



Innovatie en Demonstratie Centrum CO₂ uit Buitenlucht

Resultaten Skytree Cumulus (Bèta)

Alexander Boedijn, Isabella Righini, Janneke Grit, Frank Kempkes en Jaco den Bakker



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

Referaat

De glastuinbouwsector staat voor de grote uitdaging om de fossiele CO₂-emissie op termijn volledig te elimineren. Tegelijkertijd blijft CO₂ noodzakelijk om de fotosynthesecapaciteit van planten optimaal te benutten. Direct Air Capture (DAC) kan in potentie bijdragen als alternatieve CO₂-bron, maar de werking, integratie in de bedrijfsvoering van kassen, CO₂-kwaliteit en de benodigde input voor dergelijke installaties zijn nog grotendeels onbekend. In het IDC CO₂-project wordt beoogd deze vragen op een onafhankelijke manier te beantwoorden, zodat de potentiële bijdrage van deze systemen aan de verduurzaming van de sector in kaart wordt gebracht. Als onderdeel van het project zullen verschillende DAC-bedrijven hun systemen testen in de kassen van Wageningen University & Research in Bleiswijk. Het onderzoek heeft tot doel gegevens te verzamelen in een semi-praktische omgeving om: 1) de CO₂-kwaliteit te beoordelen en potentiële fytotoxiciteitsrisico's te identificeren, 2) de prestaties te evalueren op het gebied van productiecapaciteit, concentratie en energie-efficiëntie, 3) de benodigde inputs zoals sorptiemiddelen te kwantificeren, evenals de hoeveelheid en kwaliteit van outputs zoals condenswater en 4) praktische implementatie-uitdagingen te verkennen.

Dit rapport presenteert de belangrijkste bevindingen van de eerste geteste DAC-machine: een bètaversie van de Skytree Cumulus. In 2025 wordt de Skytree Stratus verwacht. Een machine met grotere capaciteit die specifiek is ontwikkeld voor de glastuinbouw. Omdat de Skytree Cumulus en Stratus voor verschillende toepassingen zijn ontworpen, zijn de onderzoeksresultaten uit de proef met de Cumulus niet volledig representatief voor de prestaties van een geoptimaliseerd DAC-systeem voor de glastuinbouw. Desondanks kon de Cumulus wel worden geëvalueerd op punten 1, 3 en 4, omdat beide systemen hetzelfde sorptiemiddel en een deel van dezelfde kernprocessen gebruiken. De productiecapaciteit, concentratie en behaalde energie-efficiëntie zijn ook getest, waarbij mogelijke verbeteringen zijn geïdentificeerd.

Abstract

The greenhouse horticulture sector faces the significant challenge of completely eliminating fossil CO₂ emissions in the long term. At the same time, CO₂ remains essential for maximizing the photosynthetic capacity of plants. Direct Air Capture (DAC) could serve as a new CO₂ source, but its functioning, integration into greenhouse operations, CO₂ quality, and required inputs for such systems are still largely unknown. The IDC CO₂ project provides a platform for the independent evaluation of DAC technologies, providing insight into the potential contribution of these systems to the sustainability of greenhouse horticulture. As part of the project, several DAC companies will deploy their systems in the greenhouse facilities of Wageningen University & Research in Bleiswijk. The research aims to collect data in a semi-practical setting to: 1) assess CO₂ quality and identify potential phytotoxicity risks, 2) evaluate performance in terms of production capacity, concentration, and energy efficiency 3) quantify necessary inputs such as sorbents, and analyse outputs, such as condensate water, in terms of volume and quality and 4) explore practical implementation challenges.

This report presents the key findings from the first tested DAC machine: a beta version of the Skytree Cumulus. In 2025, the Skytree Stratus is expected—a higher-capacity machine specifically developed for greenhouse horticulture. Since the Skytree Cumulus and Stratus are designed for different applications, the research results from the Cumulus trial are not fully representative of the performance of an optimized DAC system for greenhouse horticulture. Nevertheless, the Cumulus could still be evaluated on points 1, 3, and 4, as both systems use a similar sorbent and share core processes. The production capacity, concentration, and achieved energy efficiency were also tested, identifying potential areas for improvement.

Rapportgegevens

Rapport WPR-1429

Projectnummer: 3742350800

DOI: [https://doi.org/ 10.18174/691545](https://doi.org/10.18174/691545)

BO-nummer: BO-43.10-006

Dit project/ onderzoek is mede tot stand gekomen door de bijdrage van het programma kas als energiebron, een samenwerking tussen het ministerie van LNV en glastuinbouw Nederland.



Disclaimer

© 2025 Wageningen, Stichting Wageningen Research, Wageningen Plant Research, Businessunit Glastuinbouw
Postbus 20, 2665 MV Bleiswijk T 0317 48 56 06, wur.nl/plant-research
Kamer van Koophandel-nr.: 09098104 | BTW-nr.: NL 8113.83.696.B07

Stichting Wageningen Research. Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Stichting Wageningen Research.

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

Adresgegevens

Wageningen University & Research, Businessunit Glastuinbouw

Postbus 20, 2665 ZG Bleiswijk	Postbus 644, 6700 AP Wageningen
Violierenweg 1, 2665 MV Bleiswijk	Droevendaalsesteeg 1, 6708 PB Wageningen
T +31 (0)317 48 56 06	T +31 (0)317 48 60 01
wur.nl/glastuinbouw	wur.nl/glastuinbouw

Foto achterzijde omslag: Skytree machine_COPYRIGHT SKYTREE

Inhoud

Samenvatting	7
Summary	11
1 Inleiding	15
1.1 Aanleiding	15
1.2 Innovatie en Demonstratie Centrum CO ₂ uit Buitenlucht	16
1.3 Doelstellingen proef met Skytree Cumulus (Bèta)	17
2 Proefopzet	18
2.1 DAC-machine – Skytree Cumulus (Bèta)	18
2.1.1 CO ₂ -voorziening via DAC & metingen	19
2.1.2 Input & outputmetingen (energie, water, sorptiemiddel, filtermateriaal)	19
2.2 Teelt & teeltsysteem	20
2.3 Klimaatmetingen	22
2.4 Plantmetingen	22
2.4.1 Plantontwikkeling	22
2.4.2 Kleurmeting	23
2.4.3 Oogst	23
3 Resultaten & discussie	24
3.1 Teeltverloop & klimaat	24
3.1.1 Teeltverloop	24
3.1.2 Klimaat	24
3.2 CO ₂ -kwaliteit	26
3.2.1 Plantmetingen	26
3.2.2 Gasanalyses	32
3.3 CO ₂ -productie en energievraag	35
3.4 Condenswater	38
3.4.1 Kwantiteit	38
3.4.2 Kwaliteit	39
4 Conclusie	41
Literatuur	42
Bijlage 1 Gasanalyse SGS	43
Bijlage 2 Wateranalyse van nutriënten en zware metalen in condenswater	45

Samenvatting

Doel van het project

De glastuinbouwsector staat voor de grote uitdaging om de fossiele CO₂-emissie op termijn volledig te elimineren. Tegelijkertijd blijft CO₂ noodzakelijk om de fotosynthesecapaciteit van planten optimaal te benutten. Direct Air Capture (DAC) kan in potentie bijdragen als een nieuwe CO₂-bron, maar de werking, integratie in de bedrijfsvoering van kassen, CO₂-kwaliteit en de benodigde input voor dergelijke installaties zijn nog grotendeels onbekend.

Het **IDC CO₂-project** biedt een platform voor onafhankelijke evaluatie van DAC-technologieën. Tijdens het project krijgen meerdere DAC-bedrijven de gelegenheid om hun systeem op te stellen binnen de kasfaciliteiten van Wageningen University & Research in Bleiswijk. De proeven zijn toegankelijk voor demonstratiedoeleinden, waarbij geïnteresseerden de mogelijkheid hebben om de testopstelling te bezoeken en de werking van de systemen in de praktijk mee te maken. Het onderzoek heeft tot doel gegevens te verzamelen in een semi-praktijk omgeving om:

1. De **kwaliteit** van de afgevangen CO₂ te evalueren en **potentiële schadelijke stoffen** voor gewassen te identificeren.
2. De **prestaties van de DAC-machine** te evalueren op het gebied van productiecapaciteit, geleverde concentratie en energie-efficiëntie.
3. De kwantiteit, kwaliteit en duurzaamheid van benodigde **verbruiksmaterialen**, zoals sorptiemiddelen, en **bijproducten**, zoals condenswater, in kaart te brengen.
4. **Praktische implementatie** van DAC in de bestaande kassystemen te verkennen.

Het project als geheel is erop gericht om via demonstratie en kennisontwikkeling de haalbaarheid en effectiviteit van DAC-technologie binnen de glastuinbouwsector in kaart te brengen, met als doel het gebruik van CO₂ te verduurzamen.

Skytree is het eerste bedrijf dat een DAC-machine, een bètaversie van de Skytree Cumulus, heeft geleverd voor het IDC CO₂-project. Hoewel de machine is ontworpen voor een gesloten teeltomgeving, zoals een vertical farm, sloot de beoogde capaciteit van 10 kg CO₂ per 24 uur goed aan op de schaal van de proef. In 2025 wordt de Skytree Stratus verwacht. Een machine met grotere capaciteit die specifiek is ontwikkeld voor de glastuinbouw. Omdat de Skytree Cumulus en Stratus voor verschillende toepassingen zijn ontworpen, zijn de onderzoeksresultaten uit de proef met de Cumulus niet volledig representatief voor de prestaties van een geoptimaliseerd DAC-systeem voor de glastuinbouw. Desondanks kon de Cumulus wel worden geëvalueerd op punten 1, 3 en 4, omdat beide systemen hetzelfde sorptiemiddel en een deel van dezelfde kernprocessen gebruiken. De productiecapaciteit, concentratie en behaalde energie-efficiëntie zijn ook getest, waarbij mogelijke verbeteringen zijn geïdentificeerd.

Proefopzet

- De proef werd uitgevoerd in twee kasafdelingen uitgerust met een hogedraadteeltsysteem. In de testafdeling werd CO₂ gedoseerd afkomstig van de Cumulus en in de referentieafdeling OCAP CO₂ gedoseerd.
- **Komkommer** werd gekozen als testgewas vanwege de snelle groei en (relatieve) gevoeligheid voor fytotoxische gassen, waardoor eventuele schade goed waarneembaar is.
- De proeven vonden plaats van **januari tot en met juni 2024** en van **juli tot en met december 2024**, waarbij de Cumulus vanaf mei 2024 in gebruik is genomen als CO₂ bron.
- In de proefopzet is ernaar gestreefd om zoveel mogelijk gelijke teeltomstandigheden te creëren, waardoor eventuele verschillen in resultaten uitsluitend aan de CO₂-bron konden worden toegeschreven.

- Beide afdelingen waren uitgerust met een luchtbehandelingssysteem voor ontvochtigen en/of koelen, waardoor de ramen bijna volledig gesloten konden blijven. Dit minimaliseerde het verlies van CO₂ en verhoogde de kans om eventuele effecten van fytotoxische gassen – indien aanwezig – waar te nemen. Het gerealiseerde klimaat was als volgt:
 - **Temperatuur:** de jaarrond gemiddelde luchttemperatuur was 0,2 °C hoger in de referentieafdeling (22,1 °C) dan in de testafdeling (21,9 °C). Dit verschil kan verklaard worden door een iets lagere gerealiseerde koelcapaciteit in de referentieafdeling.
 - **Vochtdeficiet:** vergelijkbaar in beide afdelingen, met een jaarrond gemiddelde van 3,3 g/m³ in de referentieafdeling en 3,2 g/m³ in de testafdeling.
 - **CO₂ concentratie:** vergelijkbaar in beide afdelingen, met een jaarrond gemiddelde van 680 ppm.
 - **Lichtintensiteit:** vergelijkbaar in beide afdelingen, met een jaarlijks gemiddelde daglichtsom van 18,8 mol/m².

Resultaten

CO₂ kwaliteit, fytotoxiciteit, gewasgroei en -ontwikkeling

- De gemeten **gewasparameters** voor zowel vegetatieve als generatieve groei waren vergelijkbaar tussen beide afdelingen en beide teeltrondes. Ook de **opbrengst** was zeer vergelijkbaar:
 - Eerste teelt (158 dagen vanaf overplanten): 70,8 kg/m² met 176,7 vruchten/m² in de referentieafdeling en 70,2 kg/m² met 178,2 vruchten/m² in de testafdeling.
 - Tweede teelt (169 dagen vanaf overplanten): 80,2 kg/m² met 198 vruchten/m² in de referentieafdeling en 80,0 kg/m² met 194,2 vruchten/m² in de testafdeling.
 - Het drogestofpercentage van de vruchten varieerde tussen de 2,0-3,1% voor beide teelten en verschilde nauwelijks tussen de behandelingen.
- Er zijn **kleurmetingen** uitgevoerd voor de bladeren en bloemen om eventuele afwijkingen of symptomen van gewasschade te monitoren. De resultaten lieten geen significant verschil zien in kleurpatronen tussen beide afdelingen.
- Gedurende beide teeltrondes was de **ziektedruk** laag en goed beheersbaar. Het grootste verschil tussen beide afdelingen was de mate van Fusariuminfectie. In de testafdeling kwam de Fusarium meer tot uiting dan in de referentieafdeling, terwijl er in beide afdelingen Fusariumsporen werden aangetroffen in het substraat. Er is geen duidelijke verklaring gevonden waarom Fusarium in de afdeling met DAC CO₂ tot meer uitval heeft geleid dan in de referentieafdeling, en er is geen directe link met CO₂-kwaliteit vastgesteld.

Gasanalyses

De afgevangen CO₂ werd getest op bekende schadelijke gassen voor planten (NH₃, NO_x, C₆H₆, C₂H₅O, C₂H₄ en H₂S). Daarnaast werden sensoren geïnstalleerd aan het einde van de tweede teelt om continu NO_x en C₂H₄ te monitoren. Op basis hiervan zijn geen alarmerende hoeveelheden toxische stoffen aangetroffen. Aandachtspunten zijn monitoring van NO_x en NH₃. Gedurende beide teelten kon Cumulus niet volledig voorzien in de CO₂-behoefte van het gewas, waardoor deze planten ook gedeeltelijk OCAP CO₂ hebben gekregen. Vooral in de eerste teelt was er een relatief korte periode waarin DAC CO₂ werd gebruikt, maar ook in de tweede teelt waren er momenten waarop moest worden overgeschakeld naar OCAP CO₂. Hierdoor konden de korte termijn (24 uur) en middellange termijn (maand) effecten afdoende worden beoordeeld, maar lange termijn effecten (hele teelt/jaar) niet.

DAC-machine prestaties (Opmerking: deze gegevens zijn verzameld voor een bètaversie van de Skytree Cumulus. Voor de meest recente ontwikkelingen raden we aan contact op te nemen met Skytree.)

- **CO₂-concentratie:** 40-57% volume, gelijk aan 56-67% gewicht.
- **Productiecapaciteit:** gemiddeld 4,5 kg CO₂/dag (gemeten maximum van 6,5 kg CO₂/dag).
- **Energie-efficiëntie:** 9-15 kWh/kg CO₂.
- De CO₂-afvangst en efficiëntie van proces daalde gedurende de proefperiode waarvoor de volgende oorzaken zijn gevonden:
 - **Blootstelling aan stof en hoge temperaturen** aangezien de Cumulus binnen stond opgesteld, op de grond in een stoffige ruimte, waardoor de filters relatief snel verstopt raakten. Tijdens de tweede teeltronde zijn de filters vervangen, wat leidde tot een verbetering van de prestaties.

- **Een lek in de vacuümkamer** heeft geleid tot achteruitgang van het sorptiemiddel door oxidatie. Aangezien dit de bètaversie van de Cumulus betrof en voor het eerst in de praktijk werd getest, was het systeem nog niet geoptimaliseerd, waardoor de lekkages in de loop van de tijd verergerden. Door dit lek en de verhoogde temperatuur had het sorptiemiddel direct te lijden onder de aanzuiging van warmere lucht, wat een negatieve impact had op de prestaties.
- **Overmatig energiegebruik** kwam voor omdat de Control unit van de Cumulus continu draaide waardoor er apparatuur aanstond – met name de koeling voor het ontvochtigen van de CO₂-stroom – in perioden dat het niet nodig was.

Kwantificering van verbruiksmaterialen en bijproducten

- **Condenswater:** De Cumulus produceerde condenswater als bijproduct tijdens de afvangst van CO₂ uit de buitenlucht. Net als andere waterstromen in de kas, is het wenselijk om dit te hergebruiken als irrigatiewater. Dit is in lijn met het Nederlandse beleid om vanaf 2027 water volledig te recirculeren. Om het condenswater goed en veilig te kunnen hergebruiken, is het van belang om de hoeveelheid en kwaliteit van het condenswater te bepalen:
 - **Hoeveelheid:** De proef liet zien dat de DAC-machine ca. 3,4 l condenswater produceert per kg CO₂. Er was niet voldoende data beschikbaar om te bepalen hoe constant de condenswaterproductie is onder wisselende klimaatomstandigheden zoals temperatuur en vochtgehalte van de aangezogen lucht. Als we aannemen dat een teelt 20 kg CO₂/m²/jaar uit DAC doseert komt dit overeen met een totale condenswaterproductie van ca. 68 l/m²/jaar. Aangenomen dat een Nederlandse hogedraadteelt per jaar ca. 800 l/m² gebruikt, zou het condensatiewater ca. 8,5% van de irrigatiebehoefte op jaarbasis kunnen voorzien. Dit is slechts een ruwe schatting op jaarbasis, maar gezien de potentie is verder onderzoek naar de daadwerkelijke bijdrage aan de watervoorziening zinvol, met aandacht voor het fluctuerende waterverbruik in de kas.
 - **Kwaliteit:** Uit wateranalyses werden elementen (NH₄, HCO₃, Fe, Zn, Cu, Al, Pb en Cr) teruggevonden in hogere concentraties dan gangbare waterbronnen voor de glastuinbouw, maar de concentraties bleven onder de risicogrenswaarden voor toxiciteit wanneer het water gerecirculeerd wordt in de kas. In de analyse zijn extreme scenario's doorgerekend die ervan uitgaan dat 100% van de verontreinigingen op één plek ophopen, namelijk het fertigatiewater, de vruchten of de (rest)biomassa. De exacte herkomst van alle elementen in het condensaat kon niet met zekerheid worden vastgesteld. Het is onduidelijk of deze (volledig) uit de DAC-machine afkomstig zijn of ook worden aangezogen als externe verontreinigingen. Nadere analyses van de luchtfilters wijzen erop dat omgevingsverontreinigingen kunnen bijdragen aan de samenstelling van het condensaat. Dit benadrukt het belang van een (relatief) schone locatie voor de DAC-machine en regelmatige vervanging van de filters. Skytree adviseert om tenminste elke zes maanden de luchtfilters te vervangen, afhankelijk van de omgeving. Daarnaast wordt aanbevolen om het condenswater altijd te testen voordat het als irrigatiewater wordt gebruikt.
- **Sorptiemiddel:** De Cumulus gebruikt 22 kg sorptiemiddel gewogen bij 10-15% w vochtretentie en het sorptiemiddel moet na 30 maanden vervangen worden. Op dit moment is nog niet bepaald wat er gebeurt met het sorptiemiddel na gebruik, maar Skytree neemt het sorptiemiddel na gebruik terug. Het is momenteel niet mogelijk om het te hergebruiken in de DAC-machine, maar mogelijk zijn er andere doeleinden voor hergebruik mogelijk.
- **Filtermateriaal:** De filters bij de lucht aan- en afvoer van de Cumulus moeten waarschijnlijk elke 6 maanden vervangen worden, maar dit is afhankelijk van de locatie en plaatsing.

Verbeteringen en blik op de toekomst

In 2025 wordt de Skytree Stratus verwacht. Een machine met grotere capaciteit die specifiek is ontwikkeld voor de glastuinbouw. Omdat de Skytree Cumulus (dit rapport) en Stratus voor verschillende toepassingen zijn ontworpen, zullen de onderzoeksresultaten uit de proef met de Cumulus niet volledig representatief zijn voor de prestaties van de Stratus. Dit geldt met name voor de productiecapaciteit, geleverde concentratie en behaalde energie-efficiëntie. Het onderzoek naar risico's met betrekking tot fytotoxische gassen bij het gebruik van de Skytree Cumulus wordt echter wel als indicatief beschouwd, omdat beide systemen hetzelfde sorptiemiddel en een deel van dezelfde kernprocessen gebruiken. De nieuwe inzichten verkregen uit het IDC CO₂-project hebben geleid tot een reeks aan verbeteringen in zowel het ontwerp van de DAC-machine als de opstelling in de praktijk.

Summary

Project objective

The greenhouse horticulture sector faces the major challenge of gradually eliminating fossil CO₂ emissions. At the same time, CO₂ remains essential for maximizing the photosynthetic capacity of plants. Direct Air Capture (DAC) has the potential to contribute as a new CO₂ source, but its functionality, integration into greenhouse operations, CO₂ quality, and required inputs for such installations remain largely unknown.

The **IDC CO₂ project** provides a platform for the independent evaluation of DAC technologies. During the project, multiple DAC companies have the opportunity to set up their systems within the greenhouse facilities of Wageningen University & Research in Bleiswijk. The trials are open for demonstration purposes, allowing interested parties to visit the test setup and experience system operations firsthand. The research aims to collect data in a semi-practical environment to:

1. Evaluate the **CO₂ quality** and identify potential **phytotoxicity risks** for crops.
2. Assess the **performance of the DAC machine** in terms of production capacity, CO₂ concentration, and energy efficiency.
3. Quantify, qualify, and assess the sustainability of required **consumables**, such as sorbents, and **by-products**, such as condensate water.
4. Explore the practical implementation of DAC in existing greenhouse systems.

