

Postbus 7001
6700 CA Wageningen
Agro Business Park 65
6708 PV Wageningen

Telefoon 0317 49 15 78
Fax 0317 46 04 00

www.delphy.nl

De paprikateelt met minimaal CO₂

Fossielvrij en weerbaar

Worldwide Expertise for Food & Flowers



In samenwerking met:



Ministerie van Landbouw, Visserij,
Voedselzekerheid en Natuur



KAS ALS
ENERGIEBRON



Glastuinbouw
Nederland
morgen groeit vandaag



Bayer Crop Science



ENZA ZADEN



RIJK ZWAAN



skytree®



Plant
Lighting



VOLTIRIS



svensson



van Dijk heating



Cultilene
SANTO DOMENICO



PRIVA

26 mei 2025

Uitgebracht door

Bas Oudshoorn¹, Martijn Wiekens², Govert Trouwborst², Silvester de Nooijer¹

1: Delphy Improvement Centre, 2: Plant Lighting

Projectnummer Kas als Energiebron: 24004

Onderstaande partijen zijn bij het project betrokken geweest als financier of uitvoerder:



Disclaimer

© 2025 Delphy Improvement Centre, Violierenweg 3, 2665 MV Bleiswijk, Tel. 010- 522 1771

Dit document is auteursrechtelijk beschermd.

Delphy is niet aansprakelijk voor eventuele schade als gevolg van gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen

Inhoudsopgave

1 Samenvatting

2 Inleiding

2.1.1	CO ₂ benutting	5
2.1.2	CO ₂ beschikbaarheid	5
2.1.3	Integraal duurzaam	6
2.2	Doelstelling	6
2.2.1	Teeltdoelstellingen	7
2.2.2	Nevendoelstelling	7
2.2.3	Inpassing	7

3 Aanpak en kasinrichting

3.1.1	Kasinrichting	8
3.1.2	CO ₂ dosering	8
3.1.3	CO ₂ bron	9
3.1.4	Doeken en folie	9
3.1.5	Ontvochtiging	9
3.1.6	Substraat	9
3.1.7	Opkweek	9
3.1.8	Registraties en metingen	9

4 Resultaten van de teelt

4.1	Verloop van de teelt	11
4.2	Productie	14

5 Resultaten CO₂-besparing

5.1	Theoretisch kader	16
5.2	Aanpak	18
5.3	CO ₂ doseerstrategie	20
5.4	Virtuele referenties	21

6 Direct air capture

7 Energie

8 Conclusies

9 Aanbevelingen

10 Literatuurlijst

1 Samenvatting

Door de klimaattransitie zal de beschikbaarheid van CO₂ als industrieel restproduct voor de tuinbouw in de toekomst lager worden. Hier kunnen tuinders op twee manieren mee omgaan: door minder CO₂ te gebruiken of door CO₂ uit alternatieve bronnen in te zetten. In dit onderzoek worden beide strategieën onderzocht. Hiervoor is een zeer energiezuinige paprikateelt opgezet waarin ontvochtiging met warmte-terugwinning is toegepast.

Bij minder CO₂ gebruik is het verstandig om de overgebleven CO₂ zo in te zetten dat het rendement erop maximaal is. In dit onderzoek is onderzocht wat het effect is van een beperking van CO₂ dosering op ventilatievoud en op buitenstraling, om zo de hoeveelheid gedoseerde CO₂ die niet door de plant opgenomen wordt, te reduceren. Hiervoor is een model opgesteld waarmee het effect op gewasfotosynthese van CO₂ doseringsstrategieën berekend kan worden.

Vooraf is het doel gesteld om niet meer dan 15 kg/m²/jaar aan CO₂ te gebruiken. Deze doelstelling is ruimschoots gehaald, maar zowel in de praktijk als modelmatig is aangetoond dat dit wel ten koste is gegaan van de productie. De genoemde strategieën om CO₂ efficiënter in te zetten werken, maar hiermee wordt slechts een deel van het verlies aan gewasfotosynthese gecompenseerd dat wordt veroorzaakt door CO₂-besparing. Conclusie is dat het bij de huidige CO₂ prijzen onverstandig is om te besparen op CO₂ gebruik. Verder is berekend dat vanaf een CO₂ prijs van €0,60 per kg het verstandiger is om minder CO₂ te doseren.

In de proef is een machine voor Direct Air Capture (DAC) van SkyTree getest. Deze machine bleek in staat te zijn om een deel van de CO₂ vraag van de proef te leveren. Het geteste prototype was in de gerealiseerde opstelling niet in staat om voor de genoemde €0,60 per kg CO₂ te leveren, maar de verwachting is dat commerciële opvolgers dit wel zullen kunnen bereiken.

Richting het einde van de teelt zijn gewasgezondheidsproblemen opgetreden die hebben geleid tot een zwak gewas en een mislukt laatste zetsel. De planten lijken verzwakt te zijn door een langdurig gebrek aan assimilaten (deels veroorzaakt door de lagere gewasfotosynthese als gevolg van CO₂-reductie) in combinatie met een te hoge plantbelasting door het seizoen heen. De problemen leken qua symptomen sterk op de in de praktijk vaak aangetroffen wortelproblemen. Op basis van deze resultaten concluderen wij dat een oplossing voor deze gewasgezondheidsproblematiek in de assimilatenbalans gezocht kan worden.

2 Inleiding

De ambitie van de Nederlandse glastuinbouw is om in 2040 klimaatneutraal binnen een economisch rendabele bedrijfsvoering te zijn. Binnen de Nederlandse glastuinbouw wordt een groot deel van het areaal, ± 4000 ha, ingevuld door de onbelichte 'glasgroententeelt', hierbinnen is ruim 35% toebedeeld aan de teelt van paprika. Deze klimaat-neutrale doelstelling heeft binnen de sector grote gevolgen voor de beschikbaarheid van CO_2 : dit zal in de toekomst van een externe bron moeten gaan komen. Dit betekent dat de prijs van CO_2 zal gaan toenemen. CO_2 benutting kan verhoogd worden door alleen te doseren wanneer dit voor het gewas een goed fotosyntheserendement oplevert. Het optimaliseren van de CO_2 benutting moet daarbij plaatsvinden binnen een integraal duurzaam teeltsysteem waarbij ook gekeken moet worden naar energiegebruik en gewasgezondheid.

2.1.1 CO_2 benutting

In 2023 heeft voor de teelt van paprika een deskstudie¹ plaatsgevonden waarin een aantal belangrijke zaken voor paprika naar voren zijn gekomen, om een maximaal CO_2 -rendement (=geassimileerd CO_2 /gedoseerd CO_2) te kunnen realiseren:

- CO_2 dosering beperken vanaf raamstand 20%.
- In de zomer dosering halveren
- In de middag niet/minder doseren met evt. in de ochtend een hogere doseerflux.

Wat in deze studie echter niet is meegenomen is een aangepaste klimaatstrategie om de CO_2 benutting verder te verhogen. Een voor de hand liggende methode om CO_2 in de kas te houden en dus te besparen, is door minder te ventileren. Een gevolg hiervan is een stijging van de kastemperatuur. Een hogere kastemperatuur doet de gewasvraag naar assimilaten stijgen. Dat kan acceptabel zijn zolang die stijging in balans blijft met een toename aan assimilatie door de hogere CO_2 -concentratie. In recent onderzoek uitgevoerd door Plant Lighting en Botany² in komkommer was een belangrijke conclusie dat door meer te knijpen met de ramen inderdaad CO_2 valt te besparen en CO_2 beter benut wordt voor gewasfotosynthese en productie. Kort gezegd weegt het voordeel van meer CO_2 in de kas binnen een bepaalde bandbreedte zwaarder dan het nadeel van een hogere kastemperatuur. Met nadruk op 'binnen een bepaalde bandbreedte', omdat aan de kastemperatuur wel een bovengrens zit, welke overigens verschillend is per gewas.

Ook in paprika kunnen we de benutting van CO_2 verhogen door waar mogelijk de ventilatievoud te verminderen door het knijpen van de luchtramen, waardoor het CO_2 -verlies kleiner is, er een hogere CO_2 -concentratie in de kas wordt gerealiseerd en de gewasfotosynthese en productie hoger wordt. Hier zijn nog meer mogelijkheden voor wanneer gebruik gemaakt wordt van actieve ontvochtiging, zodat vochtafvoer niet via de ramen hoeft plaats te vinden.

Hierbij is het ook van belang om het rendement van CO_2 inzichtelijk te maken, om de CO_2 dosering gericht te kunnen inzetten. Dit kan door de berekende gewasfotosynthese te delen door de dosering (beide in gram $\text{CO}_2/\text{m}^2/\text{dag}$).

2.1.2 CO_2 beschikbaarheid

Naast het optimaliseren van de CO_2 benutting door het gewas, vindt er een ontwikkeling plaats waarin de huidige externe CO_2 bronnen richting de toekomst sterk verminderen. Een technische innovatie die grote impact kan hebben voor de glastuinbouw, zijn systemen die CO_2 uit buitenlucht kunnen concentreren, zogenoemde 'Direct Air Capture' systemen (DAC). Om CO_2 uit buitenlucht te

kunnen maken is echter wel energie (elektriciteit) nodig. Het systeem gaat voor een teler dus verder dan doseren alleen, de aansturing zal moeten worden ingevoegd in het energiebeheer van het bedrijf. Op het vlak van inpassing en aansturing van het systeem is nog kennisontwikkeling benodigd. Het systeem beschikt over een mate van buffering, waarbij de momenten waarop de CO₂ wordt geconcentreerd kan worden afgestemd op de energieprijzen of de beschikbaarheid van (al dan niet eigen) zonne-energie, terwijl dosering in de kas afgestemd kan worden op het rendement (gram assimilatie gedeeld door gewas/gram gedoseerd CO₂). Bijkomend voordeel is dat de vraag naar CO₂ over het algemeen het hoogst is in periodes van het jaar wanneer veel zonlicht aanwezig is.

2.1.3 Integraal duurzaam

Het doseren en benutten van CO₂ kan in een toekomstgericht teeltconcept niet op zichzelf staan. Dit zal moeten plaatsvinden binnen een integraal duurzaam teeltconcept, waarin rekening wordt gehouden met energiezuinig telen en een minimale inzet van gewasbeschermingsmiddelen. Dit project demonstreert een integraal duurzame aanpak voor de paprikateelt, waarbinnen het CO₂ rendement centraal staat en de dosering van CO₂ sterk wordt verminderd.

2.2 Doelstelling

Doelstelling van dit project is het optimaliseren van de CO₂-benutting in de paprikateelt. Hierbij wordt zowel aandacht besteed aan toekomstbestendige techniek als aan gewasfysiologie en klimaatregeling: CO₂ wordt gedoseerd vanuit een DAC (direct air capture)-systeem en er wordt gestuurd op een zuinige inzet van CO₂ met een hoog rendement. Dit alles vindt binnen een integraal duurzame aanpak plaats, waarbij geteeld wordt volgens energiezuinige principes en met een weerbaar teeltsysteem.

2.2.1 Energiedoelstellingen

- Van CO₂ wordt over de hele teelt maximaal 15 kg/m² gedoseerd, door middel van toepassing van een maximale CO₂ dosering van 120 kg/ha/uur die verder gereduceerd wordt op basis van ventilatievoud en instraling. In de praktijk is een dosering van 30 tot 40 kg/m² per teelt vrij gebruikelijk.
- Doel is het realiseren van een teelt die deels draait op CO₂ uit buitenlucht via direct air capture (DAC). Het Skytree Cumulus systeem kan ongeveer 12 kg/dag leveren. In de paprikapraktijk wordt veelal gedoseerd met 150kg/Ha/uur. Een afdeling van 1000 m² zou bij dergelijke doseersnelheden nog geen uur belevend kunnen worden vanuit het Skytree systeem, wat betekent dat het Cumulus systeem de afdeling alleen gedeeltelijk van CO₂ kan voorzien.
- De CO₂ aanpak wordt uitgevoerd binnen een compleet duurzaam teeltconcept, waarbij middels maximaal isoleren, geen minimumbuis, een aangepaste teeltstrategie, en ontvochtiging met warmteterugwinning, gestreefd wordt naar een netto gasverbruik van slechts 4 m³/m².

2.2.2 Teeltdoelstellingen

Door middel van het inzichtelijk maken van gewasfotosynthese worden drie doelen nagestreefd:

1. Het CO₂-rendement (gewasfotosynthese/dosering) kan worden vastgesteld, waarmee de balans tussen winst in gewasfotosynthese en verlies aan CO₂ inzichtelijk wordt.
2. Er kan worden berekend of er gekozen moet worden voor CO₂-behoud/besparing of voor verlaging van de teelttemperatuur: een CO₂-besparing via vermindering van de ventilatievoud brengt een verhoging van de gewasfotosynthese en van de teelttemperatuur met zich mee. Deels kan een hogere temperatuur ook nog gecompenseerd worden door koelere nachten en koeler telen op donkerdere dagen. Als de balans richting een te hoge temperatuur gaat, dan moet juist maximaal worden geventileerd en CO₂ worden bijgedoseerd tot 415 ppm (buitenlucht concentratie), zodat de CO₂ verliezen via de ramen verminderd worden.
3. Naast het beperken van de dosering op basis van temperatuur en raamstand, is ook beperking van de dosering op basis van instraling belangrijk. Bij hogere instraling kan de plant extra CO₂ dosering beter benutten, terwijl bij lagere instraling licht de limiterende factor kan zijn voor fotosynthese, en minder of niet de beschikbare CO₂.

Uitgezocht wordt of deze benadering het rendement op de inzet van CO₂ kan verhogen.

2.2.3 Nevendoelstelling

Integrale aanpak van een duurzaam teeltsysteem. De te toetsen strategie voor duurzamer omgaan met CO₂ en zo laag mogelijk energiegebruik wordt uitgevoerd in een paprikaproef waarin ook aandacht is voor gewasgezondheid. Dit laatste door de combinatie van insectengaas, een gewasbeschermingsstrategie met een minimale inzet van chemische gewasbeschermingsmiddelen, en gebruik van houtvezelsubstraat als alternatief voor steenwol dat mogelijk weerbaarder is tegen wortelziekten.

2.2.4 Inpassing

Dit project bouwt voort op de resultaten uit het project 'De Nederlandse paprikateelt weerbaar richting fossielvrij'³. Hierbij zijn in 2023 goede stappen gezet richting verdere verduurzaming van de paprikateelt, met inpassing van actieve ontvochtiging met warmteterugwinning.

Het project maakt gebruik van de CO₂ berekeningen uitgevoerd voor paprika binnen het project 'Efficiënter gebruik CO₂: paprika (Pieter de Visser, 2023)

Leerpunten uit het project "Besparing op energie en CO₂ door te sturen op de ratio temperatuur en assimilatie (RTA) bij komkommer als modelgewas" (KaE 2023) worden toegepast.

In het Improvement Centre liep parallel aan dit project een 2^{de} onderzoeksproject in paprika, die aansluit op de ontwikkelingen richting een fossielvrije glastuinbouw. In een afdeling van 250 m² is het zonnepanelen systeem van Voltiris geïnstalleerd. Met dit systeem kan zonne-energie in de kas worden geoogst zonder dat dit ten kosten zou moeten gaan van de productie. Naast het feit dat de filters alleen het PAR licht doorlaten, en de overige straling reflecteren naar een zonnepaneel, kan dit systeem ook teelttechnische voordelen hebben doordat overtollige energie uit de kas wordt weggehouden. Dit zou kunnen betekenen dat minder ventilatie nodig is, en kan daarmee voordelig kunnen zijn voor het CO₂ rendement van die kas.

