Ventilatorstand LBK onder (0..100%)
- Raamstand afluchting (Raam¹; 0..100%)
- Klepstand inlaat kaslucht LBK (Aut vent raam¹; 0..100%)
- Beschikbaarheid CO₂ (CO₂-beheer; kg/u)
- Doseerstand CO₂ (CO₂-dosering; kg/ha)

Verder zijn metingen geregistreerd die na analyse geen meetbare invloed hadden op de gewasopname van CO₂. Het betrof:

- Kastemperatuur (°C)
- Buitentemperatuur (°C)
- Windsnelheid (m/s)



Figuur 2. Plaatsing van de 2 CO₂ meters in de kas

In de Sunergiekas zijn de volgende zaken gemeten:

- Globale straling (W/m^2)
- Ventilatie (luchtuitswisseling) ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{uur}$)
- CO_2 -concentratie (ppm)
- CO_2 -dosering ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{uur}$)

De gegevens bij Lans Zeeland zijn geanalyseerd volgens twee methoden. In de Sunergiekas kon alleen met Methode 2 worden gemeten. Beide methoden worden hieronder en in hoofdstuk 2 uitgelegd.

1.2.1 Methode 1

Doordat bij Lans Zeeland in een gesloten kas een vrij constante luchtstroom langs het gewas gaat, die niet beïnvloed wordt door wind of raamstand, is de gewasopname van CO_2 te meten door het verschil in CO_2 -concentratie te bepalen tussen de luchtslang en de meetbox boven in het gewas (zie Figuur 2). Het product van dit concentratieverschil en luchtdebiet is de gewasopname (O_g) van CO_2 .

$$O_g = (C_l - C_k) * V * 44 / (0,024 * 10^6) \quad (\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{uur}) \quad \text{Vergelijking 1.}$$

C_k is hierbij de CO_2 -concentratie van de kaslucht, C_l de CO_2 -concentratie in de luchtslang (ppm). 44 (g/mol) is de molaire massa van CO_2 en 0,024 (m^3/mol) is het molair volume van lucht bij een temperatuur van 20°C en een luchtdruk van 1013 mbar. V is het luchtdebiet dat door de luchtslangen wordt geblazen.

1.2.2 Methode 2

Een tweede methode om momentaan de gewasopname van CO_2 te meten is het vergelijken van twee opeenvolgende CO_2 -metingen in de kas. Hoe sneller de concentratie daalt, hoe meer CO_2 blijkt uit de kas te verdwijnen. Overigens kan de gewasopname pas berekend worden als ook rekening wordt gehouden met het CO_2 -verlies aan de buitenlucht en de CO_2 -dosering.

$$O_g = D + (h * (C_{kt} - C_{k(t-1)}) * 10 - x * V * (C_k - C_b)) * 44 / (0,024 * 10^6) \quad (\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{uur}) \quad \text{Vergelijking 2.}$$

Hierbij is $h * (C_{kt} - C_{k(t-1)})$ de kashoogte (m) vermenigvuldigd met het CO_2 -kasconcentratieverschil tussen twee opeenvolgende metingen. 10 is het aantal metingen per uur. $x * V$ is het percentage buitenlucht in de luchtslang vermenigvuldigd met het totale volume door de luchtslang in $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{uur}$. $C_k - C_b$ is het verschil in CO_2 -concentratie kas en CO_2 -concentratie buiten (ppm). 44 is de molaire massa van CO_2 en 0,024 het molaire volume van lucht. D is de dosering van CO_2 ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{uur}$)

2 Berekeningen gewasopname van CO₂

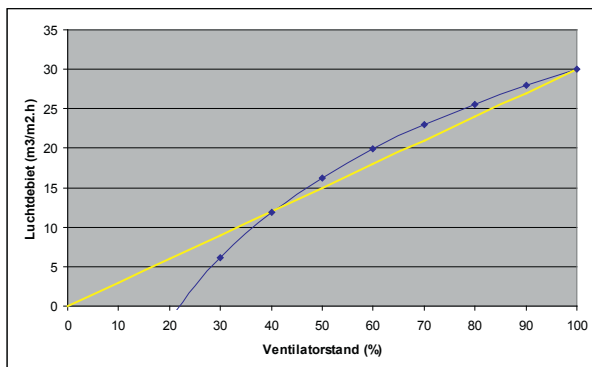
2.1 Methode 1: Concentratieverschil kaslucht en luchtslang

Voor methode 1 is het van belang om te weten hoeveel lucht er door de luchtslang wordt geblazen en wat het CO₂-concentratieverschil is tussen de kas en de luchtslang.

2.1.1 Hoeveelheid lucht door de ventilator

De ventilator staat vrijwel continu op 60%. Alleen boven een kastemperatuur van 26°C komt er voor iedere °C 10% ventilatorstand bij. Dit is in 2009 350 uren voorgekomen. Een ideale ventilator heeft een debiet dat recht evenredig is met de ventilatorstand. Aangezien ventilatoren in de praktijk enerzijds een drempelwaarde hebben voordat een laag toerental in voldoende druk wordt omgezet en anderzijds een hoger toerental leidt tot een toenemende interne wrijvingskracht, wordt verondersteld dat het luchtdebiet V in de LBK en de luchtslang van Lans Zeeland de volgende functie heeft:

$$V = 30 * \ln(\text{ventilatorstand}/0,22) / \ln(1/0,22) \text{ (m}^3/\text{m}^2\cdot\text{uur)} \quad \text{Vergelijking 3.}$$



Figuur 3. Geschat verband tussen ventilatorstand en luchtdebiet in de LBK in vergelijking met een lineair verband

Ook de klepweerstand kan relatief hoger worden als een van de kleppen gesloten is. Deze variatie in klepweerstand wordt echter vooralsnog verwaarloosd.

Met de gehanteerde formule varieert het berekende debiet bij een ventilatorstand van 60% tot 100% van respectievelijk 19,9 tot 30 m³/m²·uur.

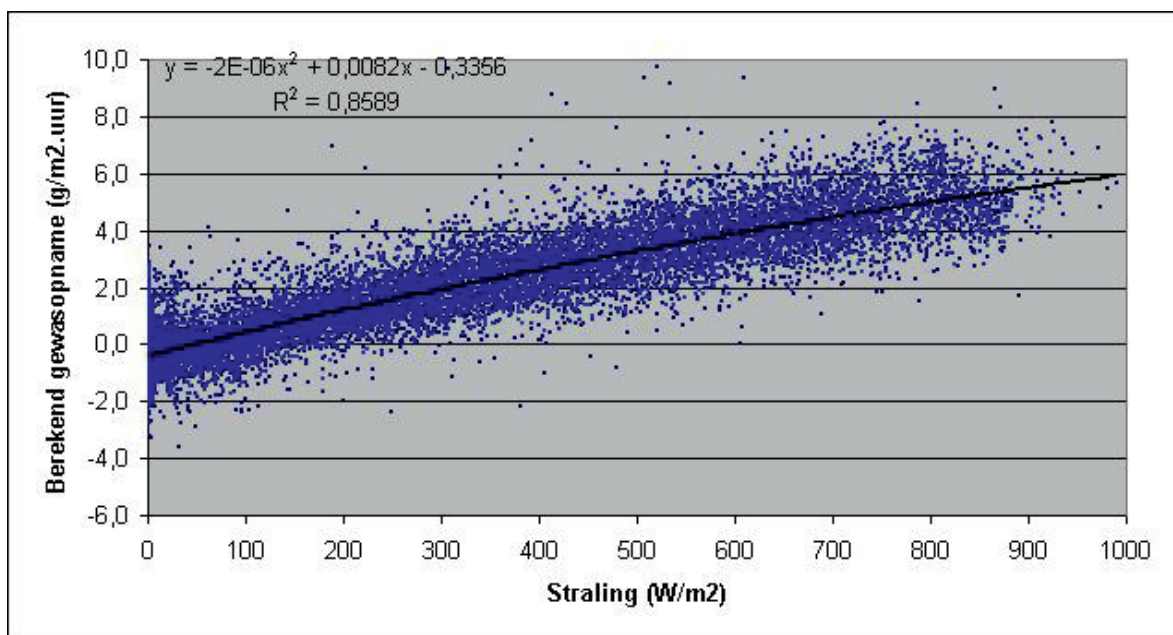
2.1.2 Verschil in CO₂-concentratie tussen de meetpunten

Voor de twee CO₂-sensoren is het van belang dat zij onderling niet te ver afwijken. Een concentratieverschil van 10 ppm geeft bij een debiet van 20 m³/m²·uur al een berekende gewasopname van $10 * 20 * 44 / (0,024 * 10^6) = 0,37$ gram/m²·uur (zie vergelijking 1). In Bijlage I wordt uitgelegd dat het concentratieverschil tussen de twee meters normaliter zeer gering is (< 7 ppm), maar dat ('s nachts), als de buitenluchtaanzuiging klein is en in de kas hoge CO₂-concentraties worden gerealiseerd, wel een afwijking wordt vermoed. De CO₂-meter van de klimaatcomputer wijkt dusdanig af dat deze verder niet is meegenomen in de berekeningen.

De afstand tussen de twee CO₂-meters is ongeveer 4 meter. Dit betekent dat de lucht uit de luchtslang bij een luchtdebiet van 19,9 m³/m².uur gemiddeld 4/19,9 uur ofwel 12 minuten nodig heeft om de meetbox bovenin te bereiken. Doordat deze luchtstroming niet perfect geleidelijk is, geven plotselinge wijzigingen in de CO₂-concentratie in de luchtslang (bijvoorbeeld bij het opstarten of het stoppen met doseren) niet exact 12 minuten later een even grote concentratiewijziging in de kaslucht. Pas ruime tijd na een grote wijziging stabiliseert de concentratie in de kaslucht boven het gewas. Om grote uitschieters in de berekende CO₂-opname te voorkomen wordt daarom een filter toegepast. Na ieder grote wijziging van de CO₂-concentratie in de luchtslang worden de berekende waarden gedurende 40 minuten niet meegenomen.