The overall goal of the project is to map the feasibility and effectiveness of DAC technology within the greenhouse horticulture sector through demonstration and knowledge development, with the aim of making CO₂ use more sustainable.

Skytree is the first company to provide a DAC machine, a beta version of the Skytree Cumulus, for the IDC CO₂ project. Although the machine was designed for a closed cultivation environment such as a vertical farm, its intended capacity of 10 kg CO₂ per 24 hours was well suited to the scale of the trial. The Skytree Stratus, a machine with greater capacity specifically developed for greenhouse horticulture, is expected in 2025. Since the Skytree Cumulus and Stratus are designed for different applications, the research results from the Cumulus trial are not fully representative for the performance of an optimized DAC system for greenhouse horticulture. Nevertheless, the Cumulus was evaluated on points 1, 3, and 4, as both systems use the same sorbent and some of the same core processes. The production capacity, concentration, and achieved energy efficiency were also tested, identifying possible improvements.

Trial Setup

- The trial was conducted in two greenhouse compartments equipped with a high-wire cultivation system. In the test compartment, CO₂ was supplied by the Cumulus, while OCAP CO₂ was used in the reference compartment.
- **Cucumber** was chosen as the test crop due to its rapid growth and relative sensitivity to phytotoxic gases, allowing potential damage to be easily observed.
- The trials took place from **January to June 2024** and from **July to December 2024**, with the Cumulus being used as the CO₂ source from May 2024.
- The trial design aimed to create identical cultivation conditions as much as possible, ensuring that any differences in results could be attributed to the difference in CO₂ source.

- Both compartments were equipped with an air treatment system for dehumidification and/or cooling, allowing windows to remain almost completely closed. This minimized CO₂ loss and increased the likelihood of detecting effects of phytotoxic gases—if present. The realized climate conditions were as follows:
 - **Temperature:** The year-round average air temperature was 0.2°C higher in the reference compartment (22.1°C) than in the test compartment (21.9°C), likely due to slightly lower cooling capacity in the reference compartment.
 - **Moisture deficit:** Comparable in both compartments, with a year-round average of 3.3 g/m³ in the reference compartment and 3.2 g/m³ in the test compartment.
 - **CO₂ concentration:** Comparable in both compartments, with a year-round average of 680 ppm.
 - **Light levels:** Comparable in both compartments, with an annual average daily light sum of 18.8 mol/m².

Results

CO₂ quality, phytotoxicity, crop growth, and development

- The measured **crop parameters** for both vegetative and generative growth were similar between both compartments and both cultivation cycles. The **yields** were also very comparable:
 - First cycle (158 days from transplanting): 70.8 kg/m² with 176.7 fruits/m² in the reference compartment and 70.2 kg/m² with 178.2 fruits/m² in the test compartment.
 - Second cycle (169 days from transplanting): 80.2 kg/m² with 198 fruits/m² in the reference compartment and 80.0 kg/m² with 194.2 fruits/m² in the test compartment.
 - The dry matter percentage of the fruits ranged between 2.0-3.1% for both crops and showed little variation between treatments.
- **Color measurements** were conducted on the leaves and flowers to monitor any abnormalities or symptoms of crop damage. The results showed no significant difference in color patterns between the two greenhouse compartments.
- **Disease pressure** was low and manageable in both cycles. The most notable difference was the degree of Fusarium infection, which was higher in the test compartment despite Fusarium spores being present in both compartments. No clear link between DAC CO₂ and Fusarium incidence was identified.

Gas analyses

The captured CO₂ was tested for known harmful gases for plants (NH₃, NO_x, C₆H₆, C₂H₅O, C₂H₄, and H₂S). Additionally, sensors were installed at the end of the second cultivation cycle to continuously monitor NO_x and C₂H₄. Based on these measurements, no alarming levels of toxic substances were detected. Key points of attention remain the monitoring of NO_x and NH₃. During both cultivation cycles, the Cumulus could not fully meet the crop's CO₂ demand, leading to a partial supply of OCAP CO₂. In the first cultivation cycle, DAC CO₂ was used for a relatively short period, and in the second cycle, there were also moments when switching to OCAP CO₂ was necessary. As a result, short-term (24-hour) and mid-term (monthly) effects could be sufficiently assessed, but long-term effects (entire cultivation cycle/year) could not.

DAC machine performance (Note: This data was collected for a beta version of the Skytree Cumulus. For the latest developments, we recommend contacting Skytree.)

- **CO₂ concentration:** 40-57% by volume, equivalent to 56-67% by weight.
- **Production capacity:** An average of 4.5 kg CO₂/day (measured maximum of 6.5 kg CO₂/day).
- **Energy efficiency:** 9-15 kWh/kg CO₂.
- CO₂ capture and process efficiency declined over the trial period due to the following factors:
 - **Exposure to a dust and high temperatures**, as the Cumulus was placed indoors, on the ground in a dusty environment, causing the filters to clog relatively quickly. During the second cultivation cycle, the filters were replaced, which improved performance.
 - **A leak in the vacuum chamber** led to the degradation of the sorbent due to oxidation. As the beta version of Cumulus is the first field-deployed system, the process was not yet fully optimized and leaks worsened over time. Due to this leak and the increased temperature, the sorbent was directly affected by the intake of warmer air, negatively impacting performance.
 - **Excessive energy consumption** occurred because the Cumulus Control unit ran continuously, keeping certain equipment – particularly the cooling system for dehumidifying the CO₂ stream – operational even when it was not needed.

Quantification of consumables and by-products

- **Condensate Water:** The Cumulus produced condensate water as a by-product during the capture of CO₂ from ambient air. As with other water streams in a greenhouse, it is desirable to reuse this as irrigation water. This aligns with Dutch policy to fully recirculate irrigation water by 2027. In order to reuse the condensate water safely and effectively, its quantity and quality must be determined:
 - **Quantity:** The trial showed that the DAC machine produces approximately 3.4 liters of condensate water per kg of CO₂. There was insufficient data to determine how consistent condensate production is under varying climate conditions, such as temperature and humidity of the intake air. Assuming a grower doses 20 kg CO₂/m²/year from DAC, this corresponds to a total condensate production of around 68 liters/m²/year. Considering that a Dutch high-wire crop uses approximately 800 liters/m²/year, the condensate could supply about 8.5% of the annual irrigation needs. This is a rough annual estimate, but given the potential, further research into the actual contribution to water supply is worthwhile, taking into account the fluctuating water use of the greenhouse.
 - **Quality:** Water analyses detected elements (NH₄, HCO₃, Fe, Zn, Cu, Al, Pb, and Cr) at higher concentrations than those typically found in commonly used water sources for greenhouse horticulture. However, the concentrations remained below toxicity risk thresholds when irrigation water is recirculated in a greenhouse. The analysis included extreme scenarios assuming 100% accumulation of contaminants in one location—either the fertigation water, the fruits, or the (residual) biomass. The exact origin of all elements in the condensate could not be definitively identified. It is unclear whether they originate entirely from the DAC machine or are partially drawn in as external contaminants. Further analyses of the air filters suggest that environmental pollutants may contribute to the condensate's composition. This highlights the importance of placing the DAC machine in a relatively clean location and replacing filters regularly. Skytree recommends replacing air filters at least every six months, depending on the environment. It is also recommended to always test the condensate water before using it as irrigation water.
- **Sorbent material:** The Cumulus used 22 kg of sorbent (measured at 10–15% moisture retention), and it must be replaced after 30 months. It is not yet determined what happens to the sorbent after use, but Skytree indicated they will take back the used material. Currently, it cannot be reused in the DAC machine, but other applications for reuse may be possible.
- **Filter material:** The air intake and exhaust filters of the Cumulus likely need to be replaced every six months, although this depends on location and setup.

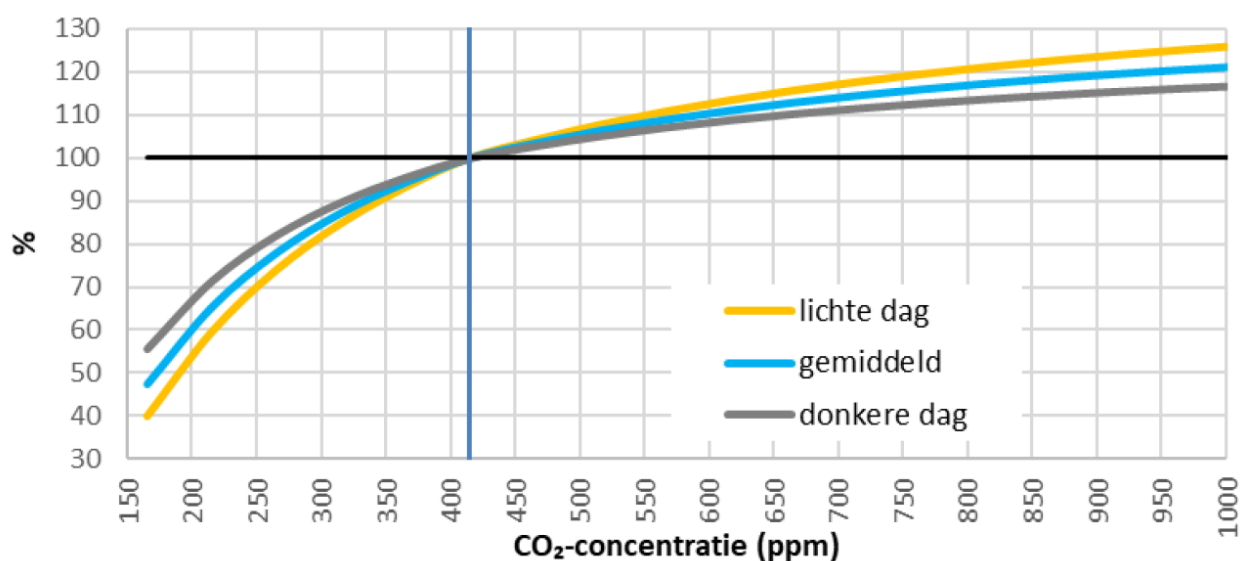
Improvements and outlook

The Skytree Stratus is expected in 2025—a higher-capacity machine specifically developed for greenhouse horticulture. Since the Skytree Cumulus (discussed in this report) and the Stratus are designed for different applications, the research results from the Cumulus trial will not be fully representative of the Stratus's performance—especially regarding production capacity, delivered concentration, and achieved energy efficiency. However, the research into risks related to phytotoxic gases from the Skytree Cumulus is considered indicative, as both systems use the same sorbent and share core processes. The new insights gained from the IDC CO₂ project have led to a series of improvements in both the DAC machine's design and its practical implementation.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

In kassen wordt al decennialang CO₂ gedoseerd om de productiviteit van gewassen te verhogen. Figuur 1 toont de toename in oogst die wordt behaald bij hogere CO₂-concentraties ten opzichte van de huidige concentratie in de buitenlucht (ca. 415 ppm). Ook is te zien hoe sterk de gewasgroei afneemt wanneer de CO₂-concentratie onder de buitenwaarde daalt. In een gangbare kas is enkel natuurlijke ventilatie via de ramen op veel momenten niet genoeg om de CO₂-concentratie in de kas op de buitenwaarde te houden (Trouwborst & Van Oostrom, 2024). Met name in de winterdag bij veelal gesloten ramen kan de CO₂-concentratie sterk dalen, zeker met belichting.



Figuur 1 Relatie tussen de gewasopbrengst en de CO₂-concentratie.

De meeste CO₂ die in de glastuinbouw wordt gebruikt, is momenteel afkomstig van fossiele brandstoffen. Het gaat voornamelijk om CO₂ die vrijkomt bij de verbranding van aardgas in ketels en warmtekrachtkoppelingen (WKK) die op glastuinbouwbedrijven gebruikt worden voor de energievoorziening. Een deel van de sector krijgt CO₂ geleverd via het leidingnetwerk van OCAP¹. Die CO₂ is gedeeltelijk bijproduct uit de petrochemische industrie (Shell Pernis) en gedeeltelijk afkomstig uit een bio-ethanolfabriek (Alco). Levering van vloeibare CO₂ per as wordt het minst ingezet (Van Der Velden & Smit, 2019).

Naarmate de energietransitie vordert – gedreven door klimaatbeleid en de ambitie van de glastuinbouwsector om fossielvrij te opereren² – neemt de beschikbaarheid van fossiele CO₂ uit ketels en WKK af. De beschikbaarheid van externe CO₂ voor de glastuinbouw zou ook aanzienlijk kunnen afnemen door de wijze waarop klimaatbeleid in de praktijk wordt uitgevoerd. Industrieën die momenteel CO₂ leveren aan de glastuinbouwsector moeten hun eigen uitstoot reduceren. In dit kader kan prioriteit worden gegeven aan langdurige opslag van CO₂ (CCS) in plaats van hergebruik (CCU). Een project in ontwikkeling door Porthos³ richt zich op het transporteren en opslaan van CO₂ afkomstig van industrieën in de Rotterdamse haven. De CO₂ wordt opgeslagen in lege gasvelden onder de Noordzee.

¹ <https://www.ocap.nl/>

² <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2022/12/06/bijlage-bij-convenant-energietransitie-glastuinbouw-2022-2030>

³ <https://www.porthosco2.nl/>

De aanleg van de benodigde infrastructuur is begin 2024 gestart, met de verwachting dat het systeem operationeel zal zijn in de loop van 2026. Porthos werkt samen met vier klanten: Air Liquide, Air Products, ExxonMobil en Shell. Northern Lights⁴ is een vergelijkbaar project in Noorwegen waar CO₂-uitstoot van Yara Sluiskil zal worden opgeslagen.

Om de huidige productiviteit en efficiëntie van de glastuinbouw te behouden, kijkt de sector naar meerdere oplossingsrichtingen. Er ligt focus op efficiënter gebruik van CO₂ in de kas, maar ook alternatieve, duurzamere bronnen voor CO₂ worden verkend. De CO₂-behoefte van de glastuinbouwsector in 2030 wordt geschat op een omvang tussen 1,24 en 2,46 Mton per jaar (Smit & Grootscholten, 2024).

Een van de alternatieve bronnen die onder de aandacht staat, is CO₂ die wordt afgevangen uit buitenlucht met Direct Air Capture technologie, ofwel DAC. Hoewel er verscheidene methoden bestaan, werkt het proces als volgt:

1. Buitenlucht wordt aangevoerd en in contact gebracht met een sorbens: een stof waar CO₂ in kan worden opgeslagen.
2. De CO₂ wordt uit de buitenlucht verwijderd en vastgelegd in het sorbens.
3. De CO₂ wordt gescheiden van het sorbens door het te verhitten. Er bestaan ook technologieën die via andere vormen van energie de CO₂ vrijmaken, zoals latente warmte of druk.

Binnen de glastuinbouw wordt DAC nog niet op commerciële schaal toegepast, maar er zijn meerdere bedrijven bezig om hun technologie naar de markt te brengen. Anticiperend op bovenstaande ontwikkelingen heeft het innovatieprogramma Kas als Energiebron opdracht gegeven om de potentie van DAC als duurzame investering voor telers te onderzoeken binnen het project 'Innovatie en Demonstratie Centrum CO₂ uit Buitenlucht' (IDC CO₂).

1.2 Innovatie en Demonstratie Centrum CO₂ uit Buitenlucht

Het IDC CO₂ biedt een platform voor onafhankelijke evaluatie van DAC-technologieën. Tijdens het project krijgen meerdere DAC-bedrijven de gelegenheid om hun systeem op te stellen binnen de kasfaciliteiten van Wageningen University & Research in Bleiswijk. De proeven zijn toegankelijk voor demonstratiedoeleinden, waarbij geïnteresseerden de mogelijkheid hebben om de testopstelling te bezoeken en de werking van de systemen in de praktijk mee te maken. Het onderzoek is gericht op het verzamelen van data binnen een semi-praktijkomgeving om de volgende inzichten te verkrijgen:

- **Kwaliteit van CO₂ uit DAC:** Het identificeren van potentiële risico's met betrekking tot fytotoxische gassen en inventariseren van maatregelen die DAC-bedrijven en telers kunnen implementeren om deze risico's te beheersen.
- **Prestatiekenmerken:** Het analyseren van de prestaties van DAC-machines onder uiteenlopende klimaatomstandigheden, met aandacht voor:
 - De geleverde CO₂-concentratie;
 - De behaalde capaciteit;
 - Het productiepatroon (continue of batch);
 - Het energieverbruik per kilogram afgevangen CO₂.
- **Verbruiksmaterialen:** De kwantiteit en duurzaamheid van benodigde inputs, zoals sorbens en filters, wordt onderzocht.
- **Bijproducten:** De kwantiteit en kwaliteit van outputs, bijvoorbeeld condenswater, wordt onderzocht.
- **Praktijkimplementatie:** Naarmate de technische kenmerken van commerciële DAC-technologie in beeld komen, wordt geanalyseerd hoe de CO₂-productie optimaal kan worden afgestemd op de vraag van één of verscheidene teelten. Hierbij wordt rekening gehouden met eventuele CO₂-buffercapaciteit evenals beschikbaarheid en prijs van (hernieuwbare) warmte en elektriciteit.
- **Economisch perspectief:** Op basis van de energie-efficiëntie (kWh/kg CO₂), gerealiseerde energieprijzen en CO₂-doseerstrategieën wordt het economisch perspectief in kaart gebracht. Indien mogelijk wordt ook rekening gehouden met afschrijving van apparatuur en kosten voor verbruiksmaterialen en onderhoud.

⁴ <https://norlights.com/news/northern-lights-and-yara-signs-binding-agreement-on-co2-transport-and-storage/>

Het project als geheel is erop gericht om via demonstratie en kennisontwikkeling de haalbaarheid en effectiviteit van DAC-technologie binnen de glastuinbouwsector in kaart te brengen, met als doel het gebruik van CO₂ te verduurzamen.

1.3 Doelstellingen proef met Skytree Cumulus (Bèta)

Skytree is het eerste bedrijf dat een DAC-machine, de Skytree Cumulus⁵, heeft geleverd voor het IDC CO₂-project. Hoewel de machine is ontworpen voor een gesloten teeltomgeving, zoals een vertical farm, sloot de beoogde capaciteit van 10 kg CO₂ per 24 uur goed aan op de schaal van de proef, die kascompartimenten van 144 m² betreft. In 2025 wordt de Skytree Stratus⁶ verwacht. Een machine met grotere capaciteit die specifiek is ontwikkeld voor de glastuinbouw. Omdat de Skytree Cumulus en Stratus voor verschillende toepassingen zijn ontworpen, zullen de onderzoeksresultaten uit de proef met de Cumulus niet volledig representatief zijn voor de prestaties van de Stratus. Dit geldt met name voor de productiecapaciteit, geleverde concentratie en behaalde energie-efficiëntie. Het onderzoek naar risico's met betrekking tot fytotoxische gassen bij het gebruik van de Skytree Cumulus wordt echter wel als indicatief beschouwd, omdat beide systemen hetzelfde sorbens en een deel van dezelfde kernprocessen gebruiken. De doelstellingen van de proef omvatten:

- **CO₂-kwaliteit:** Kwaliteit van CO₂ uit de Skytree Cumulus evalueren door middel van kasproeven met plantmetingen, en gasanalyses van bekende fytotoxische gassen.
- **Prestatiekenmerken:** Analyseren van de prestaties onder uiteenlopende klimaatomstandigheden, met aandacht voor:
 - De geleverde CO₂-concentratie;
 - De behaalde capaciteit;
 - Het productiepatroon (continue of batch);
 - Het energieverbruik per kilogram afgevangen CO₂.
- **Verbruiksmaterialen:** De kwantiteit en duurzaamheid evalueren van benodigde inputs, zoals sorbens en filters.
- **Bijproducten:** De kwantiteit en kwaliteit evalueren van outputs, zoals condenswater.
- **Praktijkimplementatie:** Inzichten verzamelen wat betreft de technische integratie van DAC in de bestaande (high-tech) kassystemen.

⁵ <https://www.skytree.eu/product/skytree-cumulus>

⁶ <https://www.skytree.eu/nl/product/skytree-stratus>

2 Proefopzet

2.1 DAC-machine – Skytree Cumulus (Bèta)

Van mei tot en met december 2024 werd de Skytree Cumulus als eerste DAC-machine getest binnen het IDC CO₂-project in de faciliteiten van Wageningen University & Research te Bleiswijk. De opstelling bestond uit een *Main unit* (rechts) en een *Control Unit* (midden), zie Figuur 2. De Main unit zuigt omgevingslucht aan en bevat het sorbens dat de CO₂ uit de lucht bindt. De Control unit huisvest de apparatuur die alle processen aanstuurt en zorgt voor de nabehandeling van de geconcentreerde CO₂, waaronder het drogen van de gasstroom. Vervolgens wordt de CO₂, via een compressor, naar een buffertank geleid voor opslag en dosering in de kas.



Figuur 2 De bètaversie van de Skytree Cumulus. Links is de apparatuur zichtbaar die deel uitmaakt van de Control unit en rechts staat de Main unit die omgevingslucht aanzuigt. (Foto door Skytree.)