3 Aanpak en kasinrichting

3.1.1 Kasinrichting

De proef is uitgevoerd in afdeling 9 op het Delphy Improvement Centre in Bleiswijk. Deze afdeling is 1000m² groot en is uitgerust met 18 dubbele goten. Hiervan zijn 4 paden gebruikt voor een substraatproef en drie paden voor een rassenproef. De exacte kasindeling is te vinden in Bijlage I Kas indeling. De uitrusting en kenmerken van de kas zijn te vinden Tabel 1. Het hoofdtras van de proef was Alzamora (Rijk Zwaan). Daarnaast zijn er rassen getest van de veredelaars Rijk Zwaan, Enza Zaden en De Ruiter Seeds. Voor de substraatproef is de steenwol referentie vergeleken met houtvezelmatten. Er is geteeld met een driestengelsysteem en een stengeldichtheid van 6.3 stengels/m². Het verloop van de teelt was als volgt:

Zaaidatum: 28-10-2023

Plant datum: 15-12-2023

Eerste oogst: 10-04-2024

Laatste oogst: 8-11-2024

Tabel 1. Uitrusting en kernmerken van de kasafdeling 9

Bruto oppervlakte	1008 m ² (28,8 m * 35 m)
Netto oppervlakte	936 m ² (28,8 m * 32,5 m)
Poothoogte	6,68 m
Kasdek type	Venlo dek, tralie met 2 kappen per tralie
Glastype	Extra helder glas
Verwarming	Buisrail
CO ₂ dosering	OACAP zuiver CO ₂ , Skytree Cumulus
Doeken	Luxous 1147 FR (bovenste dradenbed) Obscura 9970 FR A (onderste dradenbed) Luxous 1147 FR (onderste dradenbed)
Teeltsysteem	Dubbele goten
Substraat	Cultilene steenwolmatten (1000 x 120 x 75 mm)
Verneveling	Capaciteit 0,5 L/m ² .uur, druppelgrootte 3 µm
Klimaat computer	Priva
Meetboxen	Priva meetboxen onder en boven schermdoek
Ontvochtiging	Van Dijk AVS-C

3.1.2 CO₂ dosering

In samenwerking met Plant Lighting B.V. is een strategie opgesteld en geïmplementeerd in de Priva klimaatcomputer, waarbij de maximumdosering wordt beïnvloed door de instraling van zonlicht, en de doseersnelheid wordt beïnvloed door de ventilatievoud.

3.1.3 CO₂ bron

Tot september 2024 is alle gedoseerde CO₂ afkomstig geweest van OCAP. Daarna is een SkyTree Cumulus machine geïmplementeerd. Deze vulde een CO₂ tank waarin ongeveer 25kg CO₂ kon worden opgeslagen. Bij 90% tankvulling schakelde de CO₂ dosering over van OCAP naar de tank. Vervolgens werd uit de tank gedoseerd tot deze 10% vulling bereikte, waarna weer werd overgeschakeld naar OCAP en de tank werd aangevuld vanuit Skytree Cumulus.

3.1.4 Doeken en folie

De kasafdeling was uitgerust met drie doeken waarvan twee energie doeken (Luxous 1147 FR) en één aluminium verduisteringsdoek (Obscura 9970 FR A). Het verduisteringsdoek lag samen met een energiedoek op één dradenbed en dus konden er maximaal twee doeken tegelijk worden toegepast. Het verduisteringsdoek werd 's nachts toegepast omdat het een hogere isolatiewaarde heeft in vergelijking met een energiedoek.

Vanaf de start van de teelt tot en met week 9 is een AC folie gebruikt voor extra kasisolatie en om het vochniveau in de kas in het begin van de teelt te verhogen. Verwacht werd dat dit positieve effecten op de teelt heeft en dat meer terugwinning van energie mogelijk is via ontvochtiging.

3.1.5 Ontvochtiging

De afdeling was uitgerust met een ontvochtigingssysteem met warmteterugwinning (AVS-C). In de kopgevel waren twee units geplaatst. Samen hadden ze een debiet van 12 m³/m²/uur. De koelcapaciteit van de units was 37.8 kW en de verwarmingscapaciteit 16.4 kW. Het systeem bestaat uit een koudeblok waarin de aangezogen kaslucht wordt afgekoeld tot onder het dauwpunt. Hierdoor condenseert een deel van het vocht in de aangezogen lucht. Hierna wordt de koude lucht terugverwarmd naar de kasluchttemperatuur. Het koelwater uit het koude blok warmt op tijdens het koelen van de kaslucht. De teruggewonnen warmte wordt via een warmtepomp opgewaardeerd en opgeslagen voor later gebruik.

3.1.6 Substraat

Er zijn twee substraten gebruikt in dit project. Het hoofdsubstraat was steenwol, Cultilene Reaxion 1000mm x 120mm x 75mm. Daarnaast is er in vier goten een gebonden houtsubstraat, 1000mm x 120mm x 75mm van Cultilene toegepast met als doel het effect op weerbaarheid, groei en productie inzichtelijk te maken.

3.1.7 Opkweek

In de opkweek zijn alleen steenwolpotten, PC Cultilene, gebruikt. De planten van 1 goot zijn getopt tijdens de opkweek, waarna zijstengels zijn gevormd en aangebonden.

3.1.8 Registraties en metingen

De kas was uitgerust met twee meetboxen die aangesloten waren aan de klimaatcomputer, één bij de kop van het gewas en één boven het doek. Ook zijn twee PAR-sensoren in de kas geplaatst ter hoogte van de top van het gewas. Deze sensoren zijn maandelijks meebewogen met de kop van het gewas.

De vruchtzetting per oksel is geregistreerd en de oogst van 20 stengels voor beide substraten. Aan de hand van deze metingen is per week de zetting per m^2 berekend, de plantbelasting per m^2 en de uitgroeiduur. Ook de lengte groei is wekelijks gemeten. De productie is per goot geregistreerd en omgerekend naar productie per m^2 . Van beide substraten zijn 120 vruchten per oogstmoment gebruikt om het gemiddelde vruchtgewicht te bepalen en de sortering op basis van zes gewichtsklassen. Per oogstmoment zijn er 20 vruchten voor beide substraten apart gezet en na tien dagen beoordeeld op binnenrot.

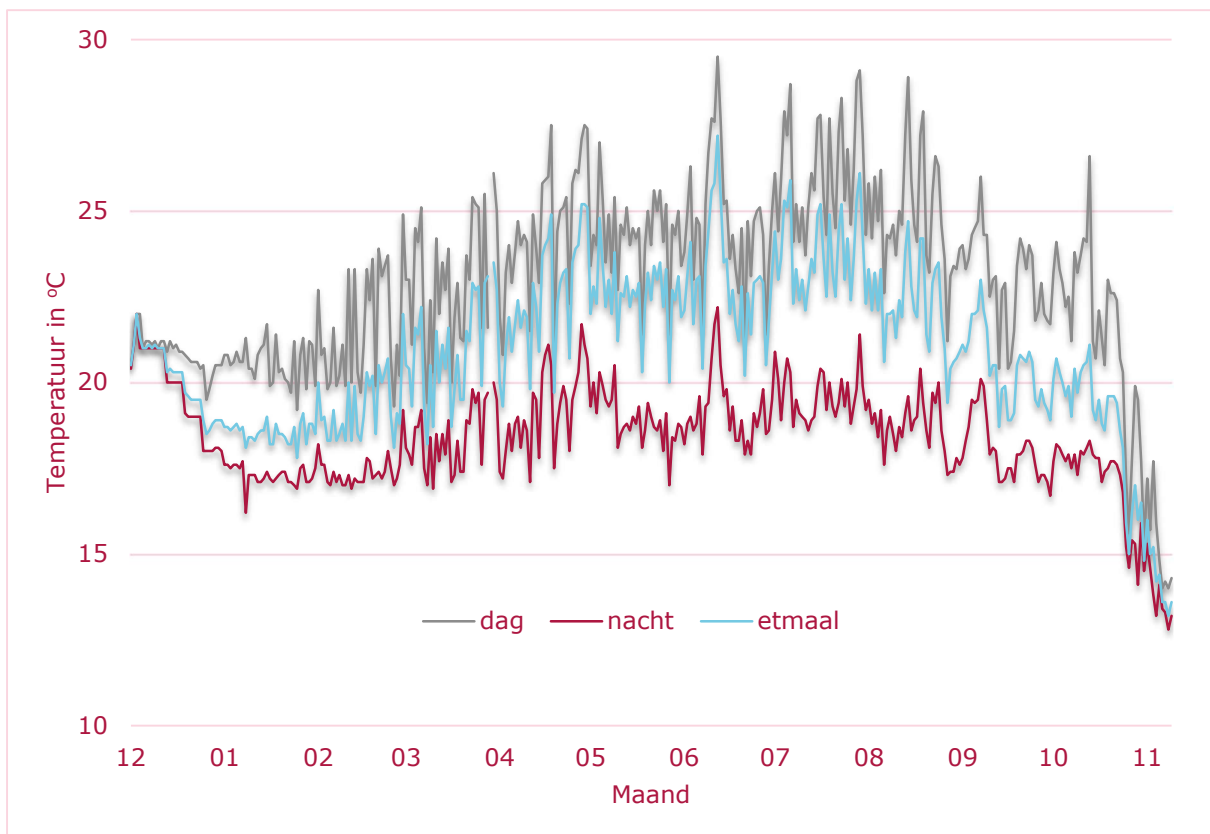
Het energiegebruik is tijdens het project op dagelijkse basis gemonitord aan de hand van energiemeters, zowel de energie input als energie oogst van de AVS-C.

Er is wekelijks gescout op ziekten en plagen. Hierbij werden elke week zes van de achttien paden gescout waardoor elke drie weken de hele kas was gescout. Elke maand werden alle paden nagelopen op botrytis, fusarium en uitval.

4 Resultaten van de teelt

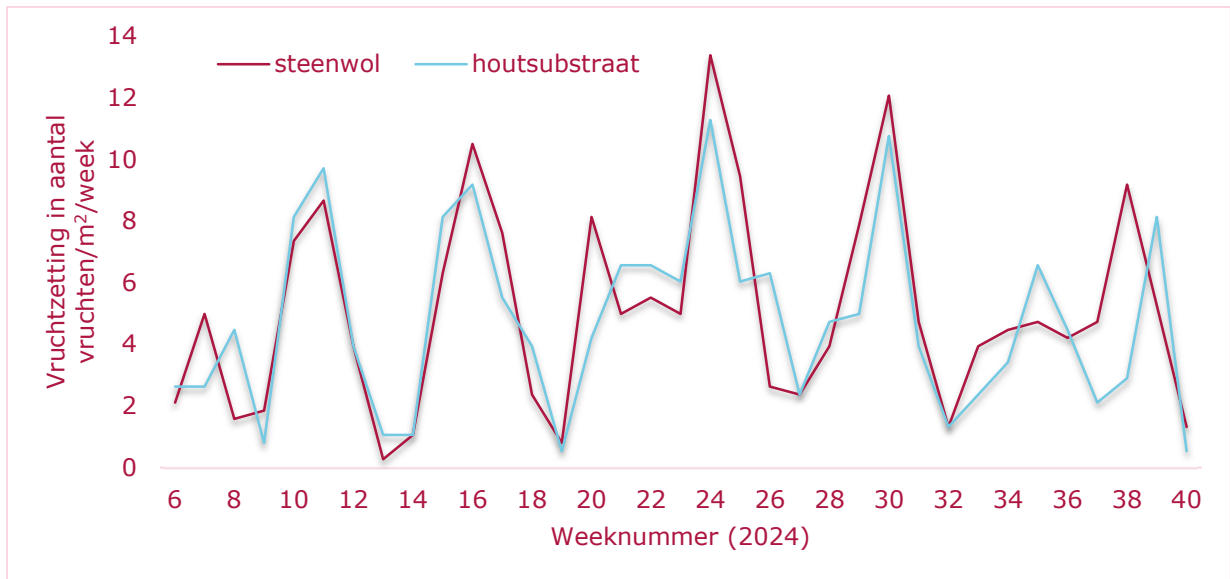
4.1 Verloop van de teelt

Op 8 december is een 5-weekse plant gepoot in de kas. Tot 26 december is vegetatief gestuurd op inworteling bij een etmaaltemperatuur opbouwend tot 21 graden Celsius (Figuur 1). Daarna is een dag-nachtverschil opgebouwd door de nachttemperatuur wekelijks met 1 graad te verlagen. Vanaf 15 januari bereikte de nachttemperatuur het streefbereik van 17,0-17,5 graden en werd generatief gestuurd op zetting. Daarna is de temperatuur met het licht mee verhoogd tot mei, en vervolgens is gestuurd op een streef-etmaaltemperatuur van 21 graden. Vanaf september is deze geleidelijk verlaagd. Zie appendix 2 voor gedetailleerde grafieken van instellingen van buis, schermen en raamstanden.



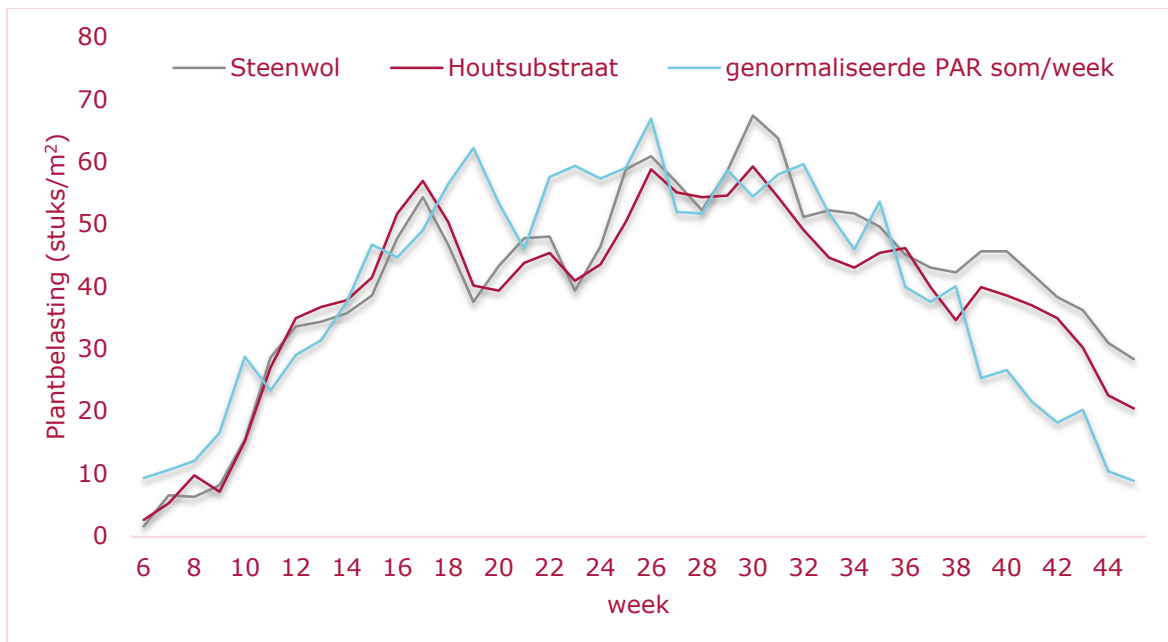
Figuur 1. Kastemperatuurverloop over het teeltseizoen.

Het eerste zetsel werd aangelegd in week 6 bij planten op steenwol (Figuur 2). Hierbij is gepoogd 1 vrucht per stengel aan te leggen op het 5^e oksel. De planten op het houtsubstraat waren in die week qua ontwikkeling nog niet aan zetting toe, daarom is besloten om daar de bloemen pas vanaf week 7 te laten zitten. Daarna is het tweede zetsel aangelegd in week 10 en 11. Vervolgens kwam het derde zetsel in week 15-17 en ook daarna is het gewas de vruchten in golven blijven zetten (in telerstermen een "hozerig" gewas) met pieken in week 20-21, 24-25, 29-30, 35 en 38-39.



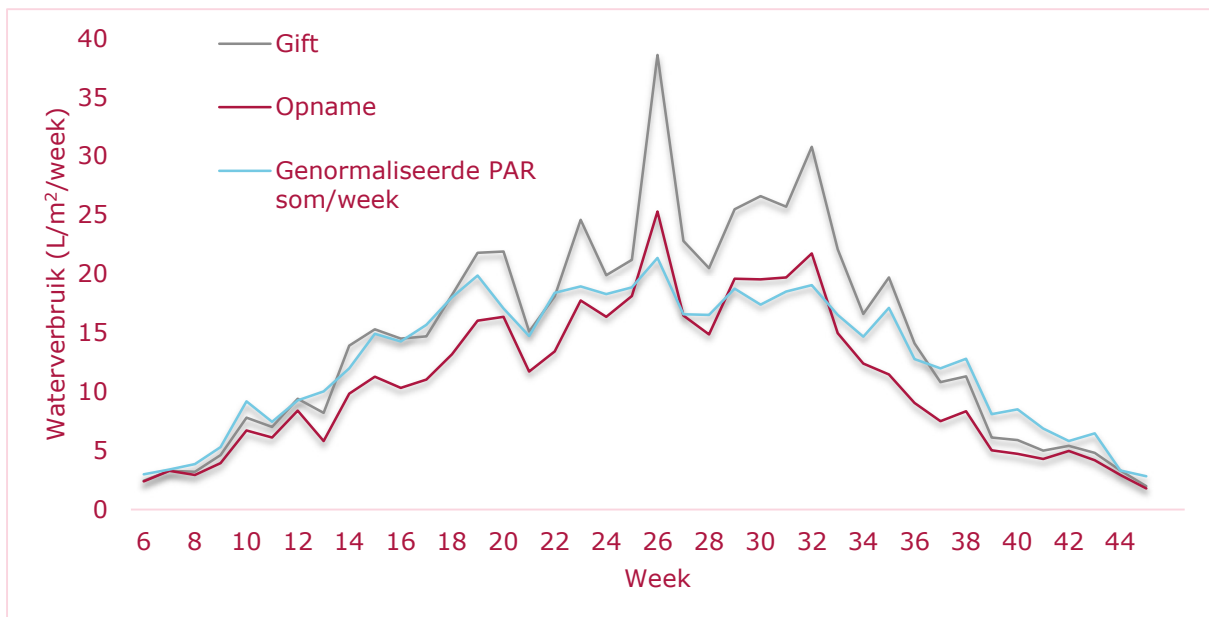
Figuur 2: Zetting in aantal vruchten per m² teeltoppervlak. Hieruit blijkt dat het gewas het hele seizoen zetsels is blijven maken.

