



Invloed CO₂-dosering op groei bij tomaat

Tomatenproef 2020

Pieter de Visser¹, Arie de Gelder¹, Henk Kalkman², Mary Warmenhoven¹ en Feije de Zwart¹

Rapport WPR-1106

1. Wageningen University & Research, 2. Delphy

Referaat

Om de emissiedoelstellingen voor 2030 te halen is het noodzakelijk de verliezen van CO₂ in de glastuinbouw te beperken. In een tomatenteelt met ras Merlice is een drietal niveaus van CO₂-dosering getest op groei, productie en kwaliteit van tomaat en tevens op de benutting en verliezen van CO₂. De teelt was onbelicht en duurde van december tot oktober het jaar erop. De gehanteerde CO₂-niveaus waren conform praktijk ("Normaal"), een halvering ("Minder") en een kwart ("Weinig") van dit niveau. De gemeten cumulatieve drogestof producties waren niet verschillend tussen "Normaal" en "Minder" maar behandeling "Weinig" liet een reductie van 10% zien. Kopdikte, bladdikte en vruchtgewicht waren hoger bij toenemend CO₂-aanbod. Vruchtkwaliteit en fotosynthese eigenschappen waren niet verschillend. De oogstverschillen tussen de laagste twee doseerniveaus duiden op de invloed van CO₂ op de groei. Veel van de gedoseerde CO₂ ging verloren door de luchtramen. Verkenningen met een kasklimaat- en groeimodel van mogelijke teeltstrategieën bij een hogere kostprijs van CO₂ gaven mogelijkheden aan voor een aanzienlijke vermindering ten opzichte van de gebruikelijke CO₂ dosering met relatief weinig productieverlies.

Abstract

CO₂ losses in greenhouse horticulture have to be reduced to reach the emission targets of 2030. In a greenhouse trial with tomato cultivar Merlice three levels of CO₂ were supplied to examine effects on growth, yield and fruit quality. Utilization and loss of CO₂ were quantified. The crop was not illuminated. Cultivation started in December and lasted ten months. Supplied CO₂ levels were either comparable to practice ("Normal"), half ("Less") or a quarter ("Little") of this level. Cumulative total biomass was 10% lower in "Little" while the other two treatments had comparable biomass. Stem and leaf thickness and fruit weight increased with CO₂ supply level, while photosynthetic properties and fruit quality were not affected. Total ventilation losses of supplied CO₂ were considerable and strongly depended on the supply rate when roof vents were open. A model survey showed options for cultivation strategies with lower CO₂ supply levels that have lower losses of CO₂ with only modest yield loss.

Rapportgegevens

Rapport WPR-1106

Projectnummer: 3742290800

PT nummer: 20134

DOI: <https://doi.org/10.18174/568596>

Thema: Energie

Dit project/onderzoek is tot stand gekomen in het kader van programma Kas als Energiebron, het innovatie- en actieprogramma van het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit en Glastuinbouw Nederland en mede gefinancierd door de Stichting Kennis in je Kas

Disclaimer

© 2022 Wageningen, Stichting Wageningen Research, Wageningen Plant Research, Business unit Glastuinbouw, Postbus 20, 2665 MV Bleiswijk T 0317 48 56 06, www.wur.nl/plant-research.

Kamer van Koophandel nr.: 09098104

BTW nr.: NL 8113.83.696.B07

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

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

Adresgegevens

Wageningen University & Research, BU Glastuinbouw

Postbus 20, 2665 ZG Bleiswijk

Violierenweg 1, 2665 MV Bleiswijk

T +31 (0)317 48 56 06

Inhoud

	Samenvatting	5
1	Inleiding	7
	1.1 Achtergrond	7
	1.2 Voorgaand onderzoek	8
	1.3 Gerelateerd lopend onderzoek	8
	1.4 Doelstelling	8
2	Methoden	11
	2.1 Kasproef	11
	2.1.1 Kas en uitrusting	12
	2.1.2 Teelt opzet en strategie.	12
	2.1.3 Gewasregistratie en productie	13
	2.1.4 Plantbiomassa	13
	2.1.5 Lichtonderschepping	13
	2.1.6 Fotosynthese	13
	2.1.7 Huidmondjes	14
	2.1.8 Vruchtkwaliteit	14
	2.1.9 Verloop CO ₂ -concentraties	15
	2.2 CO ₂ -berekeningen	15
	2.2.1 Aanvoer CO ₂	16
	2.2.2 Bestemmingen CO ₂ in kas en gewas	16
	2.2.3 Modelsimulaties	17
3	Resultaten tomatenproef	19
	3.1 Gerealiseerd klimaat	19
	3.1.1 Temperatuur en luchtvochtigheid	19
	3.1.2 Licht	20
	3.1.3 Gerealiseerde CO ₂ -dosering	21
	3.1.4 Verloop van CO ₂ -concentraties	22
	3.2 Stand van het gewas en gewasgezondheid	24
	3.3 Productie en gewasgroei	24
	3.3.1 Productie	25
	3.3.2 Gewasgroei	29
	3.3.3 Destructieve tussenoogsten en eindooft: biomassa en koolstof opslag	30
	3.4 Lichtonderschepping	31
	3.5 Fotosynthese	32
	3.5.1 Juni	32
	3.5.2 September	38
	3.6 Huidmondjes	41
	3.7 Vruchtkwaliteit	41
	3.7.1 Houdbaarheid	43
	3.8 Verticale verdeling van CO ₂	44

4	Resultaten CO₂-berekeningen	47
4.1	Gemeten CO ₂ -opname door het gewas	47
4.2	Gemodelleerde CO ₂ -opname en -verliezen	48
4.2.1	Groei en productie volgens het model	48
4.3	CO ₂ -dosering en -opname binnen de dag: verliezen?	53
4.4	Mogelijke invloed van overige groeifactoren op de verschillen tussen de afdelingen	54
4.5	Adaptatie van plant aan lager CO ₂ -aanbod	54
4.6	Korte modelverkenning van alternatieve CO ₂ -strategieën	54
4.7	Terug in CO ₂ -gebruik: mogelijke teeltstrategie en consequenties voor opbrengst	55
5	Discussie en conclusies	61
	Literatuur	63
	Bijlage 1 Plantbiomassa	65
	Bijlage 2 Verloop proef en stand gewas	67
	Bijlage 3 Oogst variaties binnen de afdeling	73

Samenvatting

Om de emissiedoelstellingen voor 2030 te halen is het noodzakelijk de verliezen van CO₂ in de glastuinbouw sterk te beperken. In een tomatenteelt met ras Merlice is een drietal niveaus van CO₂-dosering getest op groei, productie en kwaliteit van tomaat en tevens op de benutting en verliezen van CO₂. De teelt was onbelicht en duurde van december 2019 tot oktober 2020. De gehanteerde CO₂-niveaus waren conform praktijk ("Normaal") en een halvering ("Minder") en een kwart ("Weinig") van dit niveau. Overige groeicondities tussen de behandelingen werden gelijk gehouden.

De cumulatieve oogst was 4% minder bij halvering van de gedoseerde CO₂ van 24 naar 12 kg m⁻² per teelt. Hierbij werd in beide behandelingen een streefconcentratie van 600 ppm CO₂ aangehouden, alleen bij de "weinig" dosering werd deze verlaagd naar 450 ppm bij grotere raamstand. De behandeling met een totale dosering van 47 kg, een zelfde orde van grootte als in de praktijk en een streefconcentratie van 800 ppm CO₂, had tegenvallende productiecijfers door een slechte groeistart. Volgens het voor Merlice geijkte groeimodel hadden de drie behandelingen onderling 3% in productie zullen verschillen.