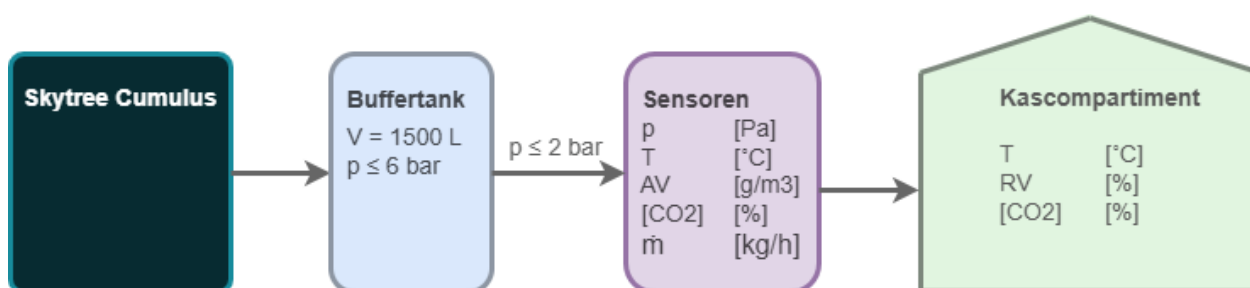
Voor de proef met de Skytree Cumulus zijn twee aandachtspunten te noemen. Ten eerste betreft het een bètaversie van de machine, wat betekent dat de prestaties naar verwachting nog niet volledig overeenkomen met de beoogde output van de commerciële versie. Ten tweede is de Cumulus ontworpen voor gebruik met gesloten teeltomgevingen, zoals vertical farms, maar de verwachte capaciteit van 10 kg CO₂ per 24 uur sloot goed aan op de schaal van de proef, waarbij kascompartimenten van 144 m² zijn gebruikt.

Daarnaast wordt in 2025 de Skytree Stratus verwacht. Een machine met een veel grotere capaciteit die specifiek is ontwikkeld voor de glastuinbouw. Omdat de Cumulus en de Stratus voor verschillende toepassingen zijn ontworpen, zullen de resultaten van de proef met de Cumulus niet volledig representatief zijn voor de prestaties van de Stratus.

Dit geldt met name voor de productiecapaciteit, geleverde concentratie en behaalde energie-efficiënte. Het onderzoek naar de aanwezigheid van fytotoxische gassen bij gebruik van de Cumulus wordt wel als indicatief beschouwd, omdat beide systemen gebruikmaken van hetzelfde sorptiemiddel en vergelijkbare kernprocessen.

2.1.1 CO₂-voorziening via DAC & metingen

Figuur 3 geeft schematisch weer hoe de CO₂-voorziening vanuit de DAC-machine was opgezet voor de proef. De Cumulus produceerde een geconcentreerde CO₂-stroom die met behulp van een compressor werd opgeslagen in een buffertank (Airpress Drukvat⁷) van 1500 liter tot een maximale druk van 6 bar. Vanuit de buffertank werd de CO₂ gereduceerd naar maximaal 2 bar en vervolgens gedoseerd in het kascompartiment via een mass flow controller (Bronkhorst EL-FLOW Select F-201AV⁸). De mass flow controller werd aangestuurd door de klimaatcomputer (Hoogendoorn iSii⁹) op basis van de gemeten CO₂-concentratie in de kas (LI-COR LI-850 Analyzer¹⁰). Wanneer de gemeten concentratie onder de ingestelde streefwaarde zakte, stuurde de klimaatcomputer een signaal naar de mass flow controller om CO₂ te doseren.



Figuur 3 Schematische weergave van de CO₂-voorziening vanuit DAC en de uitgevoerde metingen.

Om de CO₂-productie van de DAC-machine in kaart te brengen werd de CO₂-stroom door sensoren gevoerd. Daarmee werd data verzameld over de druk, temperatuur en vochtigheid van de CO₂-stroom, evenals de CO₂-concentratie (Carltech Gas Analyzer WD22-Series¹¹) en het massadebiet (Bronkhorst EL-FLOW Select F-201AV).

Zoals te zien is in Figuur 2, stond de Skytree Cumulus binnen opgesteld in een technische corridor van de kas. Deze bètaversie was nog niet bestand tegen buitenomstandigheden (IP21) en ook zou te koude lucht de werking negatief kunnen beïnvloeden. Om te voorkomen dat de CO₂-concentratie in de corridor onder de buitenconcentratie zou dalen doordat de DAC-machine CO₂ aan de lucht onttrekt, zijn enkele maatregelen genomen om in de corridor realistische CO₂-concentraties te waarborgen. Er zijn extra ventilatioeroosters in de deuren geïnstalleerd, de klimaatinstellingen van de ramen en schermen zijn aangepast voor maximale ventilatie en daarnaast was het ook mogelijk om CO₂ te doseren in de corridor.

2.1.2 Input & outputmetingen (energie, water, sorptiemiddel, filtermateriaal)

Naast de geproduceerde CO₂ zijn ook metingen verricht om de inputs en outputs van de DAC-machine in kaart te brengen:

- De elektriciteitsvraag van de machine is gemeten met twee kilowattuurmeters. Een voor de Main unit en een voor de Control unit.
- Het condenswater uit de DAC-machine is verzameld om de geproduceerde hoeveelheid in te schatten en wateranalyses uit te voeren. Concentraties van nutriënten en zware metalen zijn geanalyseerd door Eurofins.

⁷ <https://airpress.nl/drukvat-1500-l-11-bar-36150011>

⁸ <https://www.bronkhorst.com/nl-nl/producten/gas-flow/el-flow-select/f-201av/>

⁹ <https://hoogendoorn.com/onze-oplossingen/isii/>

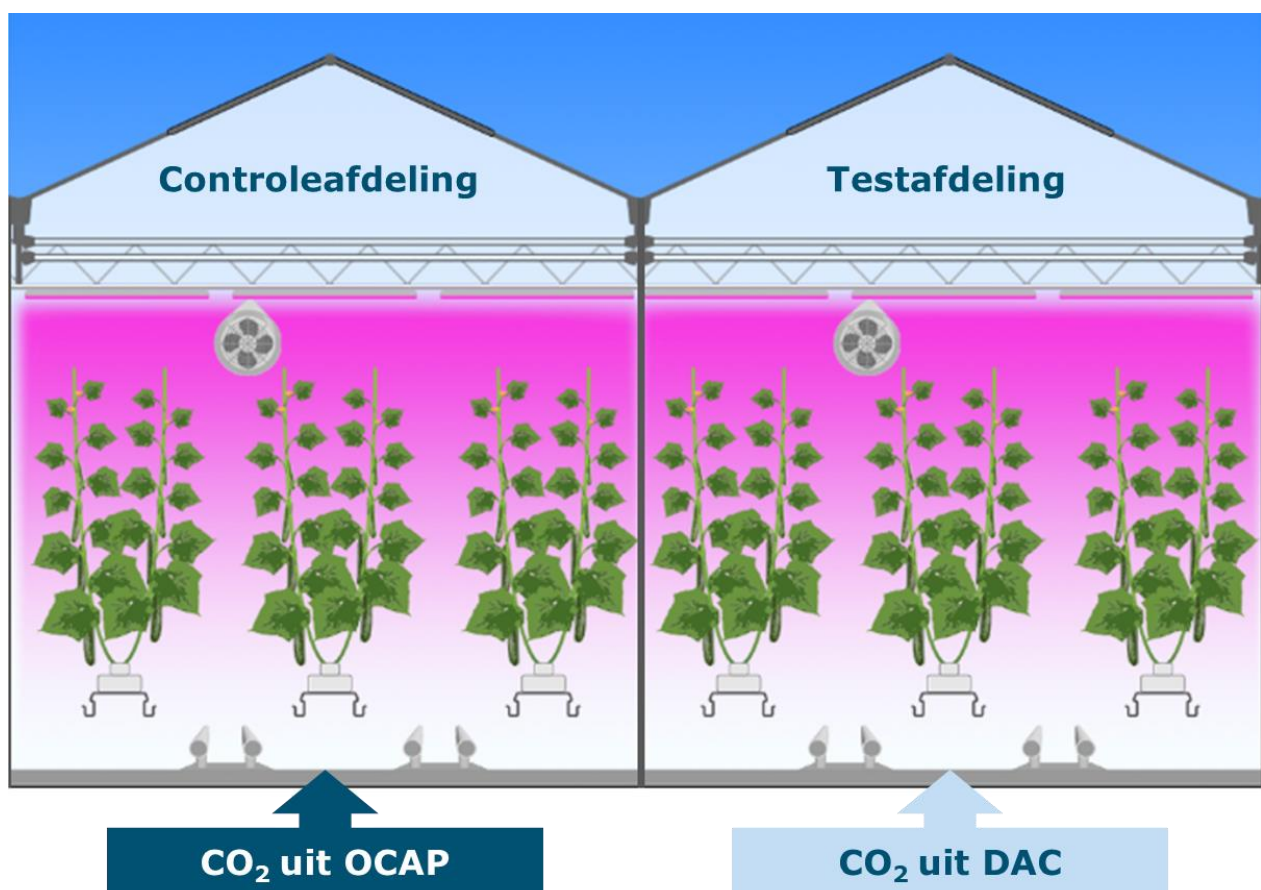
¹⁰ <https://www.licor.com/env/support/LI-850/topics/specifications.html?Highlight=LI-850%20Gas%20analyzer>

¹¹ <https://carltech.nl/producten/procesmeting>

- Aanvullende informatie over de Cumulus is verstrekt door Skytree:
 - Het sorptiemiddel, gebruikt in de Skytree Cumulus is afkomstig van Purolite™. De machine gebruikt 22 kg sorptiemiddel gewogen bij 10-15%w vochtretentie en het sorptiemiddel moet na 30 maanden vervangen worden. Op dit moment is nog niet bepaald wat er gebeurt met het sorptiemiddel na gebruik, maar Skytree neemt het sorptiemiddel na gebruik terug. Het is momenteel niet mogelijk om het te hergebruiken in de machine zelf, maar mogelijk zijn er andere doeleinden voor hergebruik mogelijk. Een verklaring van de fabrikant met betrekking tot de duurzaamheid van het sorptiemiddel is te vinden op <https://www.purolite.com/index/Company/About/environmental-commitment>.
 - Filtermateriaal: De filters bij de lucht in-en uitlaat van de Skytree Cumulus moeten naar verwachting elke 6 maanden vervangen worden, maar dit is uiteraard afhankelijk van de luchtkwaliteit op de locatie waar de machine geplaatst wordt.

2.2 Teelt & teeltsysteem

Om de kwaliteit te testen van CO₂ dat wordt geproduceerd door de Skytree Cumulus, is een proef uitgevoerd waarbij komkommers zijn geteeld in twee kasafdelingen met een hogedraad teeltsysteem. In de testafdeling werd CO₂ vanuit de DAC-machine toegediend, terwijl in de referentieafdeling CO₂ van OCAP is gedoseerd (zie Figuur 4). OCAP CO₂ wordt sinds 2005 gebruikt als CO₂-bron door de glastuinbouwsector en wordt beschouwd als een veilige bron van CO₂, waarbij de concentratie van potentieel fytoxische verbindingen (zoals benzeen, toluen, ethanol, etheen, acetaldehyde en ethylacetaat) laag genoeg is om schade te voorkomen (Dueck & van Dijk, 2011).

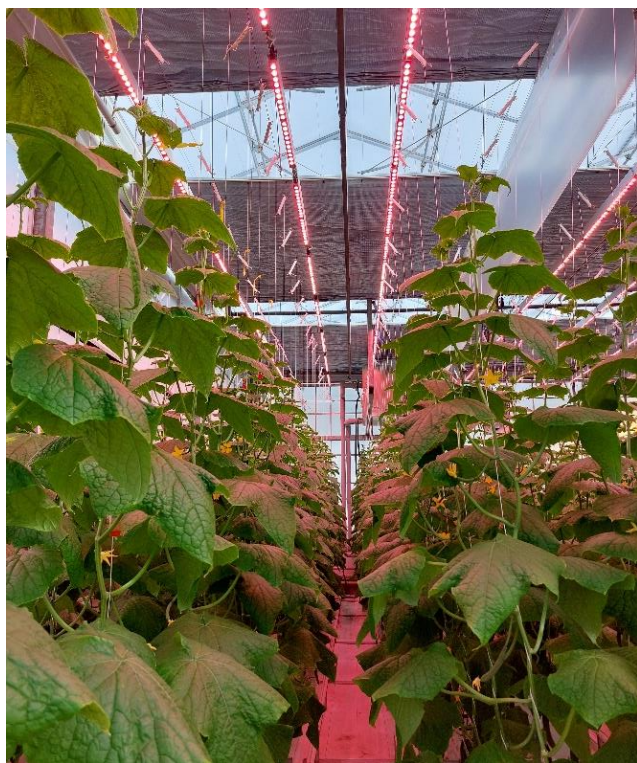


Figuur 4 Proefopzet voor het testen van CO₂ uit DAC-machines op basis van een test- en referentieafdeling waar komkommers worden geteeld in een (zeer) gesloten kas en onder gelijke condities.

Komkommer werd gekozen als testgewas vanwege het praktische voordeel dat het een snelgroeiend gewas is vergeleken met andere hogedraadteelten zoals tomaat en paprika. Bovendien zijn komkommerplanten gevoelig genoeg voor fytotoxische gassen. Mogelijke effecten van fytotoxische gassen zijn zichtbare schade aan de bladeren, zoals bladrandjes en vergeling, groeireductie en bloem abortie en de bloemkleur (Boerman, 2020; Dieleman et al., 2007; van Dijk et al., 2010).

In de proefopzet is ernaar gestreefd om zoveel mogelijk gelijke teeltomstandigheden te creëren, waardoor eventuele verschillen in resultaten uitsluitend aan de CO₂-bron konden worden toegeschreven. Om dit te waarborgen, werden beide afdelingen ingericht met hetzelfde kasdek, schermdoeken, belichting- en luchtbehandelingsinstallaties. Daarnaast werden teeltstrategieën toegepast om een gelijk klimaat in beide afdelingen te realiseren. Protocollen voor gewasverzorging werden binnen hetzelfde tijdsbestek en door dezelfde gewasverzorger uitgevoerd.

Om dicht bij de praktijk te blijven zijn de afdelingen uitgerust overeenkomstig met commerciële hightech kassen. Er werd gekozen voor belichting om het groeitempo te versnellen en de CO₂-behoefte van de planten te verhogen, vooral tijdens periodes met weinig natuurlijk licht. Belichting maakt het ook beter mogelijk om op jaarbasis twee DAC-machines te testen. Afwijkend van de praktijk is dat beide afdelingen beschikten over een luchtbehandelingskast (LBK) om te ontvochtigen en/of te koelen waardoor de luchtramen vrijwel volledig gesloten konden blijven. Dit minimaliseerde het verlies van CO₂ en verhoogde de kans om eventuele effecten van fytotoxische gassen – indien aanwezig – waar te nemen. Bij veel luchten is de kans op opbouw van dergelijke gassen en dus mogelijke schade immers kleiner. Figuur 5 toont een weergave van de gerealiseerde proefopzet.



Figuur 5 Gerealiseerde proefopzet met teelt van komkommer in een hogedraadafdeling uitgerust met LED-belichting, luchtbehandelingskast (LBK) met één centrale luchtverdeelslang (rechtsboven in de foto) en schermen.

Voor elke deelnemer aan het IDC CO₂-project is de minimale teeltduur een halfjaar, waarbij de teelt wordt gestart op de kortste of langste dag zodat er uiteenlopende klimaatcondities worden meegenomen in het testen van de DAC-machine. De proef duurde van januari tot juni 2024 en werd verlengd van juli tot december 2024 met een nieuw komkommergewas. De Skytree Cumulus is sinds mei 2024 operationeel.

Er is gekozen voor een verlengde proefperiode, omdat de installatie vertraging opliep en er nog geen andere deelnemers beschikbaar waren die een (pilot)machine konden leveren. Tabel 1 bevat een overzicht van de teeltgegevens.

Tabel 1 *Overzicht teeltgegevens voor beide teeltproeven met de Skytree Cumulus (Bèta).*

Gewas	Komkommer
Ras	Uptrace (BASF, Nunhems)
Startdata teelten	Teeltproef 1: 18 januari, Teeltproef 2: 2 juli
Plantdichtheid	2,55 planten/m ²
Teeltstrategie	Doel: luchtramen zo gesloten mogelijk houden om CO ₂ in de kas te houden door gebruik te maken van luchtbehandelingskasten.
Substraat en watergift	Steenwolblokken, watergift via druppelaars.
Schermen	Luxuous 1147 FR op de bovenligger, Obscura 9950 FR W op de onderligger.
Diffuus Glas	Hemisferische transmissie 83.6% en haze factor 73%.
Verwarming	Buisrailnet, luchtbehandelingskast.
Belichting	LED-lampen 2 types: Philips 929001648806 TM1.2 DRWFR_1 LB 180W en Philips 929001649206 TM1.2 DRWFR_4 RSE 205W, spectrum rood 75%; groen 9%; blauw 5%; Verrood 11%, intensiteit PAR 245 µmol/m ² /s op 1,5 m onder de lampen.
Daglengthe	16 uur (hele jaar). Dagelijks belichten tot verwachte DLI=20 mol/m ² inclusief zonlicht.
Temperatuurinstellingen	24 °C dag, 19 °C nacht.
Instellingen luchtvochtigheid	VD=2 (donkere nacht), VD=3 (belichte nacht), VD=4 (dag).
CO ₂ -concentratie	600-700 ppm (afhankelijk van de beschikbare hoeveelheid CO ₂ uit de DAC-machine) als het dag is of de lampen aanstaan.
Einddata teelten	Teeltproef 1: 24 juni, Teeltproef 2: 18 december

2.3 Klimaatmetingen

Gedurende de teelt werd het kasklimaat (temperatuur, CO₂ en relatieve luchtvochtigheid) per afdeling gemonitord via een meetbox, en gestuurd via de Hoogendoorn iSii klimaatcomputer. De CO₂-concentratie werd in beide afdelingen gemeten met en geregeld op basis van LI-850 Analyzers van LI-COR¹². Dit zijn zeer nauwkeurige sensoren vergeleken met gangbare CO₂-sensoren die in kassen worden ingezet en een nauwkeurigheid van ca. ±40 ppm kennen. Er is dan ook voor een hogere meetnauwkeurigheid gekozen zodat een verschil in oogst niet veroorzaakt kon worden door meetfouten in de aangehouden CO₂-concentratie.

2.4 Plantmetingen

Gedurende de teelt is de plantontwikkeling, eventuele afwijkingen zoals zichtbare bladschade, en oogst gemonitord.

2.4.1 Plantontwikkeling

In het onderzoek werden wekelijks een aantal plantparameters geregistreerd om de groei- en ontwikkelingssnelheden per afdeling te bepalen. In elke afdeling werden 10 stengels geselecteerd en gedurende de gehele teeltperiode wekelijks gemonitord. Alleen als een stengel brak, aangetast werd door een ziekte of om welke reden dan ook stopte met groeien, werd een nieuwe stengel geselecteerd om de monitoring voort te zetten. De volgende parameters werden gemonitord:

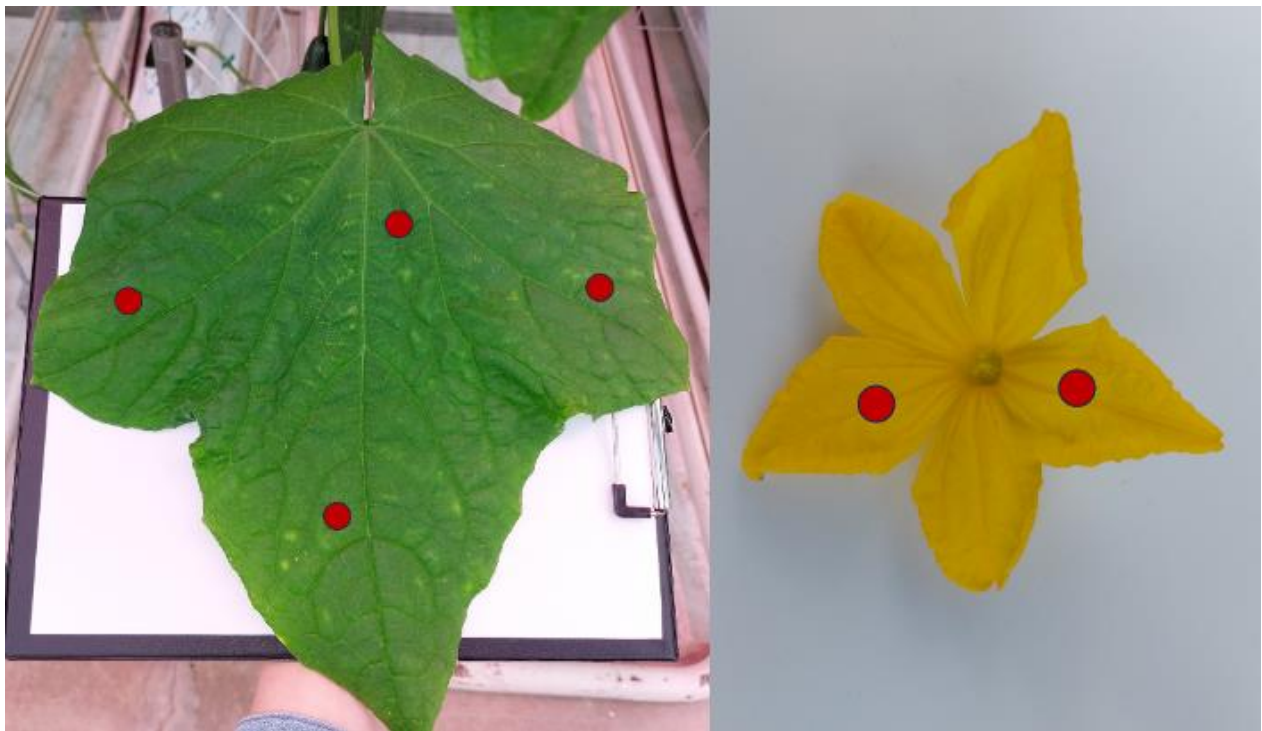
- Aantal nieuwgevormde bladeren per stengel per week. Het hoogste blad dat is gescheiden van de kop werd gemarkeerd met een label en beschouwd als het hoogste, nieuwe blad.
- Toename van stengellengte per week. De planten werden om een draad gedraaid. Op deze draad werd het hoogste punt van de plant (niet het blad) gemarkeerd en de toename van stengellengte is de afstand tussen de laatste twee markeringen op de draad.