De plantbelasting bouwde snel op tot een belasting van 54 vruchten per m² in week 17 (Figuur 3). Na de oogst van het tweede zetsel daalde dit weer, maar bleef tot week 42 boven de 40 vruchten per m². Vanaf het moment van volledige belasting (week 11) volgde de plantbelasting het beschikbare licht tot week 35. Na week 35 bleef de plantbelasting op steenwol relatief hoog, terwijl die op houtsubstraat sneller daalde en beter in verhouding bleef tot het beschikbare licht. Vanaf week 39 was de vruchtbelasting op beide substraten hoog in vergelijking met het beschikbare licht.



Figuur 3: Plantbelasting in aantal vruchten per m² teeltoppervlak. Ter vergelijking is de weeksom van gemeten PAR toegevoegd, genormaliseerd zodat het oppervlak onder de curve gelijk is aan het gemiddelde onder de twee plantbelastinglijnen. De verhouding tussen de PAR som en de plantbelasting kan zo gemakkelijk afgelezen worden. Voor steenwol komt de genormaliseerde lijn vanaf week 36 onder de plantbelasting, voor houtsubstraat vanaf week 39.

Watergift is gestuurd op basis van een percentage drain van 20-30% (Figuur 4). In de productieperiode van april tot en met oktober is gemiddeld 26% drain gerealiseerd. De watergift en -opname volgden grotendeels de gerealiseerde PAR som per week, waarbij opvalt dat vanaf week 36 de opname achterblijft bij de PAR som. Dit kan duiden op een probleem met opname van water via de wortels.



Figuur 4. Watergift (op steenwol meetgoot) versus PAR som per week. De PAR som is zodanig genormaliseerd dat het oppervlakte onder de curve gelijk is aan dat van het gemiddelde van gift en opname. Wanneer PAR en watergift/drain in balans zijn, is de verwachting dat de blauwe lijn het gehele seizoen tussen de grijze en donkerrode lijnen in blijft. Vanaf week 36 lopen gift en opname echter achter bij de genormaliseerde PAR som, wat duidt op een probleem met wateropname.

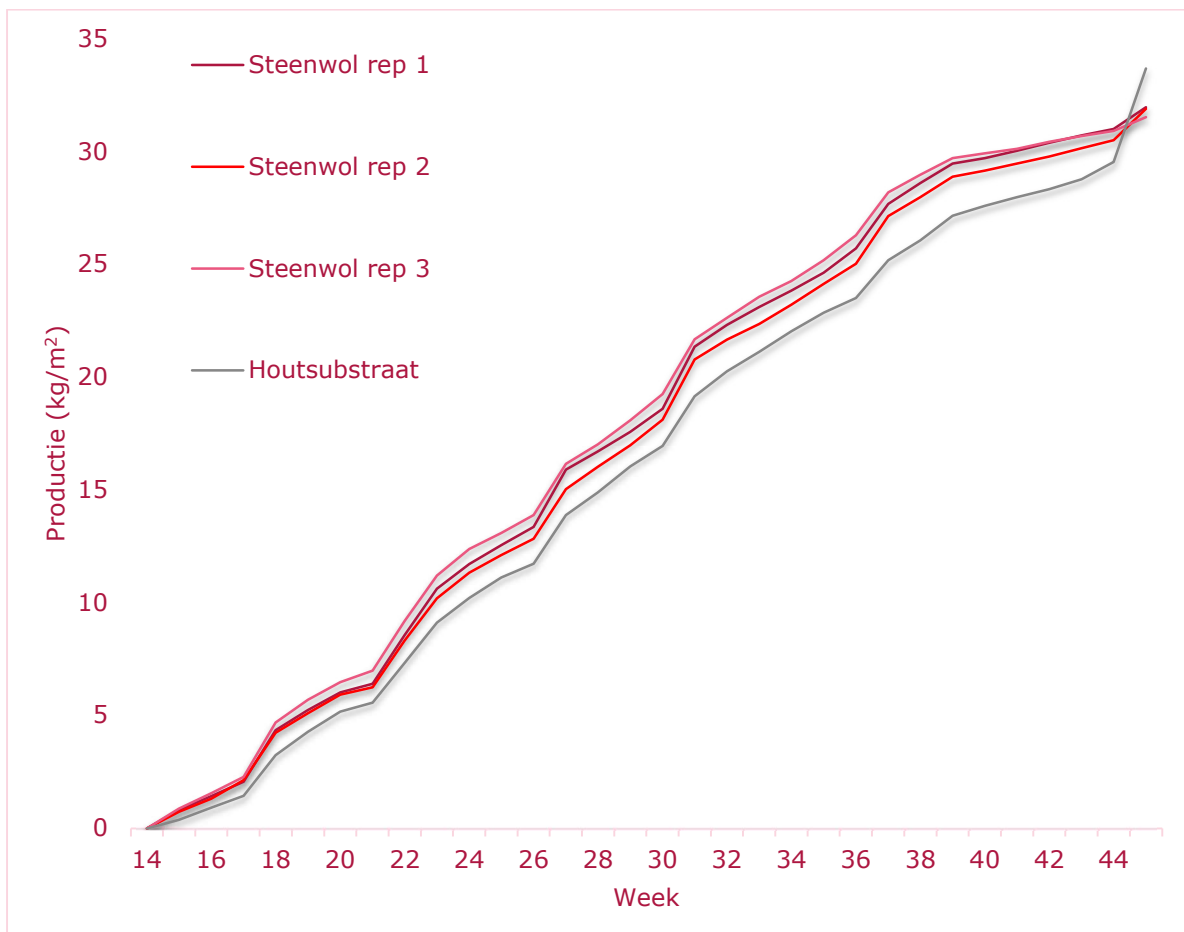
Tijdens het seizoen zijn enkele problemen met plagen ontstaan. In week 30 is een spintinfectie opgetreden. Deze was pas in week 33 onder controle. Vanaf week 34 is een bladluisinfectie ontstaan, die in week 36 weer onder controle was.

Vanaf week 33 viel op dat sommige planten op steenwol langzamer herstelden van deze infecties en achter begonnen te lopen qua lengtegroei en vruchtzetting. Hierdoor werd het gewas ongelijk. Hoewel het beeld hiervan leek op wortelproblematiek, werden de wortels visueel in deze periode nog als goed beoordeeld. Alle planten op steenwol werden echter geleidelijk steeds zwakker, met minder groei en doffe vruchten. Vanaf week 39 werden ook de wortels visueel als steeds slechter beoordeeld, en was duidelijk dat het laatste zetsel zou mislukken. Op het houtsubstraat zijn de planten wel goed hersteld van de infecties en in balans blijven groeien tot het einde van de teelt. De wortels zijn hierbij elke keer als goed beoordeeld.

4.2 Productie

Vanaf week 15 zijn de eerste vruchten geoogst (Figuur 5). Hierbij is vrijwel direct de productie op steenwol hoger geweest dan op de houtvezelmatten. Dit verschil is over het seizoen opgelopen tot ongeveer 2kg/m^2 in week 42. Van de houtvezelmatten is echter in de laatste 3 weken nog $5,3\text{kg/m}^2$ geoogst, terwijl dit voor steenwol slechts $1,6\text{kg/m}^2$ was. Hierdoor is de totale productie van de houtvezelmatten uiteindelijk uitgekomen op $33,7\text{kg/m}^2$, versus $31,8\text{kg/m}^2$ voor de steenwolmatten.

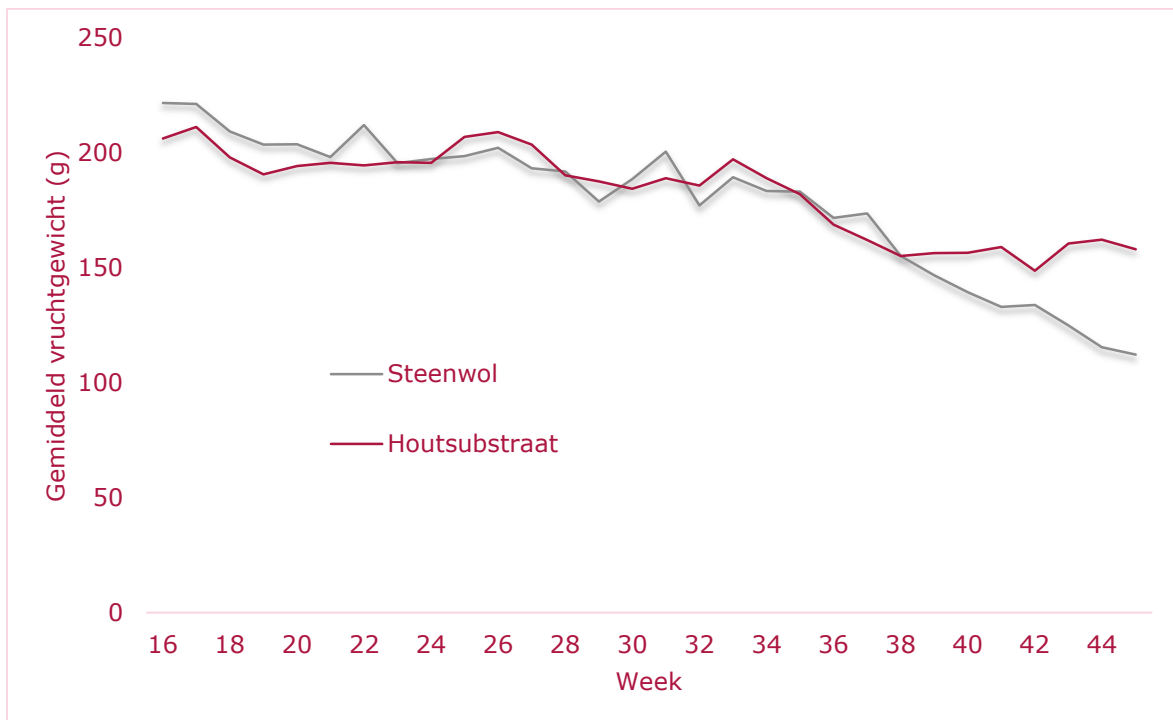
Er is in deze proef ook een experiment gedaan met getopte zaailingen (behandeling "opkweek") op steenwol substraat. Door de zaailing te toppen, wordt het gemakkelijker om 3 gelijkwaardige stengels te kweken. De vraag was of dit zich vertaalt in een betere opbrengst. Dit bleek zo te zijn: de getopte planten hebben gedurende het gehele seizoen een iets hogere productie gehaald. In week 39 was dit verschil opgelopen tot $1,8\text{kg/m}^2$. Bij deze planten traden dezelfde plantgezondheidsproblemen op als bij de niet getopte planten op steenwol.



Figuur 5: cumulatieve productie in kg/m^2 van de behandelingen "houtsubstraat" en "opkweek" vergeleken met 3 referentiegoten op steenwol. Bij alle oogsten zijn alleen rode paprika's geoogst, behalve bij de laatste oogst, toen ook volgroeide groene vruchten geoogst zijn.

Het gemiddeld vruchtgewicht (Figuur 6) daalt gedurende het seizoen, maar voor houtsubstraat stabiliseert het aan het eind van het seizoen boven de 150g, terwijl steenwol blijft doordalen. Opvallend is dat het verschil in gemiddeld vruchtgewicht tussen houtsubstraat en steenwol ontstaat vanaf week 37. Dit is 2 weken nadat de vruchtzetting voor steenwol te hoog werd voor het beschikbare licht (Figuur 3). De sterke afname in vruchtgewicht is daardoor te verklaren, er waren niet meer genoeg assimilaten beschikbaar om de vruchten uit te laten groeien. Bij houtvezel bleef de plantbalans enkele weken langer behouden, en bleef daardoor ook de vruchtmaat groter.

Voor alle behandelingen geldt dat het vruchtgewicht op het einde van de teelt te laag geworden is. De commerciële waarde van de productie was met name bij de vruchten geoogst vanaf steenwol in het laatste zetsel zeer laag. Een commerciële teelt met dergelijke lage vruchtgewichten zou waarschijnlijk eind september voortijdig beëindigd zijn. Van de planten op houtsubstraat was in de laatste oogst iets minder dan de helft van de geoogste vruchten zwaarder dan 160g en daarmee commercieel verkoopbaar.



Figuur 6: Verloop van gemiddeld vruchtgewicht over het seizoen.

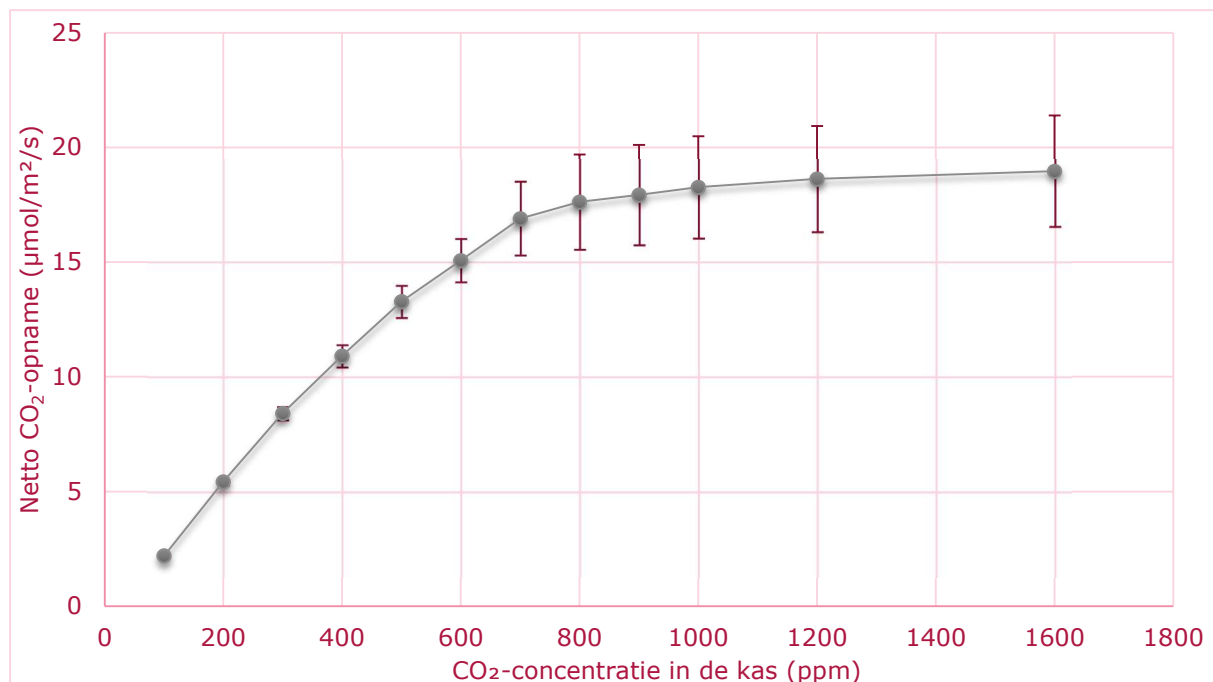
5 Resultaten CO₂-besparing

Dit hoofdstuk beschrijft de proefresultaten gericht op CO₂-besparing. Allereerst zullen de begrippen (5.1) en de gevolgde methoden (5.2) worden toegelicht, waarna de resultaten worden gepresenteerd (5.3). Ten slotte worden er algehele conclusies getrokken (5.4).