Er is geen adaptatie in de fotosynthese in het blad gevonden dat opgroeide bij 600 of 800 ppm CO₂. Die verschillen in CO₂-concentratie waren in mei-juni grotendeels te handhaven en fotosynthesemetingen toonden toen geen verschillen. Wel leek de fotosynthese capaciteit sneller te verlagen bij veroudering van het blad bij lager CO₂ niveau. Vruchtkwaliteit werd niet beïnvloed door de CO₂-behandelingen. In tegenstelling tot de fotosynthese en de vruchtkwaliteit adapteerde de plantbiomassa zich wel aan de verschillende CO₂-beschikbaarheden. Blad en stengel werden dikker en vruchten grover bij meer CO₂ doordat er meer source was en minder sink voor geassimileerde CO₂. Dit ruime aanbod aan CO₂ had mogelijk tot meer vruchtproductie geleid indien een hogere stengeldichtheid of plantbelasting was gehanteerd. Voor een goed vergelijk ten aanzien van de CO₂-opname zijn dergelijke teeltmaatregelen echter niet gewijzigd tussen de behandelingen. De laagste doseerbehandeling had in totaal 10% minder biomassa aangemaakt dan de hogere doseringen. Dit is in dezelfde orde van grootte als het verschil in gesimuleerde vruchtproductie, indien van gelijke zetting en kwaliteit van uitgangsmateriaal wordt uitgegaan.

Veel van de gedoseerde CO₂ ging verloren door de luchtramen. Dit betekende een verlies van 42 kg m⁻², 85% van de gift, per teelt in de doseerbehandeling met praktijkconforme hoeveelheden. Deze behandeling realiseerde in de zomermaanden nooit de streefconcentratie van 800 ppm en kon op dergelijke zonnige dagen de fotosynthese dus nauwelijks verhogen. Een verschuiving van een deel van de dosering van zomer, met veel ventilatieverlies, naar voor- en nazomer leidde in simulaties tot minder verlies en meer CO₂-benutting. Scenario's met het voor de proef geijkte model laten zien dat een halvering van de CO₂-doseerhoeveelheden tot slechts enkele procenten productiedaling leiden maar wel tot veel minder CO₂-verlies en een verdrievoudiging van de CO₂-benutting. Tevens laat de modelverkenning van hogere prijzen voor CO₂ zien dat een lager CO₂-setpoint in de zomer gunstig is voor het financiële rendement en niet ten koste hoeft te gaan van de productie en vruchtgewicht. De resultaten bieden een perspectief voor een afbouw van de gebruikelijke CO₂ dosering met relatief weinig productieverlies.

1 Inleiding

CO₂ is een essentiële grondstof voor plantengroei. In de glastuinbouw wordt om die reden al decennia lang CO₂ gedoseerd ter verhoging van de productie. De ruime beschikbaarheid uit WKK installaties en levering van zuivere CO₂ via OCAP hebben er toe geleid dat telers de CO₂ dosering hebben gemaximaliseerd zonder oog voor de verliezen naar de buitenlucht. Door de emissiedoelstellingen van de tuinbouwsector, maar ook door de steeds verder teruglopende beschikbaarheid van CO₂ is het zaak om in de nabije toekomst het gebruik van CO₂ te reduceren. Het hier gerapporteerde onderzoek richt zich op twee aspecten om CO₂ gebruik te verminderen maar toch een rendabele teelt te behouden: (1) ventilatieverlies beperken door op andere tijden te doseren, (2) fysiologische aanpassingen van het gewas t.a.v. CO₂-benutting. Hiervoor is een teeltproef uitgevoerd en zijn modelmatige evaluaties verricht.

Dit rapport beschrijft achtereenvolgens de achtergrond en de doelstellingen van het onderzoek, de opzet van de kasproef en de meet- en rekenmethoden, de behaalde productie en een beschrijving van de resultaten en een evaluatie hiervan, aangevuld met een modelmatige analyse.

1.1 Achtergrond

De ambitie voor 2030 voor de jaarlijkse CO₂ emissie van de tuinbouwsector ligt op 2.3 Mton. Dat is een reductie van 50% ten opzichte van 2020. Daarmee wordt het efficiënt benutten van CO₂ door het gewas en het minimaliseren van het verlies van CO₂ nog belangrijker dan het al was. Een gangbare, onbelichte tomatenteelt in een gangbare kas zou bij een ongelimiteerd CO₂ aanbod (overdag altijd 800 ppm) 'slechts' ca. 5 kg extra CO₂ in het gewas opnemen (berekend voor het gemiddelde Sel-jaar, zie De Visser *et al.* 2019) in vergelijking met een teelt zonder CO₂ dosering. Voor deze vastlegging van CO₂ wordt wel ruim 50 kg m² aan CO₂ worden gedoseerd, dus met grote ventilatieverliezen (gift – opname = 45 kg m⁻²).

De teler staat voor een enorme uitdaging om enerzijds de dosering te beperken tot de perioden waarin de luchtramen dicht zijn, wat mogelijk weinig productieverhoging oplevert, en anderzijds te anticiperen op plantadaptatie aan een lager CO₂-niveau. Die adaptatie is voor tomaat in klimaatcel-onderzoek aangetoond t.a.v. fotosynthese (o.a. Besford, 1993) maar studies naar verschillen onder praktijkomstandigheden zijn er nauwelijks: onderzoek van Plant Lighting vond geen verschil in een najaarsstudie bij tomaat, i.t.t. kleine verschillen bij paprika (Hogewoning *et al.* 2015). Bij de gesloten kas met ca. 200 ppm hoger CO₂ in de zomer verlaagde de fotosynthese alleen bij lage plantbelasting (vruchtsnoei) t.o.v. de open kas; evenwel nam de bladdikte toe bij hoger CO₂ hetgeen wijst op verhoogde drogestofallocatie naar het blad t.o.v. de vrucht (Qian *et al.* 2012).

Een eerste stap naar minder CO₂-gebruik is toepassing van voor de hand liggende maatregelen als het beperkter doseren als de luchtramen open zijn, of in de zomer een hogere temperatuur toe laten in navolging van Het Nieuwe Telen. Deze aanpak kan snel navolging krijgen in de praktijk. Een tweede stap is nog verder terug te gaan in dosering en gericht te sturen op plantadaptatie aan de lagere CO₂-concentraties. In dit project worden deze twee stappen beproefd en vergeleken met een referentie conform de praktijk.

1.2 Voorgaand onderzoek

In het KAE-project "CO₂ op zoek naar de grens" is met modelberekeningen aannemelijk gemaakt dat de productie ca. 5% daalt wanneer de CO₂ dosering van een dosering van 45 kg m⁻² jr⁻¹ per jaar wordt teruggeschroefd naar 23 kg CO₂ m⁻² jr⁻¹ (De Visser *et al.* 2019). Deze dosering ('de helft van de helft') houdt nog steeds rekening met onvermijdelijke verliezen. Een dosering van 45 kg m⁻² jr⁻¹ kon in een KAE-project in 2010/2011 in onbelichte tomaat al tot 23 kg m⁻² jr⁻¹ worden teruggebracht zonder te leiden tot significant productieverlies (De Gelder *et al.* 2012). Het belangrijkste verschil met bovengenoemde modelberekening is dat in de proef naar verhouding meer van de 45 kg in de zomer werd gedoseerd, wat leidde tot relatief meer ventilatieverlies van CO₂ dan in het model. Verlaging naar 17 kg gaf volgens de modelberekeningen een significante productiedaling t.o.v. 45 kg van bijna 20% (Figuur 3.3 in De Visser *et al.* 2019). Doordachte toediening van de CO₂ en langer dichtlaten van de luchtramen in de zomer kon die productiedaling volgens het model met slechts enkele kilo's oogsttoename zeker niet geheel herstellen. Maar aangevuld met mogelijke gewasadaptatie aan lager CO₂ is de productie wel op een acceptabel niveau te krijgen.

Eerder plantenfysiologisch onderzoek geeft aan dat planten kunnen adapteren aan lagere CO₂ concentraties. Dit biedt dan mogelijkheden in de zomer meer buitenlucht-CO₂ te benutten welke efficiënter zal worden omgezet in assimilaten dan bij een aan hoog-CO₂ aangepast gewas. Dit is onder meer gebaseerd op resultaten van Besford (1993), van FACE-experimenten aan veldgewassen, van Qian *et al.* (2012) in de gesloten kas en van in §1.2 genoemde onderzoek door Hogewoning *et al.* (2015).