¹² <https://www.licor.com/env/support/LI-850/topics/specifications.html?Highlight=LI-850%20Gas%20analyzer>

- Aantal bladeren boven de hoogste open bloem.
- Aantal vruchten onder de hoogste open bloem om de plantbelasting te bepalen. Oogstrijpe vruchten werden niet meegerekend.
- Bladoppervlakte (LAI), berekend op basis van bladlengte en de correlatie met het bladoppervlak. De correlatie tussen bladlengte en bladoppervlak werd enkele keren bepaald door het oogsten van 50 bladeren per afdeling en het meten van lengte en overeenkomstig bladoppervlak.
- Aantal nieuwe vruchten gezet.
- Aantal vruchten geaborteerd.
- Uitgroeiduur van de vruchten. Drie keer per week werden in totaal 30 bloeiende vruchten per compartiment gelabeld met de datum van die dag. Wanneer ze werden geoogst, werd het aantal dagen om volledig uit te groeien bepaald.
- Drogestofgehalte van de vruchten. Per afdeling werd van 10 vruchten op basis van het versgewicht en drooggewicht (na drogen in een droogstoof op 80 °C) het drogestofgehalte bepaald.
- Drie keer per week werden de EC en pH van de gift, mat en drain gemeten.

2.4.2 Kleurmeting

Om eventuele effecten van het gebruik van CO₂ uit DAC op de blad- en bloemkleur te meten, werden kleurmetingen uitgevoerd met de NCS Colourpin PRO¹³. In elke afdeling werden 10 stengels geselecteerd om wekelijks gedurende de teeltperiode de kleurmetingen aan te doen. Voor iedere stengel werd steeds voor 3 bladeren op verschillende hoogtes (onderin, midden, bovenin) de kleur gemeten. Per blad werd op 4 punten gemeten (zie Figuur 6). Daarnaast werden er per afdeling 10 bloemen verzameld die helemaal open waren, en per bloem werd de kleur op twee plaatsen gemeten.



Figuur 6 *Overzicht van de punten op het blad (links) en bloem (rechts) waar de kleurmetingen zijn uitgevoerd.*

2.4.3 Oogst

De productie van het gewas werd bepaald door van 3 carrousels per afdeling de oogst bij te houden. Per carousel werden de vruchten gesorteerd op goede vruchten en afwijkende vruchten (stek genaamd). Per oogstmoment werden het aantal vruchten en het gewicht per carousel en klasse bepaald.

¹³ https://ncscolour.com/en-eu/products/ncs-colourpin-pro?srltid=AfmBOorxOfdVP9iAmx03FoNwgDeggkabg7JTKTkZibUkKY1qctx_wTWI

3 Resultaten & discussie

3.1 Teeltverloop & klimaat

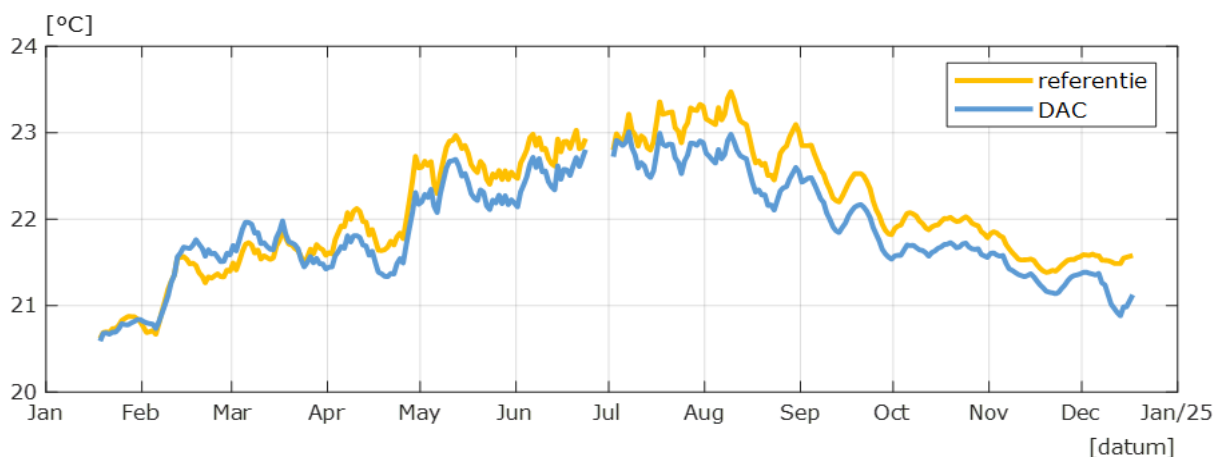
3.1.1 Teeltverloop

Zowel de eerste als de tweede teelt verliep zonder significante problemen. De ziektedruk was laag:

- Crazy Roots: Direct na de start van de teelt werden bij beide compartimenten symptomen van crazy roots waargenomen en aangetoond met een PCR-test. Bij beide compartimenten is een dosatron geïnstalleerd voor een continue toediening van waterstofperoxide om deze infectie te onderdrukken. Er zijn geen negatieve gevolgen gezien van deze infectie.
- Insecten: Mogelijke schadelijke insecten als luis, spint en witte vlieg zijn met biologische bestrijders volgens gebruikelijke inzet bestreden. Chemisch ingrijpen was niet nodig. Rupsen zijn mede door het dichthouden van de luchtramen niet gesignaleerd.
- Schimmels: Voor de Meeldauw is in zowel de eerste als tweede teelt enkele keren een chemische bestrijding uitgevoerd.
- Fusarium: Aan het einde van de eerste teelt waren een paar planten in het compartiment met DAC CO₂ aangetast door fusarium. In de loop van de tweede teelt is er een aantal planten uitgevallen door Fusarium in het compartiment met DAC CO₂. Uit diverse testen op Fusarium werd duidelijk dat water niet de bron van de Fusarium was. Fusarium is in beide compartimenten in het substraat aangetoond. Er is geen duidelijke verklaring gevonden waarom Fusarium in de afdeling met DAC CO₂ tot meer uitval heeft geleid dan in de referentie.

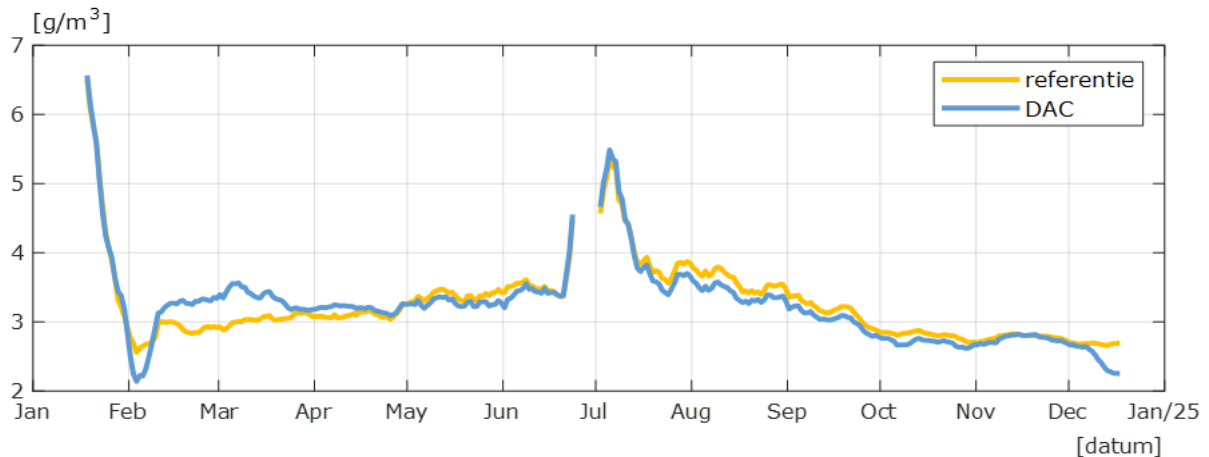
3.1.2 Klimaat

Een van de doelen binnen dit project was om beide compartimenten de planten in een gelijk klimaat te laten opgroeien om mogelijke verschillen te kunnen verklaren aan de kwaliteit van CO₂. De kasluchttemperatuur (Figuur 7) gaf in beide compartimenten een klein verschil van 0,2°C op het jaarrond gemiddelde (referentie 22,1 en DAC 21,9 °C).



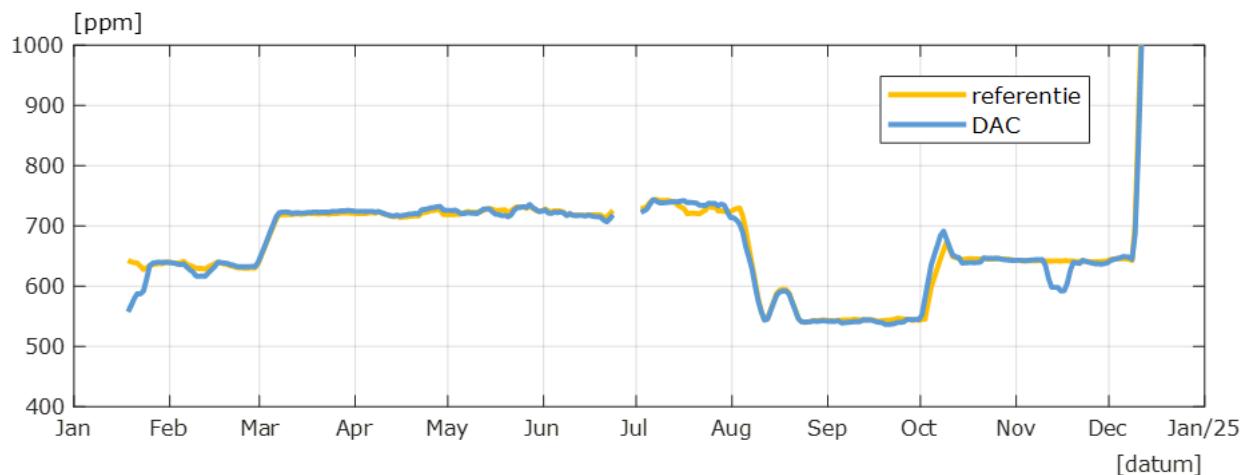
Figuur 7 Kasluchttemperatuur, etmaalgemiddelde, weergegeven als een voortschrijdend gemiddelde van 7 dagen.

Het verschil is te verklaren door de technische opstelling van beide compartimenten, die in de basis gelijk was maar waarbij de uiteindelijke koelcapaciteit in de referentieafdeling iets beperkter bleek te zijn. Het vochtdeficiet (VD) was in beide compartimenten zo goed als gelijk (jaarrond gemiddelde: referentie 3,3 g/m³, DAC 3,2 g/m³), zie Figuur 8.



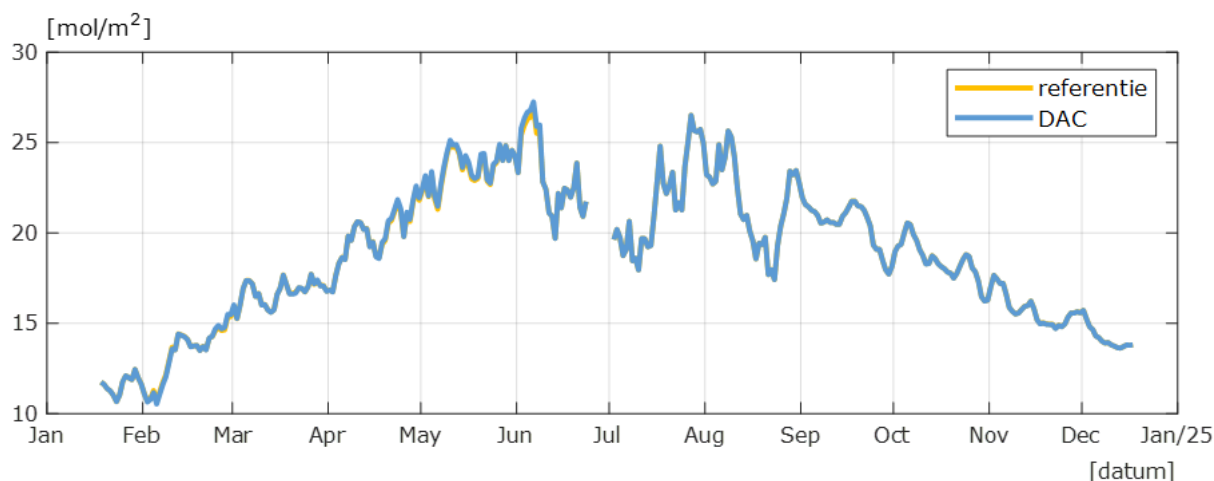
Figuur 8 Kaslucht VD, etmaalgemiddelde, weergegeven als een voortschrijdend gemiddelde van 7 dagen.

De CO₂ concentratie was in beide afdelingen gelijk met een jaarrond gemiddelde van 680 ppm voor beide compartimenten (Figuur 9). Aan het einde van de tweede teelt is het setpoint verhoogd naar 2000 ppm voor een maximale dosering. Dit is gedaan om te zien of er momentaan verschil op de gasanalyzer is tussen de test- en referentieafdeling.



Figuur 9 CO₂ concentratie, etmaalgemiddelde, over een periode dat er belicht en/of daglicht is geweest, weergegeven als een voortschrijdend gemiddelde van 7 dagen.

De hoeveelheid licht was in beide compartimenten gelijk (Figuur 10). Het etmaalgemiddelde over het hele jaar was in beide compartimenten 18,8 mol/m² en de totale molsom op jaarbasis was 1765 mol/m² voor de referentie en 1767 mol/m² voor de testafdeling. Er is een daglengte aangehouden van 16 uur. Er kon dan maximaal 14,1 mol van de lampen komen. In de eerste 4 weken van teelt 1 is er niet langer belicht dan de natuurlijke daglengte vanwege het feit dat het donkerdoek niet kon sluiten door technische problemen met de motor. De teeltstrategie is daarop aangepast.



Figuur 10 Daglichtsom (DLI), etmaalgemiddelde, weergegeven als een voortschrijdend gemiddelde van 7 dagen.

3.2 CO₂-kwaliteit

3.2.1 Plantmetingen

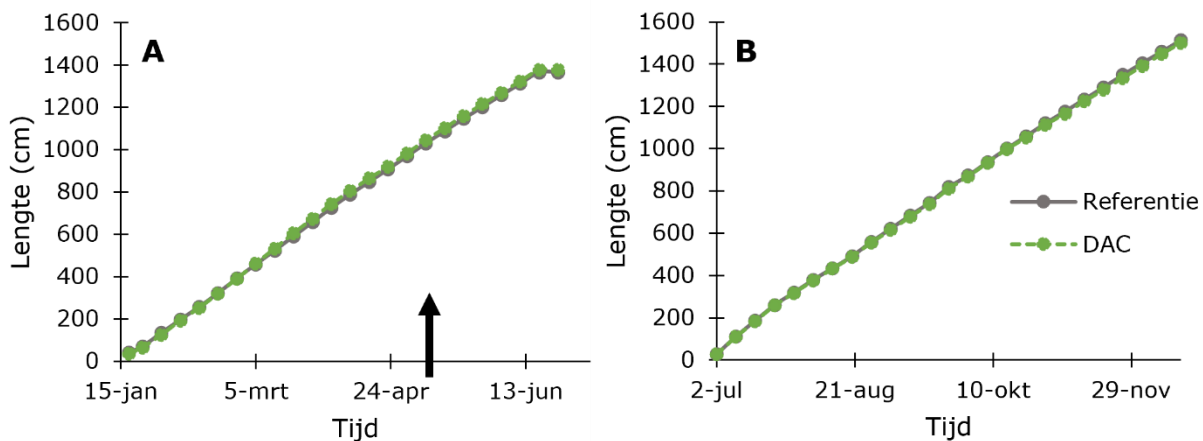
Bij schade door toxische componenten, zoals stikstofoxiden en koolwaterstoffen (o.a. benzeen en etheen), in de CO₂-stroom maakt men onderscheid tussen twee soorten schade. Acute, meestal zichtbare schade na een korte maar hevige blootstelling en chronische schade als gevolg van langdurige blootstelling aan lage concentraties. De chronische schade leidt vaak tot verminderde groei wat kan resulteren in productieverlies en mindere kwaliteit. Door de WHO en in eerdere rapporten wordt daarom gesproken over effecten door kortdurende blootstelling (24-uursgemiddelde) en langdurende blootstelling (jaargemiddelde) (Dieleman et al., 2007; van Dijk et al., 2010; WHO, 2021). Wanneer er geen toxische componenten aanwezig zijn, is de verwachting dat groei, productie en kwaliteit tussen de twee behandelingen (kasafdelingen) gelijk zijn.

3.2.1.1 Vegetatieve groei

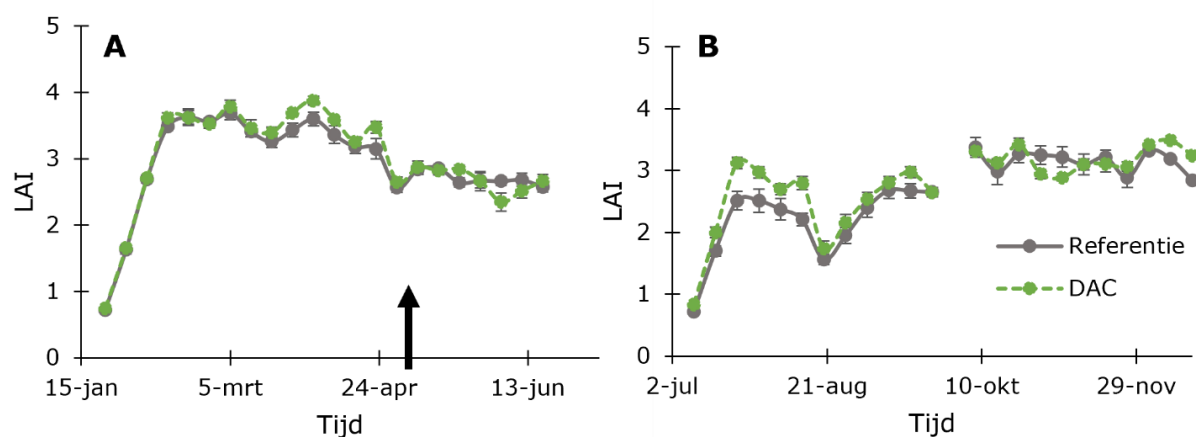
Gedurende de proeven hebben wekelijks plantmetingen plaatsgevonden om eventuele afwijkingen in groei of ontwikkeling te monitoren. De plantlengte verschilde gedurende de teelt nauwelijks tussen de referentie teelt en de teelt waar CO₂ uit DAC werd gedoseerd (Figuur 11A, B). De totale plantlengte was aan het einde van de eerste teelt gemiddeld 13,65 m in de referentieafdeling en 13,76 m voor de testafdeling bij de eerste teelt. Voor de tweede teelt was dit gemiddeld 15,00 m voor de testafdeling en 15,13 m voor de referentie.

De LAI was gedurende de eerste teelt ook vergelijkbaar tussen de twee afdelingen, kleine verschillen in LAI tussen de referentie en testafdeling kwamen zowel voor wanneer er wel en geen DAC CO₂ gedoseerd werd (Figuur 12A). In het eerste deel van de eerste teelt was de LAI wat aan de hoge kant waarna besloten is een extra kopblaadje weg te halen om de LAI niet te hoog te laten worden. Ook tijdens de tweede teelt was de LAI vergelijkbaar tussen de twee afdelingen (Figuur 12B). Deze was de tweede helft van de teelt rond de 3.

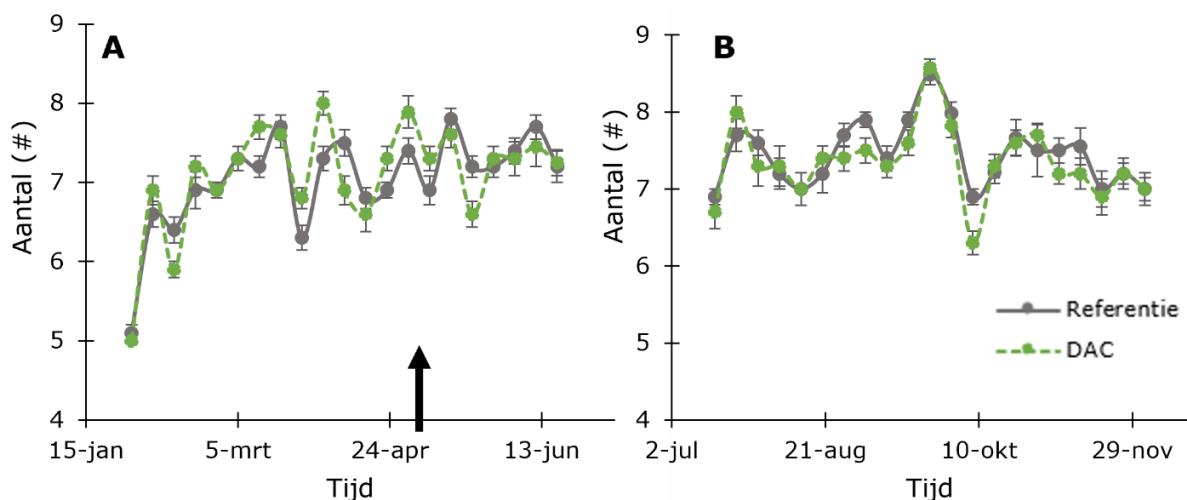
Ook de aanleg van het aantal bladeren per week verschilde minimaal tussen de twee kasafdelingen voor beide teelten, waarbij de ene periode planten in de testafdeling iets meer bladeren aanmaakte en dan weer de planten in de referentieafdeling (Figuur 13A,B). De aanleg van bladeren wordt met name gestuurd door de kastemperatuur. De kleine verschillen in kastemperatuur hebben geleid tot minimale verschillen in het aantal ontwikkelde bladeren per week.