5.1 Theoretisch kader

Bij een toenemende CO₂-concentratie in de kas neemt de fotosynthesesnelheid toe. CO₂ besparen door het verlagen van de concentratie beneden de 800 ppm betekent inleveren op de gewasfotosynthese. De gewasfotosynthese verzadigt namelijk bij hoge CO₂-concentraties, maar neemt snel af bij concentraties onder de 800 ppm. Dit verband geldt bij elk lichtniveau en heeft te maken met de eigenschappen van Rubisco: het enzym dat CO₂ maar ook O₂ bindt afhankelijk van de concentratie van beide (Figuur 7; Voor toelichting zie bijlage 2 & 3 in Hogewoning *et al.*⁴)

De benutting van CO₂ kan worden uitgedrukt via het CO₂-rendement. Het CO₂-rendement wordt gedefinieerd als de berekende gewasfotosynthese (uitgedrukt in opgenomen CO₂) als aandeel van de gedoseerde hoeveelheid CO₂. Hoe hoger dit rendement, hoe beter de gedoseerde CO₂ wordt benut. Dit rendement kan groter dan 100% zijn indien er netto door de gewasfotosynthese meer CO₂ aan de atmosfeer wordt onttrokken, dan er via dosering wordt toegevoegd.



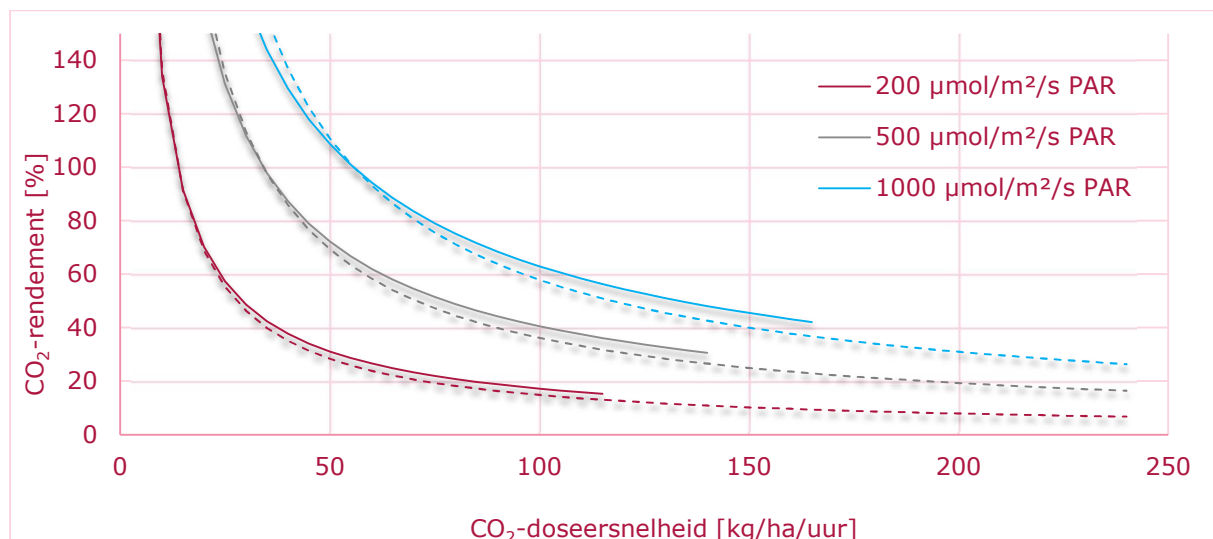
Figuur 7. De relatie tussen de netto CO₂-opname en CO₂-concentratie in de kas laat een verzadigend verband zien. Deze curve is een voorbeeld van komkommer en is gemeten bij 1000 μmol/m²/s PAR en een luchttemperatuur van 24.6 °C (februari 2024). Boven CO₂-concentraties van 800 ppm neemt de opname van CO₂ steeds minder snel toe (verzadiging). Door licht sluitende huidmondjes blijft de toename langer doorgaan dan doorgaans het geval is. Een lagere CO₂-concentratie aanhouden betekent echter een snelle daling van de CO₂-opname. De foutbalken laten de standaarddeviatie zien (voornamelijk bladvariatie en nauwelijks variatie op het effect van CO₂-concentratie).

Een modelstudie van Plant Lighting liet kwantitatief zien dat een hoge ventilatievoud een enorme verliesfactor is voor de CO₂ en het CO₂-rendement⁵. Ditzelfde inzicht kwam naar voren in de deskstudie van Visser¹. De modelstudies lieten ook zien dat de lichtintensiteit (PAR) een zeer grote invloed heeft op het CO₂-rendement. Aanvullende berekeningen laten zien dat de lichtintensiteit een grotere invloed heeft op het CO₂-rendement dan de ventilatievoud (Figuur). Door de CO₂-doseersnelheid afhankelijk te maken van de lichtintensiteit kan een hoger CO₂-rendement bereikt worden. Er komen twee strategieën naar voren waarmee zo efficiënt mogelijk met CO₂ kan worden omgegaan:

- Bij toenemende ventilatievoud een afbouwende CO₂-concentratie in de kas aanhouden (verliezen beperken).
- Bij toenemende lichtintensiteiten een opbouwende doseersnelheid hanteren (lichtafhankelijk doseren).

De eerste strategie focust op het beperken van de verliezen van CO₂ naar de buitenlucht. Via de luchtramen vindt er namelijk uitwisseling van CO₂ plaats in de richting van de laagste concentratie, wat in een kas doorgaans naar buiten is. Door bij hoge luchtuitwisseling de CO₂-concentratie in de kas te beperken kan ook het verlies naar buiten worden beperkt. De luchtuitwisseling kan worden uitgedrukt via de ventilatievoud (de vervanging van lucht in de kas). Bij hoge ventilatievoud benadert de CO₂-concentratie in de kas die van de buitenlucht en wordt er enkel CO₂ gedoseerd om de opname van het gewas te compenseren.

De tweede strategie richt zich op het verhogen van het rendement via het veranderen van de maximale doseersnelheid bij verschillende lichtintensiteiten. Bij hogere lichtintensiteiten wordt er namelijk meer CO₂ opgenomen. Vanuit deze gedachte wordt daarnaast automatisch minder CO₂ gedoseerd in het najaar, wanneer de lichtsommen van nature afnemen. Gedurende de proef is dit inzicht ontstaan waardoor dit vanaf week 34 werd beproefd.



Figuur 8. Het CO₂-rendement bij verschillende lichtintensiteiten (PAR) bij een gegeven doseersnelheid. Te zien is dat bij hogere lichtintensiteiten een hogere doseersnelheid nodig is om een vast rendement te behalen. Dit verband verandert nauwelijks bij variaties in ventilatievoud en is afgebeeld bij ventilatievouden van 2 (doorgetrokken lijnen) en 10 (gestreepte lijnen) /uur. Bij de lage ventilatievoud wordt 800 ppm bij lagere doseersnelheden behaald waardoor de lijn eerder stopt. Bij hoge ventilatievouden kan het CO₂-rendement hoger liggen wanneer er weinig CO₂-dosering is en de concentratie onder die van de buitenlucht komt.

5.2 Aanpak

Om de doelstelling van een maximale dosering van 15 kg/m² CO₂ per teelt te halen en aan de gewasbehoefte (berekend uit de productieprognose en de verdeling en samenstelling van drogestof) te voldoen is een minimaal CO₂-rendement van 55% nodig (Tabel 2). De gewasfotosynthese - uitgedrukt in opgenomen CO₂ - kan worden berekend uit klimaatgegevens op 5-minutenbasis, fotosyntheseparameters en het aanwezige bladoppervlak. Voor een uitgebreide beschrijving van het berekenen van de gewasfotosynthese zie Vervoort et al.².

Tabel 2. De parameters waarmee het minimaal benodigde CO₂-rendement is bepaald vanuit de gewasbehoefte. Verder zijn er aannames gedaan voor de oogstindex en de hoeveelheid benodigde assimilaten voor 1 gram drogestof en de onderhoudsademhaling.

Parameter	Grootheid	Eenheid
Productie ³	34.4	kg/m ²
Drogestofpercentage vruchten ⁶	7	%
Oogstindex (deze teelt)	65	%
Drogestofproductie (vegetatief + generatief)	3.9	kg/m ²
Maximale CO ₂ -dosering (doelstelling)	15	kg/m ²
Benodigde CO ₂ t.b.v. gewasfotosynthese	8.2	kg/m ²
Minimaal benodigd rendement voor doelstelling	55	%

De twee CO₂-besparende strategieën zijn in dit project als stuurregels in de klimaatcomputer toegepast. Voor de eerste strategie 'dosering beperken op ventilatievoud' is de CO₂-concentratie vanaf week 21 tussen een ventilatievoud van 0 – 5 /uur lineair van 800 naar 435 ppm (net boven de buitenconcentratie) afgebouwd (Figuur 9). Vanaf week 34 is de tweede strategie 'lichtafhankelijk doseren' toegepast. Hierbij nam de maximale doseersnelheid lineair toe van 40 naar 120 kg/ha/uur bij stralingsintensiteiten tussen de 0 en 700 W/m². De maximale doseersnelheid nam boven de 700 W/m² aan straling niet verder toe (Figuur 9).

Om een indruk te krijgen van de effecten van de toegepaste strategieën zijn een aantal virtuele referenties doorgerekend vanaf week 23. Vanaf die week werd namelijk de ventilatievoud in de klimaatcomputer geregistreerd. Aan de hand van modellen van Plant Lighting is berekend hoeveel uitwisseling van CO₂ tussen de kas en de buitenlucht plaatsvindt, wat de CO₂-opname via het fotosyntheseproces was en welke dosering er nodig was (Tabel 3). Hiertoe zijn de klimaatgegevens van de proefkas als uitgangspunt gebruikt voor de volgende gemodelleerde situaties:

1. Proef

Hiervoor zijn enkel de gegevens van de klimaatcomputer gebruikt.

2. Niet doseren

In deze modelsituatie komt alle CO₂ van buiten en is de concentratie in de kas afhankelijk van de ventilatie.

3. Praktijkdosering

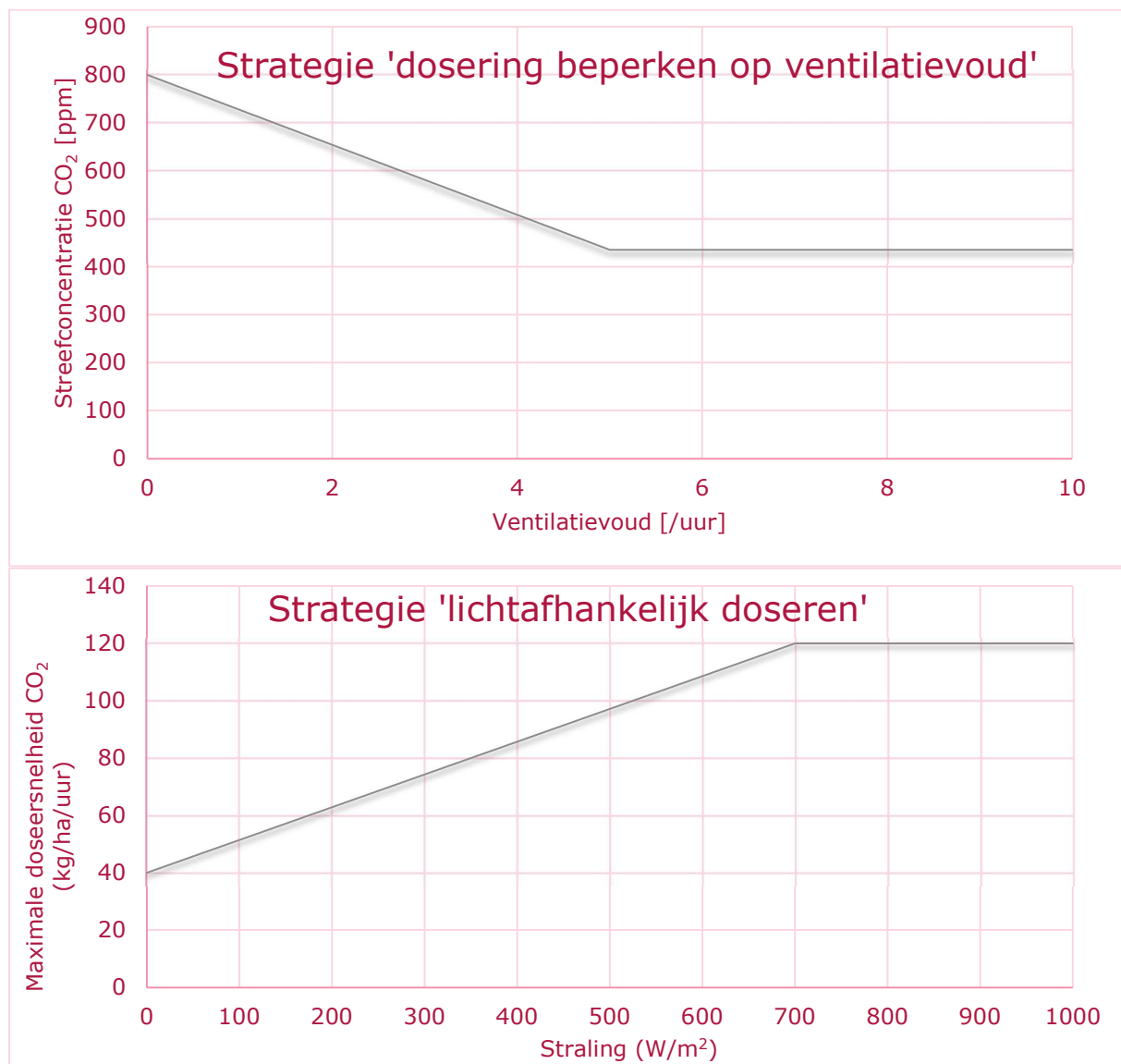
Deze modelsituatie is meer praktijkconform dan de proef. Er wordt met een maximale doseersnelheid van 150 kg/ha/uur tot 800 ppm gedoseerd *ongeacht* de ventilatievoud. In de nacht wordt geen CO₂ gedoseerd.

4. Hoog doseren

Vergelijkbaar met situatie 2, maar dan met een maximale doseersnelheid van 200 kg/ha/uur tot een concentratie van 1000 ppm.

5. Doseren op een vaste concentratie.

De laatste modelsituatie richt zich op eenzelfde totale hoeveelheid gedoseerde CO₂ als in de proef, maar dan gedoseerd met een vaste CO₂-concentratie in de kas (561 ppm). Dit geeft inzicht in hoe effectief CO₂ is toegepast door het gebruik van de twee strategieën in de proef. Deze concentratie is empirisch vastgesteld: in stapjes is de dosering verhoogd tot er een gelijk gebruik werd gerealiseerd als in de proef.



Figuur 9. Boven: de sturing voor de strategie 'dosering beperken op ventilatievoud'. Bij toenemende ventilatievoud werd de gewenste CO₂-concentratie verlaagd tot de buitenconcentratie. De resterende dosering compenseerde daardoor enkel voor de opname van CO₂ door het gewas. Onder: de maximale doseersnelheid werd bij toenemende straling verhoogd tot een maximum van 120 kg/ha/uur bij 700 W/m² aan instraling.

Tabel 3. De gesimuleerde situaties waarmee de proef is vergeleken en de ingestelde maximale CO₂-concentraties en doseersnelheden.