1.3 Gerelateerd lopend onderzoek

Voor Kas als Energiebron liep er in 2020 een vergelijkbaar onderzoek bij framboos, waar twee doseerniveaus werden onderzocht in combinatie met twee lichtniveaus voor twee rassen (Janse *et al.* 2021). Ook in dat onderzoek werd aandacht gegeven aan het verminderen van ventilatieverliezen en de mogelijke gewasadaptatie.

1.4 Doelstelling

Verlagen van de CO₂ jaargift (ca. 45 kg m⁻² CO₂) tot maximaal 15 kg, met behoud van een rendabele productie.

Technische doelstellingen:

- CO₂ ventilatieverlies sterk terugbrengen door bij een raamstand > 5% slechts te doseren tot 450 ppm en maximaal 60 kg ha⁻¹ uur⁻¹. Met deze strategie wordt een binnen-concentratie onder de buitenconcentratie te vermeden. (alleen geven wat de plant vraagt); Langer gesloten houden van de luchtramen (bij alle doseerniveaus), dus zal ook een hogere temperatuur worden toegestaan. Het Nieuwe Telen is hierbij uitgangspunt en biedt die mogelijkheden (o.a. temperatuur laten oplopen met de straling); bij gesloten luchtramen met de dosering streven naar max. 600 ppm CO₂
- Door het verlagen van de streefconcentratie naar 600 ppm, en 450 ppm bij ruime raamstand, zorgdragen voor een adaptatie en een betere v benutting door het gewas. Dit biedt de mogelijkheid om de dosering terug te brengen, bijv. naar 10-15 kg CO₂ m⁻² j⁻¹. Verdere mogelijkheden m.b.t gewasadaptatie zijn niet meegenomen (o.a. telen bij hoge RV om huidmondjesgeleidbaarheid te verhogen, en meer luchtcirculatie voor zowel koeling als voor verlaging grenslaagweerstand voor CO₂ opname door gewas).
- Uitstoot van CO₂ sterk verminderen door de efficiëntere dosering, aangezien verlies door de luchtramen nauwelijks meer voorkomt en bij teruggang van de nu gangbare doseringen van ca. 45 naar 12 kg wordt dan een uitstoot van 33 kg CO₂ m⁻² j⁻¹ vermeden.

Energiedoelstellingen:

- De vaker en langer gesloten luchtramen, t.b.v. het vermijden van CO₂-verliezen, leiden tot een verminderde warmtevraag (verminderd gebruik van fossiele CO₂).
- Er hoeft minder gestookt te worden voor CO₂-productie, dus minder vernietiging van warmte.

Verdere aandachtspunten:

- Door plantadaptatie aan lager CO₂ kan de CO₂ efficiënter worden omgezet in assimilaten dan bij een aan hoog CO₂ aangepast gewas (zie 1.2).
- Goede benutting van de gedoseerde CO₂ wordt onder andere bereikt door beperkter te doseren als de CO₂ verliezen het hoogst zijn, i.e. in de zomer maanden, en de gift verschuiven naar perioden met kleinere raamstanden. Door het lagere aanbod aan CO₂ zal mogelijk een iets lagere plantbelasting, o.a. door vruchtsnoei, moeten worden aangehouden, afhankelijk van de stand van het gewas.

2 Methoden

Na de simulatie studies die beschreven zijn in het onderzoek "CO₂ op zoek naar de grens" (De Visser *et al.* 2019) was er de vraag om in onderzoek de bevindingen uit eerdere studies en onderzoeken experimenteel te bevestigen. Een beperking is dat in experimenten niet alle combinaties van gewasmanagement, temperatuurstrategie, CO₂ dosering en sturing van luchtvochtigheid kunnen worden gebruikt. Daarvoor zijn juist de simulatiestudies nodig. Er is daarom gekozen voor een strategie waarbij de CO₂ dosering kon verschillen maar andere omstandigheden zo veel mogelijk gelijk gehouden konden worden. Effecten op plantbelasting konden indien nodig door de vruchtsnoei strategie worden opgevangen.

2.1 Kasproef

Er werden drie naast elkaar gelegen afdelingen gebruikt voor de proef. De afdelingen waren identiek. Het kasdek was diffuus met een haze-factor 0.73. De volgende CO₂-doseerstrategieën werden aangehouden: Normaal (Referentie), Minder (Milde beperking van dosering), Weinig (Grote beperking van dosering). Zie Tabel 2.1 voor de instellingen per behandeling. De strategieën zijn vooraf doorgerekend middels modelsimulaties zodat er een verwachting was voor de productie en de CO₂ concentratie en dosering. Voor details strategieën en bijbehorende oogsten wordt naar het voorgaande rapport verwezen (De Visser *et al.* 2019).

Tabel 2.1

Overzicht CO₂-strategieën gebruikt voor simulatie met producties en resulterende CO₂-concentraties. De ventilatiestrategie is overal hetzelfde:

	Normaal	Minder	Weinig
Doseercapaciteit max. (kg/ha/hr)	230	130	60
Dosering per teelt (CO ₂ kg/m ² /jaar)	44.3	21.9	11.7
CO ₂ -setpoint (raam dicht)	800	600	600
CO ₂ -setpoint bij raamstand >20%)	800	600	600 tot raamstand 20%, daarna lineair teruglopend naar 450 bij 30%raam
Lichtafhankelijke dosering	geen	Toenemend van 0 naar max. bij 400W	Toenemend van 0 naar max. bij 400W
Doseertijden	Uur na zonop tot uur voor zon onder	Uur na zonop tot uur voor zon onder	Uur na zonop tot uur voor zon onder
Ventilatie temperatuur	23	23	23
P-band ventilatie	5 15; 20 5 #	5 15; 20 5	5 15; 20 5
Gem. [CO ₂] (ppm) overdag	606	505	488
Gemiddelde temperatuur	20.0	20.0	20.0

(T-verhoging van resp. 15 en 5, bij buitenT van resp. 5 en 20, om max. raam te bereiken)

2.1.1 Kas en uitrusting

De afdelingen waren wat minder lichtdoorlatend dan in de praktijk gebruikelijk door de beperkte kasafmetingen (144 m²) en de opgehangen apparatuur. De CO₂ kwam binnen als pure CO₂ afkomstig van OCAP. Deze pure CO₂ werd gedoseerd middels massflow controllers (Bronckhorst), waarna via zwarte polyethyleen slangen, hangend direct onder de laagste vruchten in elke dubbele plantrij, de CO₂ uit luchtgaatjes (onderlinge afstand 75 cm) de kas instroomde.

De afdelingen hadden een energiedoek en een diffuus scherm, en tevens schermen voor de zijgevels om licht van de aangrenzende afdelingen weg te schermen.

Er waren geen ventilatoren of nivolatoren geplaatst. De kassen hadden een doorlopende nokventilatie.

Per afdeling werden de volgende meetinstrumenten geplaatst: PAR-meter ter hoogte van de top van de plant, planttemperatuur-meter boven het gewas, 3 meetboxen bij resp. onderste vruchten, bij top van gewas en boven het scherm voor meting temperatuur en relatieve luchtvochtigheid en CO₂-concentratie.

2.1.2 Teelt opzet en strategie.

In de proef is gekozen voor het tomatenras Merlice, geënt op Maxifort onderstam, en een onbelichte teelt; dit is besloten in samenspraak met de telers die het onderzoek begeleiden vanuit de BCO. Plantdatum was 17 december 2019, zodat de eerste zettingen en vruchtgroei plaats vinden bij toenemend natuurlijk licht. De afdelingen waarin de proef wordt uitgevoerd zijn betrekkelijk donker (55% transmissie) en het doseersysteem heeft een maximale CO₂-doseercapaciteit van 230 kg ha⁻¹ uur⁻¹. Dit heeft gevolgen voor de proefopzet: de CO₂-behandelingen zullen vooral onderling vergeleken moeten worden en niet 1-op-1 met de praktijk. Daarnaast moet niet met een hoge plantbelasting gewerkt worden omdat het gewas door de lagere lichtbeschikbaarheid een beperkte productiecapaciteit heeft. Deze aspecten hebben geleid tot de volgende teeltstrategie:

Behandelingen zijn normaal, minder en weinig CO₂ doseren met als streven 44 kg, 22 resp. 12 kg CO₂ m⁻². De genoemde CO₂-giften worden gerealiseerd door de maximale doseercapaciteiten van 230, 130 en 60 kg ha⁻¹ uur⁻¹ (zie ook Tabel 1). Voor de weinig-behandeling gelden twee uitzonderingen: in de zomermaanden is de doseercapaciteit verlaagd naar 30, en in de twee resterende maanden daarna verhoogd naar 90 kg ha⁻¹ uur⁻¹, zie uitleg hieronder.