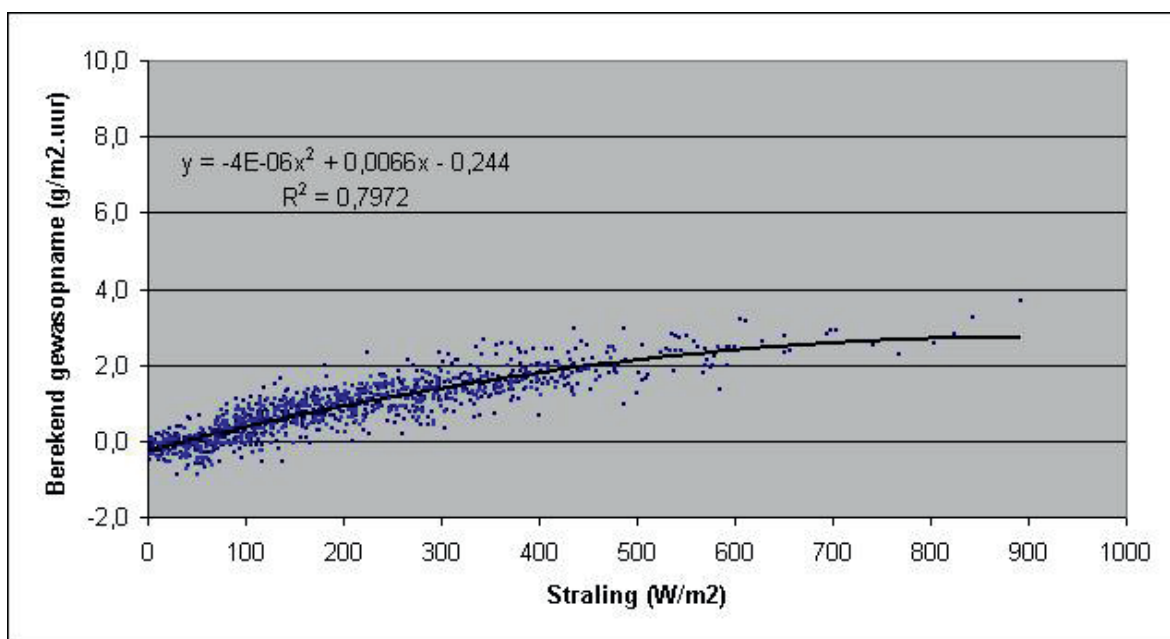
2.1.3 Resultaten

De berekende gewasopname (O_g) gedurende de gehele periode wordt in Figuur 3 uitgezet tegen de globale straling. Hieruit blijkt dat er een vrijwel lineair verband bestaat tussen gewasopname en globale straling. Zelfs bij hoge instraling laat de grafiek nog steeds een stijgende lijn zien. De regressielijn loopt weliswaar minder steil bij hoge instraling.



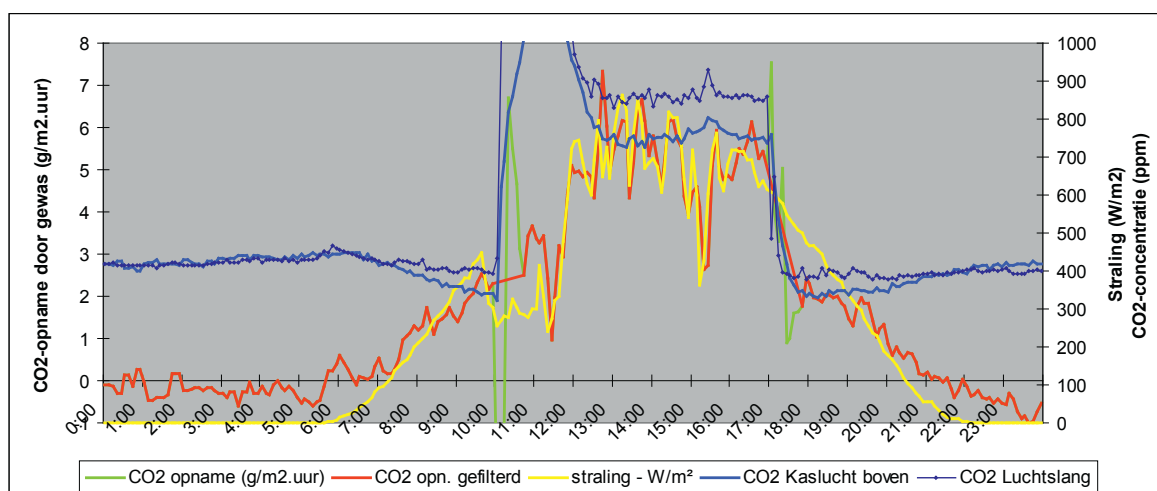
Figuur 4. Berekende gewasopname (g/m².uur) als functie van de globale straling (W/m²)

Bij Lans Zeeland wordt overdag gestreefd naar een CO₂-concentratie van 1000 ppm. Als de CO₂-concentratie onder het setpoint komt, wordt er met de WKK een vaste hoeveelheid van 185 kg/ha.uur gedoseerd. Soms wordt alleen met de ketel een iets lagere hoeveelheid gedoseerd. Gedurende een klein aantal uren overdag is echter geen CO₂ gedoseerd, bijvoorbeeld als de WKK en de ketel niet hebben gedraaid om technische of economische redenen. Als voor deze uren de CO₂-opname wordt berekend blijkt de 2^egraads polynoom regressielijn wel naar beneden af te buigen bij een toenemende globale straling. Overigens liggen de berekende gewasopnames tijdens lage CO₂-concentraties over de hele lijn een flink stuk lager. Het aantal metingen met een lage CO₂-concentratie is te klein om aan te geven hoe sterk de invloed van de CO₂-concentratie op de gewasopname is.



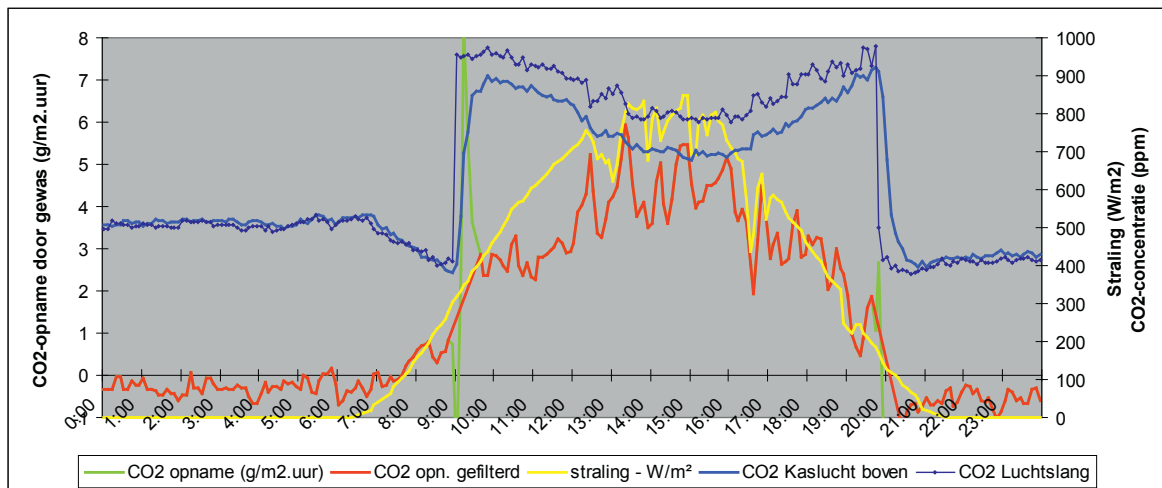
Figuur 5. Berekende gewasopname ($\text{g/m}^2.\text{uur}$) als functie van de globale straling (W/m^2) gedurende de uren met een CO_2 -concentratie van minder dan 400 ppm ($n=1448$)

Ook op individuele dagen blijkt de gewasopname de straling goed te volgen. Wat in Figuur 5 opvalt is dat op deze zaterdag laat (10:00 uur) is gestart met CO_2 doseren (WKK wordt later gestart vanwege lage elektriciteitsstarieven in het weekend), maar dat de gewasopname daar niet zichtbaar onder lijdt. In de avond lijkt dit wel het geval.



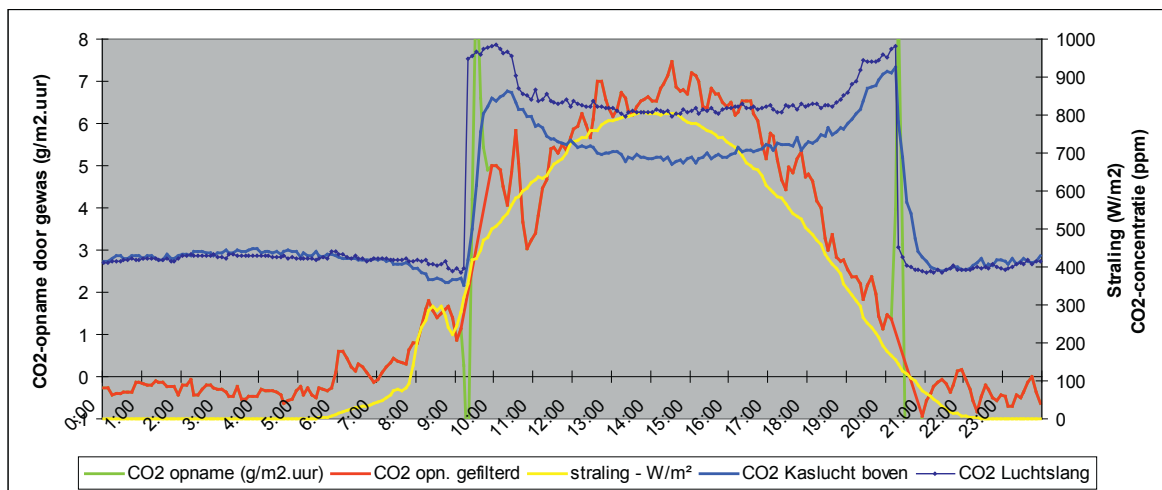
Figuur 6. Linkeras: CO_2 opname in $\text{g/m}^2.\text{uur}$ op 4 juli 2009. Ongefilterd (lichtgroen), gefilterd (rood). Rechteras: globale straling (W/m^2 , geel), CO_2 kaslucht (ppm, lichtblauw) en CO_2 luchtslang (ppm, donkerblauw)

Op dinsdag 4 augustus (Figuur 6) blijkt de gewasopname vooral op het midden van de dag tegen te vallen ten opzichte van de straling. Dit is mogelijk te wijten aan het rigoureuze bladplukken in die week.



Figuur 7. CO_2 opname in $\text{g/m}^2.\text{uur}$ op 4 augustus 2009

Zelfs op een dag met een kastemperatuur van meer dan 30°C blijft het tomatengewas nog steeds CO_2 opnemen (zie Figuur 7). Hoewel het gewas op deze dag zichtbaar moeite leek te hebben met de hoge temperaturen, bleef de fotosynthese blijkaar gewoon doorgaan.