Situatie	Maximale CO ₂ -concentratie (ppm)	Max. doseersnelheid (kg/ha/uur)
Proef	436 - 800	40 - 120
Niet doseren	415	0
Praktijkdosering	800	150
Hoog doseren	1000	200
Doseren op een vaste concentratie	561	200

5.3 CO₂ doseerstrategie

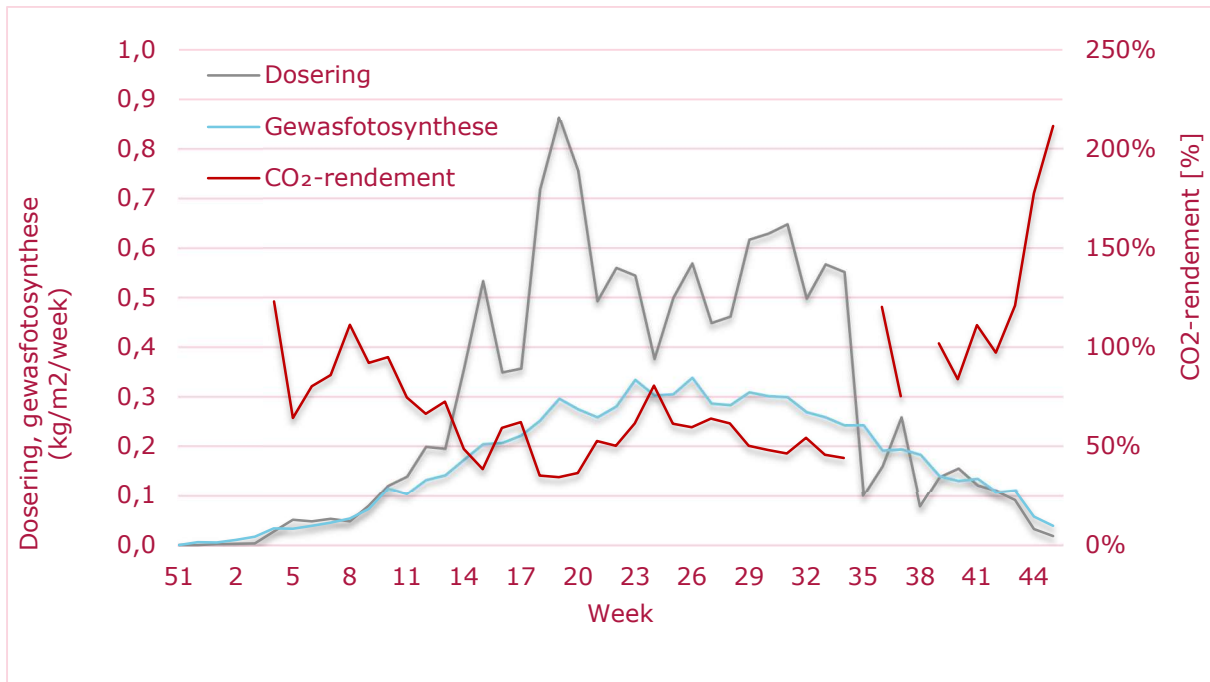
In de hele teelt is 13.6 kg/m² aan CO₂ gedoseerd met een productie van 31.8 kg/m². Hiermee is 91% van de doelstelling van 15 kg/m² CO₂ verbruikt. Dit is laag vergeleken met de praktijk (20 – 30 kg/m² en een productie van rond de 30 – 35 kg/m². De totale gewasfotosynthese (als opgenomen CO₂) over de teelt bedroeg 8.0 kg/m². Hiermee is een overall CO₂-rendement van 59% bereikt, wat hoger is dan het minimale rendement van 55% (Tabel 2; Tabel 4). De proefdoelstelling is daarmee ruim behaald.

Tabel 4. De gerealiseerde productie- en CO₂-besparingsgerelateerde cijfers voor de hele teelt.

Parameter	Grootheid	Eenheid
Productie	31.8	kg/m ²
Drogestofpercentage vruchten	7.7	%
Drogestofproductie (vegetatief + generatief)	3.0	kg/m ²
CO ₂ -dosering	13.6	kg/m ²
Gewasfotosynthese (CO ₂)	8.0	kg/m ²
Gerealiseerd CO ₂ -rendement	59	%

Het CO₂-rendement was doorgaans lager in de zomerperiode, doordat de ramen in die periode vaker geopend waren en er meer CO₂ verloren ging aan de buitenlucht. Door de CO₂-concentratie in de kas te verlagen met toenemende ventilatievoud konden de verliezen naar buiten toe worden beperkt. Dit is goed zichtbaar vanaf het moment dat deze strategie werd toegepast (week 21; Tabel 5).

Vanaf week 34 nam het rendement verder toe door het beperken van de ventilatie en het toepassen van de tweede strategie 'lichtafhankelijk doseren' (Figuur 10, Appendix 2 Figuur 3 & 9). Het rendement nam in een aantal weken toe tot boven de 100%. Dit kan wanneer er meer CO₂ wordt vastgelegd in de fotosynthese dan er wordt gedoseerd. Dit kan twee oorzaken hebben: (1) er komt netto CO₂ naar binnen. Daarvoor moet de concentratie in de kas onder de buitenwaarde liggen; en (2) de groei- en onderhoudsademhaling is een significante CO₂-bron: ruwweg 30% van de netto gewasfotosynthese gaat op aan groei-ademhaling dat als CO₂ weer vrijkomt in de kas. De onderhoudsademhaling van de bladeren is al verrekend in de netto gewasfotosynthese, maar de onderhoudsademhaling van de vruchten draagt vanwege de lange uitgroeiduur ook significant bij.



Figuur 10. De gewasfotosynthese uitgedrukt in CO₂ (lichtblauw), de CO₂-dosering (grijs) en het CO₂-rendement (rood) over de teelt. Vanaf week 21 is de strategie 'verliezen beperken' toegepast, vanaf week 34 is ook de strategie 'lichtafhankelijk doseren' ingezet. Tussen week 35 en 38 waren een aantal momenten met een onderbreking in de dosering, waardoor het rendement niet met zekerheid kon worden bepaald.

5.4 Virtuele referenties

In de modelsituaties waarin alternatieve doseringsstrategieën zijn doorgerekend, was het rendement lager naarmate de dosering toenam. De volgende zaken vallen op (Tabel 5):

- Zonder CO₂-dosering zou de gewasfotosynthese vanaf week 23 17% lager hebben gelegen, wat de meerwaarde van de dosering van CO₂ benadrukt.
- Meer CO₂ doseren in de 'praktijkdosering' en 'hoog doseren' situaties (plus 85% en 162% ten opzichte van de proef) leidde tot hogere gewasfotosyntheses (10% en 15% ten opzichte van de proef), maar ten koste van het rendement (40% en 29%). Interessant is dat praktijkdosering ruim 6 kg/m² meer CO₂ kost en 10% meer gewasfotosynthese oplevert. De stap erna naar hoog doseren kost weer 6 kg/m² en levert nog maar 5% extra gewasfotosynthese op. Dit komt overeen met het verband uit Figuur 7.
- In de situatie waarin met een vaste concentratie een gelijke hoeveelheid CO₂ werd gedoseerd als in de proef wordt ook een gelijke gewasfotosynthese en rendement behaald tussen week 23 – 45 (Tabel 5). **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** Dit is een interessant resultaat. Uit nadere analyse bleek dat in de periode week 23 - 33 sturen op een vaste 'lage' concentratie een hoger rendement haalde dan de regeling 'dosering beperken op ventilatievoud' in de proef. In de periode van week 34 tot het einde was dit echter andersom. Dit suggereert dat de regeling op ventilatievoud (Figuur 9) ertoe leidde dat bij hoge instraling (en hoge ventilatievoud) in het midden van de zomer er gestuurd werd op buitenluchtconcentratie waardoor er geen assimilatiewinst meer behaald wordt door verhoogd CO₂.
 - Extra simulaties laten zien dat beide strategieën (dosering beperken op ventilatievoud en lichtafhankelijk doseren) theoretisch tot een verhoogd CO₂-rendement leiden (resultaten niet afgebeeld). Het rendement in de proef lag tussen week 23 – 33 wat lager omdat in de proef nog werd gezocht naar de meest

geschikte regeling voor ventilatievoud, en de CO₂-concentratie in de kas toen regelmatig onder de buitenluchtconcentratie kwam wat productie kostte. Door te simuleren met de beoogde ventilatievoud-regeling met een ondergrens van 435 ppm kwam dit virtueel niet meer voor waardoor deze regeling wel beter is dan doseren op een vaste concentratie. Opgemerkt moet worden dat beide strategieën (dosering beperken op ventilatievoud & lichtafhankelijk doseren) verder geperfectioneerd kunnen worden.

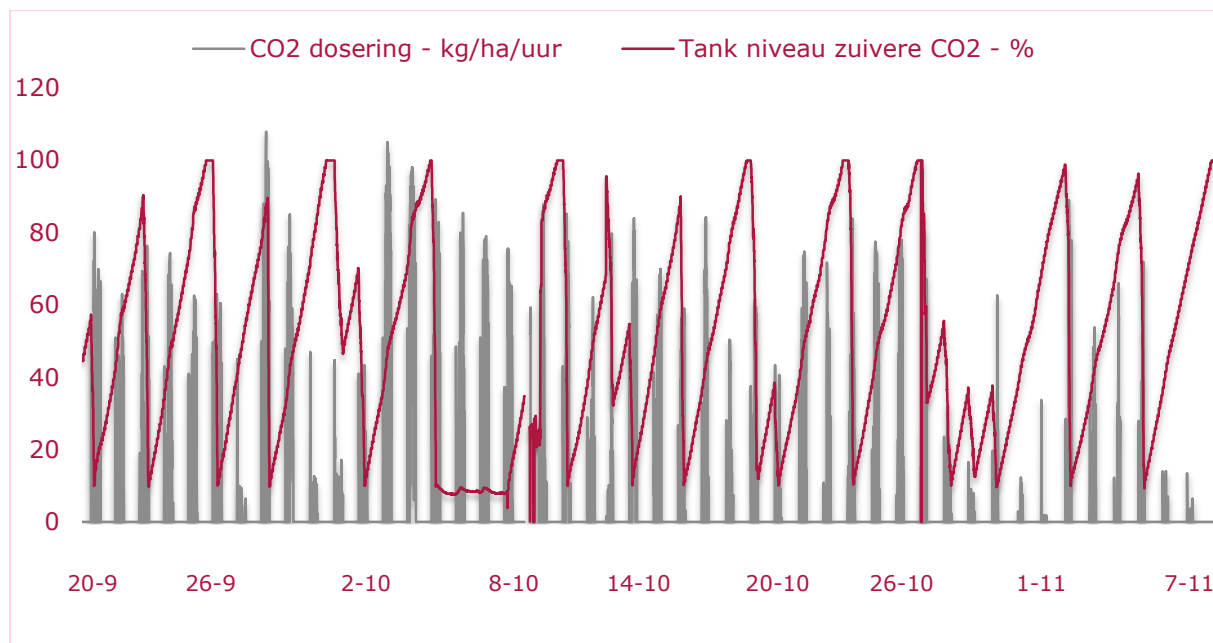
Tabel 5. Totale CO₂-dosering, het behaalde rendement en de gewasfotosynthese vanaf week 23 voor de verschillende modelsituaties. Vóór week 23 werd de ventilatievoud niet geregistreerd, waardoor er geen vergelijking kan worden gemaakt in die periode. Dit verdunt de resultaten na week 23.

Scenario	CO ₂ -dosering [kg/m ²]	CO ₂ -Rendement [%]	Gewasfotosynthese [kg/m ²]
Proef	7.6	67	5.1
Niet doseren	0.0 (-100%)	-	4.2 (-17%)
Praktijkdosering	14.0 (+85%)	40	5.6 (+10%)
Hoog doseren	19.9 (+162%)	29	5.9 (+15%)
Doseren op een vaste concentratie	7.6 (+0%)	67	5.1 (+0%)

6 Direct air capture

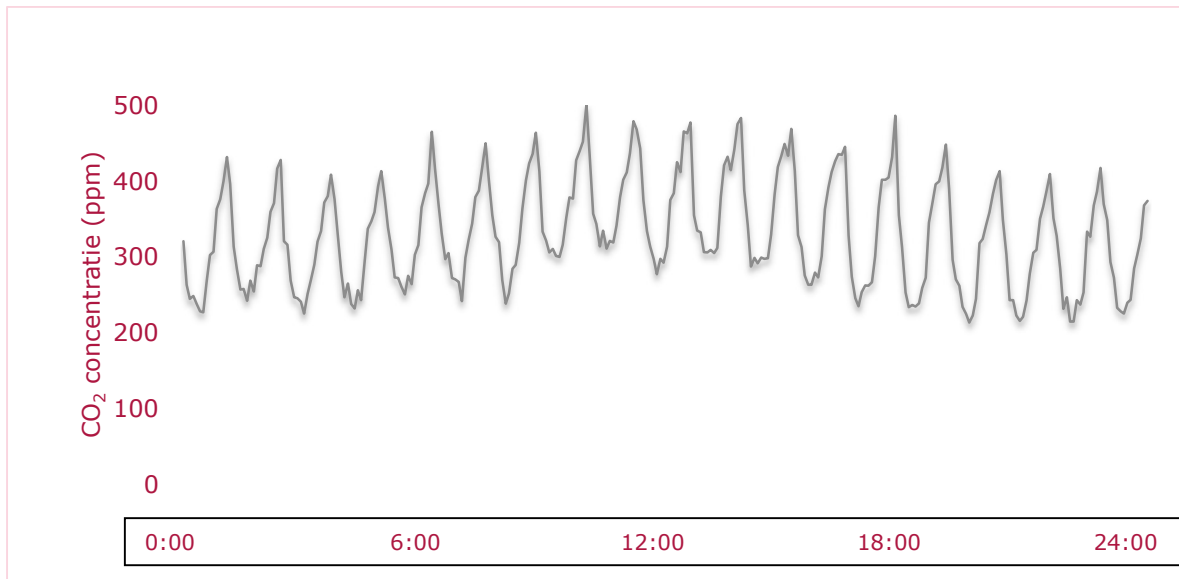
Op 6 september is een SkyTree Cumulus machine in bedrijf genomen. Na een aanloop- en testperiode heeft deze machine in totaal 14x de tank van 10% tot 90-100% gevuld tussen 20 september en 7 november. Met een maximum tankvulling van 25kg, leverde dit dus 280-315kg CO₂ op.

De maximale doseersnelheid was 12kg/uur op 1000m² (120kg/ha). Bij maximale dosering zou de tank dus ongeveer 2 uur CO₂ kunnen leveren. In de praktijk bleek dit te kloppen (figuur 11). Op 28 september werd de tank bijvoorbeeld tussen 15:00 en 17:00 volledig verbruikt. Op dagen dat er minder CO₂ behoefte was, bleek de tank langer mee te kunnen gaan. Zo werd van 27 oktober 7:00 tot 30 oktober 12:00 gedoseerd vanuit de tank (die continue werd aangevuld door de Cumulus machine). Dit waren bewolkte dagen waarop de fotosynthese laag was en de ramen gesloten bleven, waardoor het rendement van de gedoseerde CO₂ zeer hoog was.



Figuur 7: Verloop tankvulling en dosering CO₂ uit Skytree Cumulus machine. De rode lijn geeft de tankvulling aan van de Skytree CO₂ tank in procenten, deze wordt continue gevuld vanuit de Cumulus machine. De grijze lijn geeft de dosering aan in kg/Ha/uur. Wanneer de grijze lijn piekt en de rode lijn tegelijk daalt, wordt gedoseerd uit de tank, overige dosering werd geleverd door OCAP.

De Skytree Cumulus machine is niet weerbestendig en is om die reden in een geventileerde schuur opgesteld (volume ongeveer 600m³). De machine werkt in fases (Figuur 12): eerst bindt de machine CO₂ uit de buitenlucht (bindingsfase), en vervolgens wordt deze CO₂ weer losgemaakt en in een tank gepompt (regeneratiefase). De CO₂ concentratie in de schuur daalt bij elke bindingsfase in ongeveer 15 minuten met 200ppm. De totale lengte van een bindingsfase is 40 minuten, wat aangeeft dat de binding in de tweede helft van de bindingsfase minder efficiënt verloopt. Na de bindingsfase herstelt de CO₂ concentratie in de schuur zich tijdens de regeneratiefase weer door luchtuitwisseling met de buitenlucht.