Er wordt een vrij lage stengeldichtheid van 2.5 m⁻² aangehouden in alle afdelingen, en niet gewijzigd gedurende de teelt. Door geen extra stengel aan te houden wordt voorkomen dat het deel van de planten met een extra stengel risico lopen op beperkingen in wortelopname en daarmee voor verschillen zorgen binnen en tussen de afdelingen. Het tweede voordeel van een lage stengeldichtheid is dat bij hogere temperaturen de plantbelasting niet gauw te hoog wordt en de plant niet verzwakt.

Conform de praktijk wordt vanaf tros 3 tot ongeveer tros 9 bovenin een blaadje weggehaald om meer assimilaten bij de tros te krijgen. De eerste maanden wordt de tros ondersteund met een beugel, wat langer dan in de praktijk gebruikelijk vanwege de relatief donkere kassen bij Wageningen University & Research.

In de voorzomer met oplopende temperaturen kan de gedoseerde CO₂ nog redelijk binnengehouden worden door het beperkte luchten, en is een hogere plantbelasting met meer vruchten per tros en goede snelheid mogelijk. Dit geldt voor alle behandelingen. Hierbij wordt een etmaaltemperatuur van 17°C aangehouden met een verhoging van 2°C per 1000-1400 Joule lichtsom aan buitenstraling, dus een aanpassing via de RTR (Radiation Temperature Ratio) conform Het Nieuwe Telen.

In de zomer zal er bij de weinig-behandeling een sterke switch komen in het kasklimaat: gedurende twee maanden wordt een sterk verlaagde CO₂-gift gedoseerd, 30 kg ha⁻¹ uur⁻¹, vergelijkbaar met de hoeveelheid CO₂ die in de zomer in de praktijk nog bij minimale verwarming in de nacht vrijkomt. Er wordt gelet of er voldoende luchtbeweging is om voldoende CO₂-transport naar het blad te garanderen, anders moeten ventilatoren voor extra luchtcirculatie zorgen. Extra sensoren volgen de CO₂-concentratiegradient in het gewas om te signaleren

of de concentraties niet te ver weg zakken. Afhankelijk van de stand van het gewas per afdeling wordt de tros gedurende enkele weken teruggesnoeid van 6 naar 5 vruchten.

Door de sterke beperking in CO₂-gift in de zomer, kan in september in de weinig-behandeling juist meer dan de vooraf vastgestelde doseercapaciteit ingezet worden, waarbij het maximum van 12 kg voor de hele teelt niet mag worden overschreden; dit kan bij 90 kg ha⁻¹ uur⁻¹. Medio september zal de plantbelasting snel omlaag gaan doordat de kop er 15 september uit wordt gehaald en er geen vruchten meer bij komen. In die laatste teeltfase kan ook in de weinig-behandeling aan de vraag naar CO₂ worden voorzien door de genoemde 90 kg ha⁻¹ uur⁻¹ doseercapaciteit zodat de productie op peil blijft. Bij de behandelingen normaal en minder blijven de maximale doseercapaciteiten het hele jaar dezelfde 230 resp. 130 kg ha⁻¹ uur⁻¹ bij CO₂-setpoints van 800 resp. 600 ppm.

2.1.3 Gewasregistratie en productie

De in proeven gebruikelijke gewasregistratie is uitgevoerd. Dit betekent dat elke week per behandeling aan 12 vaste meetplanten het volgende werd gemeten: kopdikte, lengtegroei, lengte van eerst volgroeide blad bovenin de plant, aantal bloeiende en gezette vruchten met trosnummer, aantal nieuw gevormde bladeren. Zes meetplanten waren aan de noord- en zes aan de zuidzijde van een gewasrij in het midden van de afdeling gesitueerd. Bij de oogst is het gemiddeld vruchtgewicht van de tomaten van de meetplanten bepaald, en is per behandeling het versgewicht aan oogst gewogen van elke halve afdeling, dus noord- en zuidhelft apart. Vruchtkwaliteit waaronder Brix en drogestofgehalte is maandelijks bepaald, zie voor details §2.1.8.

2.1.4 Plantbiomassa

Bij aanvang proef, in maart, juni en aan eind van de proef zijn via destructieve metingen de vers- en drooggewichten van 5 planten per behandeling bepaald. De gewichten werden onderverdeeld in blad, stengel, vrucht. Daarnaast werden plantlengte, aantal trossen, bladeren en vruchten gemeten. Tevens werd totaal bladoppervlakte gemeten met een Licor-oppervlaktometer.

2.1.5 Lichtonderschepping

Op 30 januari en 11 mei 2020 zijn met een lichtstok (Sunscan) de lichtniveaus op 6 hoogten op 3 plekken per afdelingen bepaald. Hiermee is de lichtonderschepping door het gewas te berekenen. Die resultaten werden gebruikt om de uitkomsten van de lichtonderschepping in het groeimodel mee te verifiëren.

2.1.6 Fotosynthese

De fotosynthese-eigenschappen van het tomatenblad zijn op twee momenten gedurende de proef bepaald: 16 juni en 30 september 2020. Hierbij is de fotosynthese bepaald aan het bovenste volgroeide blad (ongeveer het 5^{de} blad van boven geteld, waarbij een blad groter is dan 2.5 cm lengte). Op 16 juni is ook aan het 5^{de} blad, van onderaf geteld, gemeten.

De fotosynthesemetingen betroffen de lichtrespons, de CO₂-respons (A/C_i) curve) en de temperatuurrepons. De lichtrespons werd gemeten bij opeenvolgende, steeds hogere lichtniveaus van 0, 50, 100, 150, 200, 400, 500, 750, 1000 en 1500 μmol PAR m⁻² s⁻¹, bij een constante CO₂ -concentratie van zowel 400, 600 als 800 ppm, en een luchttemperatuur van 25°C. De CO₂ -respons werd bepaald aan oplopende CO₂ -concentraties, namelijk 0, 200, 400, 800, 1100, 1400 en 2000 ppm CO₂, bij een constant lichtniveau van 300 en 1500 μmol PAR m⁻² s⁻¹, en een luchttemperatuur van 25°C. De temperatuurrepons werd bepaald bij 20 en 25°C (juni) en ook 30, 35 en 40°C (september), bij constant lichtniveau van 1250 μmol PAR m⁻² s⁻¹ en een CO₂ -concentratie van 600 ppm.

2.1.7 Huidmondjes

Op drie momenten in de teelt, i.e. in maart, mei en oktober, werden afdrukken van bladeren gemaakt ter bepaling van huidmondjesaantal en -opening. Per meetmoment werden tien net volgroeide bladeren per behandeling opgemeten.

Per blad werd de volgende techniek uitgevoerd voor een afdruk m.b.v. nagellak:

Dun vloeibaar Xanthopren Plus werd gemengd met elastomeer harder en direct op de onderzijde van een blad aangebracht. Na stolling werd de rubber stempel voorzichtig afgenomen. Vervolgens werd kleurloze nagellak aangebracht op de stempel (positief). Na droging werd de uitgeharde lakfilm onder de microscoop bekeken bij een vergroting van 10 (oculair) x 10 (objectief).

Met een Leica digitale camera werd een foto gemaakt teneinde de opname te kunnen relateren aan aantal en opening.