Figuur 8. CO_2 opname in $\text{g/m}^2.\text{uur}$ op 30 juni 2009

2.2 Methode 2: Dosering, luchtuitwisseling en concentratiemutaties

Met methode 2 wordt de CO₂-gewasopname berekend door de dosering te corrigeren voor lekkage en verandering in kasconcentratie. De lekkage wordt berekend door de hoeveelheid ingeblazen buitenlucht te vermenigvuldigen met het verschil tussen concentratie in de kas en de buitenlucht.

2.2.1 CO₂-dosering (D)

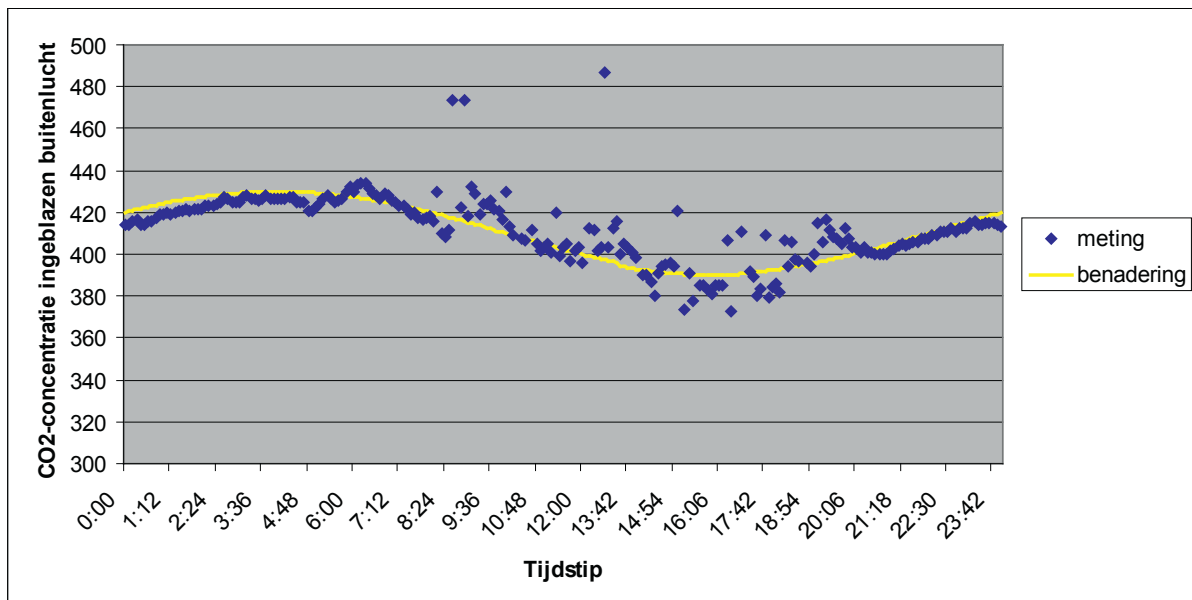
CO₂ wordt meestal gedoseerd vanuit de WKK, maar als deze is uitgeschakeld dan kan ook met de ketel worden gedoseerd. De hoeveelheid dosering van de WKK ligt hoger dan die van de ketel (18,5 tov 15,6 gram/m².uur). Deze dosering kan met een klep worden gesmoord, maar over het algemeen staat deze klep open of dicht. De stand van deze smoorklep en de doseercapaciteit zijn bijgehouden door de Priva computer. Toch komt de aangegeven stand van de smoorklep niet altijd overeen met de CO₂-concentratie in de luchtslangen. Als de CO₂-concentratie in de luchtslang lager is dan 500 ppm dan wordt aangenomen dat er niet wordt gedoseerd. Indien de luchtslang een veel hogere concentratie aangeeft dan de kaslucht, wordt verondersteld dat de smoorklep wel open staat.

2.2.2 Concentratie buitenlucht (Cb)

De concentratie van de buitenlucht is niet gemeten. Wel is de CO₂-concentratie in de luchtslang bekeken op de momenten dat niet is gedoseerd en beide kleppen (zie Figuur 9) op 100% staan. Hieruit blijkt een etmaalcyclus te bestaan in het patroon van CO₂-concentratie in de buitenlucht. Deze etmaalcyclus is te benaderen met de formule

$$C_b = 410 + 20 \cdot \cos(\text{tijdstip} \cdot 2\pi/24\text{uur} - \pi/3) \quad (\text{ppm}) \quad \text{Vergelijking 4.}$$

Meting en benadering zijn weergegeven in Figuur 8.

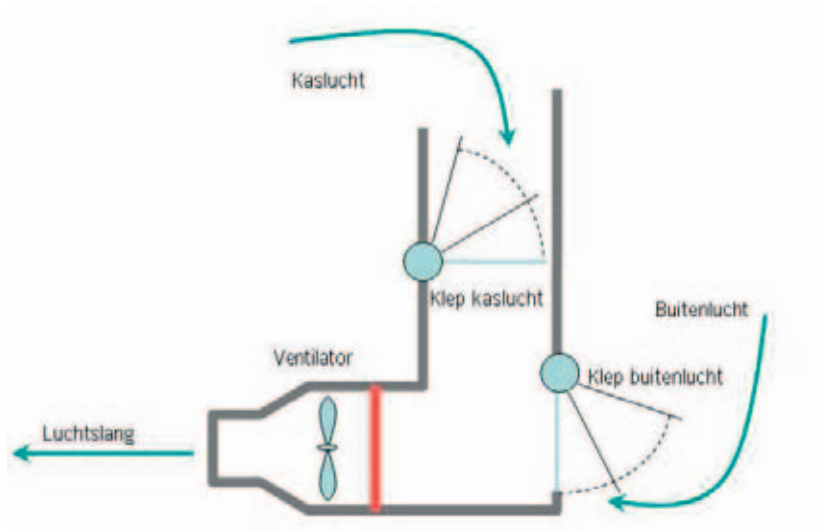


Figuur 9. Meting en benadering van de cyclus van de buitenconcentratie CO₂

2.2.3 Schatting van de hoeveelheid buitenlucht ($x \cdot V$)

Op de klimaatcomputer wordt een waarde berekend van de luchtuitwisseling (ber lus:LZKAS5:Afd 5 onder LBK luchtinlaat). Dit is echter een zeer eenvoudige formule gebaseerd op de windsnelheid, de raamstand en de windrichting. Aangezien de windinvloed op de luchtuitwisseling in de gesloten kas veel kleiner is dan in deze berekening verondersteld, kan deze berekende waarde niet gebruikt worden. Verder hebben er geen metingen plaatsgevonden van de hoeveelheid ingeblazen buitenlucht. Daarom is gebruik gemaakt van de klepstanden van de LBK's en de ventilatorstand. In Figuur 9 zijn de kleppen en de ventilator van een LBK weergegeven.

De twee kleppen zijn onderling onafhankelijk te bedienen, maar in de praktijk lopen beide kleppen redelijk synchroon.

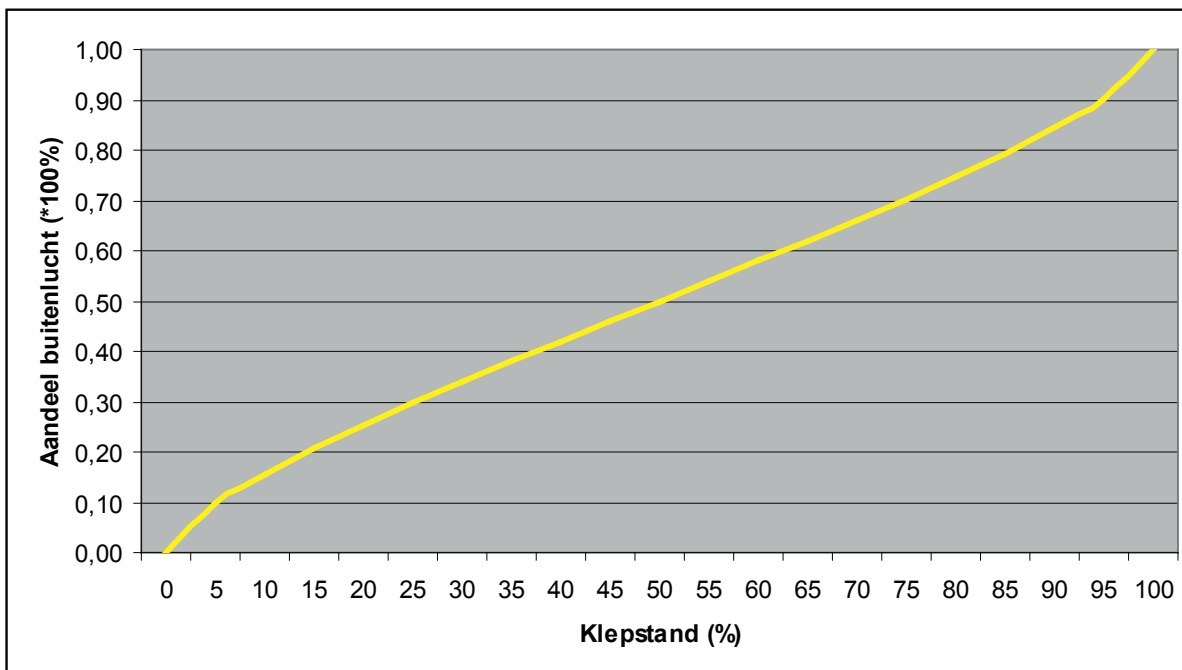


Figuur 10. Schematische weergave van een luchtbehandelingskast (LBK) langs de gevel

Het is niet aannemelijk dat het aandeel buitenlucht in de aangezogen lucht recht evenredig is met de stand van de kleppen. Van 0 naar 1% opening heeft voor de klepstand van de buitenluchtaanzuiging meer invloed dan van 99 naar 100% opening. Bij de klep voor de kasluchtaanzuiging is dit net andersom (100% klepstand betekent dat deze klep gesloten is. Aangenomen wordt dat de volgende formule een betere weergave van het aandeel buitenlucht is.

$$x = (K_b^a + 1 + (1 - K_k)^b) / 2 \quad (*100\%) \text{ Vergelijking 5.}$$

Hierin is K_b de klepstand buitenlucht (100% betekent geopend) en K_k de klepstand kaslucht (100% betekent gesloten). a en b zijn factoren die de karakteristiek van de klep bepalen. Bij twee synchroon lopende kleppen met de factoren a en b beide op 0,6 wordt het berekende aandeel buitenlucht als functie van de klepstand weergegeven in Figuur 10.