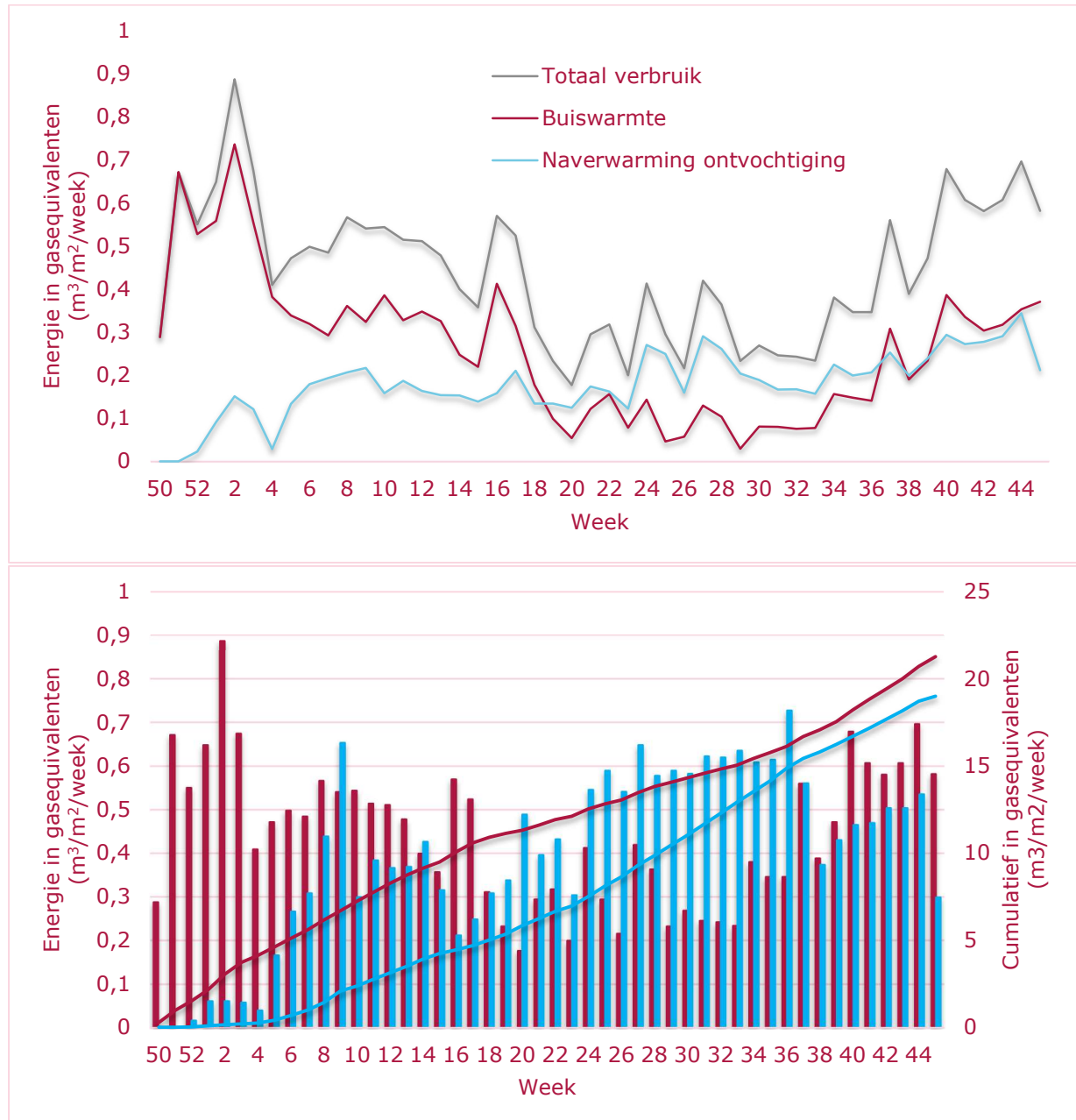


Figuur 8: CO₂ concentratie in de schuur waar de Skytree Cumulus opgesteld stond op 21 september 2024. Tijdens elke bindingsfase daalt de concentratie sterk, waarna deze weer herstelt tijdens de regeneratiefase. De gebruikte sensor meet in buitenlucht ongeveer 480 ppm CO₂.

Het energieverbruik van de Cumulus machine is bijgehouden door middel van een verbruiksmeter en was gemiddeld 119 kWh/dag, ofwel 10 kWh/kg geproduceerde CO₂.

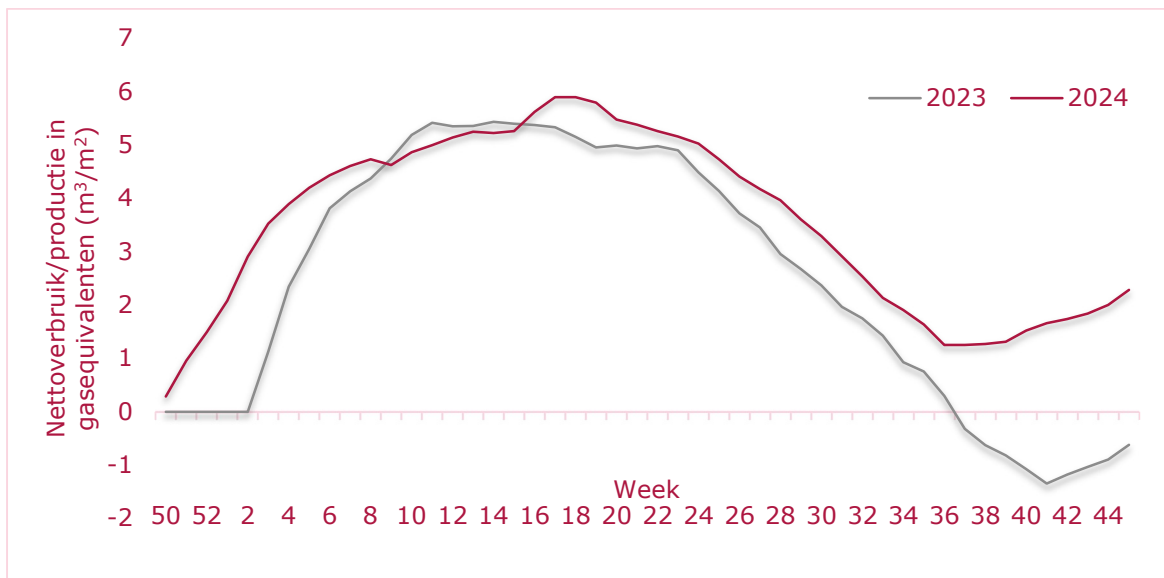
7 Energie

Warmte-input en -productie van de teelt is bijgehouden via calorimeters. Warmte-input (Figuur 13) vindt plaats via de buisrail en door middel van naverwarming van ontvochtigde lucht. Warmteproductie (terugwinning van latente warmte, Figuur 13) vindt plaats door afvangen van condensatiewarmte in de ontvochtigingsinstallatie.



Figuur 9: Energieverbruik en -productie. (a) totaalverbruik opgesplitst in energie voor kasverwarming en naverwarming van ontvochtigde lucht per week. (b) vergelijking van energieverbruik (rood) versus -productie (winning van latente warmte, blauw). Staven (schaal links) geven hier verbruik/productie per week per m^2 aan, lijnen (schaal rechts) het cumulatieve verbruik/productie per m^2 .

Het totale nettoverbruik van energie komt uit op $1,74 \text{ m}^3$ gasequivalenten per m^2 , ruim onder de doelstelling van $4 \text{ m}^3/\text{m}^2$. In vergelijking met het energieverbruik in 2023 valt op dat ondanks de veel eerdere start van de teelt en daardoor het verbruik van bijna $3 \text{ m}^3/\text{m}^2$ extra gas tot week 2, in week 9 het cumulatieve netto-energieverbruik in 2024 lager lag dan in 2023 (Figuur 14). Vanaf week 16 is het energieverbruik van de teelt in 2024 wel hoger geweest dan in 2023. Verder valt op dat in 2024 vanaf week 37 er ongeveer evenveel energie is geproduceerd als verbruikt, waar in 2023 tot week 41 de productie hoger bleef dan het verbruik. De oorzaak hiervan is de in 2024 sterk gedaalde productie vanaf week 37. De wateropname van het gewas was in deze fase van de teelt sterk gedaald (Figuur 4). Dit duidt op een lage verdamping en daardoor minder beschikbaarheid van vocht voor de ontvochtiging. Daardoor is er in 2024 in tegenstelling tot 2023 geen netto-energie overschot opgetreden (Figuur 14).



Figuur 10: vergelijking cumulatief netto warmteverbruik/productie (energieverbruik – terugwinning, over de periode van begin van de teelt tot de vermelde week) in 2023 versus 2024.

8 Conclusies

De belangrijkste doelstelling van deze proef was het onderzoeken van de effecten van het telen bij een maximale CO₂-dosering van 15 kg/m²/teelt. Deze doelstelling is ruim onder het door telers gerapporteerd verbruik van 20 – 30 kg/m²/teelt. In de proef zijn we uiteindelijk uitgekomen op 13,6 kg/m²/teelt uitgekomen, dus ruim onder de doelstelling en ongeveer de helft tot tweederde van het door de praktijk gerapporteerde verbruik. Het doel qua productie was 34 kg/m². In de proef zijn we uitgekomen op 31.8 kg/m², een kleine 10% lager.

Telen met minder CO₂ brengt uitdagingen met zich mee. Een verlaagde CO₂-concentratie in de kas heeft al snel een negatief effect op de gewasfotosynthese (en productie). Wanneer er beperkt CO₂ beschikbaar is, zal er zo efficiënt mogelijk met CO₂ moeten worden omgesprongen om het CO₂-rendement te maximaliseren. Er zijn twee strategieën getoetst:

- Om het CO₂-rendement te maximaliseren zijn vanaf week 21 stappen ondernomen om de verliezen naar buiten toe te beperken. Door de gewenste CO₂-concentratie afhankelijk te maken van de ventilatievoud werd er op momenten met veel ventilatie minder gedoseerd.
- Hiernaast is vanaf week 34 de maximale doseersnelheid afhankelijk gemaakt van de stralingsintensiteit. Hierdoor verbetert het CO₂-rendement automatisch. Hoewel het CO₂-rendement hoog was in de periode waarin deze strategie werd getoetst, is het effect van deze strategie niet volledig zuiver te toetsen naast de strategie waarin de verliezen werden beperkt. Beide strategieën werden namelijk tegelijkertijd toegepast, en door het natuurlijke verloop in het klimaat kunnen deze niet onafhankelijk worden beoordeeld.

Een aparte proef waarin de strategie 'lichtafhankelijk doseren' onafhankelijk van de ventilatievoud kan worden getoetst, kan uitwijzen welke strategie de grootste bijdrage gaf aan het optimaliseren van het CO₂-rendement.

Voor een zuivere vergelijking met een praktijksituatie moet bovendien gecorrigeerd worden voor het minder ventileren vanwege de inzet van actieve ontvochting (die -nog- niet tot de standaarduitrusting van een paprikabedrijf behoort).

Wat in proeven onafhankelijk moet worden onderzocht kan ook in modellen virtueel worden nagerekend. De modelstudie maakt opnieuw helder dat 'niet doseren' wel 17% aan gewasfotosynthese - en waarschijnlijk ook aan productie - kan gaan kosten. Vergeleken met de 'praktijkstrategie' is er wel 6.4 kg/m² bespaard ten koste van 10% gewasfotosynthese (en productie). Deze prijs qua gewasfotosynthese had echter kleiner kunnen zijn wanneer de 1.4 kg/m² resterende CO₂ binnen de doelstelling ook was ingezet en de CO₂-besparende maatregelen de hele teelt waren toegepast in plaats van vanaf week 21. Verdere verbetering van het rendement is mogelijk als deze aanpak nog meer wordt verfijnd ten opzichte van de gewasfotosynthese. Als de gewasfotosynthese bekend is, kan er op 5-minutenbasis zodanig worden gedoseerd dat het CO₂-rendement binnen enige procenten nauwkeurig al bekend is. Uit de virtuele referenties bleek ook dat in een simulatie waarbij er gestuurd werd op een vaste CO₂-concentratie van 561 ppm, de gewasfotosynthese tussen week 23 – 33 iets hoger was dan in de proef bij een gelijke CO₂ input. Tegelijkertijd lag het CO₂-rendement in de proef wel hoger dan in deze simulatie in de periode waarin lichtafhankelijk werd gedoseerd. Gemiddeld was er in de virtuele referentie met een constante CO₂-concentratie van 561 ppm daardoor een gelijk CO₂-rendement als in de proef. Dit suggereert dat doseren bij weinig licht een lager rendement oplevert: streven naar 800 ppm bij lage lichtintensiteit en een lage ventilatievoud levert mogelijk

een lager CO₂-rendement op dan sturen op 561 ppm onder hoge instraling en hoge ventilatievoud (en dus hogere verliezen). De regeling op besparing bij verhoging van de ventilatievoud stond mogelijk te agressief afgesteld. Extra simulaties lieten wel zien dat beide strategieën theoretisch tot een verhoogd CO₂-rendement leiden (hoofdstuk 5). Opgemerkt moet worden dat beide strategieën (dosering beperken op ventilatievoud & lichtafhankelijk doseren) verder geperfectioneerd kunnen worden. Zo is bij iets meer dan 0 W/m² aan straling een doseringssnelheid van ruim 40 kg/ha/uur veel te hoog ten opzichte van de gewasfotosynthese. Idealiter houden de twee CO₂-strategieën meer rekening met de assimilatiesnelheid, die in eerste instantie wel lineair toeneemt met toenemend licht maar vervolgens overgaat in lichtverzadiging (lichtverzadigingscurve).

Een tweede doelstelling was om de benodigde CO₂ deels te leveren vanuit Direct Air Capture. Helaas is de hiervoor benodigde SkyTree Cumulus machine later geleverd (september) dan oorspronkelijk gepland (juni) en had de geleverde machine ook minder capaciteit dan benodigd om de gehele kas van CO₂ te kunnen voorzien. Het is echter wel gelukt om in de periode van 6 september tot het einde van de teelt ongeveer 44% van de gedoseerde CO₂ uit deze machine te leveren. Hierbij zijn geen negatieve effecten op de teelt waargenomen.

De Skytree Cumulus machine is niet weersbestendig en is daarom in een schuur geplaatst van ongeveer 600m³, die passief geventileerd is. De lucht in deze schuur bevat (op basis van buitenconcentratie) slechts ongeveer 300g CO₂. Per cyclus bindt de Cumulus-machine ongeveer 600g CO₂, hiervoor moest dus de lucht in de schuur meerdere malen per cyclus ververs worden. De passieve ventilatie was hiervoor onvoldoende, waardoor de CO₂ concentratie in de schuur sterk daalde en de machine zeer veel lucht moest aanzuigen. Voor optimale aanzuiging heeft de machine een vrije worp van 15 meter nodig, en moet de aanzuiging bovendien enkele meters hoog boven de grond geplaatst worden. Dit was niet te realiseren in de opstelling. Hierdoor werd veel stof aanzogen, dat de filters blokkeerde.

Per kg CO₂ was in deze proef 10 kWh aan elektriciteit benodigd. Dit rendement is fors lager dan het door de leverancier gespecificeerde rendement van 3-4kWh/kg, wat dus verklaard kan worden door de suboptimale plaatsing van de machine. Dit leidt tot de conclusie dat er nog verbetering mogelijk is in de DAC-technologie voordat implementatie in een kas kan worden aanbevolen. SkyTree geeft aan dat bovenstaande technische problemen worden opgelost in hun Stratus machine, die wel buiten geplaatst kan worden en een veel grotere schaalgrootte en hoger rendement kan halen.

De doelstelling om een energiezuinige paprikateelt uit te voeren waarbij niet meer dan 4m³/m² aan netto-gasequivalenten verbruikt wordt, is ruimschoots gehaald. Het doel was berekend op basis van resultaten uit 2023, waarbij de vroegere teelt-start in overweging werd genomen. Het blijkt echter dat door het gebruik van een AC-folie het warmteverbruik daalt en de terugwinning van latente warmte efficiënter wordt (vermoedelijk door een hoger absoluut vochtgehalte), waardoor tot week 9 netto net zoveel energie is verbruikt als in 2023. Vanaf week 16 is de netto-energieproductie wat minder goed verlopen dan in 2023, vermoedelijk vanwege het minder mooie weer en de traag op gang komende zomer. Vanaf week 37 is in 2024 de winning van latente warmte plotseling sterk teruggelopen. Verder werd het netto-energieverbruik vanaf week 37 beïnvloed door een verschil in buitentemperatuur: deze was gemiddeld 1,7 graden lager in 2024.

Als gevolg daarvan was het buisverbruik 12% hoger in die periode. Hierdoor is uiteindelijk netto 1,7 m³/m² aan gasequivalenten verbruikt voor de teelt.

De teruglopende energiewinning vanaf week 37 lijkt grotendeels toe te schrijven aan lagere gewasverdamping door verminderde plantgezondheid van de planten op steenwol. Vanaf week 37 is er in 2023 tot het einde van de teelt 35% meer energie teruggewonnen dan in 2024. Vanaf diezelfde week blijft in 2024 ook de gewasopname van water achter bij het beschikbare licht (Figuur 4), begonnen de planten er minder gezond uit te zien en nam het gemiddeld vruchtgewicht sterk af (Figuur 6).