2.1.8 Vruchtkwaliteit

Metingen in het smaaklab en berekende smaak

Elke maand werden 10 trossen versgeoogste tomaten van elke behandeling binnen 2 dagen na pluk gemeten in het smaaklab. De vruchtmassa werd gemeten op refractie (t.b.v. °Brix), hoeveelheid titreerbaar zuur (in mmol H₃O⁺ per 100g), % sap geperst uit de vruchtwand van de tomaat. Tevens werd de breekkracht van de vruchtwand gemeten, als maat voor de stevigheid die wordt ervaren tijdens het kauwen (Bite, N). Het gemiddelde vruchtgewicht werd geregistreerd. De kenmerken Brix, zuur, %sap en Bite werden met Smaakmodel Tomaat versie 2.1 (Verkerke *et al.* 2011) gebruikt om een smaakcijfer te bereken op een schaal van 0 (zeer onaangenaam) tot 100 (zeer aangenaam).

Houdbaarheidsproeven

Voor dit houdbaarheidsonderzoek werden per behandeling 8 trossen ingezet. De vruchten werden bewaard in een houdbaarheidscel van 20°C bij een relatieve luchtvochtigheid van 80%. De vruchten werden door een getrainde beoordelaar 3x per week visueel beoordeeld. Daarnaast werden de vruchten handmatig beoordeeld op stevigheid en rot, tot op het moment dat de laatste vrucht te zacht werd bevonden. De gemiddelde houdbaarheid is uitgedrukt in het aantal dagen dat de vruchten van een partij gemiddeld voldoende stevig en niet rot zijn.

2.1.9 Verloop CO₂-concentraties

Naast een standaard CO₂-meting bovenin het gewas is er een extra meetbox boven het gewas gehangen voor CO₂-meting van de kaslucht zoals onder invloed van het luchten. Tevens is er een 8-kanaals Multiplexer (Licor, USA) gebruikt om op 8 meetpunten met tijdstappen van ca. ½ uur de CO₂ te meten. De Multiplexer bevatte een CO₂-sensor die nauwkeuriger is dan de sensoren in de meetboxen. De 8 aanzuigpunten zijn in de proefperiode regelmatig verplaatst om een goed overzicht te krijgen van de CO₂-concentraties op de diverse hoogten en afdelingen. De volgende posities zijn gemeten (afdeling en hoogte boven grond):

Van	Tot	1	2	3	4	5	6	7	8
21-01-2020	13-03-2020	607-1m	607-2m	607-3m	607-4m	608-1m	608-2m	608-3m	608-4m
13-03-2020	09-05-2020	609-1m	609-2m	609-4m	609-3m	608-1m	608-2m	608-3m	608-4m
09-05-2020	02-06-2020	geen aansluiting							
02-06-2020	03-07-2020	609-1m	608-1m	609-2m	608-2m	609-3m	608-3m	609-4m	608-4m
03-07-2020	11-08-2020	609-1m	608-1m	607-1m	607-4m	609-3m	608-3m	609-4m	608-4m
11-08-2020	15-09-2020	geen aansluiting							
15-09-2020	30-10-2020	607-4m	607-1m	608-1m	608-3m	608-4m	609-4m	609-1m	609-3m

Afdelingen: 607: Minder; 608: Weinig; 609: Normaal



Figuur 2.1 CO₂-multiplexer (links) voor gelijktijdige CO₂-metingen in de lucht op meerdere plekken in de kas, waarbij aanzuigpunten (rechts) de lucht aanzuigen richting meetapparaat.

2.2 CO₂-berekeningen

CO₂-aanbod is de belangrijkste proeffactor. Het doel van de proef is de bestemming van elke kilo aangevoerde CO₂ zo goed mogelijk te kwantificeren, zodat er inzicht ontstaat hoe CO₂ het meest efficiënt ingezet kan worden. In de kas zijn slechts twee bestemmingen: (1) opname door het gewas, (2) verlies via de luchtramen. Aan punt 1 kunnen we nog het onderscheid naar de vastlegging in blad, stengels, wortels en vruchten toevoegen.

Opname door het gewas wordt gemeten door alle geproduceerde biomassa, met bekende fractie C, te drogen en wegen, zie §2.2.2. Het verlies in de proef kan alleen indirect geschat worden: verlies = aanvoer - gewasopname. Daarnaast wordt het gewasgroeimodel geijkt met de meetdata, zodat achteraf met het model de stromen kunnen worden herberekend en geëvalueerd, en tevens om scenario's door te rekenen met andere doseerstrategie, zie voor de methode §2.2.3.

2.2.1 Aanvoer CO₂

De CO₂ kwam binnen als zuivere CO₂ afkomstig van OCAP. Deze pure CO₂ werd gedoseerd middels massflow controllers (Bronckhorst), welke net voor start van de proef door de leverancier waren geijkt. De maximale doseersnelheden werden per afdeling vooraf ingesteld (zie proefopzet) en werden binnen een dag afhankelijk van de raamstand aangepast. Daarnaast werden de massflow controllers door de klimaatcomputer geregeld, afhankelijk van het wel of niet bereiken van het ingestelde setpoint voor CO₂-concentratie.

De aanvoer van CO₂ werd tevens gemeten met een conventionele flowmeter (zie Figuur 2.2), welke regelmatig werd afgelezen en handmatig verwerkt.



Figuur 2.2 Gasmeter voor handmatige registratie van de CO₂-aanvoer bij elke afdeling.

2.2.2 Bestemmingen CO₂ in kas en gewas

De gedoseerde CO₂ kent in de kas twee bestemmingen: gewasopname of ventilatie naar de buitenlucht. De opname in het gewas wordt indirect bepaald door de biomassatoename te meten, waarbij ook oogst en afvoer van het geplukte blad en de planttop na toppen behoort. Daarbij is de aanname dat 1 gram drogestof 40% koolstof bevat (1 koolhydraatmolecuul = CH₂O, waarin C met atoommassa C = 12 g mol⁻¹ 40% is van de totale molecuulmassa (12+2+16)). Aangezien de concentratie in de kas in dit experiment altijd hoger was dan de buitenluchtconcentratie is de bijdrage van CO₂ uit de buitenlucht verwaarloosbaar. Maar zelfs wanneer er CO₂ vanuit de buitenlucht naar binnen zou zijn gestroomd blijft de berekening van het verlies aan gedoseerde CO₂ gegeven worden door: verlies = dosering - gewasopname.

De toename van de plantbiomassa is bepaald door diverse destructieve metingen (zie §2.1.4); versgewicht van bladpluk en oogst werd 1-2 wekelijks gemeten en via een subsample het drogestofgehalte bepaald.

2.2.3 Modelsimulaties

Doel was om bij de waargenomen plantontwikkeling de CO₂-benutting te simuleren, via de fotosynthese en opslag in de plantbiomassa, en de ventilatieverliezen bij de opgetreden temperaturen en raamstanden.

Het tweede doel van de simulaties was om met het voor dit gewas geijkte groeimodel enkele scenario's door te rekenen: (1) voor een kas die een praktijkconforme lichttransmissie heeft i.p.v. de vrij donkere kassen bij WUR, (2) een scenario met een perspectievolle combinatie van de uitgevoerde doseerbehandelingen, om minder CO₂ te verliezen en een rendabele teelt te voeren.

Het gecombineerde Kaspro/Intkam werd gebruikt, waarbij Kaspro het kasklimaat simuleert op basis van de ingestelde setpoints, en Intkam op basis van klimaatvariabelen temperatuur, licht en CO₂ de gewasgroei en vruchtproductie simuleert. Calibratie vond plaats aan de waargenomen kasklimaatcondities en gewasgroei- en vruchtproductie. Het model heeft een rekenstap van 5 minuten, en is al eerder succesvol gebruikt voor het narekenen van tomatenproeven met Komeett en Capriccia.