Figuur 11 Verloop van de cumulatieve plantlengte, in de referentieafdeling en de afdeling met DAC CO₂ voor de eerste teelt (A) en de tweede teelt (B). Meetpunten zijn het gemiddelde van 10 meetplanten voor lengte met de standaardafwijking van het gemiddelde (SEM). De pijl geeft aan vanaf wanneer de DAC CO₂ werd gedoseerd.



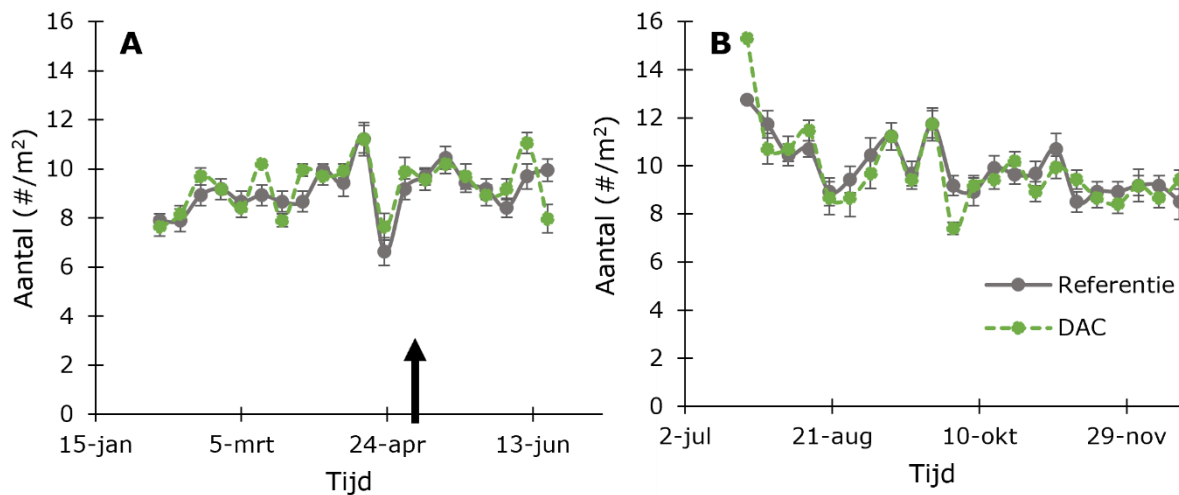
Figuur 12 Verloop van de LAI (leaf area index) in de referentieafdeling en de afdeling met DAC CO₂ voor de eerste teelt (A) en de tweede teelt (B). Meetpunten zijn het gemiddelde van 6 meetplanten met de standaardafwijking van het gemiddelde (SEM).



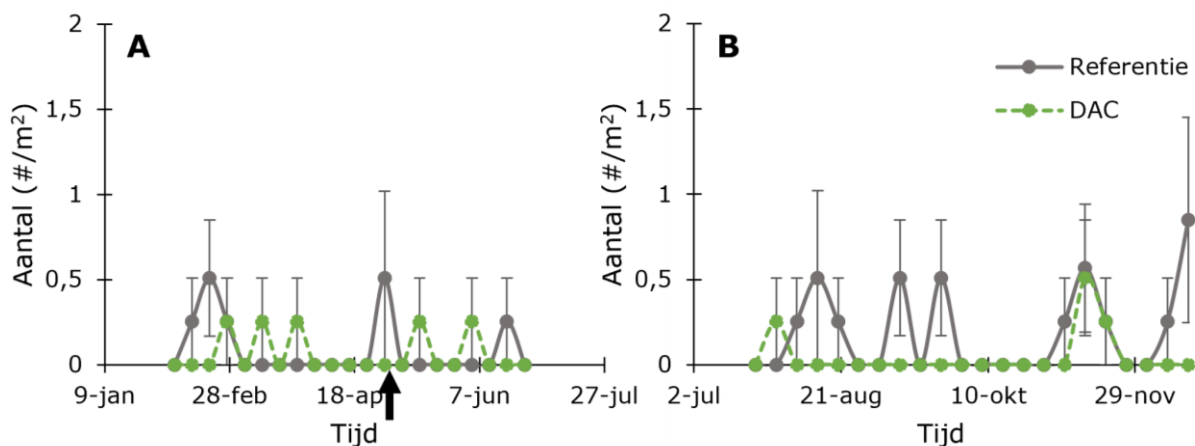
Figuur 13 Verloop van het aantal ontwikkelde bladeren per week in de referentieafdeling en de afdeling met DAC CO₂ voor de eerste teelt (A) en de tweede teelt (B). Meetpunten zijn het gemiddelde van 10 meetplanten met de standaardafwijking van het gemiddelde (SEM).

3.2.1.2 Generatieve groei

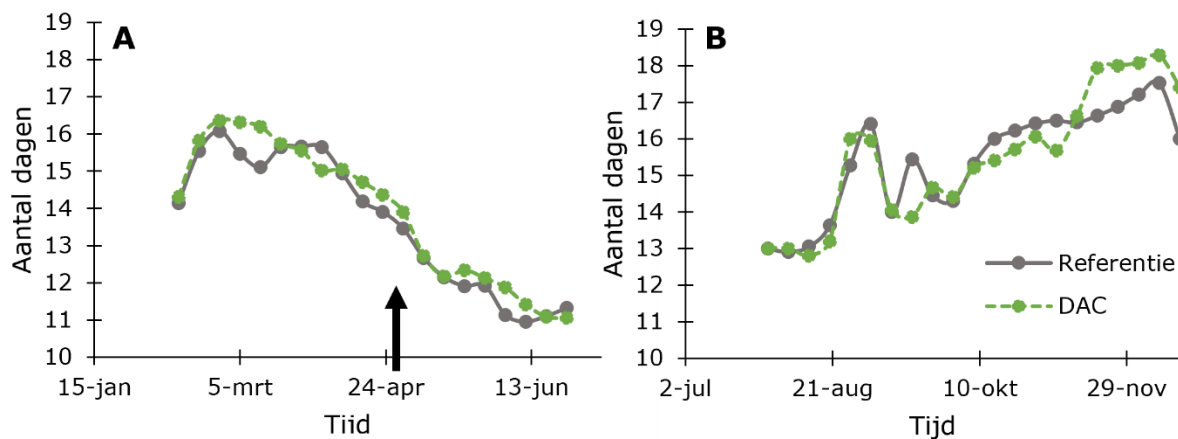
Gemiddeld bloeiden er per week ruim 9 bloemen gedurende de proef. Zoals te zien in Figuur 14A, B waren er enkele uitschieters naar boven en naar beneden. Tussen de behandelingen werden nauwelijks verschillen gevonden. De vruchtabortie was gedurende beide teelten laag en vond bij beide behandelingen plaats (Figuur 15A, B). Dit gebeurde zowel in de periode dat er DAC CO₂ gedoseerd werd als dat er geen DAC CO₂ werd gedoseerd en bij zowel de referentieafdeling als de testafdeling. De uitgroei duur van de vruchten van bloei tot oogst varieerde tussen de 11 en ruim 16 dagen voor beide behandelingen voor de eerste teelt (Figuur 16A). Voor de tweede teelt was dit tussen de 12 en ruim 18 dagen (Figuur 16B). In beide teelten verschilde de uitgroei duur minimaal tussen de beide afdelingen.



Figuur 14 Verloop van het aantal nieuw bloeiende bloemen per week in de referentieafdeling en de afdeling met DAC CO₂ voor de eerste teelt (A) en de tweede teelt (B). Meetpunten zijn het gemiddelde van 10 meetplanten met standaardafwijking van het gemiddelde (SEM). De pijl geeft aan vanaf wanneer de DAC CO₂ weer werd gedoseerd.



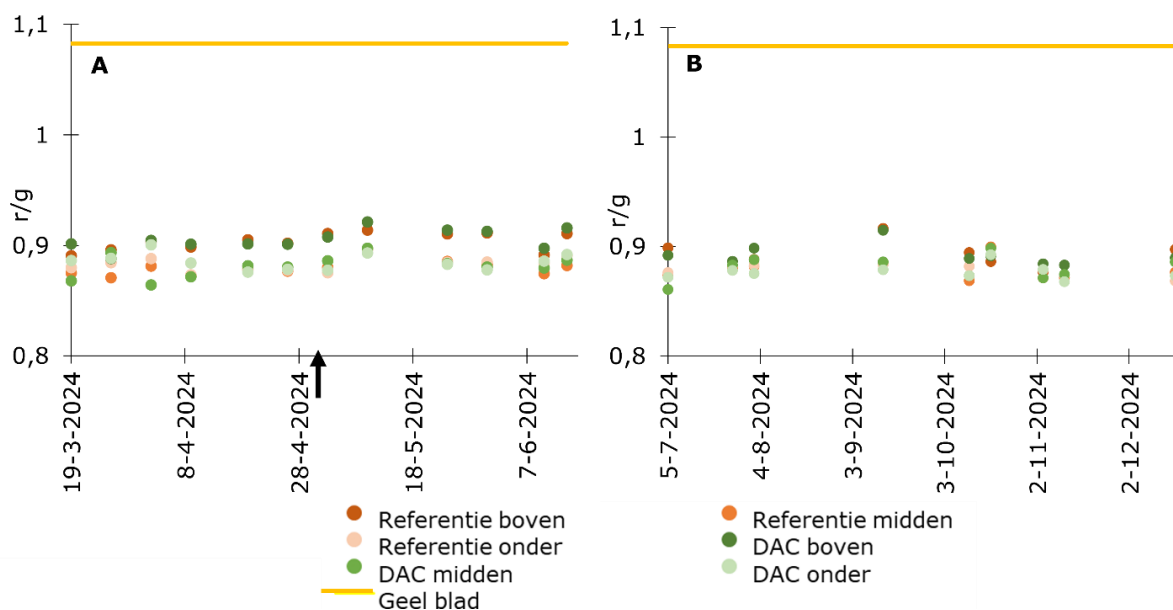
Figuur 15 Verloop van het aantal vruchtabortie per week in de referentieafdeling en de afdeling met DAC CO₂ voor de eerste teelt (A) en de tweede teelt (B). Meetpunten zijn het gemiddelde van 10 meetplanten met standaardafwijking van het gemiddelde (SEM). De pijl geeft aan vanaf wanneer de DAC CO₂ weer werd gedoseerd.



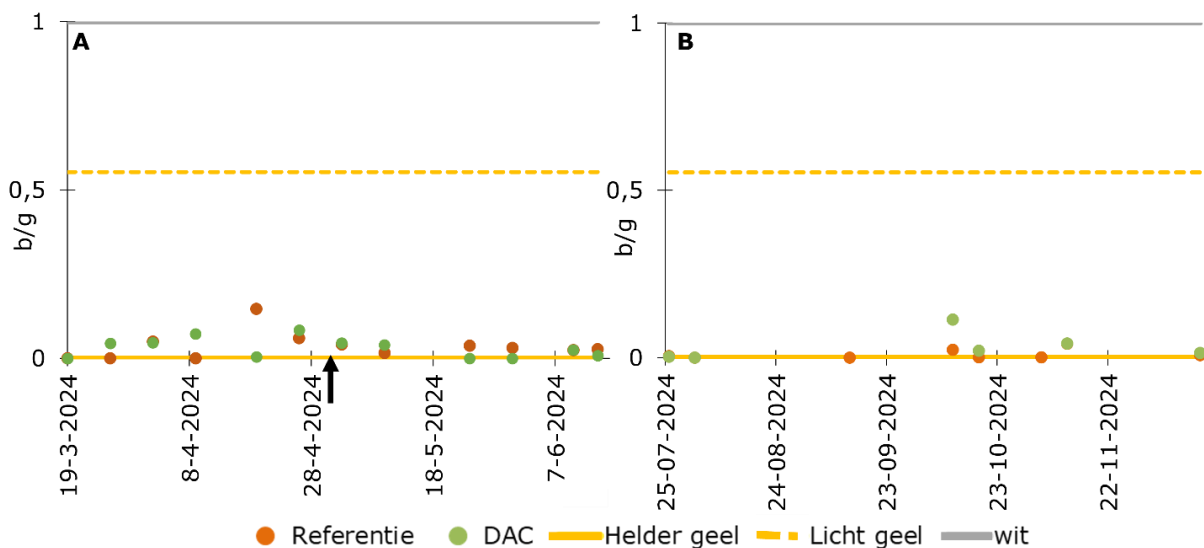
Figuur 16 Verloop van de uitgroeiduur van de vruchten in de referentie afdeling en de afdeling met DAC CO₂ voor de eerste teelt (A) en de tweede teelt (B). Voor de meetpunten zijn wekelijks 30 bloeiende vruchten per behandeling gelabeld. De pijl geeft aan vanaf wanneer de DAC CO₂ weer werd gedoseerd.

3.2.1.3 Kleurmeting

Gedurende de proef vonden er kleurmetingen plaats aan zowel de bladeren als de bloemen met een NCS Colourpin PRO. Hierbij werden de RGB-waardes gemeten (D65-10deg). De mate van groenheid van het blad werd vervolgens uitgedrukt als r/g (D65-10deg). Voor beide teelten was de r/g waarde gemiddeld 0,9 (Figuur 17A, B). De bovenste bladeren hadden een iets hogere r/g waarde dan de bladlagen daaronder. Dit was voor beide behandelingen zo. De r/g waarde gemeten voor een geel blad lag hoger, namelijk ongeveer 1,1. Er werd voor beide teelten geen verschil waar genomen in groenheid van het blad tussen de twee afdelingen. Om afwijkingen in bloemkleur vast te stellen werd de geelheid van de bloemen bepaald door b/g (D65-10deg) te bepalen. Wanneer de waarde rond de nul ligt dan zijn de bloemen helder geel en hoe lichter geel ze zijn hoe hoger de waarde wordt. Wanneer de waarde 1 is, zijn de bloemen wit. Gemiddeld hadden de bloemen een b/g waarde van 0,03 voor de eerste teelt. Voor de eerste teelt waren er vrijwel geen verschillen in bloemkleur tussen beide afdelingen (Figuur 18A). Bij de tweede teelt was de bloemkleur in de testafdeling iets minder helder geel (b/g=0,03) dan bij de referentieafdeling (b/g=0,01) (Figuur 18B). Echter is deze waarde van 0,03 nog niet sterk afwijkend aangezien echt licht gele bloemen een veel hogere waarde hebben (>0,5). Ook was de b/g waarde niet bij elke meting hoger voor de testafdeling dan de referentieafdeling.



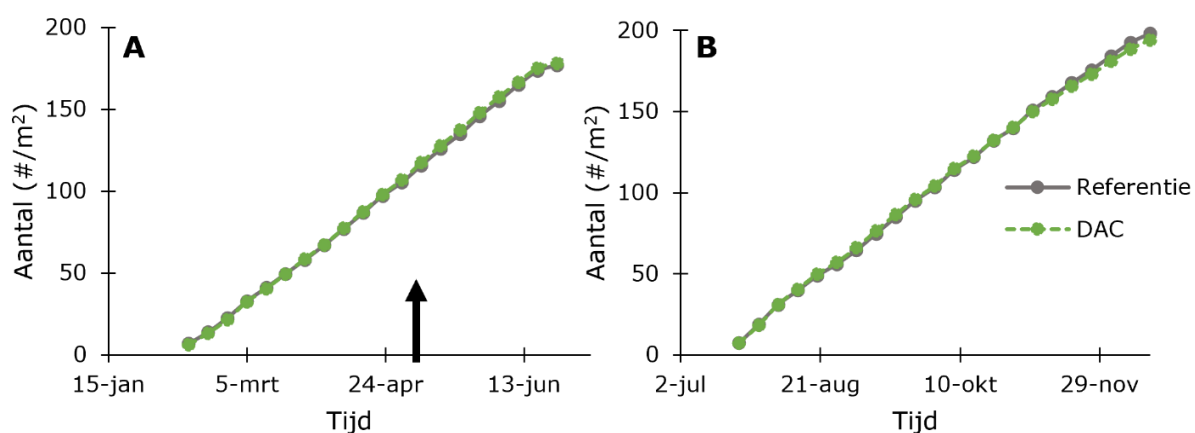
Figuur 17 Kleurmetingen uitgevoerd aan de bladeren op 3 niveaus in het gewas: boven, midden, onder gedurende de eerste teelt (A) en de tweede teelt (B) in de referentieafdeling en de afdeling met DAC CO₂. De gele lijn geeft de waarde aan voor een geel blad ($r/g=1,08$). Meetpunten zijn het gemiddelde van 10 meetplanten. Per blad werden 4 metingen gedaan. De pijl in (A) geeft aan vanaf wanneer de DAC CO₂ werd gedoseerd in de eerste teelt.



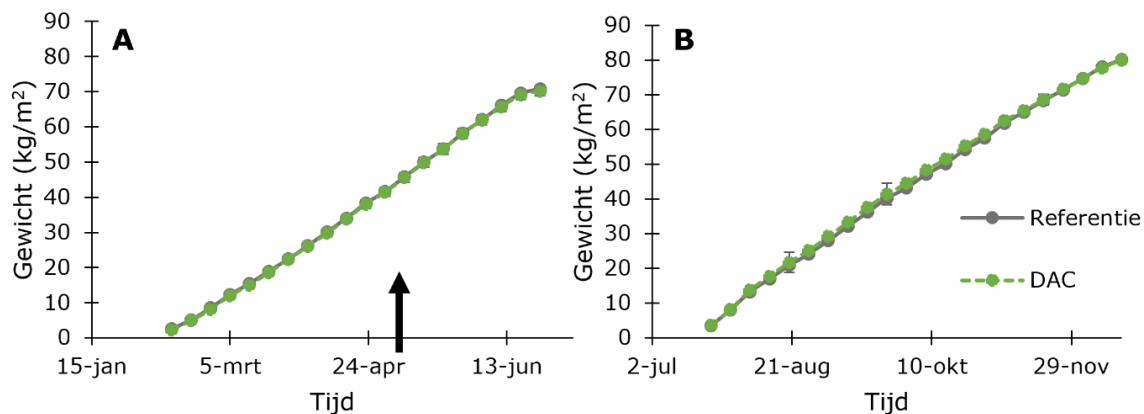
Figuur 18 Kleurmetingen uitgevoerd aan de bloemen die helemaal open waren in de referentieafdeling en de afdeling met DAC CO₂ gedurende de eerste teelt (A) en de tweede teelt (B). De grijze lijn geeft de b/g waarde van een witte bloem (b/g=1) weer, de gele gestippelde lijn een licht gele bloem (b/g=0,55) en de gele lijn een heldergele bloem (b/g=0). Meetpunten zijn het gemiddelde van 10 bloemen. Per bloem werden 2 metingen gedaan. De pijl in (A) geeft aan vanaf wanneer de DAC CO₂ werd gedoseerd in de eerste teelt.

3.2.1.4 Oogst

Gedurende de beide teelten is er van drie carroussels per afdeling de oogst geregistreerd. In totaal werden er gemiddeld 176,7 vruchten/m² met een totaal oogstgewicht van 70,8 kg/m² geoogst in de referentieafdeling en 178,2 vruchten/m² met een totaalgewicht van 70,2 kg/m² geoogst in de testafdeling tijdens de eerste teelt (Figuur 19A, Figuur 20A). Tijdens de tweede teelt zijn bij de testafdeling twee carroussels meegenomen voor de oogstdata aangezien er in de derde carrousel veel planten zijn uitgevallen door een Fusarium uitbraak waardoor de oogstdata niet meer representatief waren voor de rest van de kas waar de planten niet of nauwelijks waren uitgevallen door Fusarium. Tijdens de tweede teelt werden in totaal gemiddeld 198,0 vruchten/m² met een totaal oogstgewicht van 80,2 kg/m² geoogst in de referentieafdeling en 194,2 vruchten/m² met een totaalgewicht van 80,0 kg/m² geoogst in de testafdeling (Figuur 19B, Figuur 20B). Gedurende beide teelten verschilde zowel het aantal vruchten als het oogstgewicht nauwelijks tussen de behandelingen.