De vraag is waardoor de plantgezondheid van planten op steenwol achteruitgegaan is. Een veelvoorkomend probleem binnen de paprikateelt is wortelproblematiek, waarbij planten schijnbaar ineens massaal bruine wortels krijgen en binnen enkele weken qua groei tot stilstand komen. Soms leidt dit zelfs tot verwelking. De oorzaak is niet altijd herleidbaar, in de praktijk wordt soms fusarium gevonden. Het is niet bekend of de problematiek in alle praktijkgevallen hetzelfde is, en of het verloop hiervan vergelijkbaar is met deze proef. Op basis van alle meet- en sensordata uit deze proef is echter wel een conclusie te trekken over de oorzaken van de problemen in deze teelt.

Allereerst valt op dat het probleem optreedt nadat de plantbelasting uit de pas begint te lopen met de beschikbare hoeveelheid PAR (Figuur 3). De planten hadden dus te weinig energie tot hun beschikking op dat moment. Bovendien hadden ze net 2 plagen doorstaan (spint en luizen), die ook veel energie gekost hebben. Hier komt bij dat de teelt tot week 37 een hoge opbrengst had, ook in vergelijking tot telers uit de BCO, terwijl al sinds week 21 tot 10% minder gewasfotosynthese plaatsvond door CO₂ beperking.

Het geteelde ras (Alzamora) staat bekend om zijn generativiteit, dit ras prioriteert bij een energietekort de vruchten boven de vegetatieve delen van de plant. Ons vermoeden is dat de plant vanaf week 21 is gaan interen op de vegetatieve delen van de plant, die hierdoor geleidelijk steeds verder verzwakt zijn. Door het teruglopende licht in de herfst is hierbij een kantelpunt bereikt waarop de vegetatieve delen van de plant, en met name de wortels, niet goed meer functioneerden. Hierdoor is de plant in stress gekomen en is het laatste zetsel mislukt.

De planten op houtsubstraat hebben de hele teelt een wat lagere plantbelasting gehad dan de planten op steenwol, waardoor er meer assimilaten overbleven voor de wortels. Bovendien lijkt houtsubstraat de wortels te stimuleren, waardoor deze een groter deel van de assimilaten toegewezen kregen en de plant beter in balans is gebleven. Hierdoor zijn de planten op houtsubstraat uiteindelijk tot het einde van de teelt gezond gebleven en hebben ze qua productie de planten op steenwol ingehaald.

Zoals eerder genoemd, is de behaalde productie van 31,8 kg/m² op steenwol lager dan de doelstelling van 34 kg/m². De vraag is hoeveel van het tekort aan productie te wijten is aan een tekort aan assimilaten als gevolg van CO₂ beperking en hoeveel aan de problemen met gewasgezondheid in de laatste fase van de teelt. Aangezien deze problemen waarschijnlijk veroorzaakt zijn door een verminderde weerbaarheid als gevolg van een tekort in de assimilatenbalans dat mede veroorzaakt is door CO₂ beperking, is het lastig om hier oorzaak en gevolg te scheiden. De houtsubstraat behandeling geeft een indicatie welke productie haalbaar is

bij een goede plantgezondheid: $33,6 \text{ kg/m}^2$. Hierbij is wel een grote groene oogst aan het eind meegerekend. Die vruchten zijn zo laat gezet dat ze niet allemaal meer rijp (rood) zouden worden en hebben dus niet volledig bijgedragen aan de plantbelasting. Alleen kijkend naar oogstbare rijpe vruchten, zou deze teelt op ongeveer $30,3 \text{ kg/m}^2$ uitkomen. Voor steenwol waren er slechts weinig groene vruchten in de laatste oogst, de productie van rode vruchten komt uit op $31,4 \text{ kg/m}^2$. Dit suggereert dat zowel de planten op steenwol als die op houtsubstraat uiteindelijk gelimiteerd zijn door de beschikbare hoeveelheid assimilaten: bij steenwol heeft dit geleid tot problemen met plantgezondheid en een mislukt laatste zetsel, bij houtsubstraat tot een groot laatste zetsel dat niet meer op tijd afrijpte.

De modellen uit hoofdstuk 4 wijzen uit dat de totale gemiste assimilatenproductie als gevolg van CO_2 beperking rond de 10% ligt. Met de aanname dat assimilatenproductie en productie in kg/m^2 geoogst product een lineair verband hebben, betekent dit op basis van $31,8 \text{ kg/m}^2$ dat zonder CO_2 -reductie een productie van 35 kg/m^2 haalbaar geweest moet zijn. Op basis van de planten op houtsubstraat zou zelfs tot 37 kg/m^2 gehaald kunnen worden, maar ook dan met een grote groene laatste oogst.

9 Aanbevelingen

Op basis van de overwegingen aan het eind van de conclusies, schatten we dat CO₂ beperking in deze proef 3,2 kg/m² aan productie gekost heeft. Hiermee is voor het gehele seizoen ongeveer 6,4kg/m² aan CO₂ bespaard. Bij een middenprijs van paprika's van €1,20 /kg betekent dit dat het omslagpunt lag bij €0,60 per kg CO₂. Dit is veel hoger dan de huidige marktprijzen voor CO₂, wat betekent dat het op dit moment financieel onverstandig is voor paprikatelers om een CO₂ besparing van 6,4kg/m² te implementeren.

Het is mogelijk dat dit break-even punt in de toekomst wel bereikt gaat worden wanneer als gevolg van de energietransitie de beschikbaarheid van CO₂ afneemt en daardoor de prijs per kg stijgt. Er zijn dan twee mogelijkheden: CO₂ beperking, of implementatie van een andere CO₂ bron, zoals Direct Air Capture (DAC). Met behulp van de SkyTree Cumulus machine is in deze proef DAC geïmplementeerd. Deze machine verbruikte in onze passief geventileerde (niet optimale) opstelling 10 kWh/kg geproduceerde CO₂. Bij elektriciteitsmiddenprijzen van €0,20/kWh ligt de prijs per kg CO₂ boven het omslagpunt, en is het dus financieel verstandiger om CO₂ te besparen. Wanneer de door de fabrikant opgegeven cijfers qua verbruik (2-3kWh/kg CO₂) in de praktijk gehaald worden en wanneer een tuinder goedkopere elektriciteit kan maken of verbruiken, is het mogelijk dat de prijs van een kg CO₂ onder het omslagpunt uitkomt, en het dus voordelig kan worden bij stijgende CO₂ prijzen om via DAC CO₂ te produceren en zo te voorkomen dat CO₂-verbruik beperkt hoeft te worden. Dit zal echter sterk afhangen van de rest van de kosten van de DAC-unit, zoals kosten voor onderhoud en afschrijving, alsmede van de vraag of de DAC-unit 24 uur per dag moet draaien, of alleen wanneer de stroomprijzen laag zijn. Het is daarom niet a priori mogelijk om te berekenen vanaf welk elektrisch rendement DAC voordelig wordt voor tuinders.

Als er toch CO₂ bespaard moet worden, is het uiteraard voordelig om dit op zo'n manier te doen dat het CO₂ rendement gemaximaliseerd wordt. Onze modellen tonen aan dat beide geteste strategieën, beperking van CO₂ doseringssnelheid op basis van ventilatievoud en beperking van de maximale dosering op basis van straling, theoretisch een hoger rendement opleveren dan simpelweg het verlagen van de CO₂-streefniveaus. Dit bleek in eerste instantie echter niet uit de proef. De oorzaak hiervan is dat het inregelen van de klimaatcomputer en testen daarvan enkele weken gekost heeft, waarbij we op sommige dagen te weinig of juist te veel CO₂ gedoseerd hebben. Hierdoor is het rendement weer gedaald, en zijn we netto op hetzelfde rendement uitgekomen als wanneer we simpelweg de dosering hadden verlaagd. Na de inregelperiode hebben we wel het verwachte hogere rendement gehaald. Aangezien het implementeren van een CO₂ doseringsstrategie op basis van ventilatievoud en licht geen extra kosten met zich meebrengt, kunnen we concluderen dat het implementeren hiervan loont. Hiermee wordt echter slechts een klein deel van het verlies aan gewasfotosynthese gecompenseerd dat wordt veroorzaakt door CO₂-besparing.

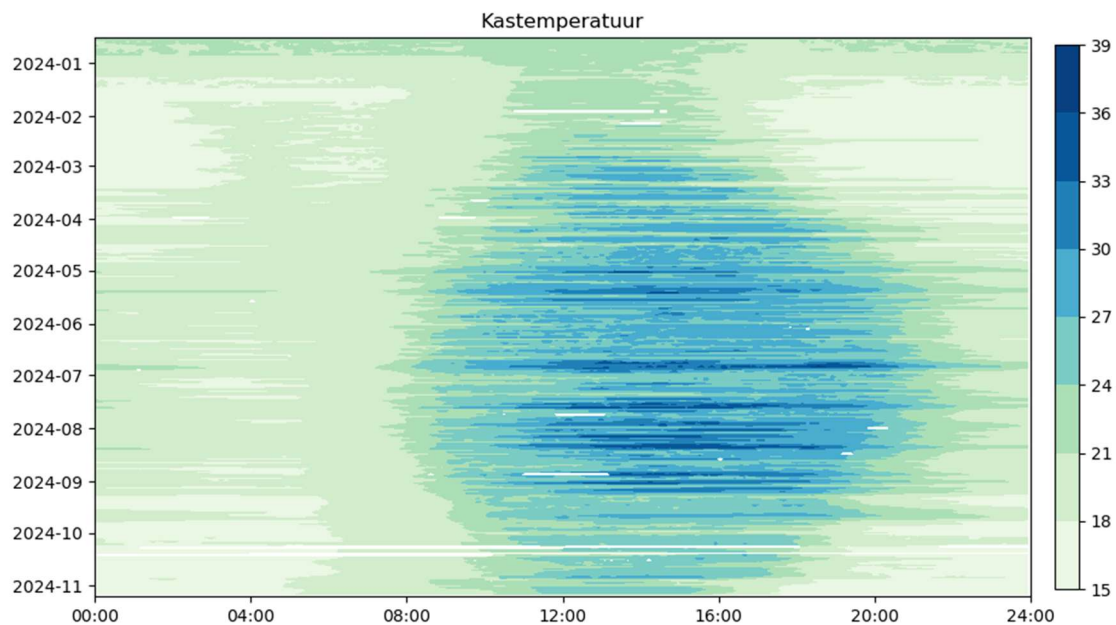
10 Literatuurlijst

1. CO₂-gebruik moet efficiënter: Mogelijke opties voor zuiniger CO₂-gebruik. Pieter Visser, 2024.
https://www.kasalsenergiebron.nl/content/research/E21009_Eindrapport_EfficiënterCO2doeren.pdf
2. Besparing op energie en CO₂ door te sturen op de ratio temperatuur en assimilatie (RTA) bij komkommer als modelgewas. Conny Vervoort et al., 2024.
https://www.kasalsenergiebron.nl/content/research/Eindrapport_Besparing_op_energie_en_CO2_door_sturing_op_temperatuur_en_assimilatie.pdf
3. De Nederlandse paprikateelt weerbaar richting fossielvrij. Bas Oudshoorn, Lianne Helmus-Schuddebeurs, 2024.
https://www.kasalsenergiebron.nl/content/research/Eindrapport_Paprika_teelt_weerbaar_richting_fossielvrij.pdf
4. Zuiniger met CO₂ bij gelijkblijvende of hogere productie? Sander Hogewoning et al., 2015.
<https://edepot.wur.nl/369210>
5. Besparen op CO₂ door verhogen van de ventilatievoud. L. van Oostrom & G. Trouwborst. 2024.
https://www.kasalsenergiebron.nl/content/user_upload/Eindrapport_Plant_Lighting_Consultancy_besparen_op_CO2_door_verhoging_ventilatievoud.pdf
6. Paprika: effecten van temperatuur en lichtspectrum. Martijn Wiekens et al., 2023.
https://www.kasalsenergiebron.nl/content/user_upload/Plant_Lighting_B.V._2023_Fundamentele_kennisontwikkeling_LED-belichting_Deelrapport_IX_Paprika.pdf

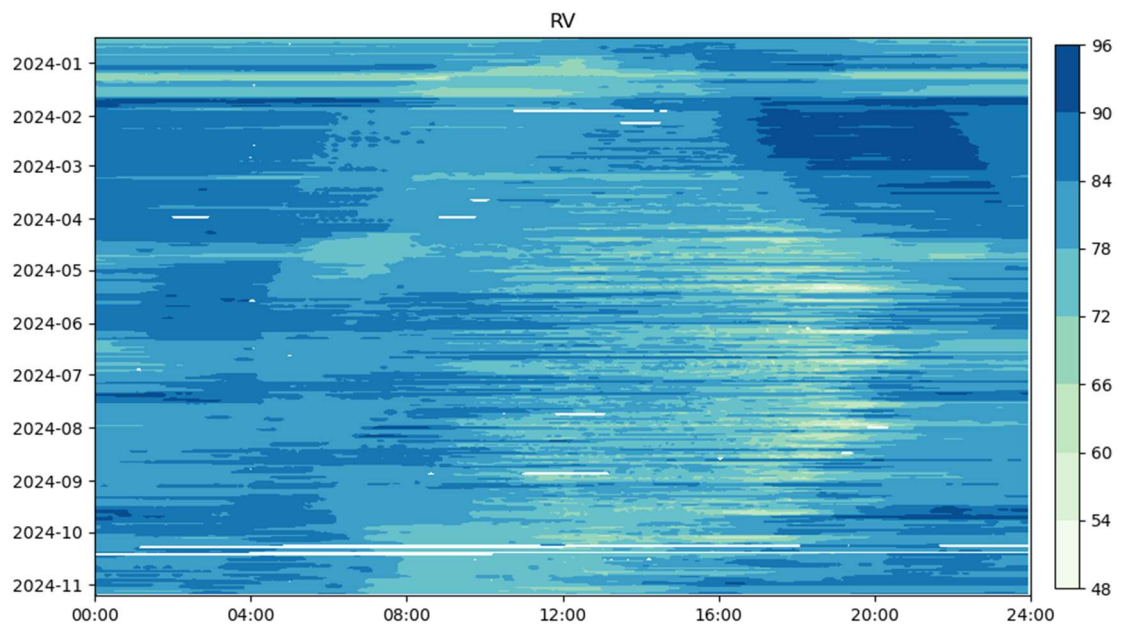
Appendix 2 klimaatgegevens

Deze appendix bevat grafische seizoenoverzichten van diverse metingen en kasparameters. De rapportagetijdsschaal van instellingen en metingen is eens per 5 minuten. De y-as van alle grafieken loopt van 17 december 2023 (boven) tot en met 7 november 2024 (onder). De markeringen geven de eerste dag van elke maand aan. De horizontale as geeft de tijd op elke dag weer. Kleurintensiteit geeft de waarden weer. Missende waarden worden weergegeven in wit. Minimale en maximale waarden kunnen worden afgelezen aan de legenda.

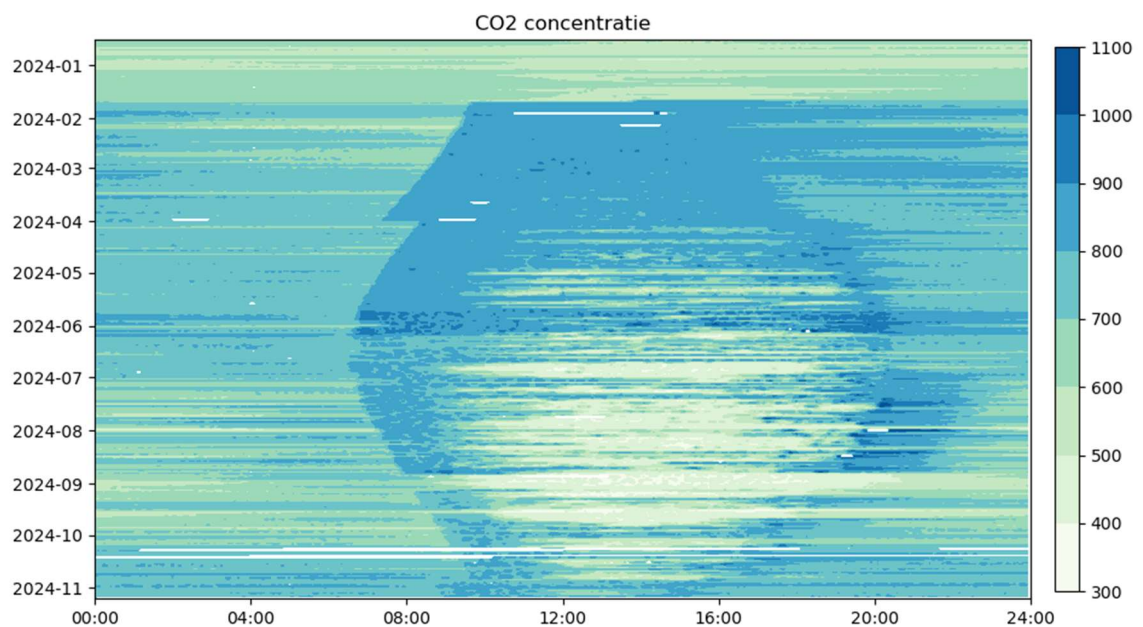
2.1 Metingen



Appendix 2 Figuur 1: verloop van kastemperatuur in °C over het seizoen.