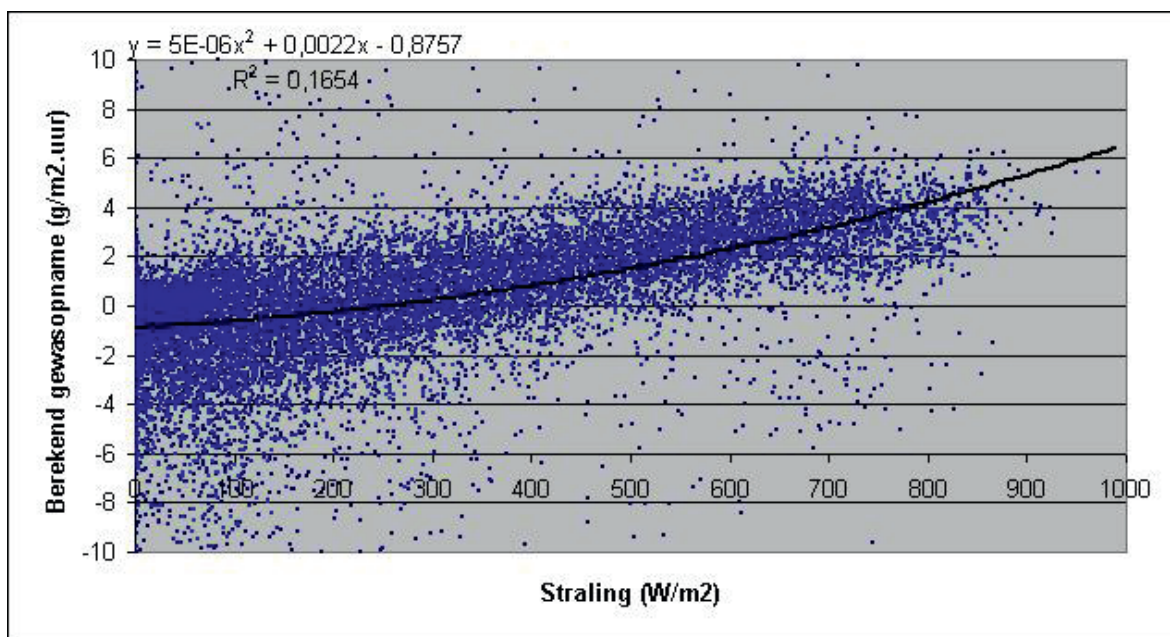
Figuur 11. Aangenomen karakteristiek van het aandeel buitenlucht op basis van de klepstanden voor buitenlucht en kaslucht

2.2.4 Berekening CO₂ opname met methode 2

Hoewel het aandeel buitenlucht blijkbaar moeilijk is te bepalen wordt in deze paragraaf toch bekeken of met deze gegevens de CO₂-opname met methode 2 (Vergelijking 2) is te berekenen, ofwel

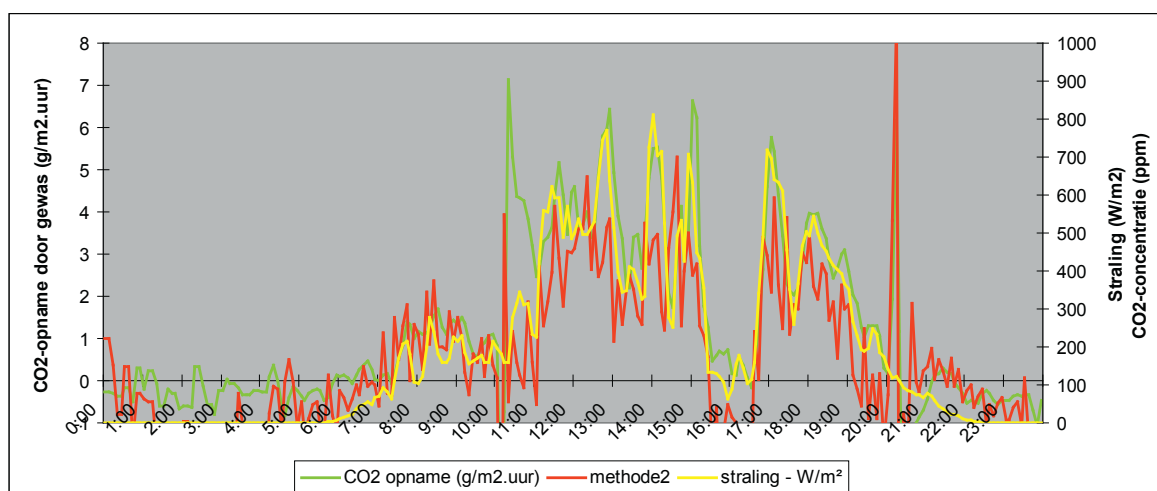
$$O_g = D + (h \cdot (C_{kt} - C_{k(t-1)}) \cdot 10 - x \cdot V \cdot (C_k - C_b)) \cdot 44 / (0,024 \cdot 10^6) \quad (\text{g/m}^2 \cdot \text{uur})$$

Voor het aandeel buitenlucht (x) wordt hierbij gebruik gemaakt van de schatting op basis van klepstanden (zie Figuur 10). Het resultaat van de berekening met methode 2 is te zien in Figuur 11. Hieruit blijkt dat methode 2 een zeer grote puntenwolk oplevert, waarvan de regressielijn (2^e graadspolynoom) een R² heeft van slechts 0,17. Blijkbaar zijn de metingen die nodig zijn voor methode 2 te onbetrouwbaar om deze methode te gebruiken.

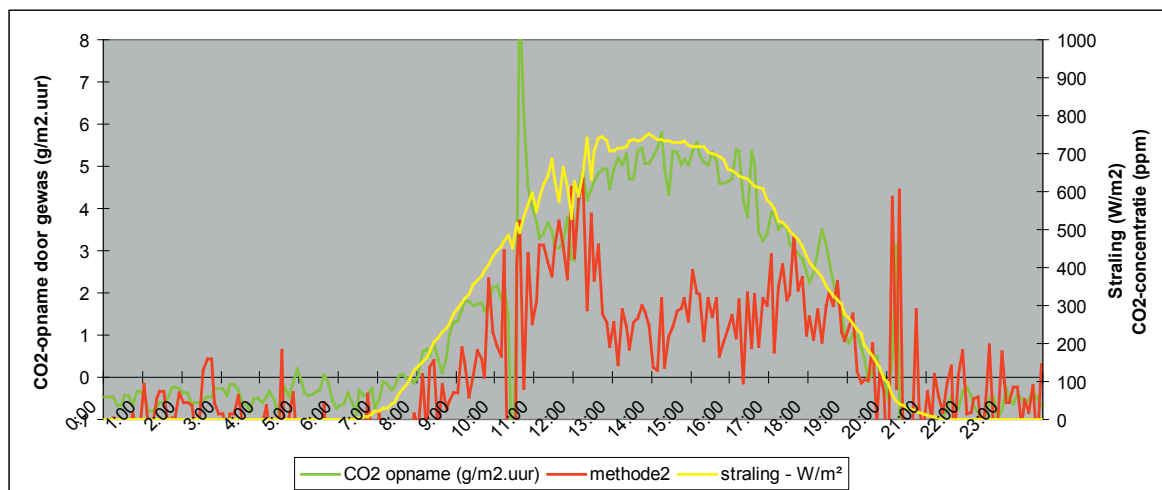


Figuur 12. Gewasopname van CO_2 ($\text{g/m}^2\cdot\text{uur}$) als functie van de straling (W/m^2), berekend met methode 2

De twee methoden om de CO_2 -opname te berekenen levert op sommige dagen een vergelijkbaar beeld op (zie Figuur 12), maar op sommige dagen wijkt methode 2 sterk af. Mogelijk meet de klimaatcomputer op die momenten niet de juiste waarde van de dosering, de ventilatorstand of de klepstand.



Figuur 13. Straling (W/m^2 ; gele lijn) en gewasopname van CO_2 ($\text{g/m}^2\cdot\text{uur}$) op 5 juli berekend met twee CO_2 -meters (methode 1; rode lijn) en op basis van geschatte luchtuitwisseling (methode 2; rode lijn)



Figuur 14. Straling (W/m²; gele lijn) en gewasopname van CO₂ (g/m².uur) op 6 augustus berekend met twee CO₂-meters (methode 1; rode lijn) en op basis van geschatte luchtuitwisseling (methode 2; rode lijn)

3 Toepassing methode 2 bij Sunergiekas

De Sunergiekas is een van de drie kassen van het Innovatie en Demonstratiecentrum (IDC) te Bleiswijk. Deze kas heeft sterke overeenkomsten met de gesloten kas van Lans Zeeland. De belangrijkste verschillen zijn:

- De Sunergiekas is kleiner (500 tot 15000 m²)
- Er wordt meer gekoeld met de koelers boven het gewas
- Het luchtdebiet door de luchtslangen is lager
- CO₂ is afkomstig van andere bronnen dan WKK of ketel
- De CO₂-dosering gaat vaker aan en uit
- De CO₂-dosering vindt niet plaats via de luchtslangen maar via aparte doseerslangen.

3.1 Methode

Wegens het ontbreken van luchtramen is de Sunergiekas een geschikt object om de CO₂-opname van het gewas te meten. Aangezien de CO₂-dosering vaak fluctueert en niet via luchtslangen wordt ingebracht is methode 1 ongeschikt om toe te passen. Met methode 2 kan de CO₂-opname echter wel worden geschat. Hierbij wordt vergelijking 2 iets aangepast omdat slechts 4 in plaats van 10 data per uur beschikbaar zijn.