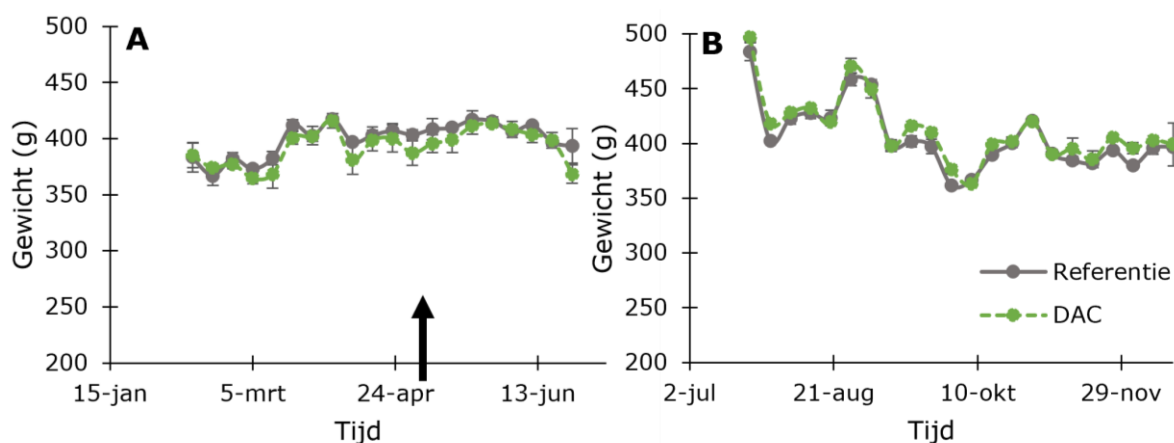


Figuur 19 Verloop van het cumulatief aantal geoogste vruchten inclusief stek in de referentieafdeling en de testafdeling voor de eerste teelt (A) en de tweede teelt (B). Meetpunten zijn het gemiddelde van 3 carroussels met standaardafwijking van het gemiddelde (SEM). De pijl geeft aan vanaf wanneer de DAC CO₂ werd gedoseerd.



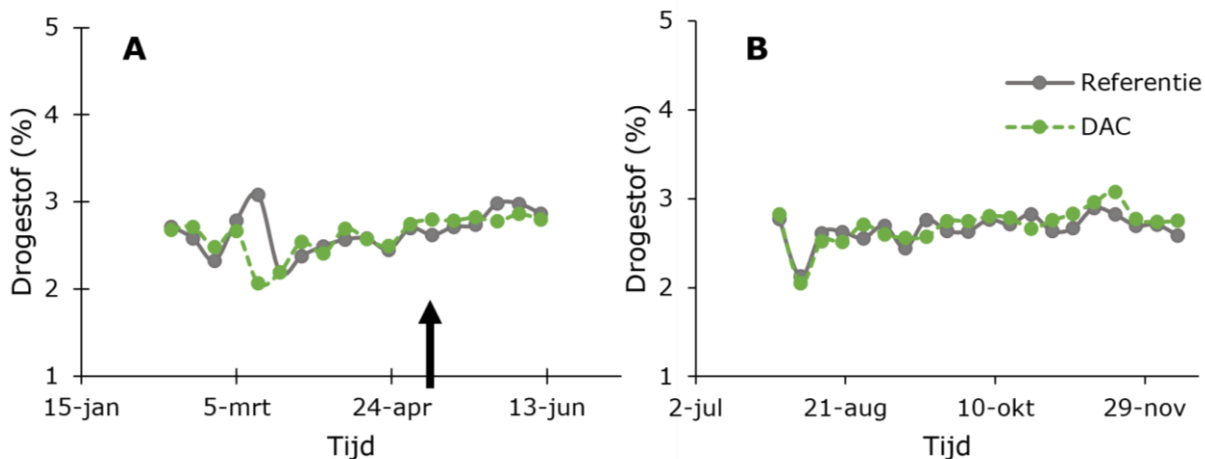
Figuur 20 Verloop van het cumulatief totaal versgewicht van de geoogste vruchten inclusief stek in de referentieafdeling en de testafdeling voor de eerste teelt (A) en de tweede teelt (B). Meetpunten zijn het gemiddelde van 3 carrousel met standaardafwijking van het gemiddelde (SEM). De pijl geeft aan vanaf wanneer de DAC CO₂ werd gedoseerd.

Het gemiddeld vruchtgewicht per week schommelde tussen 364 gram en 417 gram tijdens de eerste teelt, waarbij de vruchten van de testafdeling gemiddeld iets lichter waren (Figuur 21A). Het iets lagere vruchtgewicht kwam zowel voor in de periode met als zonder DAC CO₂. Tijdens de tweede teelt schommelde het gemiddeld vruchtgewicht tussen de 362 en 484 gram, waarbij de vruchten van de testafdeling iets zwaarder waren dan de referentie (Figuur 21B).

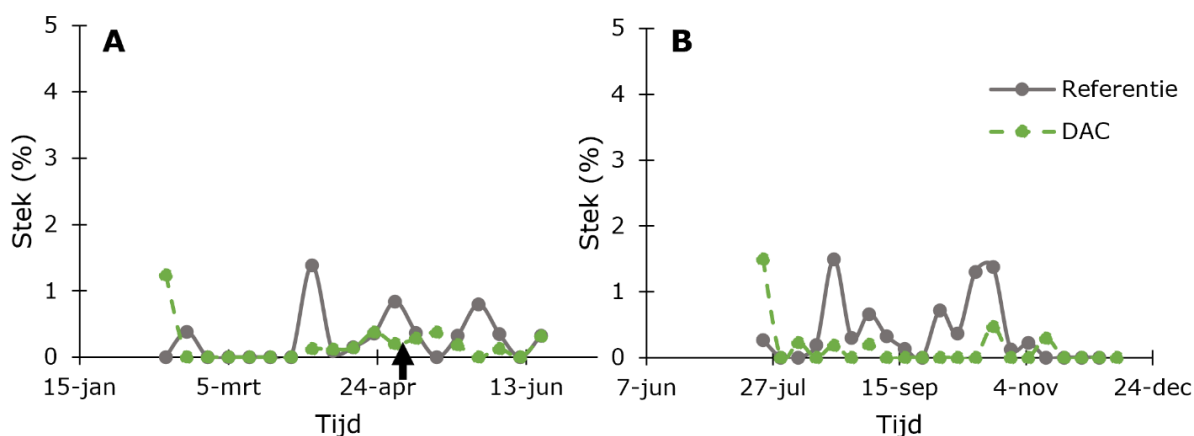


Figuur 21 Verloop van het gemiddeld vruchtgewicht per week in de referentieafdeling en de testafdeling voor de eerste teelt (A) en de tweede teelt (B). Meetpunten zijn het gemiddelde van 3 carrousel met standaardafwijking van het gemiddelde (SEM). De pijl geeft aan vanaf wanneer de DAC CO₂ werd gedoseerd.

Het droge stof percentage van de vruchten varieerde tussen de 2,0-3,1% voor beide teelten en verschilde nauwelijks tussen de twee behandelingen (Figuur 22A, B). Van het totaal geoogste vruchten was een heel klein percentage (<1%) voor beide behandelingen afwijkend en viel daarmee in de categorie 'stek' (Figuur 23A, B). Voor beide teelten was het percentage stek gemiddeld lager voor de testafdeling dan de referentieafdeling.



Figuur 22 Verloop van het droge stof percentage van de vruchten in de referentieafdeling en de testafdeling voor de eerste teelt (A) en de tweede teelt (B). Voor de meetpunten zijn wekelijks 10 vruchten gedroogd per behandeling. De pijl geeft aan vanaf wanneer de DAC CO₂ werd gedoseerd.



Figuur 23 Verloop van het percentage stekvruchten van het totaal geoogste vruchten per week in de referentieafdeling en de testafdeling voor de eerste teelt (A) en de tweede teelt (B). Meetpunten zijn op basis van het percentage stek van het totale aantal geproduceerde vruchten van de 3 gemeten carroussels.

3.2.2 Gasanalyses

Binnen het onderdeel risicoanalyse fytotoxische gassen zijn gasanalyses gedaan voor bekende schadelijke gassen voor planten door SGS Belgium NV. Vanuit de buffertank zijn op 11 juli 2024 drie monsters genomen, die gemixt zijn tot 1 staal door SGS. Vervolgens is de concentratie van CO₂, H₂, O₂+Ar, CO, N₂, NH₃, NO_x, C₆H₆, C₂H₅O, C₂H₄ en H₂S bepaald. In het monster genomen op 11 juli was de CO₂ concentratie 51,89% (Tabel 2 en Bijlage 1). Van de bekende schadelijke gassen voor planten werd alleen NO_x boven de detectiewaarde gevonden, met 2 ppm gewicht. Op 17 oktober 2024 zijn opnieuw gasmonsters genomen. Hierbij is alleen de NO_x waarde bepaald, deze was 1,1 ppm volume (Bijlage 1).

Tabel 2 Gasanalyse van mixmonster van 3 monsters genomen op 11 juli 2024 uit de buffertank met CO₂ vanuit de Cumulus, geanalyseerd door SGS (zie ook Bijlage 1). SGS heeft de aangetroffen concentraties weergegeven in ppm gewicht in plaats van ppm volume, deze zijn in de tabel omgerekend naar ppmv.

Chemische fomule	Aangetroffen concentratie in monster	Eenheid	Kortdurend EGW op plantniveau	Langdurend EGW op plantniveau	Eenheid
Koolstofdioxide (CO ₂)	51,89	% mol	Bij CO ₂ -concentraties >2000 ppm zijn negatieve effecten mogelijk door overmaat		ppmv
Waterstof (H ₂)	<0,01	% mol		nvt	
Zuurstof + argon (O ₂ + Ar)	10,35	% mol		nvt	
Koolstofmonoxide (CO)	<0,01	% mol		nvt	
Stikstof (N ₂)	37,76	% mol		nvt	
Ammoniak (NH ₃) (aq.)	<1.1	ppmv	14400 (uur)	144 (jaar) ¹	ppbv
Stikstofdioxide (NO ₂)	1.6	ppmv	40 (24-uurs)	16 (jaar) ³	ppbv
Stikstofoxide (NO) ²	2.4	ppmv			
Benzeen (C ₆ H ₆)	<0.9	ppmv	>650 (weken) ⁴		ppbv
Ethanol (C ₂ H ₅ O)	<1.6	ppmv	≈100 ⁵		ppmv
Ethyleen (C ₂ H ₄)	<100	ppmv	11 (8 uur) ⁶	5 (4 weken) ⁶	ppbv
Waterstofsulfide (H ₂ S)	<0.1	ppmv	176-949 (dag) ⁷	10-88 (jaar) ⁷	ppbv

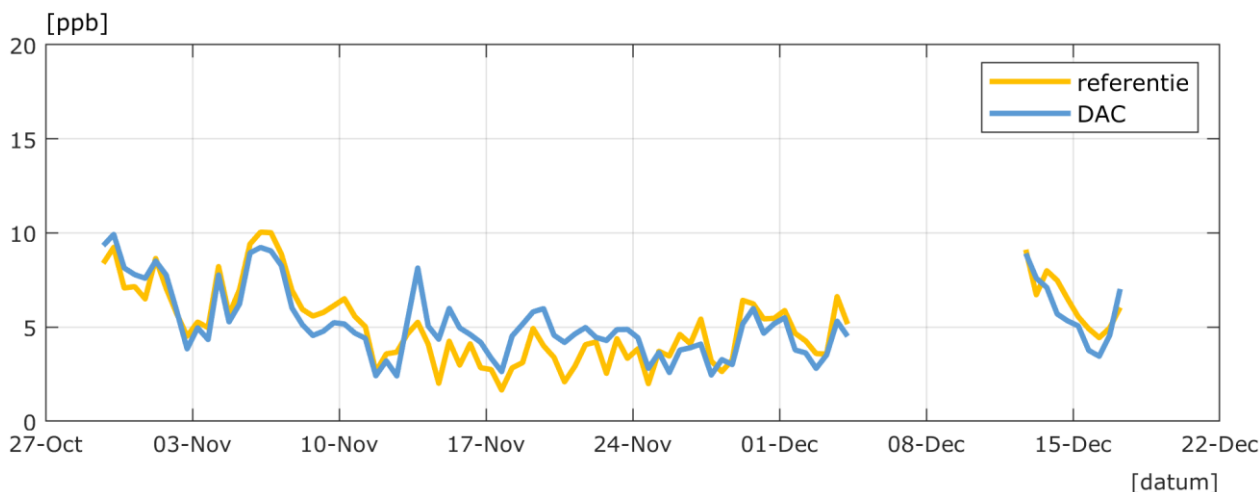
¹ (UNECE, 1988); ³(World Health Organization, 2021); ⁴(van Dijk et al., 2014); ⁵(Stutte et al., 2004); ⁶(Tonneijck & Van Dijk, 2000);

⁷(Van Dijk & van der Eerden, 1993).

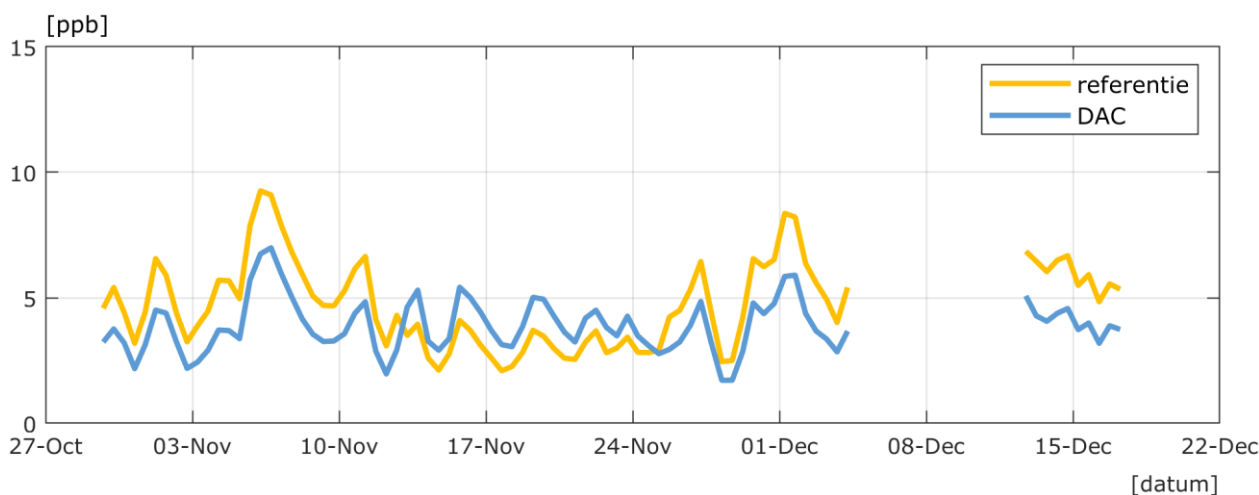
² NO_x werd door SGS weergegeven in ppm gewicht. De aangegeven concentraties in de tabel zijn de omgerekende maximale waarden voor NO₂ en NO in ppm volume op basis van de NO_x in ppm gewicht.

Vanwege de aanwezigheid van NO_x in het gasmonster is besloten 'snuffelpalen' van EMS te installeren. Deze sensoren hebben continue NO_x, C₂H₄, CO en CO₂ gemeten van 28 oktober t/m 18 december in beide afdelingen. Voor een deel van de stoffen die mogelijk fytoxisch zijn, zijn er effect grenswaarden (EGW) vastgelegd op plantniveau. Concentraties hoger dan de EGW kunnen mogelijk leiden tot schade. Er wordt vaak gesproken van twee typen grenswaarden die afhangt van de blootstellingsduur: kortdurend (24-uurs gemiddelde) en langdurend (jaar). Voor NO_x is het kortdurend EGW gemiddelde 40 ppbv en langdurend EGW 16 ppbv. De gemeten 24-uurs gemiddelden voor NO_x liggen allemaal onder de 10 ppbv, ook toen de CO₂-concentratie aan het einde van de teelt flink verhoogd werd. Wat opvalt is dat de ene sensor minder stabiel is dan de andere, ook wanneer de sensoren tijdelijk gewisseld werden tussen de afdelingen blijft hetzelfde patroon voor de sensoren zichtbaar. Enkele momenten is de NO_x concentratie iets hoger geweest, maar in zowel de afdeling met DAC CO₂ als met OCAP CO₂ niet boven de 40 ppbv (Figuur 24). NO_x was dus aanwezig in de CO₂-doseerstroom (gemeten met gasmonsters), maar heeft in het tweede deel van de tweede teelt niet geresulteerd in te hoge NO_x 24-uurs gemiddelde concentraties op plantniveau.

Voor etheen (C₂H₄) is het kortdurend (8 uur) EGW 11 ppbv en het langdurend (4 weken) EGW 5 ppbv. De gemeten 24-uurs gemiddelden liggen voor C₂H₄ allemaal onder de 9 ppbv (Figuur 25). Eenmaal is de momentane meting net boven de 10 ppbv geweest voor de referentieafdeling. De gemiddelde C₂H₄ over de gemeten periode (29 oktober-16 december) is 3,9 ppbv voor de testafdeling en 4,8 ppbv voor de referentieafdeling.



Figuur 24 *NO_x-concentratie (ppbv) gemeten door de EMS sensoren in de referentie- en testafdeling. De gegevens zijn afgevlakt over halve dagen voor een betere leesbaarheid. Gegevens tussen 4 en 12 dec worden niet getoond vanwege de onbetrouwbaarheid van de metingen door het tijdelijk uitschakelen van meetpalen i.v.m. toepassing van gewasbeschermingsmiddelen in de kas.*



Figuur 25 *Etheenconcentratie (ppbv) gemeten door de EMS sensoren in de referentie- en testafdeling. De gegevens zijn afgevlakt over halve dagen voor een betere leesbaarheid. Gegevens tussen 4 en 12 dec worden niet getoond vanwege de onbetrouwbaarheid van de metingen door het tijdelijk uitschakelen van meetpalen i.v.m. toepassing van gewasbeschermingsmiddelen in de kas.*

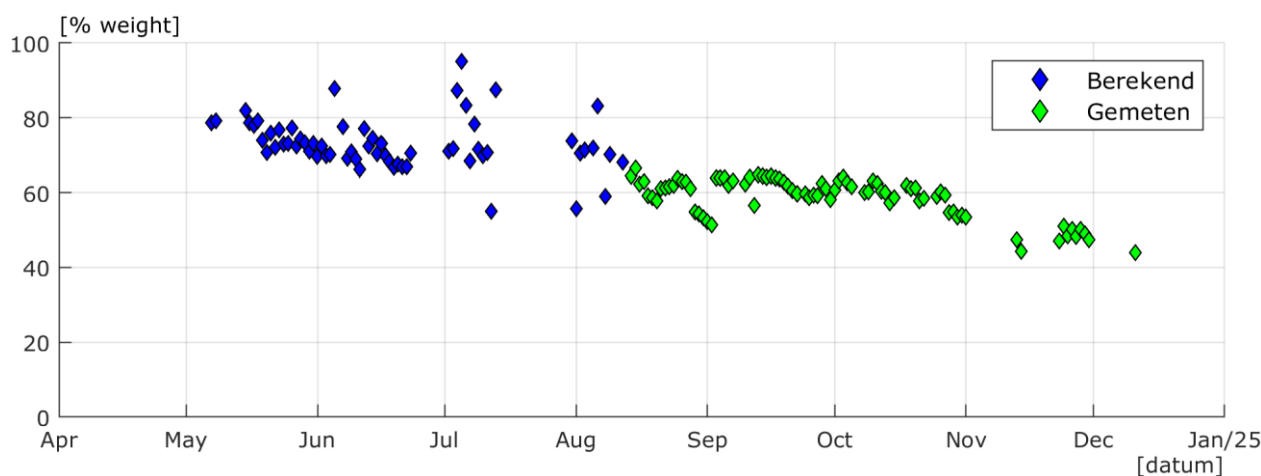
Discussiepunten

- Tijdens beide teelten, waarin de Skytree Cumulus werd getest, zijn gedurende de gehele periode plantmetingen uitgevoerd in zowel de referentieafdeling waar OCAP CO₂ werd gedoseerd als de testafdeling met DAC CO₂. De resultaten van de plantmetingen waren over het algemeen vergelijkbaar tussen de afdelingen. Ook de kleurmetingen toonden geen afwijkingen in de gewenste kleur van het gewas voor beide afdelingen. Echter, in beide teelten kon de DAC-machine niet volledig voorzien in de CO₂-behoefte van het gewas, waardoor deze planten ook gedeeltelijk OCAP CO₂ hebben gekregen. Vooral in de eerste teelt was er een relatief korte periode waarin DAC CO₂ werd gebruikt, maar ook in de tweede teelt waren er regelmatig momenten waarop moest worden overgeschakeld naar OCAP CO₂. De langste periode waarin bijna volledig met DAC CO₂ is geteeld is van half augustus tot eind oktober. De proef heeft dus met name een beeld van de mogelijk schadelijke effecten op de korte (24-uur) en middellange termijn (maand). Op deze termijnen zijn dan ook geen schadelijke effecten te verwachten, mits er 'schone' lucht wordt aangezogen door de DAC-machine.