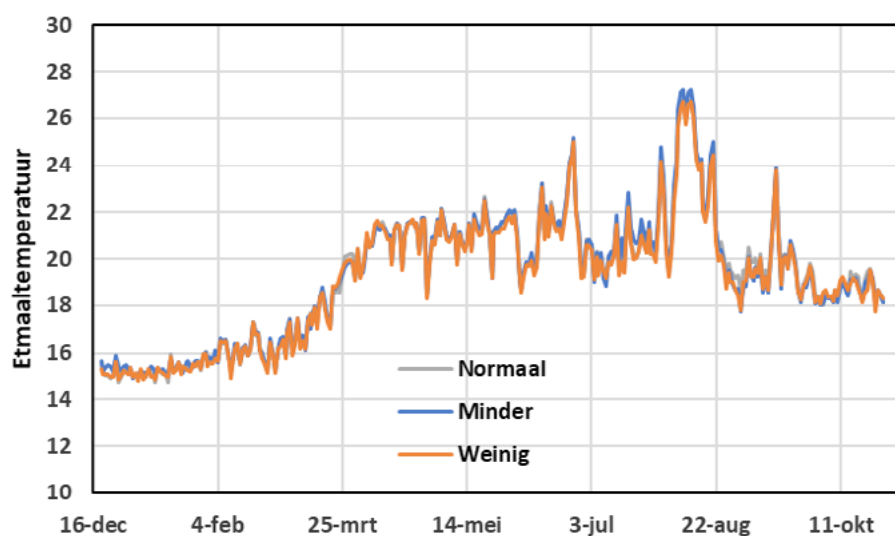
3 Resultaten tomatenproef

In dit hoofdstuk worden de gerealiseerde klimaatomstandigheden, de reactie van het gewas waaronder de stand van het gewas, gewasgezondheid en groei gerapporteerd, en wordt in detail op lichtonderschepping en fotosynthese ingegaan. Tot slot komen de vruchtkwaliteit en de verticale verdeling van de CO₂ aan de orde.

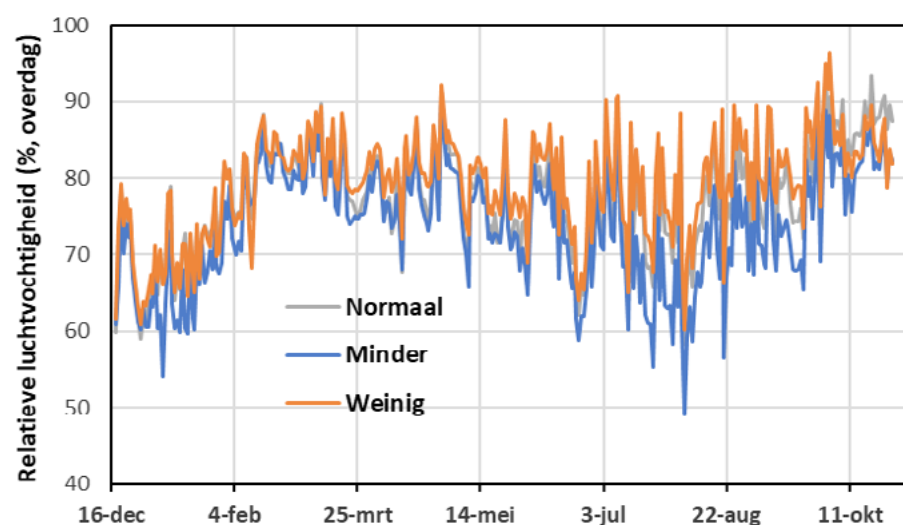
3.1 Gerealiseerd klimaat

3.1.1 Temperatuur en luchtvochtigheid

De kasluchttemperatuur kon in alle afdelingen gelijk gehouden worden (Figuur 3.1). Hiervoor moest wel in behandeling "Minder" meer gelucht worden i.v.m. een warme aangrenzende afdeling. Dit resulteerde in een gemiddeld lagere relatieve luchtvochtigheid (Figuur 3.2). Daarnaast zijn "Normaal" en "Weinig" vrijwel gelijk in luchtvochtigheid.



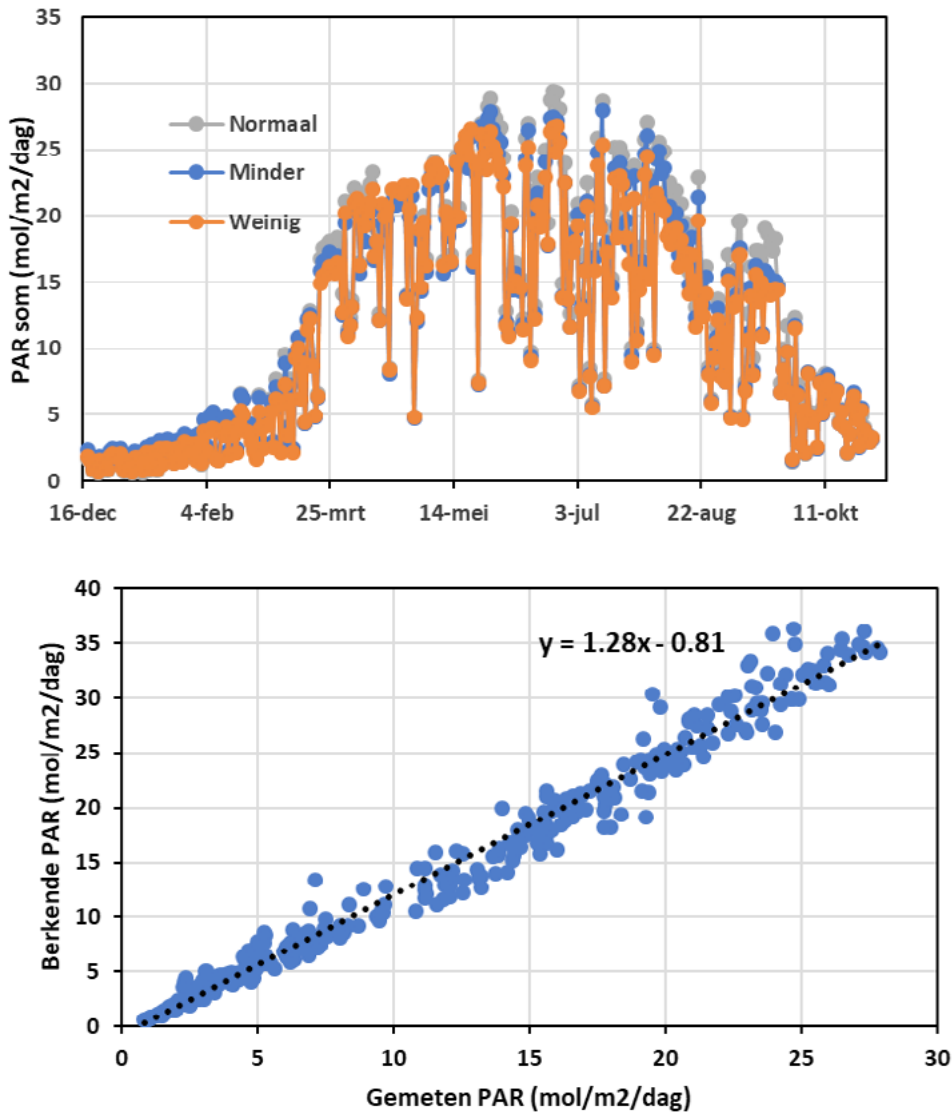
Figuur 3.1 Etmaaltemperatuur gedurende de teelt in de drie behandelingen.



Figuur 3.2 Relatieve luchtvochtigheid (%) overdag, gedurende de teelt in de drie behandelingen.

3.1.2 Licht

De dagsommen aan PAR zoals gemeten boven het gewas vertonen hetzelfde patroon in de tijd maar vertonen wel verschillen tussen de behandelingen (Figuur 3.3). De gemiddelde dagsom voor de proef was 12.1 mol m^{-2} . Aangezien de PAR-meters niet altijd vlak stonden en de metingen slechts een indicatie geven, zijn bij de modelberekeningen de berekende lichthoeveelheden (op basis van buitenstraling en kastransmissie) gebruikt. De relatie tussen de hier gemeten en berekende PAR dagsommen is uiteraard wel lineair (Figuur 3.3).



Figuur 3.3 PAR som ($\text{mol m}^{-2} \text{ dag}^{-1}$) in de drie behandelingen. Boven: seizoenverloop; Onder: relatie tussen berekende en gemeten dagelijkse PAR som.