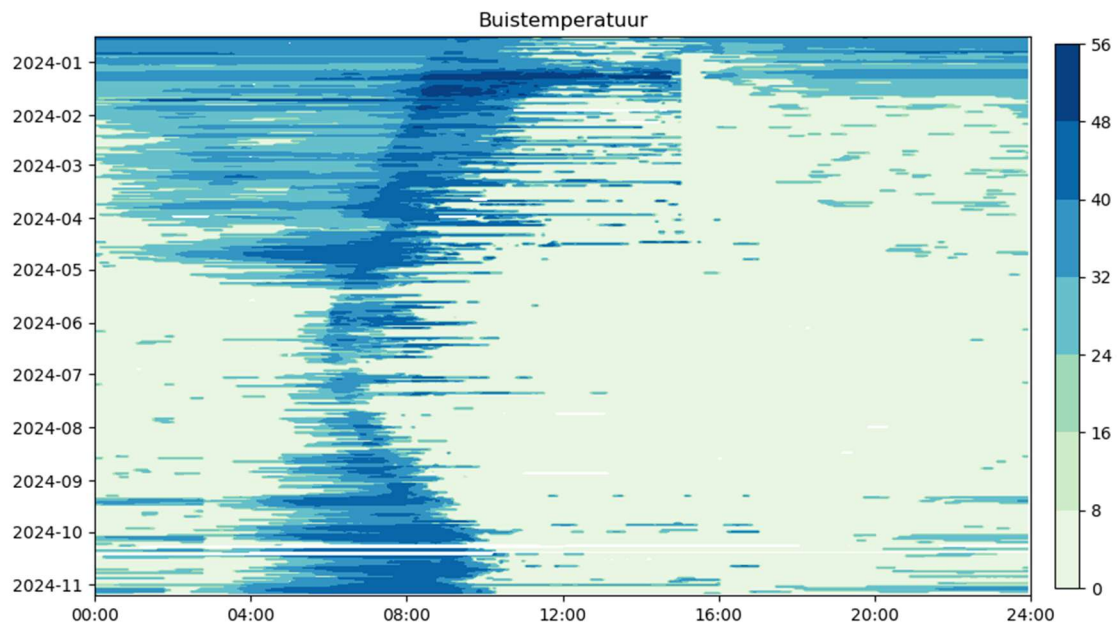


Appendix 2 Figuur 2: Verloop relatieve vochtigheid in procenten.

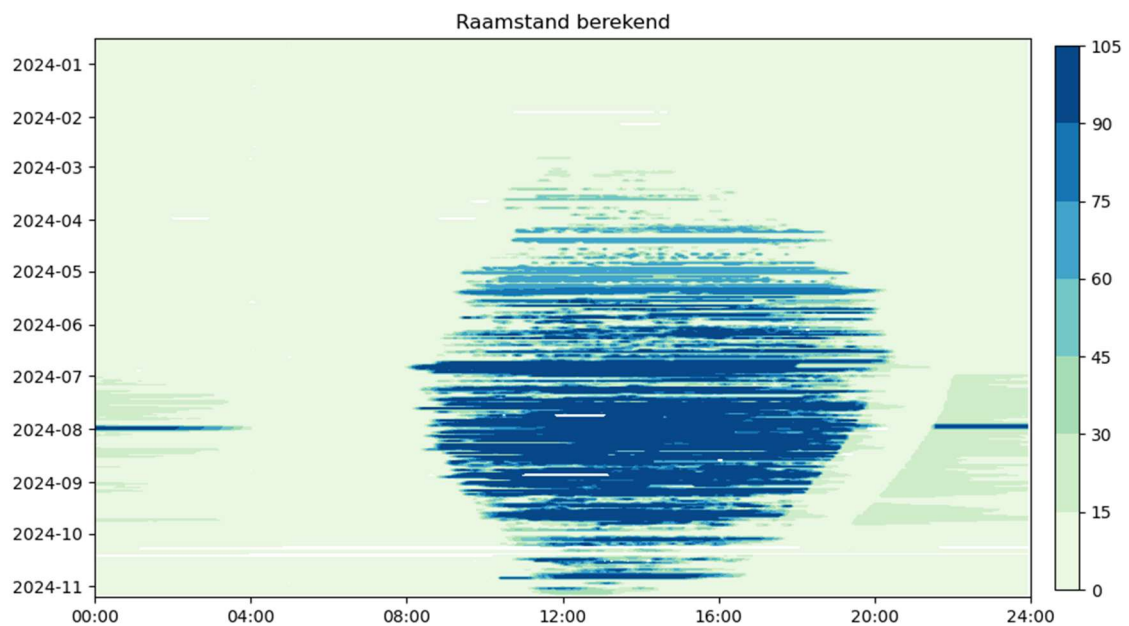


Appendix 2 Figuur 3: CO2 concentratie in ppm. Buitenluchtconcentratie op de locatie van het Improvement Centre is 415 ppm.

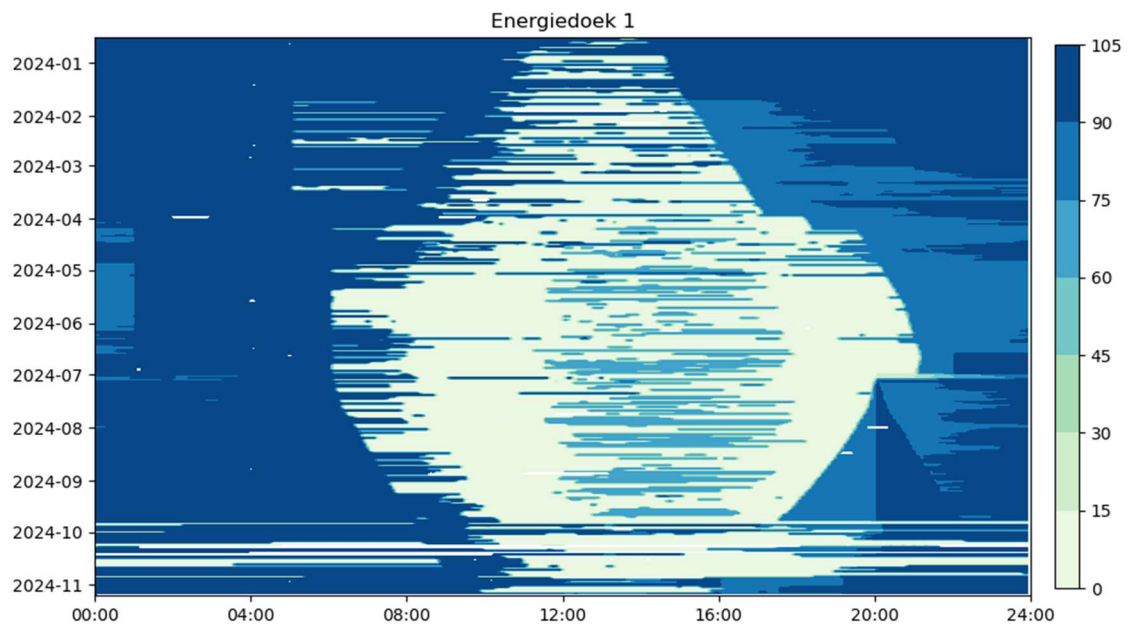
2.2 Instellingen



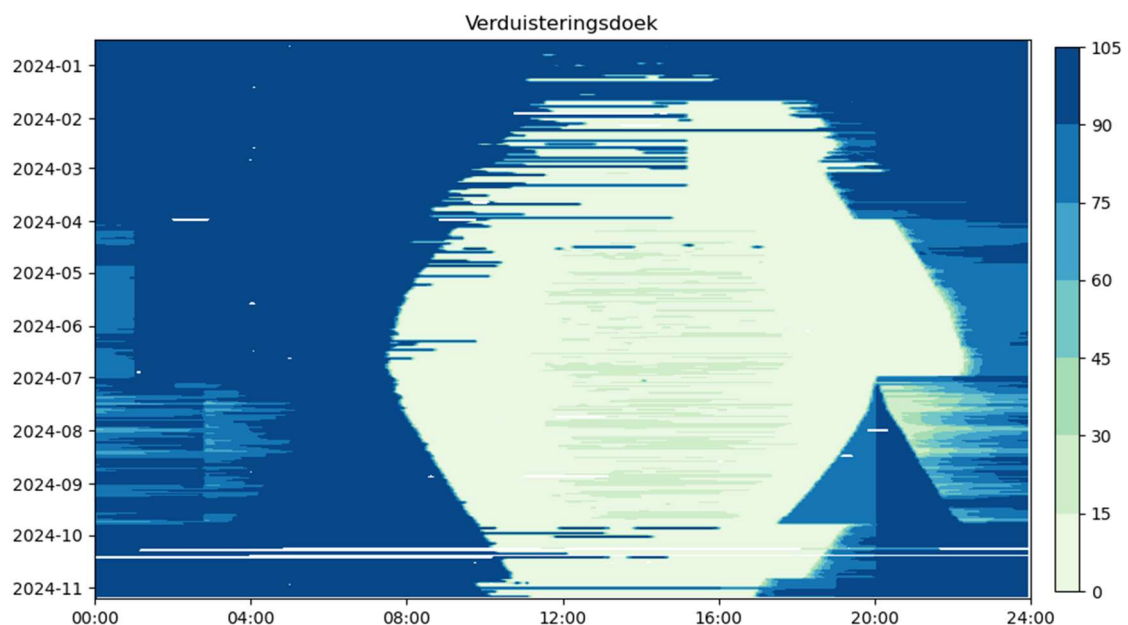
Appendix 2 Figuur 4: Buistemperatuur van de buisrailverwarming in °C.



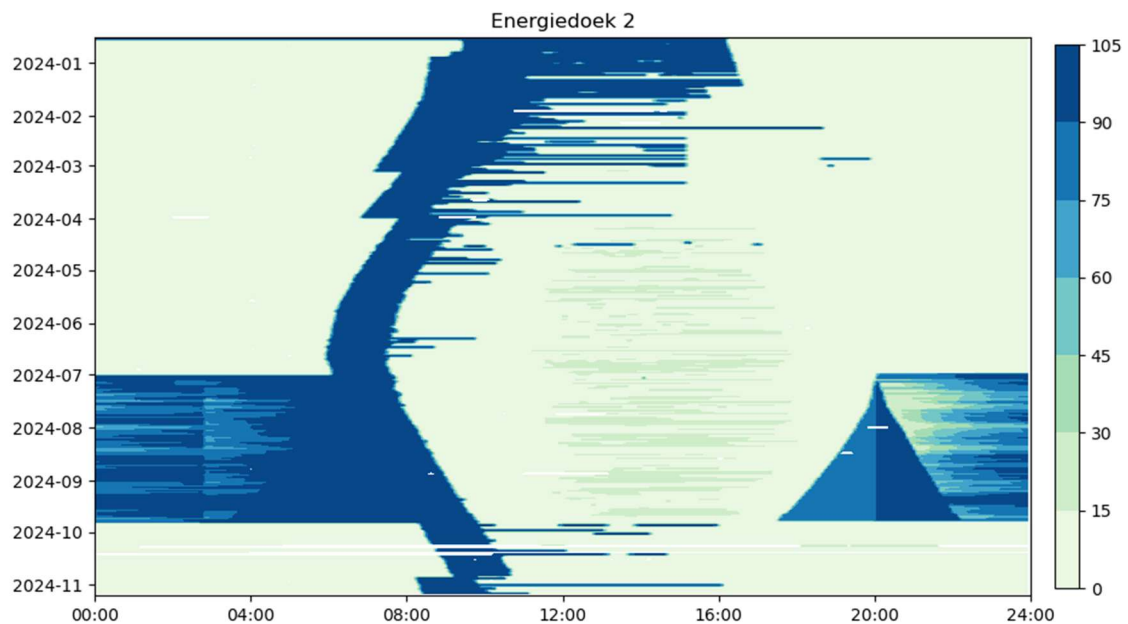
Appendix 2 Figuur 5: Raamstand (opening) in procenten.



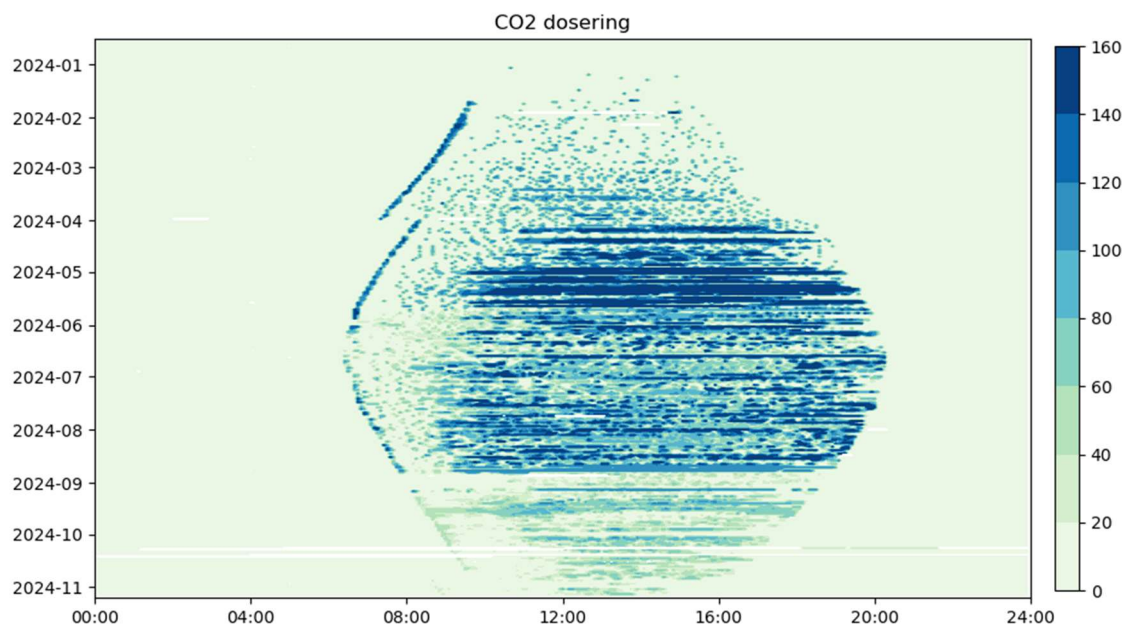
Appendix 2 Figuur 6: Energiedoek (Luxous 1147 FR) sluiting in procenten. Dit doek ligt op het bovenste dradenbed.



Appendix 2 Figuur 7: Verduisteringsdoek (Obscura 9970 FR) sluiting in procenten. Dit doek ligt op het onderste dradenbed, samen met het onderste energiedoek. Wanneer het verduisteringsdoek dicht loopt, opent dit energiedoek zich automatisch, en andersom. Dit wordt echter niet geregistreerd in de klimaatcomputer. Dit leidt ertoe dat bij vergelijking van Appendix 2 Figuren 7 en 8 soms beide schermen dicht lijken te liggen. Het laatst gesloten doek is in die gevallen gesloten, het andere was open.



Appendix 2 Figuur 8: Energiedoek (Luxous 1147 FR) sluiting in procenten. Dit doek ligt samen met het verduisteringsdoek op het onderste dradenbed. Zie voor uitleg van de grafiek het bijschrijft van Appendix 2 figuur 7.



Appendix 2 Figuur 9: CO₂ dosering in kg/Ha/uur. Deze grafiek laat onder andere de instelling van CO₂ besparende maatregelen zien in week 21 (half mei) en week 34 (eind augustus).