- Langdurige effecten over een hele teelt/jaar, die mogelijk schadelijke gevolgen kunnen hebben door fytotoxische stoffen die met de DAC CO₂ meekomen, zijn niet volledig getest, doordat de DAC-machine niet volledig in de CO₂-behoefte van het gewas kon voorzien.
- Het meest opvallende verschil tussen beide afdelingen was de zichtbare symptomen van Fusarium op het gewas. In zowel de eerste als de tweede teelt was er meer plantuitval in de testafdeling waar DAC CO₂ werd gedoseerd, vergeleken met de referentieafdeling met OCAP CO₂. Hoewel qPCR-analyses in beide afdelingen Fusarium in het substraat aantoonde, is een mogelijke verklaring dat de planten in de afdeling met DAC CO₂ zwakker waren, waardoor Fusarium eerder tot uiting kwam.
- In beide teelten waren de Fusarium-symptomen vooral zichtbaar op één specifieke plek in de afdeling. De precieze oorzaak hiervan is onduidelijk, evenals de vraag of dit gerelateerd is aan de gebruikte CO₂-bron. Aangezien de zichtbare symptomen niet door de hele kas verspreid waren, is het echter minder waarschijnlijk dat de gebruikte CO₂-bron de oorzaak is.
- Bij DAC wordt CO₂ uit de buitenlucht afgevangen, waarbij verschillende technieken kunnen worden gebruikt om de CO₂ te concentreren. In vergelijking met het afvangen van CO₂ uit fossiele bronnen, wordt verwacht dat DAC CO₂ minder vervuiling met zich meebrengt. Echter, afhankelijk van de gebruikte techniek, kunnen ook aanwezige verontreinigingen in de buitenlucht worden afgevangen en geconcentreerd.
Tijdens het huidige onderzoek is de afgevangen CO₂ geanalyseerd middels gasanalyse op bekende fytotoxische stoffen, en zijn er 'snuffelpalen' in de kas geplaatst, die continue metingen verrichtten. Op basis hiervan zijn geen alarmerende hoeveelheden toxische stoffen aangetroffen.
- Het gebruikte sorptiemiddel in de bètaversie van de Skytree Cumulus moest vooraf worden gewassen om te voorkomen dat NH₃ vrijkomt tijdens de eerste cycli en meegaat met de CO₂-stroom. In de gasanalyse (Tabel 2) werd geen NH₃ gemeten boven de detectiewaarde van 1,1 ppmv. Ter controle werd in de testafdeling een draagbare NH₃-detector ingezet met een resolutie van 1 ppmv. Deze heeft gedurende de proeven altijd 0 aangegeven. Er zijn in de kas dus geen NH₃-waarden boven 1 ppmv gemeten. Ter referentie: de wettelijke grenswaarde voor langdurige blootstelling aan NH₃ is 20 ppmv (TGG-8u) en kortdurende blootstelling betreft ca. 51 ppmv (TGG-15min) (SER, 2025).

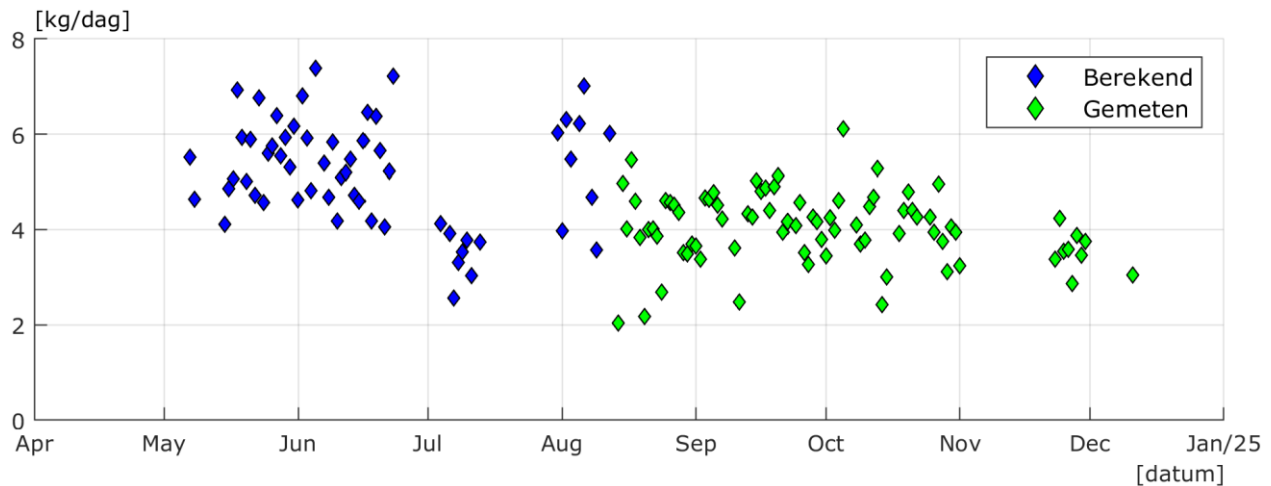
3.3 CO₂-productie en energievraag

Door een combinatie van defecte sensoren en transportproblemen is de CO₂-concentratie slechts gedurende een deel van de proefperiode gemeten (vanaf 14 Augustus). Figuur 26 toont de CO₂-concentratie die werd gedoseerd in de testafdeling in de periode van 14 augustus tot 18 december. Op dagen waarop de concentratie 100% is, werd OCAP-CO₂ gedoseerd in plaats van DAC CO₂. Dit was nodig wanneer er onvoldoende DAC CO₂ beschikbaar was of als er werkzaamheden aan de machine werden uitgevoerd.

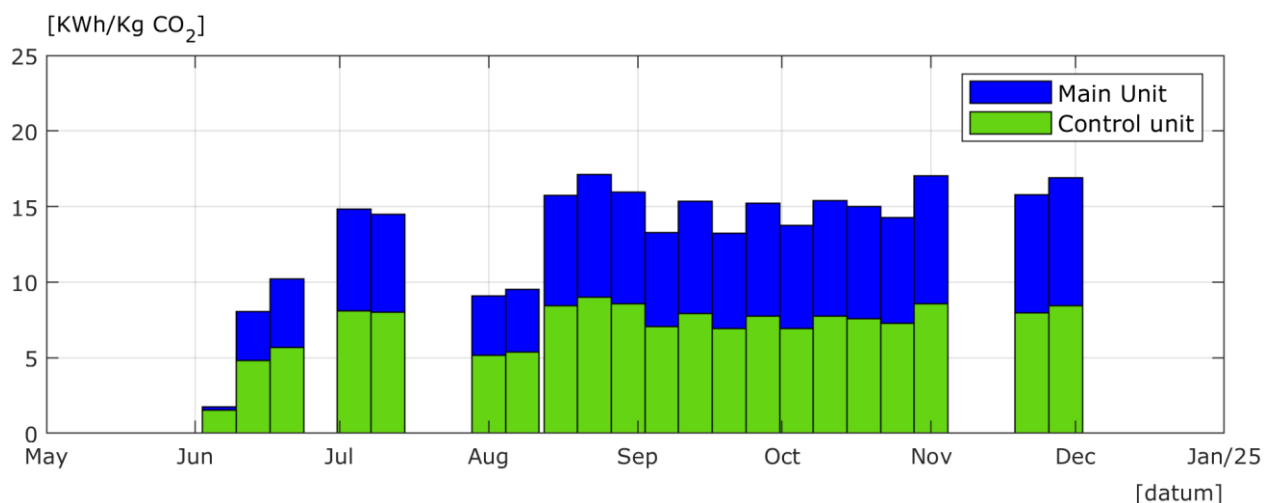


Figuur 26 Maximale dagelijkse CO₂-concentratiegegevens (% gewicht) gemeten door WUR in de totale periode van 1 mei tot 18 december 2024. Periode 1 mei tot 24 juni en 2 juli tot 13 augustus: gegevens berekend op basis van CO₂-dosering (blauw). Periode 14 augustus tot 17 september: gegevens afkomstig van de Carltech Gas Analyzer WD22-Series (groen). Waarden van 100% geven dagen aan waarop volledige of extra OCAP CO₂ is ingezet omdat er niet genoeg of geen DAC CO₂ beschikbaar was.

Afgezien van enkele uitzonderingen werd er een CO₂-concentratie gemeten met de Carltech Gas Analyzer WD22-Series die varieerde tussen de 40 en 57% vol. Dit bereik wordt ook bevestigd door het gas sample dat werd genomen op 11 juli en is geanalyseerd door SGS. Hieruit bleek een samenstelling van ca. 52% vol. CO₂, 38% vol. N₂ en 10% vol. O₂. Tussen 14 augustus en 18 december (126 dagen) werd op 84 dagen met DAC CO₂ gewerkt en bedroeg de totale productie 333 kg CO₂ (Figuur 27). De beste energieprestatie in dezelfde periode bedroeg 8,40 kWh/kg CO₂ (totaal van Control unit en Main unit) (Figuur 28).



Figuur 27 Dagelijkse CO₂-productie (kg/dag). Periode 1 mei tot 24 juni en 2 juli tot 13 augustus: gegevens berekend op basis van CO₂-dosering (blauw). Periode 14 augustus tot 17 september: gegevens afkomstig van de Carltech Gas Analyzer WD22-Series (groen). Waarden worden alleen getoond voor perioden waarin DAC werd gebruikt.



Figuur 28 Wekelijkse energie-efficiëntie (kWh/kg CO₂). De waarden worden alleen getoond voor perioden waarin DAC werd gebruikt. Opmerking: waarden tot 13 augustus zijn gebaseerd op berekende CO₂-productie, daarna op gemeten CO₂-data.

Discussiepunten

Zoals eerder genoemd zijn deze prestaties van beperkte relevantie omdat 1) de geteste machine een bètaversie betrof waarvoor de energie-efficiëntie nog niet geoptimaliseerd was, en 2) de capaciteit van het Cumulus model niet ontworpen is voor (grootschalige) glastuinbouw. Enkele verbeterpunten die tijdens het onderzoekstraject naar voren zijn gekomen:

- De locatie van de machine bleek niet optimaal i.v.m. ophoping/aanzuiging van stof waardoor filters sneller verstopt raken en uiteindelijk ook het sorptiemiddel vervuild raakt (Figuur 29). De CO₂-productie neemt dan af terwijl de energievraag hetzelfde blijft.



Figuur 29 Het filtermateriaal onvervuild (links) en vervuild na de proefperiode in Bleiswijk (rechts.)

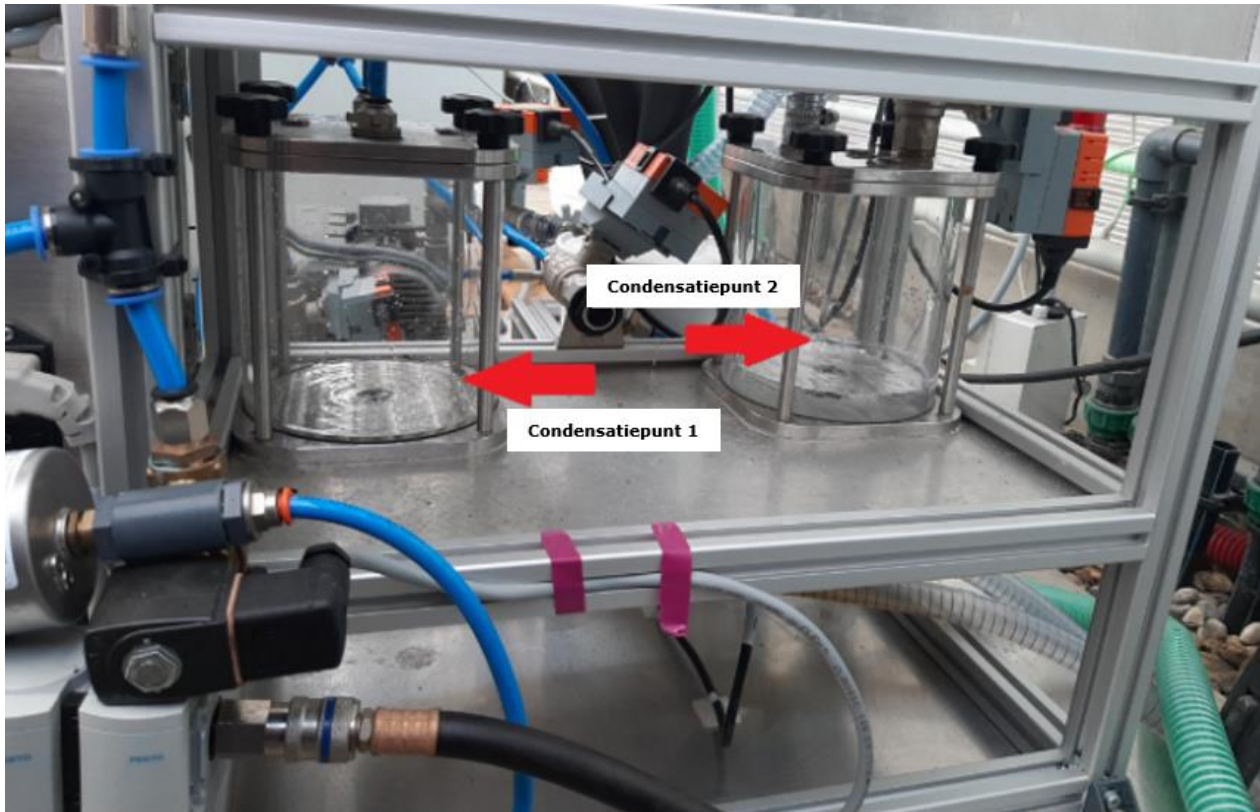
- De temperatuur in de corridor kon snel toenemen – de maximale gemiddelde dagtemperatuur was 30,4 °C – het sorptiemiddel presteerde minder efficiënt bij hogere temperaturen.
- De behaalde CO₂-concentratie werd verminderd door een lek in de vacuümkamer, waardoor het sorptiemiddel werd aangetast door oxidatie.
- Continu gebruik van de Control unit (met name ontwatering via koeling) tijdens adsorptie leidt tot energieverspilling omdat er apparatuur aanstaat in perioden dat het niet nodig is.
- Door een combinatie van defecte sensoren en transportproblemen is de CO₂-concentratie slechts gedurende een deel van de proefperiode gemeten. Met name in mei, toen de machine startte met CO₂-productie, wordt verwacht dat de concentratie hoger lag omdat er nog geen vervuiling van het sorptiemiddel had plaatsgevonden en de temperatuur in de corridor lager lag (Figuur 26).
- De betrouwbaarheid van de gemeten data is nog niet optimaal. De CO₂-concentratiesensor functioneerde waarschijnlijk niet volledig naar behoren wanneer de druk afnam tot onder de 1 bar. Deze waarden zijn er nu uitgefilterd en de oorzaak wordt nader onderzocht.

Skytree is voornemens de volgende verbeteringen door te voeren in de nieuwe versies van de Cumulus:

- **Plaatsing:** In het vervolg worden machines hoger van de grond geplaatst en wordt er meer ruimte rond de machine gelaten voor ongehinderde luchtaanvoer. De nieuwe machine(s) kunnen in buitencondities worden geplaatst. De aanzuiging kan geregeld worden met ventilatoren die energiezuiniger zijn.
- **Verlaagde instroomsnelheid:** De diameter van de luchtaanvoer wordt aanzienlijk vergroot, wat resulteert in een lagere luchtsnelheid. Hierdoor wordt minder krachtig lucht aangezogen, waardoor ook de opname van stofdeeltjes afneemt. Dit voorkomt vroegtijdige verstopping van de filter.
- **Filterontwerp:** De nieuwe uitvoering maakt gebruik van een dikker filtermateriaal dat niet alleen beter bestand is tegen stofophoping, maar ook eenvoudiger te reinigen of te vervangen is. De filter kan zonder gereedschap uit de machine worden gehaald, waardoor onderhoud met een stofzuiger of vervanging efficiënter en gebruiksvriendelijker is.
- **Vacuümkamerontwerp:** Deze is aangepast om lekkage te voorkomen en de Control unit wordt afgestemd op nauwkeurige monitoring van de condities in de vacuümkamer om deze te optimaliseren.
- **Geïntegreerd drainagesysteem:** De vacuümkamer wordt voorzien van een drainagesysteem, waardoor water afkomstig van het sorptiemiddel na elke cyclus automatisch wordt afgevoerd. Dit voorkomt wateraccumulatie in de vacuümkamer, verhoogt de efficiëntie van het droogproces en verlengt de levensduur van het systeem.
- **Regeltechniek:** De aansturing wordt aangepast zodat apparatuur alleen aanstaat als dat nodig is.

3.4 Condenswater

De Cumulus produceert condenswater als bijproduct bij de afvangst van CO₂ uit de buitenlucht. Dit gebeurt door thermische cycli waarmee de waterdamp in de CO₂-stroom en/of binnen het systeem condenseert. Ons doel was om zowel de **hoeveelheid** als de **kwaliteit** van het condenswater te onderzoeken, zodat we de potentie kunnen inschatten van deze waterstroom als irrigatie in kassen waarbij gerecirculeerd wordt. Ook lozing van het condenswater wordt beschouwd, en er is gekeken naar aanvullende acties die Skytree kan ondernemen om de waterkwaliteit te verbeteren.



Figuur 30 Plaats op de Control unit van de Cumulus waar de condenswatermonsters zijn genomen.

3.4.1 Kwantiteit

Er waren twee condensatiepunten op de Control unit, gelegen voor en na de koeler, die beide water afvangen (Figuur 30). Zowel het volume als de kwaliteit van dit water is gemeten. Bij beide condensatiepunten werd een emmer neergezet om het water op te vangen. De hoeveelheid water werd dagelijks geregistreerd inclusief de tijd van de meting. Metingen vonden plaats van 7 oktober tot en met 29 oktober. Alleen de dagen waarop de DAC-machine de hele dag heeft aangestaan zijn meegenomen in de analyse.

Resultaten

De Cumulus produceerde gemiddeld 3,4 l condenswater per geproduceerde kg CO₂. Er was niet voldoende data beschikbaar om te bepalen hoe constant de condenswaterproductie is onder wisselende klimaatomstandigheden zoals temperatuur en vochtgehalte van de aangezogen lucht. Als we aannemen dat een teelt 20 kg CO₂/m²/jaar uit DAC doseert komt dit overeen met een totale condenswaterproductie van ca. 68 l/m²/jaar. Aangenomen dat een Nederlandse hogedraadteelt per jaar ca. 800 l/m² gebruikt, zou het condensatiewater ca. 8,5% van de irrigatiebehoefte op jaarbasis kunnen voorzien. Dit is uiteraard slechts een ruwe schatting op jaarbasis, maar gezien de potentie is verder onderzoek naar de daadwerkelijke bijdrage aan de watervoorziening zinvol, met aandacht voor het fluctuerende waterverbruik in de kas.

3.4.2 Kwaliteit

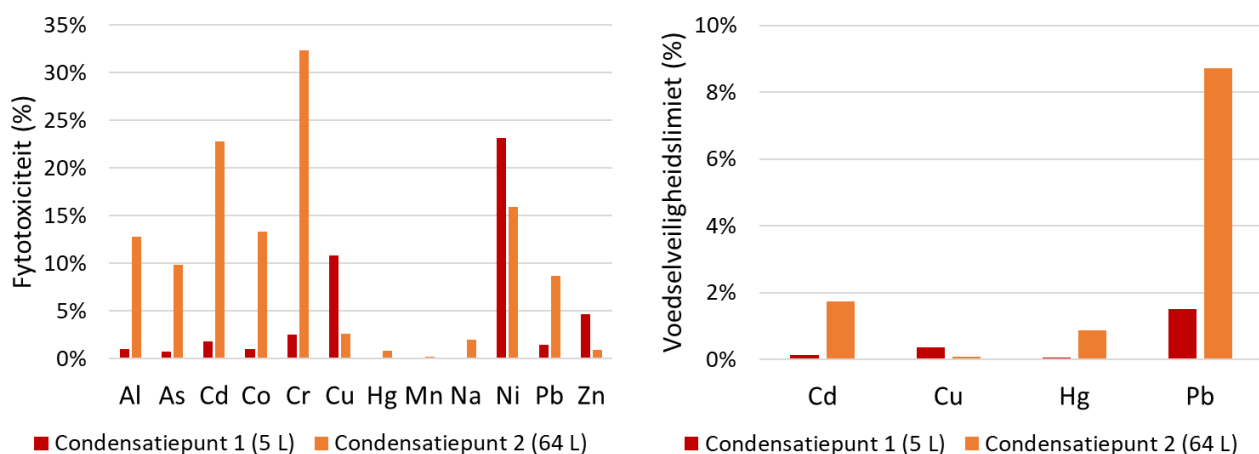
Tweemaal, op 16 juni en 9 september, zijn er van beide condensatiestromen watermonsters genomen (Figuur 30). Deze werden door Eurofins Nederland geanalyseerd op nutriënten (macro- en sporelementen) en zware metalen. Het doel was om te bepalen hoe de concentratie van zware metalen en nutriënten in de condenswatermonsters zich verhoudt tot die van andere waterbronnen zoals de standaard voedingsoplossing voor gewassen en regenbassinwater. Daarnaast lag de focus op het beoordelen van de niveaus van verontreinigingen die zich zouden kunnen ophopen in het fertigatiewater, de vruchten en de biomassa, ervan uitgaande dat het condenswater wordt ingezet als irrigatiewater voor de kas. Ook werd onderzocht hoe deze concentraties zich verhouden tot de drempelwaarden voor fytotoxiciteit, voedselveiligheid en composteerreguleringen. Wanneer het condenswater aan het fertigatiewater wordt toegevoegd, wordt het verdund. Er is echter rekening gehouden met de volgende scenario's waarbij wordt uitgegaan van het maximale risico, namelijk dat 100% van de verontreinigingen ophopen in hetzelfde component:

- **Alle verontreinigingen hopen zich op in het fertigatiewater.** In dit geval is ervan uit gegaan dat het water wordt gerecirculeerd. De resultaten van dit scenario worden vergeleken met de fytotoxiciteitslimieten (van Tuyll et al., 2024). De opname door het gewas wordt niet meegenomen, simpelweg omdat de opname voor de meeste van deze elementen niet bekend is. Er wordt ook geen rekening gehouden met het feit dat sommige elementen micronutriënten zijn (zoals Cu en Zn) en afzonderlijk kunnen worden toegevoegd via de bemesting. Fytotoxiciteitslimieten kunnen variëren tussen gewassen.
- **Alle verontreinigingen worden door het gewas opgenomen en verdeeld over de eetbare delen (bijv. vruchten).** De resultaten van dit scenario worden vergeleken met de voedselveiligheidsniveaus voor mensen (zoals gedefinieerd door EU 2023/915 en EC 396/2005).
- **Alle verontreinigingen worden door het gewas opgenomen en verdeeld over de biomassa.** De resultaten van dit scenario worden vergeleken met de drempelwaarden voor compostering van As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb en Zn, zoals gedefinieerd door de Certificeringscommissie voor Gecertificeerd Compost (2023), ervan uitgaande dat de resterende biomassa wordt hergebruikt.