3.1.3 Gerealiseerde CO₂-dosering

Van start teelt tot 27 februari is in alle behandelingen een zelfde streefwaarde van 600 ppm CO₂ gehanteerd, bij een doseercapaciteit van 50-75 kg ha⁻¹ uur⁻¹. De dosering werd uitgevoerd tussen 1 uur na zon op tot 1 uur voor zon onder. Deze streefwaarde is steeds bereikt. Op 28 februari 2020 was gestart met de drie behandelingen. Bij "Normaal" werd een doseercapaciteit van 100 kg gehandhaafd met streefwaarde 800 ppm, bij "Minder" en "Weinig" maximaal 50 kg doseercapaciteit en een streefwaarde van 600 ppm. Tevens is er bij raamstanden boven 20% in "Weinig" een streefwaarde van 450 ppm, iets boven de buitenluchtconcentratie, aangehouden. Dit is uiteindelijk in de periode 28 februari tot 10 april aan de orde geweest. De lagere doseercapaciteit was nodig omdat bij hoge capaciteit de ruimte concentratie te veel opliep voordat met doseren werd gestopt. Hierna zijn de doseercapaciteiten opgevoerd naar 60 ('Weinig'), 130 ('Minder') en 230 ('Normaal') kg ha⁻¹ uur⁻¹ met dezelfde eerdergenoemde streefwaarden (zie ook Tabel 2.1). In de zomer is van 8 juni tot en met 21 augustus de doseercapaciteit bij 'Weinig' gehalveerd tot 30 om CO₂-verliezen te beperken en de bespaarde 'doseerruimte' naar de nazomer, waarin minder gelucht wordt en dus minder verloren gaat, te verplaatsen. Van 3 augustus tot 23 september is bij 'Minder' ook ingegrepen: een maximum capaciteit van 90 kg bij raamstand boven 20% om nodeloos verlies van CO₂ te beperken, daaronder wel de eerder gebruikte 130 kg.

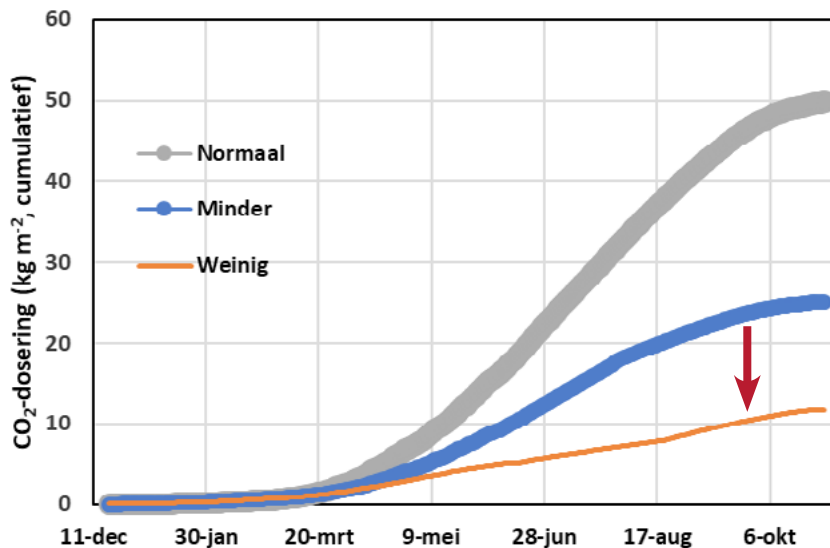
Eind oktober 2020 werd geconstateerd dat in de behandeling "Weinig" de door de CO₂-sensor in de meetbox gemeten concentratie niet juist was geweest vanaf 30 september 2020. De concentratie die de meter aangaf was te laag. Na het verwerken van de data van de Multiplexer bleken de waarden overdag rond de 800 ppm te zijn geweest, vergelijkbaar met de behandeling "Normaal". In de interpretatie van de resultaten is rekening gehouden met een mogelijk vertekend beeld in de maand oktober. De gedoseerde hoeveelheid CO₂ in "Weinig" was die maand dus ook hoger, en bleek vergelijkbaar met de doseerhoeveelheid in "Minder" (zie Figuur 3.5). Toch bleek aan het eind van de teelt dat de totale dosering in de teelt (zie Tabel 3.1) vrijwel gelijk was aan de planning van 12 kg m⁻².

De hoeveelheid gedoseerde CO₂ is op twee wijzen gekwantificeerd: (1) continue registratie van de stand van de – geijkte – massflow controller die in Letsgrow werd vastgelegd, (2) regelmatige opname van de stand van de gasmeter met gedoseerde m³ pure CO₂ (zie Figuur 2.2). De beide methoden komen tot vrijwel dezelfde doseerhoeveelheden, met een maximaal verschil van 2.2% voor 'Minder' (Tabel 3.2). De gasmeter-hoeveelheden zijn de daadwerkelijk gegeven hoeveelheden CO₂. In het rapport zijn de dagelijkse massflow-hoeveelheden hiervoor gecorrigeerd.

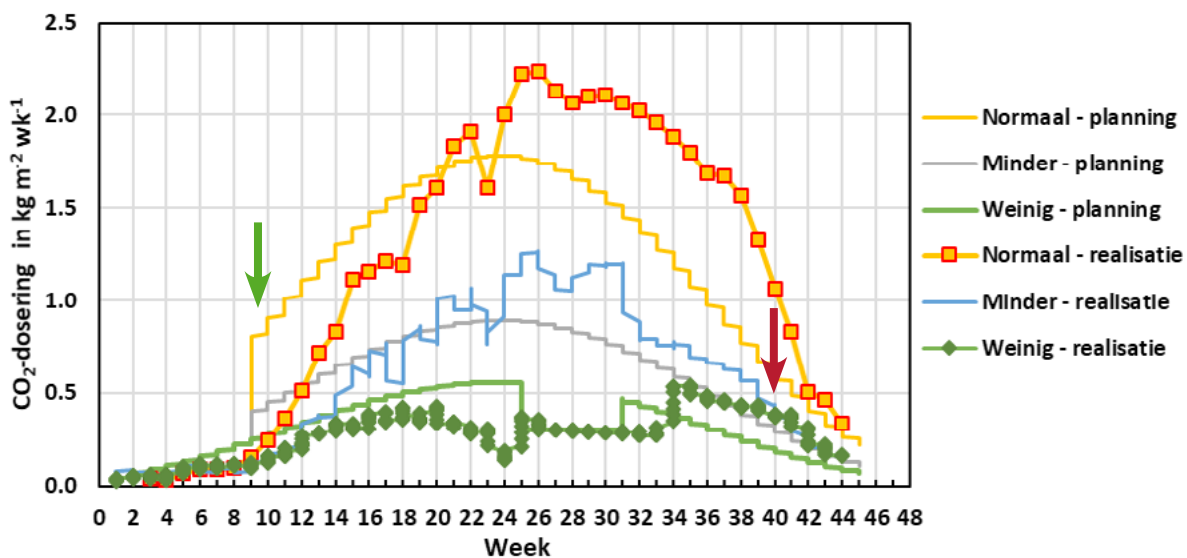
Tabel 3.1

Totaal in de teelt gedoseerde hoeveelheid CO₂ (kg m⁻²) volgens de gasmeter en de massflow meter.