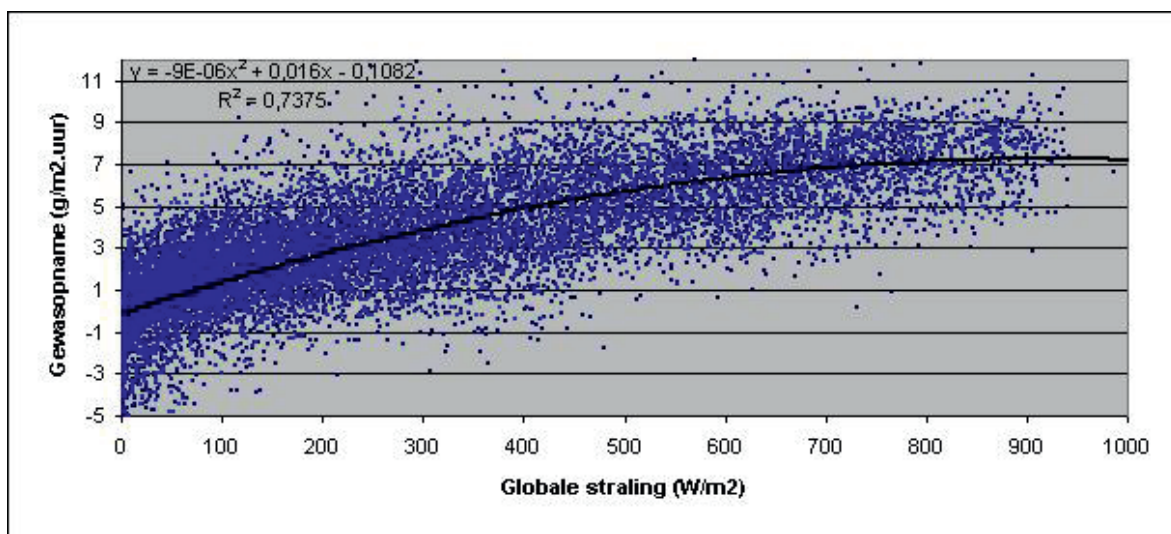
$$O_g = D + (h * (C_{kt} - C_{kt-1}) * 4 - x * V * (C_k - C_b)) * 44 / (0,024 * 10^6) \text{ (g/m}^2\text{.uur)} \quad \text{Vergelijking 6.}$$

De dosering (D) en de hoeveelheid buitenlucht (x*V) zijn tussen 1 januari en 1 oktober 2009 ieder kwartier bijgehouden. h is de kashoogte (7 meter). Voor de CO₂-concentratie van de buitenlucht (C_b) wordt verondersteld dat deze continu 400 ppm is. Aangezien de kasconcentraties overdag altijd ver boven de buitenconcentratie lag, zal een fout in deze aanname slechts geringe invloed hebben op de berekende CO₂-opname.

3.2 Resultaten

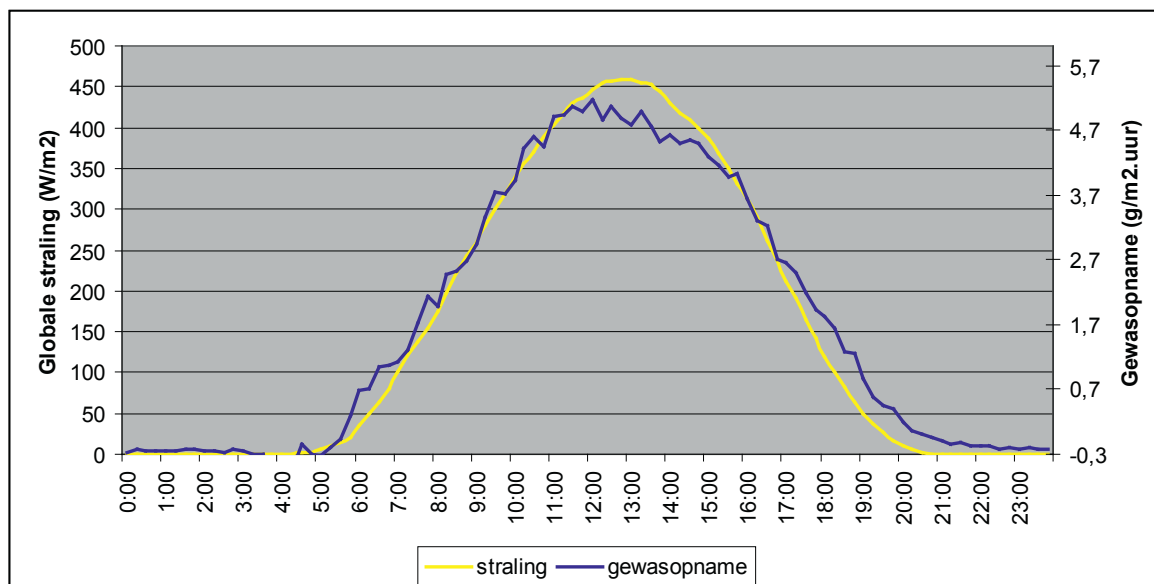
Na een analyse van de berekende gewasopname is gebleken dat de berekende gewasopname veel lager werd op de momenten dat er buitenlucht werd ingeblazen. Dit is waarschijnlijk veroorzaakt doordat de hoeveelheid ingeblazen buitenlucht is overschat. De te veel berekende afvoer door de luchtramen wordt namelijk afgetrokken van de berekende gewasopname. De overschatting is gecompenseerd door de gemeten inblaas van buitenlucht te vermenigvuldigen met een zodanige factor dat de R^2 in Figuur 14 zo hoog mogelijk zou zijn. Dit wordt gerealiseerd als de factor op 0,45 wordt gesteld. In onderstaande figuren zijn alle gemeten hoeveelheden ingeblazen buitenlucht daarom vermenigvuldigd met de factor 0,45.

De gewasopname in de Sunergiekas is berekend met methode 2 en voor het gehele jaar in Figuur 14 uitgezet tegen de globale straling. Het verband is met een R^2 van 0,74 veel groter dan bij Lans Zeeland berekend met methode 2 (zie paragraaf 2.2.4), maar kleiner dan berekend met methode 1 (zie paragraaf 2.1.3). Verder valt op dat in tegenstelling tot Lans Zeeland enige lichtverzadiging lijkt op te treden. In ieder geval buigt de trendlijn (2^e graads polynoom) naar beneden af.



Figuur 15. Berekende gewasopname in de Sunergiekas, uitgezet tegen de globale straling van 1 januari tot en met 1 oktober 2009

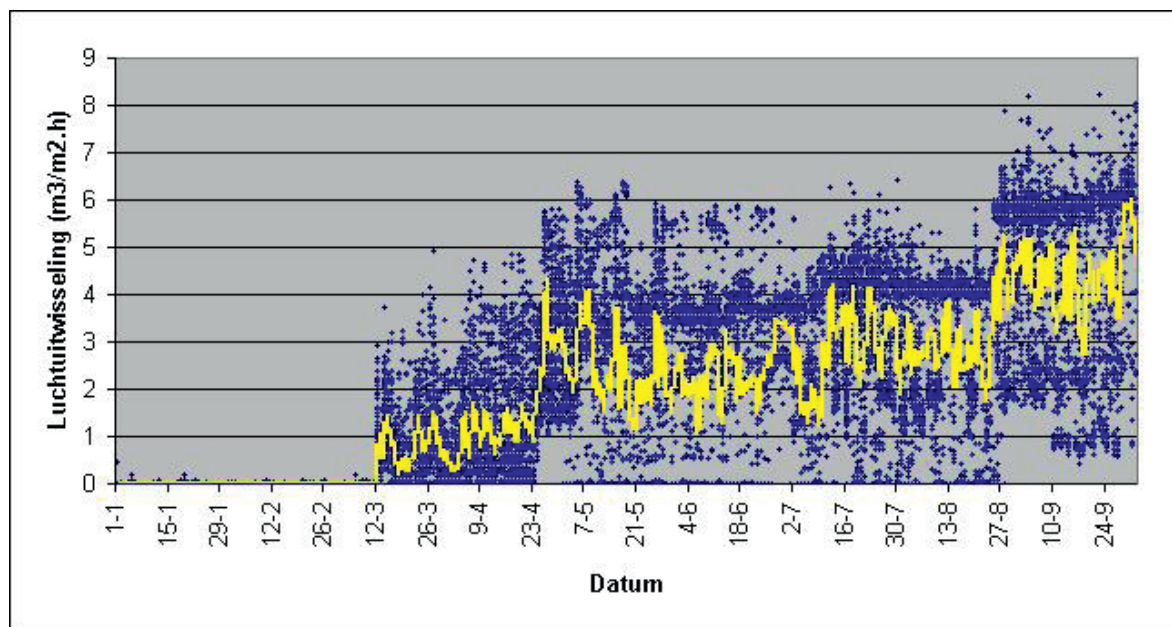
Ook in Figuur 15 is bij een cyclisch etmaalgemiddelde te zien dat de lichtverzadiging vooral lijkt op te treden tijdens en vlak na de hoogste zonnestand.



Figuur 16. Cyclisch etmaalgemiddelde van 1 januari tot en met 1 oktober 2009 van de berekende gewasopname van CO_2 ($\text{g/m}^2 \cdot \text{h}$) en de globale straling (W/m^2)

3.3 Resultaten per fase

Voor wat betreft de mate van de gemeten ventilatievouden is de periode van 1 januari tot 1 oktober te verdelen in 4 fasen met toenemende luchtaanzuiging (zie Figuur 16).



Figuur 17. Verloop van de luchtuitwisseling ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{uur}$) in de Sunergiekas. Een punt staat voor een kwartier. De gele lijn is het zwevend gemiddelde van 96 punten

Fase 1 van 1 januari tot 12 maart: nauwelijks luchtaanzuiging toegepast.

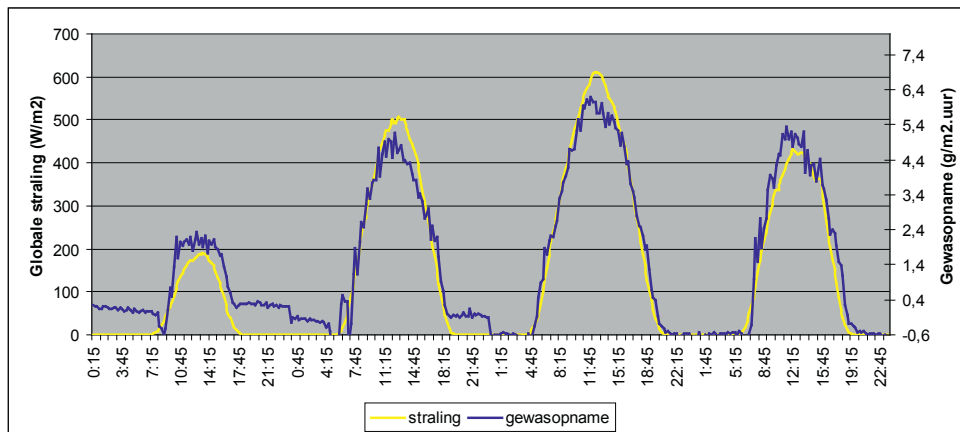
Fase 2 van 12 maart tot 25 april: luchtaanzuiging gemiddeld $1 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{uur}$

Fase 3 van 26 april tot 26 augustus: luchtaanzuiging gemiddeld $2,5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{uur}$

Fase 4 van 26 augustus tot 1 oktober: luchtaanzuiging gemiddeld $4,5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{uur}$

De cyclische gemiddelden van deze vier fasen zijn weergegeven in Figuur 17. Hieruit blijkt onder andere dat de gewasopname in het voorjaar en het najaar relatief hoger is ten opzichte van de globale straling dan in de zomer. Dit bevestigt het vermoeden dat bij hoge stralingsniveaus lichtverzadiging optreedt.