Om deze scenario's door te rekenen, is de methode toegepast die door van Tuyll et al. (2024) voor meststoffen is ontwikkeld. In plaats van de samenstelling van meststoffen als input te gebruiken, is de samenstelling van het condenswater uit de Cumulus gebruikt.

Resultaten

De elementen NH_4 , HCO_3 , Fe, Zn, Cu, Al, Pb en Cr werden in hogere concentraties aangetroffen vergeleken met andere waterbronnen (zie Tabel B2.1 en B2.2 van Bijlage 2). Bij het scenario waarin condenswater wordt toegevoegd aan irrigatiewater binnen kasrecirculatiesystemen, overschrijdt geen van de elementen de risicogrenswaarden.



Figuur 31 Relatieve concentraties in vergelijking met de limieten voor fytotoxiciteit (links) en in vergelijking met grenswaarden voor voedselveiligheid (rechts). Voor compostering zijn alle waarden lager dan 0,001% van de grenswaarden.

De gegevens in Figuur 31 worden afzonderlijk gepresenteerd voor de twee condensatiepunten omdat het watervolume en de elementconcentratie verschilt per condensatiepunt. De hoeveelheid water per condensatiepunt is berekend op basis van een CO₂-dosering van 20 kg/m² per jaar. Het ene condensatiepunt levert slechts 5 l/m² per jaar en het andere 64 l/m² per jaar. Deze hoeveelheden zijn vermenigvuldigd met de elementconcentraties en de resulterende waarden zijn vervolgens getoetst aan de genoemde toxiciteitsgrenzen. De elementen Cr en Cd hadden de hoogste waarden voor fytotoxiciteit met respectievelijk 32,4% en 22,8% van de risicogrenswaarden.

Discussiepunten

- De DAC-machine genereert condenswater als bijproduct. Net als andere waterstromen in de kas (bijv. teruggewonnen condenswater van koelelementen) is het de voorkeur om dit te hergebruiken voor irrigatie. Dit sluit aan bij de doelstellingen van de Nederlandse overheid voor de substraatteelt om in 2027 volledig te recirculeren en lozing van irrigatiewater te voorkomen. Om goed beheer en veiligheid te waarborgen, is het cruciaal om de hoeveelheid condenswater te bepalen en de kwaliteit ervan te beoordelen voor hergebruik of lozing.
- Uit de huidige proef bleek dat de totale condenswaterproductie voldoet aan ca. 8,5% van de jaarlijkse irrigatiebehoefte van een Nederlandse hogedraadteelt. Er was niet voldoende data beschikbaar om te bepalen hoe constant de condenswaterproductie is onder wisselende klimaatomstandigheden zoals temperatuur en vochtgehalte van de aangezogen lucht.
- Hoewel bepaalde elementen (NH₄, HCO₃, Fe, Zn, Cu, Al, Pb en Cr) in hogere concentraties werden aangetroffen in vergelijking tot andere waterbronnen zoals regenwater en RO-water, bleven de waarden onder de toxiciteits- en risicogrenswaarden wanneer het condenswater zou worden gebruikt in een recirculerend irrigatiesysteem. In de analyse zijn extreme scenario's doorgerekend die ervan uitgaan dat 100% van de verontreinigingen op één plek ophopen, namelijk het fertigatiewater, de vruchten of de (rest)biomassa.
- De exacte herkomst van alle elementen in het condensaat konden we niet met zekerheid vast te stellen. Het is onduidelijk of deze volledig uit de machine zelf afkomstig zijn of deels worden aangezogen als externe verontreinigingen. Om de aanwezigheid van externe bronnen te onderzoeken, hebben we de luchtfilters (aanvoer en afvoer) laten testen op aanwezigheid van voedingsstoffen en zware metalen.
- De resultaten (zie Tabel B2.3 van Bijlage 2) tonen aan dat de meeste van deze elementen in hoge concentraties in het inlaatfilter werden opgevangen, wat erop wijst dat omgevingsverontreinigingen kunnen bijdragen aan de samenstelling van het condensaat. Dit benadrukt het belang van een (relatief) schone locatie voor de machine en regelmatige vervanging van de filters. Skytree adviseert om tenminste elke zes maanden de luchtfilters te vervangen, afhankelijk van de omgeving. Daarnaast wordt aanbevolen om het condenswater altijd te testen voordat het als irrigatiewater wordt gebruikt.
- Eventueel verhoogde metaalconcentraties in water kunnen worden verlaagd door het te behandelen met ionenwisselaars. Van de gemeten elementen kan NH₄ worden gevormd door tijdelijke afgifte van NH₃ door vers sorptiemiddel. Dit moet geleidelijk steeds minder worden. HCO₃ ontstaat door oplossen van CO₂ in water, en kan worden verlaagd door het water actief te beluchten of gedurende enige tijd op te slaan in een open vat.
- Wat betreft lozing van het condenswater op het riool, ontbreken er in de huidige wetgeving expliciete richtlijnen voor de waterkwaliteit. Uit eerdere trajecten (van der Maas et al., 2015; Guus Meis, Glastuinbouw Nederland, pers. communicatie) wordt er echter gesteld dat het geloosde water:
 - Het rioolsysteem of de afvalwaterzuiveringsinstallatie (AWZI) niet mag verstoren, wat betekent dat de pH minimaal 6,5 moet zijn en het water geen materialen mag bevatten die sedimentatie of verstopping veroorzaken.
 - Het sulfaatgehalte moet onder 300 mg/L blijven om aantasting van betonnen leidingen te voorkomen.
 - Hoge zoutconcentraties moet worden vermeden, omdat deze pompen en leidingen kunnen beschadigen.

Toekomstige regelgeving kan strengere lozingsnormen opleggen indien vereist door het waterschap.

4 Conclusie

Binnen het IDC CO₂-project wordt de potentie onderzocht van Direct Air Capture (DAC) als duurzame CO₂-bron voor de glastuinbouw. Skytree is het eerste bedrijf dat een DAC-machine – een bètaversie van de Skytree Cumulus – heeft geleverd voor het IDC CO₂-project. De proefresultaten wijzen erop dat de kwaliteit van de afgevangen CO₂ geschikt is voor gewasgroei, zonder schadelijke effecten op opbrengst of plantgezondheid. Aandachtspunten zijn monitoring van lange termijn effecten evenals de mogelijke aanwezigheid van NO_x en NH₃. De machine produceerde ook condenswater dat ingezet zou kunnen worden als irrigatiewater. Uit wateranalyses bleek dat het condenswater enkele elementen bevat – NH₄, HCO₃, Fe, Zn, Cu, Al, Pb en Cr – in hogere concentraties dan gangbare waterbronnen voor de glastuinbouw. De concentraties bleven onder de risicogrenswaarden voor toxiciteit wanneer het water gerecirculeerd wordt in de kas. Het vergt nader onderzoek om na te gaan wat oorsprong is van deze elementen en daarnaast wordt aanbevolen om het condenswater altijd te testen voordat het als irrigatiewater wordt gebruikt. Hoewel de Cumulus in zijn bètaversie nog beperkingen had op het gebied van productiecapaciteit en energie-efficiëntie, leverde het waardevolle inzichten op voor verdere optimalisatie. De introductie van de Skytree Stratus in 2025 – een machine met grotere capaciteit die specifiek ontwikkeld is voor de glastuinbouw – biedt perspectief op betere prestaties en een bredere toepassing van DAC in de sector. Verdere ontwikkeling en onderzoek zijn nodig om de technologie volledig te integreren in bestaande kassystemen en haar bijdrage aan een fossielvrije glastuinbouw te realiseren.

Literatuur

- Boerman, J.-K. (2020). *Een vergelijk van effecten van NOx op de groei van komkommer-en tomatenplanten*. [https://www.kasalsenergiebron.nl/content/docs/EnergieEvent/200122/Jan-Kees Boerman - vergelijk van effecten van NOx op de groei van komkommer- en tomatenplanten - Glitch 2020.pdf](https://www.kasalsenergiebron.nl/content/docs/EnergieEvent/200122/Jan-Kees_Boerman_-_vergelijk_van_effecten_van_NOx_op_de_groei_van_komkommer-_en_tomatenplanten_-_Glitch_2020.pdf).
- Dieleman, J. A., Zwinkels, J., de Gelder, A., Kuiper, I., de Zwart, H. F., van Dijk, C. J., & Dueck, T. A. (2007). *CO₂ bij paprika: meerwaarde en beperkingen*. Wageningen UR Glastuinbouw.
- Dueck, T. A., & van Dijk, C. J. (2011). *Risico-evaluatie OCAP-CO₂ vanuit Abengoa: deskstudie*. Plant Research International.
- SER. (2025). *Grenswaarde Ammoniak*. <https://www.ser.nl/nl/thema/arbeidsomstandigheden/Grenswaarden-gevaarlijke-stoffen/Grenswaarden/Ammoniak>.
- Smit, P., & Grootcholten, R. (2024). *Actueel inzicht CO₂-behoefte Nederlandse glastuinbouw 2030*. Wageningen Economic Research.
- Stutte, G. W., Eraso, I., & Anderson, S. (2004). Sensitivity of radish to volatile organic compounds: toluene, ethanol, and acetone. *Prsa Annual Conference Proceedings, Plant Growth Regulation Society of America*.
- Tonneijck, A. E. G., & Van Dijk, C. J. (2000). Effecten van etheen op planten rond lokale bronnen. *Een Risico-Evaluatie. Plant Research International Nota*, 42.
- Trouwborst, G., & Van Oostrom, L. (2024). *Besparen op CO₂ door kunstmatige verhoging van de ventilatievoud in de kas?*
- UNECE. (1988). *Proc. ECE Critical Levels Workshop, Bad Harzburg, 14–18 March 1988*.
- Van Der Velden, N., & Smit, P. (2019). *CO₂-behoefte glastuinbouw 2030*. <https://research.wur.nl/en/publications/co2-behoefte-glastuinbouw-2030>.
- van Dijk, C. J., Meinen, E., & Dueck, T. A. (2010). *Effecten van stikstofoxiden en etheen op paprika*. Wageningen UR Glastuinbouw.
- van Dijk, C. J., Meinen, E., & Dueck, T. A. (2014). *Kwaliteit biogas-CO₂ voor toepassing in de glastuinbouw*. Wageningen UR Glastuinbouw.
- Van Dijk, C. J., & van der Eerden, L. J. M. (1993). *Risico's voor schade aan planten door emissies uit waterzuiveringsinstallaties*. CABO.
- van Tuyll, A., Lanting, M., de Lange, E., Boedijn, A., van Medevoort, J., & Koops, A. (2024). *Sustainable phosphorus for soilless greenhouse horticulture: An exploration of potential routes*. Wageningen Plant Research.
- World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. World Health Organization.

Web references

- 1) <https://www.ocap.nl/>
- 2) <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2022/12/06/bijlage-bij-convenant-energietransitie-glastuinbouw-2022-2030>
- 3) <https://www.porthosco2.nl/>
- 4) <https://norlights.com/news/northern-lights-and-yara-signs-binding-agreement-on-co2-transport-and-storage/>
- 5) <https://www.skytree.eu/product/skytree-cumulus>
- 6) <https://www.skytree.eu/nl/product/skytree-stratus>
- 7) <https://airpress.nl/drukvat-1500-l-11-bar-36150011>
- 8) <https://www.bronkhorst.com/nl-nl/producten/gas-flow/el-flow-select/f-201av/>
- 9) <https://hoogendoorn.com/onze-oplossingen/isii/>
- 10) <https://www.licor.com/env/support/LI-850/topics/specifications.html?Highlight=LI-850%20Gas%20analyzer>
- 11) <https://carltech.nl/producten/procesmeting>
- 12) <https://www.purolite.com/product/a110>
- 13) <https://www.licor.com/env/support/LI-850/topics/specifications.html?Highlight=LI-850%20Gas%20analyzer>
- 14) https://ncscolour.com/en-eu/products/ncs-colourpin-pro?srsId=AfmBOorxOfdVP9iAmx03FoNwgDeggkabg7JTKTkZiBUkKY1qctx_wTWI

Bijlage 1 Gasanalyse SGS



WAGENINGEN UNIVERSITY AND
RESEARCH
BLEISWIJK
THE NETHERLANDS

ANALYTICAL REPORT LA-693560.01.A01

P. 1/2

grade GASMIXTURE
reference no. Janneke Grit

samples received on 15th July, 2024 from WUR Glastuinbouw, Bleiswijk, Netherlands, marked as indicated below
sample 001 "WUR - DAC 1 + 2 + 3"

	<u>001</u>
<u>Gas chromatographic analysis</u> (method EN 15984)	
- carbon dioxide, % mol	51.89
- hydrogen, % mol	<0.01
- oxygen + argon, % mol	10.35
- carbon monoxide, % mol	<0.01
- nitrogen, % mol	37.76
<u>Ammonia</u> , ppm weight (Draeger tube)	<0.5
<u>Nitrogen oxides</u> , ppm weight (Draeger tube)	2.0
<u>Gas chromatographic analysis</u> (method not referenced)	
- benzene, ppm weight	<2
- ethanol, ppm weight	<2
- ethylene, % mol	<0.01
<u>Gas chromatographic analysis</u> (method SGS BE LP/LAB/G/306)	
- hydrogen sulphide, ppm weight	<0.1
Supplementary delivery gasbags	
"Administration fee"	
"Costs for collecting of sample(s)"	

Unless specified otherwise, the latest issue of test methods has been used.

End of analytical results

SGS Belgium NV

Haven 407 Polderdijkweg 16 B-2030 Antwerpen t +32(0)3 545 84 11 f +32(0)3 545 84 19 www.sgs.be
Member of the SGS Group (Société Générale de Surveillance) - ISO 9001 certified firm

Registered Office : Noorderlaan 87 2030 Antwerpen H.R. Antwerpen 141 810 BTW BE 0404.882.750 Citibank IBAN : BE87570134125494 BIC/SWIFT : CITIBEBX
All orders are executed only in accordance with our General Conditions, deposited with the Antwerp Chamber of Commerce and Industry



WAGENINGEN UNIVERSITY AND
RESEARCH
BLEISWIJK
THE NETHERLANDS

ANALYTICAL REPORT LA-1710030.01.A01

Page 1 of 1

grade	GASMIXTURE
reference no.	Janneke Grit
sample received on 18th October, 2024 from WUR Glastuinbouw , Bleiswijk, Netherlands, marked as indicated below	
sample 001	"WUR - 17/10 -1 + 2"

TEST	001
Nitrogen oxides, ppm volume (Draeger tube)	1.1
"Administration fee"	

Unless specified otherwise, the latest issue of test methods has been used.

End of analytical results

Antwerp, the 24th October 2024
Jelmen Boey
Operational Manager Chemicals Laboratory

Unless otherwise agreed, all orders and documents are executed and issued in accordance with our General Conditions. Upon simple request the conditions will again be sent to you. Attention is drawn to the limitation of liability, indemnification and jurisdiction issues defined therein. Any holder of this document is advised that information contained hereon reflects SGS' findings at the time of its intervention only and within the limits of client's instructions, if any. SGS' sole responsibility is to its client and this document does not exonerate parties to a transaction from exercising all their rights and obligations under the transaction documents. Any unauthorized alteration, forgery or falsification of the content or appearance of this document is unlawful and offenders may be prosecuted to the fullest extent of the law.

If the sample(s) to which the findings recorded herein (the 'Findings') relate was (were) drawn and / or provided by the Client or by a third party acting at the Client's direction, then the findings constitute no warranty of the sample's representativeness of any goods and strictly relate to the sample (s) as received. SGS accepts no liability regarding the origin or source from which the sample (s) is/are said to be extracted. Statements, other than the analytical results (such as statements of conformity, opinions and interpretations, etcetera ...), are not included in the scope of the ISO 17025 accreditation. The results in this certificate relate only to the items tested. This report may not be reproduced without written authorization from SGS unless in its totality.
A description of the used analytical methods, the identity of the external laboratories for the marked (*) analyses and the uncertainty of measurement of the analyses are available upon request.

SGS Belgium NV | Haven 407 Polderdijkweg 16 B-2030 Antwerpen t +32(0)3 545 84 11 f +32(0)3 545 84 19 www.sgs.be
Member of the SGS Group (Société Générale de Surveillance) - ISO 9001 certified firm

Registered Office : Noorderlaan 87 2030 Antwerpen H.R. Antwerpen 141 810 BTW BE 0404.882.750 Citibank IBAN : BE87570134125494 BIC/SWIFT : CITIBEBX
All orders are executed only in accordance with our General Conditions, deposited with the Antwerp Chamber of Commerce and Industry

Bijlage 2 Wateranalyse van nutriënten en zware metalen in condenswater

Tabel B2.1 Nutriëntenanalyse van het condenswater van de Skytree Cumulus. Twee monsters (d.w.z. 'Condensatiepunt 1' en 'Condensatiepunt 2') werden geanalyseerd en vergeleken met een standaard voedingsoplossing voor de tomatenteelt in de kas en andere gangbare waterbronnen: 1) regenwater + RO in waterbassin locatie Bleiswijk (NL), 2) bronwater (zonder RO) van een teler in Limburg (NL) en 3) een tweede monster bronwater (zonder RO) voor een teler in Limburg (NL).

Element	Skytree Cumulus		Standaard bemesting recept voor tomaat	Waterbronnen		
	Condenswater Punt 1 16 juni 2024	Condenswater Punt 2 16 juni 2024		Waterbassin + RO* (Bleiswijk)	Grondwater 1 (geen RO) (Limburg)	Grondwater 2 (geen RO) (Limburg)
EC (mS/cm)	1,2	0,4	2,7	0,1	0,6	0,6
pH	6,7	7,8	6,3	7,5	6,6	6,7
NH ₄ (mmol/l)	10,3	3,1	0,1	0,1	0,1	0,1
K (mmol/l)	0,3	0,3	7,1	0,1	0,1	0,2
Na (mmol/l)	0,1	0,1	0,3	0,2	1	0,9
Ca (mmol/l)	0,1	0,1	6,2	0,1	1,7	1,8
Mg (mmol/l)	0,1	0,1	3	0,1	0,4	0,4
NO ₃ (mmol/l)	0,1	0,1	14,7	0,1	0,1	0,1
Cl (mmol/l)	0,1	0,1	0,2	0,2	1,3	1,2
SO ₄ (mmol/l)	0,1	0,1	4,6	0,1	1,8	1,7
HCO ₃ (mmol/l)	12,3	3,4	0,4	0,1	0,8	0,6
P (mmol/l)	0,04	0,04	1	0,04	0,04	0,04
Si (mmol/l)	0,03	0,01	0,05	0,01	0,24	0,23
Fe (µmol/l)	0,3	1	16	0,2	0,2	0,7
Mn (µmol/l)	0,1	0,1	8,1	0,6	2,6	2,9
Zn (µmol/l)	0,1	9,6	5,3	2	0,1	0,1
B (µmol/l)	1	7,1	27	1,6	5,2	5,2
Cu (µmol/l)	0,1	4,2	0,5	0,6	0,1	0,1
Mo (µmol/l)	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2

*RO: reverse osmosis.

Tabel B2.2 Analyse van zware metalen in het condenswater van de Cumulus. Twee monsters (d.w.z. 'Condensatiepunt 1' en 'Condensatiepunt 2') werden geanalyseerd en vergeleken met het waterbassin in Bleiswijk.

Element	Skytree Cumulus		Waterbronnen
	Condenswater Punt 1_16 Juni 2024	Condenswater Punt 2_16 Juni 2024	
Al (µg/l)	100	100	22
As (µg/l)	1,5	1,5	0
Ba (µg/l)	10	10	7,3
Cd (µg/l)	0,4	0,4	0,11
Cr (µg/l)	5	5	0
Co (µg/l)	1	1	0
Cu (µg/l)	280	5	0
Hg (µg/l)	0,1	0,1	1,4
Pb (µg/l)	11	5	0,15
Ni (µg/l)	93	5	0,21
Sn (µg/l)	2	2	0
Zn (µg/l)	650	10	28,9

Tabel B2.3 Analyse van nutriënten en zware metalen aanwezig in de luchtfilters van de luchtaanvoer en -afvoer van de Cumulus (bemonsterd op 24 januari 2025).

Element	Filtermateriaal – Luchtaanvoer	Filtermateriaal – Luchtafvoer
NH ₄ (mg/l)	22	1,9
K (mg/l)	16	3,9
Na (mg/l)	140	57
Ca (mg/l)	60	24
Mg (mg/l)	27	9,7
NO ₃ (mg/l)	285	43
Cl (mg/l)	170	67
S (mg/l)	38	13
HCO ₃ (mg/l)	98	122
P (mg/l)	1,3	1,3
Si (mg/l)	1,1	1,1
Fe (mg/l)	0,51	0,397
Mn (mg/l)	0,88	0,28
B (mg/l)	0,13	0,12
Mo (mg/l)	0,01	0,0096
Al (µg/l)	9900	2000
As (µg/l)	16	4,4
Ba (µg/l)	510	88
Cd (µg/l)	3,8	0,98
Cr (µg/l)	110	17
Co (µg/l)	9,8	3,1
Cu (µg/l)	710	150
Hg (µg/l)	0,45	0,1
Pb (µg/l)	98	23
Ni (µg/l)	72	21
Sn (µg/l)	27	9,9
Zn (µg/l)	2700	880

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



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

Rapport WPR-1429



De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 7.700 medewerkers (7.000 fte), 2.500 PhD- en EngD-kandidaten, 13.100 studenten en ruim 150.000 Leven Lang Leren-deelnemers behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.