Verder is te zien dat de berekende gewasopname gedurende de nachten van de eerste twee fasen positief is geweest. Dit komt omdat is verondersteld dat tijdens deze nachten nauwelijks luchtuitwisseling heeft plaatsgevonden. Een afname in de CO_2 -concentratie in de kas zou dan moeten impliceren dat de CO_2 door het gewas is opgenomen. Aannemelijker is echter dat de luchtuitwisseling groter is geweest dan 0 en dat de CO_2 naar buiten is ontsnapt in plaats van door het gewas opgenomen. In ieder geval moeten er wederom vraagtekens worden gezet bij de geschatte luchtuitwisseling.



Figuur 18. Vier cyclische etmaalgemiddelden van 1 januari tot en met 1 oktober 2009 van de berekende gewasopname van CO_2 ($\text{g/m}^2 \cdot \text{h}$) en de globale straling (W/m^2)

4 Discussie, conclusies en aanbevelingen

4.1 Discussie

4.1.1 Lichtverzadiging

Naar lichtverzadiging zijn vele onderzoeken gedaan. Mogelijke oorzaken van deze lichtverzadiging zijn gezocht in een beperking in de CO₂ toevoer (lage concentratie, hoge huidmondjesweerstand) of in een beperking in de afvoer van assimilaten (feedback-inhibitie).

In dit onderzoek is gebleken dat deze lichtverzadiging slechts in een lichte mate is aangetoond bij de Sunergiekas en nauwelijks bij Lans. De verschillen tussen deze bedrijven zijn mogelijk veroorzaakt door verschillen in de meetmethode, maar zouden ook kunnen liggen in verschillen in cultivar (Cappricia en Timotion) of in het feit dat bij de Lans continu lucht wordt geblazen en bij de Sunergiekas de ventilatoren vaker uit zijn gegaan. Mogelijk heeft het continu lucht rondblazen een positief effect op de wortelvitaliteit.

Bij foto-inhibitie wordt bij hoge lichtintensiteit (en lage temperatuur) het fotosyntheseapparaat gedurende langere tijd (bijv. enkele dagen) beschadigd. Aangezien in dit onderzoek alleen naar het directe verband tussen licht en fotosynthese is gekeken is dit langdurige effect van foto-inhibitie niet meegenomen.

4.2 Conclusies

Aangetoond is dat de gewasopname van CO₂ op basis van de CO₂-concentratie in de kas met twee methoden is te meten. Methode 1 is de meest geschikte methode voor de configuratie bij Lans Zeeland. Voor de Sunergiekas is alleen Methode 2 toepasbaar.

4.2.1 Methode 1

Met methode 1 wordt er van uitgegaan dat een CO₂-meter de ingaande lucht meet en een CO₂-meter de uitgaande lucht. Hierbij is het van groot belang dat beide meters onder alle omstandigheden dezelfde waarde aangeven. In veel gevallen is het aannemelijk dat beide meters bij Lans Zeeland niet veel van elkaar afwijken. Alleen in nachtsituaties met weinig luchtuitswisseling en een hoge CO₂-concentratie is de berekende gewasopname hoger dan verwacht, zodat wordt getwijfeld aan de gelijkheid van de metingen. Mogelijk wijken de twee CO₂ meters van elkaar af onder die omstandigheden. Verder is het debiet van de ingaande en/of uitgaande lucht van belang. In een kas zonder luchtramen kan deze worden geschat op basis van de ventilatorstand, al is er wel een ventilatorkarakteristiek nodig als de ventilatorstanden veel wisselen. Aangezien bij Lans Zeeland de ventilatorstand nauwelijks is gewijzigd (90% van de tijd was de stand 60%), is een ventilatorkarakteristiek van minder belang voor het verloop van de berekende gewasopname. Om meer zekerheid te hebben over de absolute berekening van de gewasopname is een meting nodig van het ventilatiedebiet bij 60% ventilatorstand. Met methode 1 kan alleen worden gewerkt als de CO₂-dosering constant is. Na iedere wijziging in de doseerstand duurt het ruim een kwartier voor de betreffende meting weer een enigszins stabiele waarde aangeeft.

4.2.2 Methode 2

Bij methode 2 is het van belang om de hoeveelheid en de CO₂-concentratie van de toegevoegde buitenlucht te meten. Bij Lans Zeeland is de hoeveelheid buitenlucht moeilijk te meten omdat deze afhankelijk is van de ventilatorstand, twee klepstanden en twee raamstanden (afluchtingskleppen). Bovendien is het waarschijnlijk dat de windsnelheid en de windrichting invloed hebben op de hoeveelheid buitenlucht die naar binnen wordt geblazen. Deze invloed is niet gemeten. Bij de Sunergiekas is de hoeveelheid buitenlucht wel gemeten, maar deze meting geeft vermoedelijk een ruim twee keer te hoge waarde aan.

De CO₂-concentratie van de buitenlucht is niet gemeten. Bij de Sunergiekas is deze geschat op 400 ppm. Deze waarde is niet kritisch omdat de kasconcentratie vrijwel altijd ver boven deze buitenwaarde lag. Bij Lans Zeeland lag de CO₂-concentratie in de kas vaak rond de buitenwaarde. Een afwijking in de geschatte buitenwaarde geeft dan een grote afwijking van de berekende hoeveelheid afgevoerde CO₂ door buitenluchtuitwisseling.

Voor methode 2 is het bovendien van belang om de CO₂-dosering bij te houden. Zowel bij Lans Zeeland als bij de Sunergiekas is dat gebeurd, al zijn er bij Lans Zeeland enkele momenten geweest dat de gerealiseerde CO₂-dosering niet overeenkwam met de gemeten dosering.

4.2.3 Berekende gewasopname

Aangezien er twijfels zijn over de gemeten absolute hoeveelheid luchtuitwisseling bij zowel Lans Zeeland als de Sunergiekas is het in dit onderzoek niet mogelijk om de absolute gewasopname precies vast te leggen. Bij Lans Zeeland is bij 1000 W/m² globale straling een gewasopname van 6 gram CO₂/m².uur berekend, terwijl dat bij de Sunergiekas 7 gram CO₂/m².uur zou zijn. De nachtrespiratie ligt bij beide cases rond 0,5 gram CO₂/m².uur.

De grafieken geven een duidelijk verband aan tussen globale straling en gewasopname. Bij Lans Zeeland is hierbij geen lichtverzadiging gevonden, terwijl bij de Sunergiekas de gewasopname minder sterk lijkt te stijgen bij een globale straling hoger dan 500 W/m².

De gewasopname is niet meetbaar negatief beïnvloed door een hoge temperatuur. Zelfs bij kastemperaturen van meer dan 30°C bleef de gewasopname gelijk oplopen met de globale straling.

Slechts gedurende een beperkt aantal momenten overdag is bij Lans Zeeland met een lage CO₂-concentratie gewerkt. Op die momenten is de gewasopname duidelijk lager dan op de momenten met een hoge CO₂-concentratie.

Bij beide methoden heeft het ventilatievoud een grote invloed op de berekende CO₂-gewasopname. In gesloten kassen is het ventilatievoud eenvoudig te meten. Daarom zijn beide methoden geschikter voor (semi-)gesloten kassen dan voor bij kassen waar het ventilatievoud moeilijk meetbaar is, zoals de standaard kassen met luchtramen.

4.3 Aanbevelingen

Om nauwkeuriger metingen doen naar de gewasopname van CO₂ zouden de volgende punten moeten worden verbeterd. Bij Lans Zeeland:

1. Een CO₂ meter die beurtelings lucht aanzuigt uit de luchtslang enerzijds en boven het gewas anderzijds. Door slechts 1 meter te gebruiken kunnen de metingen onderling niet afwijken. Dit kan bijvoorbeeld worden uitgevoerd door een multiplexer.
2. Meting van de hoeveelheid lucht door de slangen bij verschillende ventilator- en klepstanden. Hierdoor kan de absolute hoeveelheid gewasopname beter worden geschat.

Bij de Sunergiekas:

1. Meting van de hoeveelheid aangezogen buitenlucht.
2. Meting van de CO₂-concentratie buiten.

Eventueel kan een webcam boven het gewas worden aangebracht om verklaringen te vinden voor eventuele afwijkingen van de berekende gewasopname, bijvoorbeeld door het laten zakken, het oogsten of het bladplukken.

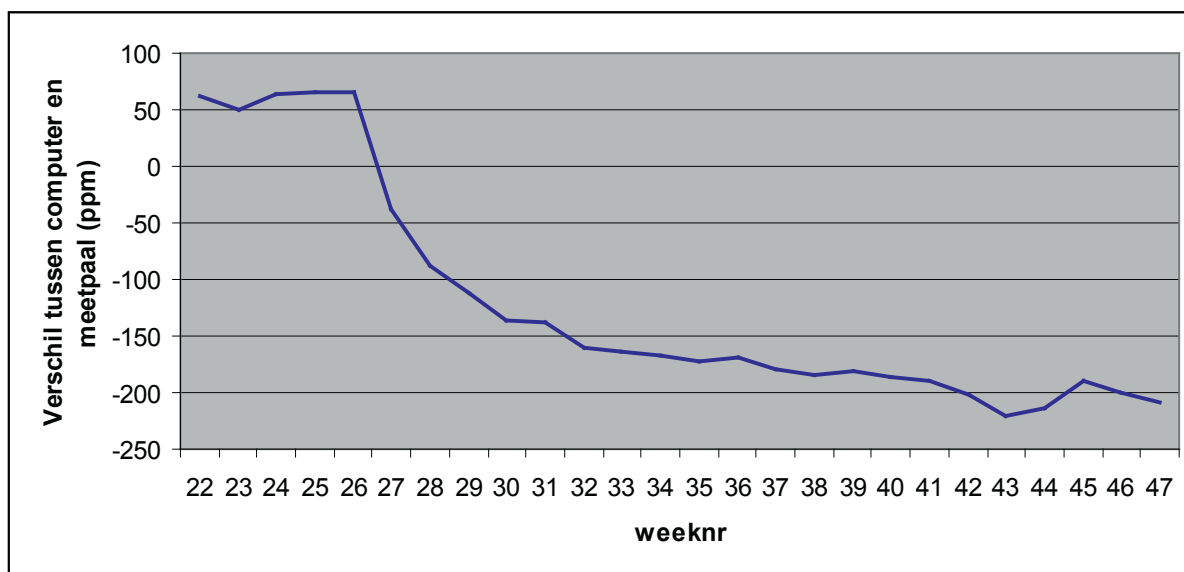
Om te onderzoeken hoe groot de invloed van de CO₂-concentratie op de gewasopname is zal vaker een lagere CO₂-concentratie moeten worden toegestaan.

5 Controle op de CO₂-metingen bij Lans

Vergelijking CO₂-meting meetpaal met bestaande meter klimaatcomputer Lans Zeeland

De CO₂-meter van de kaslucht bij de meetpaal is vergeleken met de CO₂-meter van klimaatcomputer van Lans Zeeland. Het verschil tussen deze meters is uitgezet over de weken van de proef in onderstaande grafiek. In de eerste weken gaf de meter van de klimaatcomputer meer aan dan die van de meetpaal. Na week 26 (de meter van de klimaatcomputer werd geijkt op 25 juni) gaf de meter van de klimaatcomputer juist minder aan dan die van de meetpaal. Dit verschil liep zelfs op tot zo'n 200 ppm. De verhouding tussen de waarden van de meetpaal (y) en de klimaatcomputer (x) verhiel zich na de ijking als $y = 1,08x + 119\text{ppm}$ met een R^2 van 0,98.

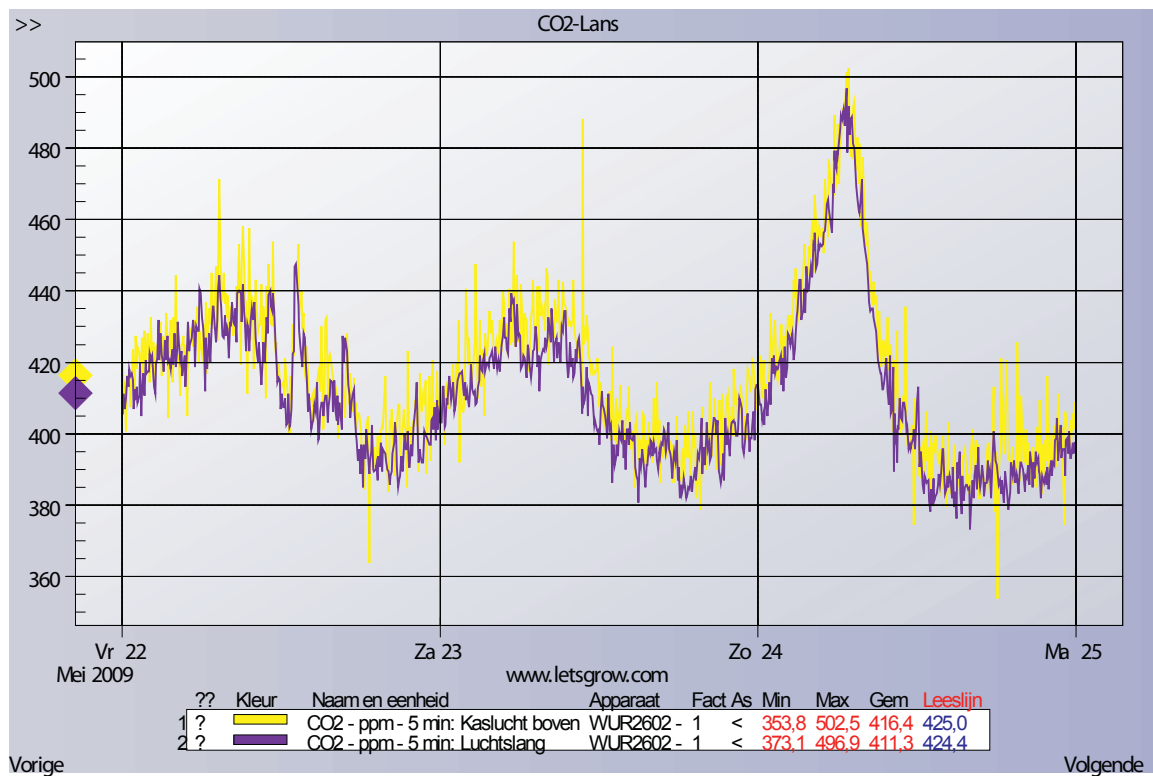
De lage CO₂ meting zal er toe geleid hebben dat vaak een hogere CO₂-concentratie is gerealiseerd dan de ingestelde streefwaarde.



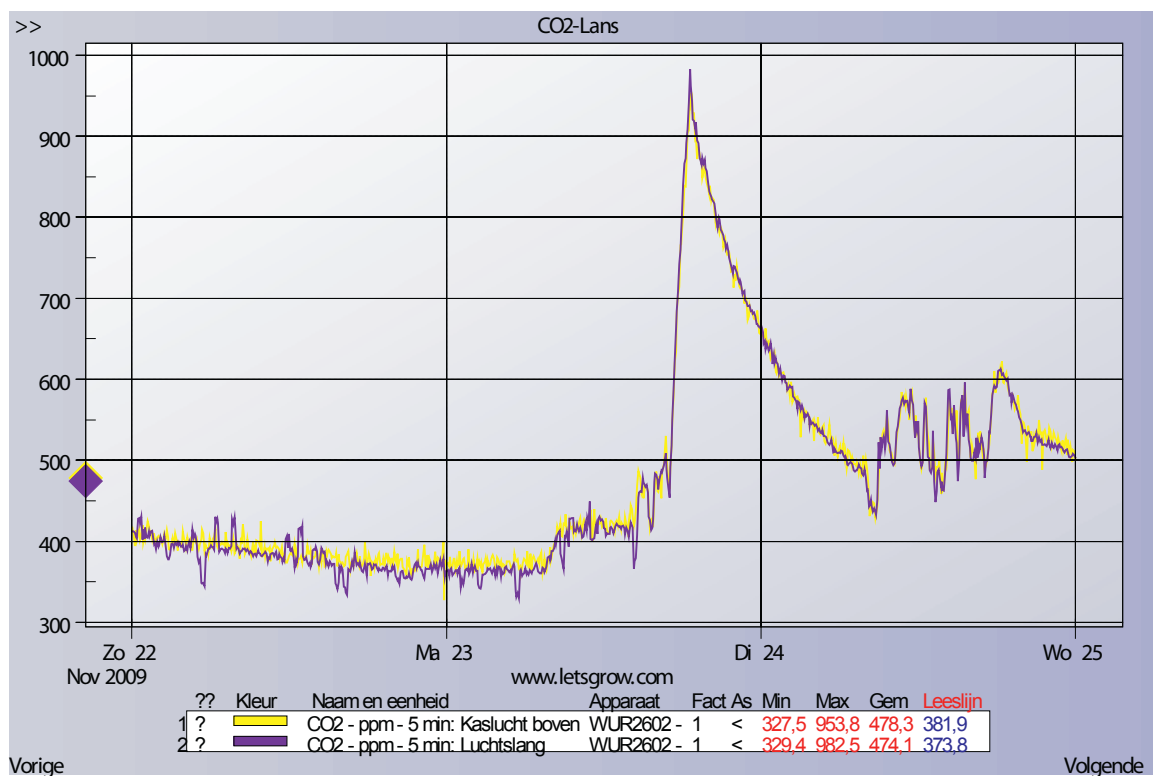
Figuur 19. Verloop van het verschil in meetwaarde tussen de CO₂-meter van de klimaatcomputer en die van de meetpaal

Vergelijking CO₂-meters luchtslang en kaslucht (beide van de meetpaal)

De twee CO₂-meters van de meetpaal gaven zowel voor als na de proef onder gelijke omstandigheden een verschil aan van gemiddeld 5 ppm (Meter boven in kas iets hoger dan meter in luchtslang). Dit kleine verschil is een indicatie voor een nauwkeurige meting, al is hiervoor geen speciale ijking gebruikt. Het is dan ook aannemelijk dat het verloop van het verschil tussen de CO₂ meter van de klimaatcomputer en van de meetpaal (Figuur 18) niet is veroorzaakt door een verloop van de meetpaal-sensor, maar van verloop in de klimaatcomputer-sensor.



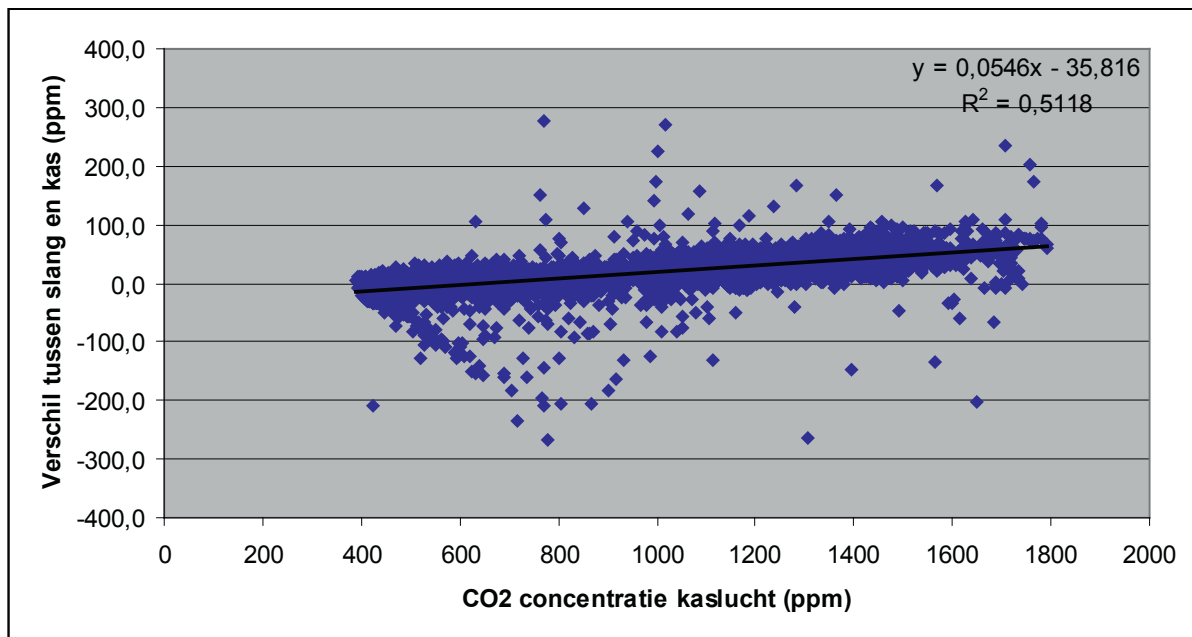
Figuur 20. Meetwaarden van beide meters van de meetpaal vlak voor de proef onder gelijke omstandigheden



Figuur 21. Meetwaarden van beide meters van de meetpaal vlak na de proef onder gelijke omstandigheden

Verder is aan Figuur 19 en Figuur 20 te zien dat de meetwaarden elkaar niet vloeiend opvolgen, maar schokkerig zijn. Om deze schokken uit te dempen wordt van zowel de kasluchtmeter als de luchtslangmeter het gemiddelde genomen van 2 zesminuten-waarden.

Hoewel uit Figuur 19 en Figuur 20 nauwelijks een afwijking tussen de beide CO₂-meters te zien is, blijken ze tijdens nachten met een hoge CO₂-concentratie toch een afwijking te vertonen. Normaliter zou gedurende de nacht de kaslucht een hogere CO₂-concentratie moeten hebben dan de lucht in de slang omdat het gewas door ademhaling CO₂ afgeeft aan de kaslucht. Bij een luchtdebiet van 20 m³/m².uur en een gewasademhaling van 0,5 gram CO₂/m².uur zou de luchtslangmeter 14 ppm minder aan moeten geven dan de kasluchtmeter. Figuur 21 laat zien dat dit verschil precies klopt bij concentraties rond 400 ppm (regressielijn geeft daar -14,0 aan). Bij hogere concentraties blijkt de luchtslang hogere waarden aan te geven dan de meter boven in de kas. De regressielijn geeft bij 1000 ppm een verschil aan van 18,8, waardoor het gewas 0,7 gram/m².uur aan CO₂ lijkt op te nemen in plaats van af te geven.

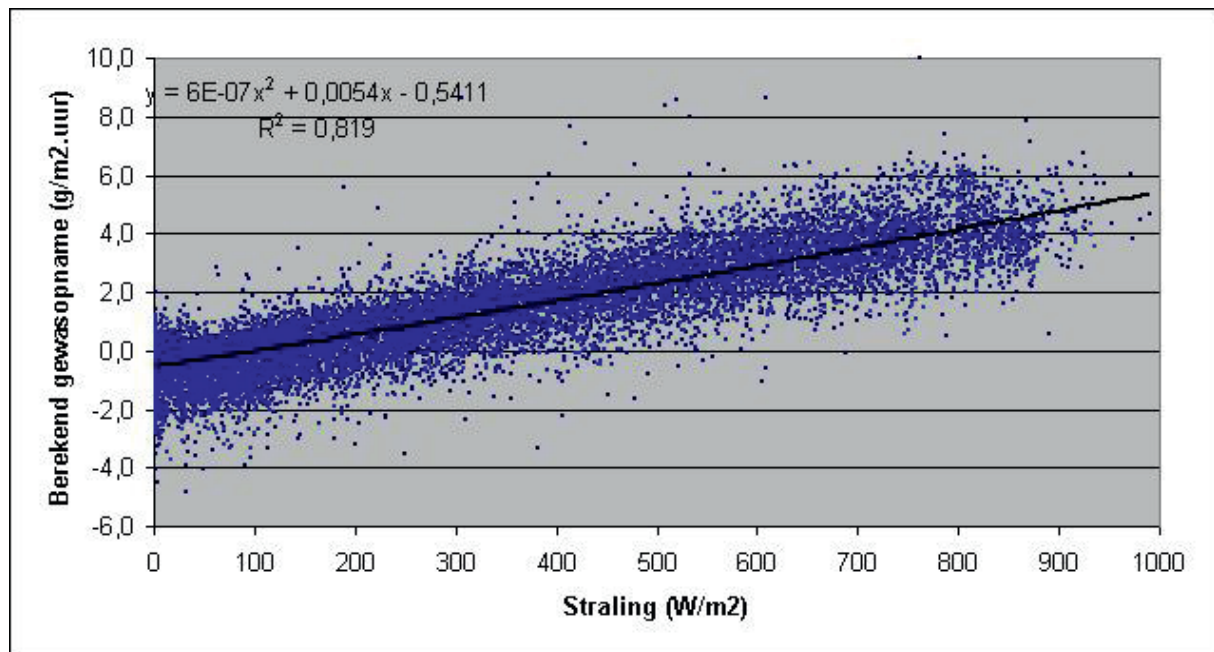


Figuur 22. Verschil tussen gemeten CO₂-concentraties van kaslucht en luchtslang gedurende de nacht bij een ventilatorstand van 60%, als functie van de concentratie van de kaslucht

Verondersteld wordt dat het concentratieverschil wordt veroorzaakt door een afwijking van (een van) de meters bij hogere CO₂-concentraties. Om dit te corrigeren zou het gemeten verschil tussen de CO₂-concentraties (ΔC) gedurende de hele proef (dus ook overdag) aangepast moeten worden met de volgende formule:

$$\Delta C = (C_l - C_k) - 0,0546 \cdot C_k + 36,14 \quad (\text{ppm}) \quad \text{Vergelijking 7.}$$

Een dergelijke correctie geeft overdag echter lagere waarden dan verwacht (5 in plaats van 7 gram/m².uur bij 1000 W/m²).



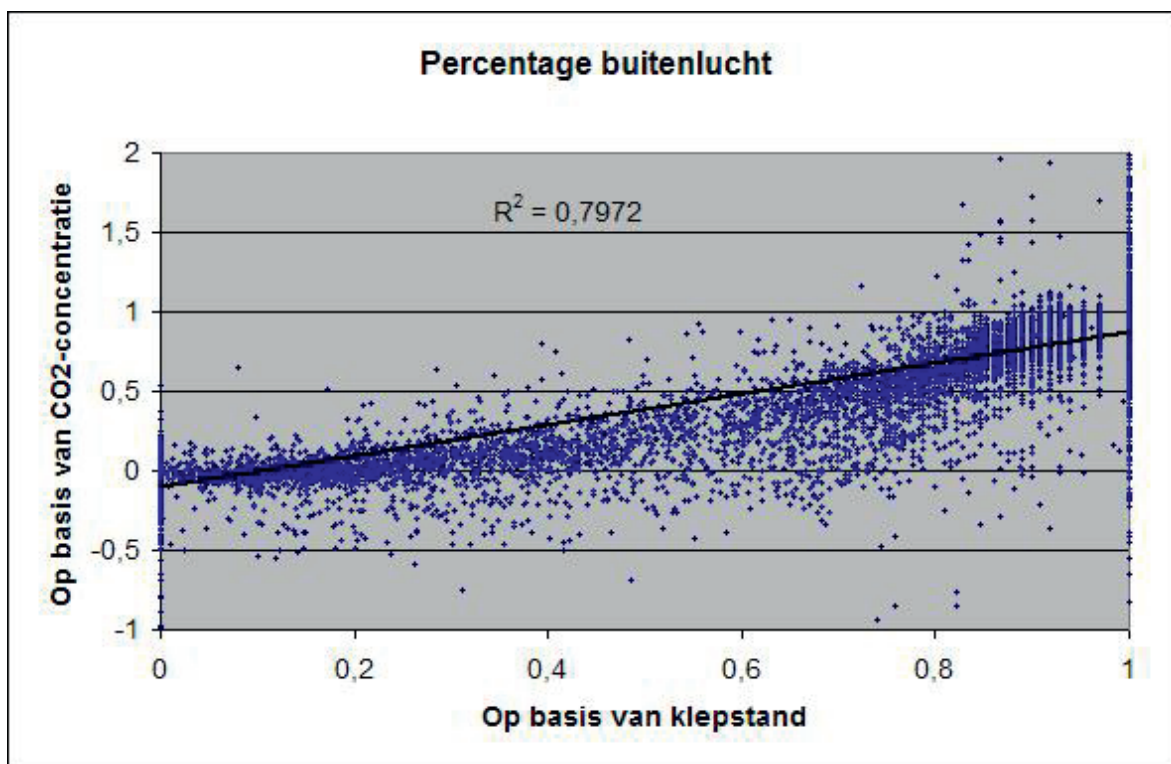
Figuur 23. Berekende gewasopname (g/m².uur) als functie van de globale straling (W/m²) (n=40002)

6 Controle voor schatting aandeel buitenlucht (x) bij Lans

Het percentage aan buitenlucht dat wordt ingeblazen is berekend door middel van de CO_2 concentraties. Het idee hierbij is dat de CO_2 -concentratie in de luchtslang wordt bepaald door een deel afkomstig uit de kaslucht en een deel afkomstig uit de buitenlucht. Als er wordt gedoseerd zal de concentratie in de luchtslang worden verhoogd. Ofwel: $C_i = C_b \cdot x + C_k \cdot (1-x) + D/V \cdot 0,024 \cdot 10^6 / 44$. Hieruit volgt het aandeel buitenlucht (x) in de luchtslang.

$$x = (C_k - C_i + D/V \cdot 0,024 \cdot 10^6 / 44) / (C_k - C_b) \quad (\%) \quad \text{Vergelijking 8.}$$

Hierbij is x het percentage buitenlucht dat is ingeblazen, C_b is de concentratie van de buitenlucht (ppm). D is de CO_2 -dosering ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{uur}$) en V is het debiet dat door de slangen wordt geblazen ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{uur}$). Deze berekening kan een fout in de geschatte C_b uitvergrooten voor het geval dat de C_b en C_k dicht bij elkaar liggen. In Figuur 23 wordt het berekende aandeel buitenlucht op basis van de CO_2 -concentratie vergeleken met het aandeel op basis van de klepstanden. Uit de verscheidenheid in de puntenwolk (zelfs bij een gemiddelde klepstand van 0% of 100%) en een R^2 van 0,80 kan niet worden gesteld dat beide methoden elkaar bevestigen. Om met methode 2 te kunnen werken is dus een nauwkeuriger meting van de CO_2 -concentratie van de buitenlucht nodig, of moet nauwkeuriger het aandeel buitenlucht worden gemeten.



Figuur 24. Vergelijking van het berekende aandeel buitenlucht in de luchtslang op basis van de klepstanden en op basis van de verschillen in CO_2 -concentratie