Behandeling	Gasmeter	Massflow meter
Normaal	48.95 kg CO ₂ m ⁻²	49.78
Minder	24.45	25.00
Weinig	11.82	11.76



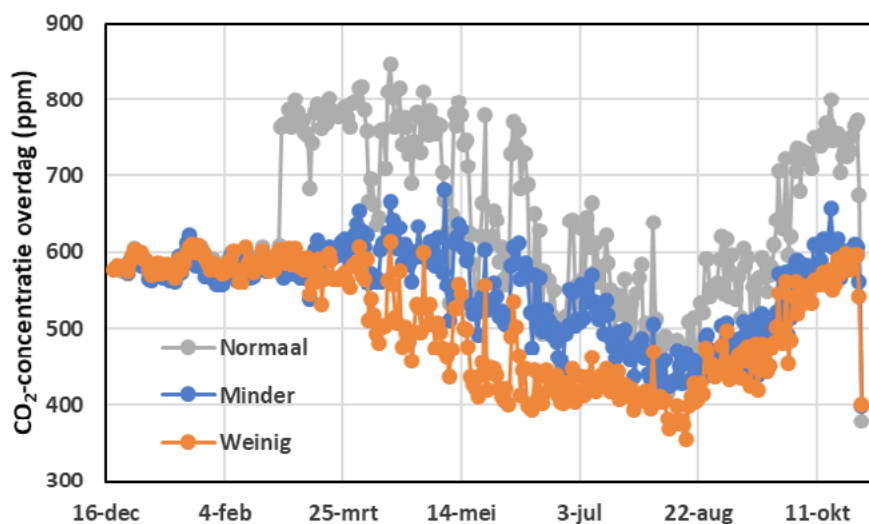
Figuur 3.4 Cumulatieve hoeveelheden CO₂ (kg m⁻²) zoals gedoseerd in de drie behandelingen. Rode pijl: moment waarna in 'Weinig' net zoveel als in 'Minder' werd gedoseerd wegens foutieve CO₂-sensor.



Figuur 3.5 Wekelijkse CO₂-doserings (kg m⁻² wk⁻¹) volgens planning en zoals gerealiseerd. Groene pijl: start CO₂-behandelingsverschillen; rode pijl: moment waarna in 'Weinig' net zoveel als in 'Minder' werd gedoseerd wegens foutieve CO₂-sensor.

3.1.4 Verloop van CO₂-concentraties

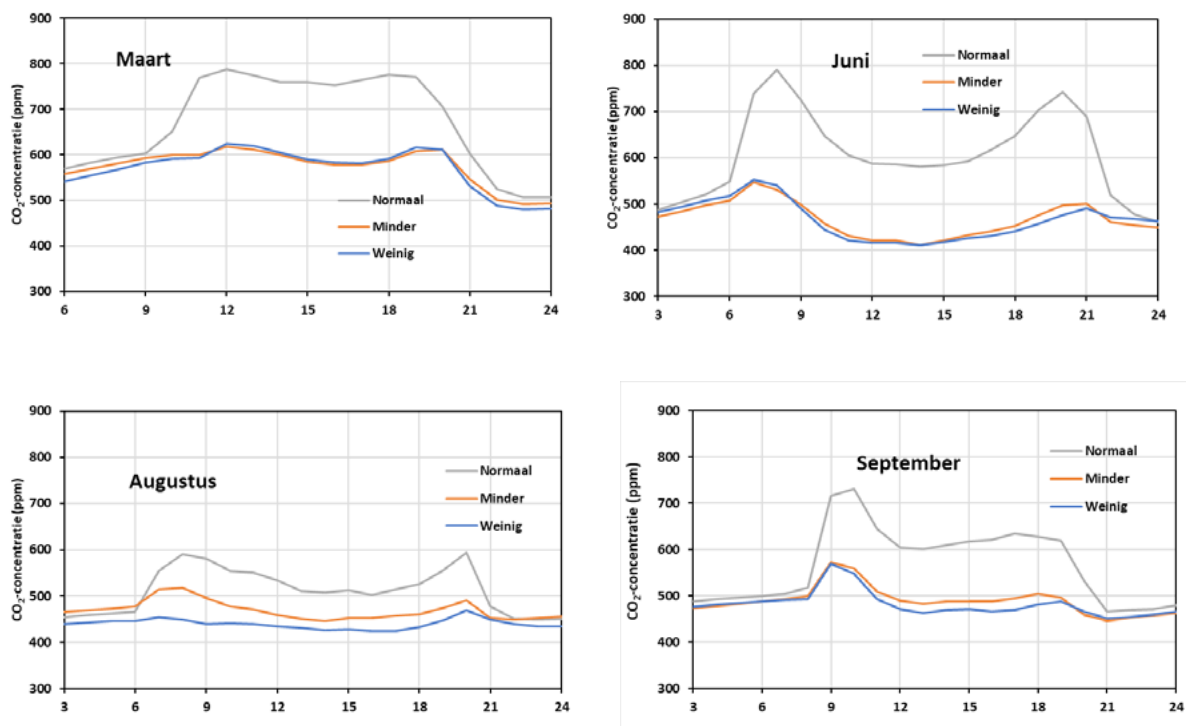
Na start van de CO₂-behandelingen zijn de CO₂-concentraties in maart vergelijkbaar tussen "Weinig" en "Minder" door toepassing van een identieke doseerstrategie. Behandeling "Normaal" heeft duidelijk steeds hogere concentraties dan de overige behandelingen, en bedragen tot begin mei overdag ca. 700-800 ppm. In de maanden juni t/m september zijn deze concentraties niet te handhaven door het frequente luchten en variëren tussen de 500 en 600 ppm. In die maanden is er een duidelijk onderscheid in concentraties tussen de behandelingen. Begin oktober zijn de concentraties in "Weinig" en "Minder" weer vergelijkbaar door de gelijke doseerstrategie, en "Normaal" weer significant hoger.



Figuur 3.6 CO₂-concentraties overdag in de behandelingen gedurende de teelt.

Het gemiddelde dagverloop van de CO₂-concentraties is voor 4 maanden weergegeven in figuur 3.7. Voor dit verloop zijn de metingen op 2, 3 en 4 meter hoogte samengevoegd want die bleken onderling zeer weinig te verschillen. Te zien is dat in maart en juni (en ook de tussenliggende maanden overigens) de concentraties in "Minder" en "Weinig" niet verschiden, hetgeen logisch is door gebruik van hetzelfde setpoint van 600 ppm, terwijl "Normaal" daar 200 ppm boven ligt. In de zomer kan in "Normaal" de streefwaarde van 800 ppm niet gehaald worden door het vele luchten, maar de concentratie blijft nog wel ca. 50-100 ppm boven "Minder". Behandeling "Weinig" heeft in de zomer de laagste CO₂-concentraties die vrijwel niet verschillen van de buitenluchtconcentratie (Figuur 3.7).

In september kan de concentratie in "Normaal" nog steeds de 800 ppm niet bereiken, terwijl "Minder" en "Weinig" na een kleine ochtendpiek, overdag lagere en vergelijkbare concentraties hebben van ca. 500 ppm.



Figuur 3.7 Gemiddeld dagverloop van de CO₂-concentraties tussen 2 en 4 m hoogte, voor 4 maanden.

3.2 Stand van het gewas en gewasgezondheid

Hier wordt beknopt weergegeven hoe de stand van het gewas was gedurende de proef, met medeneming van de eventuele ziekten en plagen. Voor een uitgebreid verslag wordt verwezen naar Bijlage 3.

De geleverde planten waren vrij klein, het was dus zaak om bij de nog zeer beperkte hoeveelheid licht een krachtige plant te produceren. Er werd besloten om hiervoor voorlopig een vrij lage etmaaltemperatuur van 15°C aan te houden. Na 3 weken bleek de plant nog steeds niet zo stevig, maar de eerste tros leek goed. Halverwege februari bleek dat deze tros zich niet naar wens ontwikkelde en door een onregelmatige zetting een variabel vruchtaantal opleverde. Daarnaast groeiden de planten nog traag door de lage etmaaltemperatuur, wat het gevaccineerde pepinovirus de kans gaf zich te manifesteren in enkele planten. Vooral in de kas van behandeling 'Minder' ontwikkelden zich pepino-verschijnselen aan randplanten aan de noordzijde. Dit verdween weer snel met het opvoeren van de temperatuur, waartoe werd besloten op basis van de gunstige gewasontwikkeling, met een sterke plant met kopdikte van minimaal 10 mm. Bij de bloei van de 4^{de} tros, eind februari, was het gewas tussen de afdelingen goed gelijk en werd besloten de CO₂-behandelingen te starten. Eind maart werd gestopt met weghalen van een blad uit de kop van de plant aangezien de plantbelasting relatief laag was. Een week later werd begonnen met aanhouden van 6 in plaats van 5 vruchten per tros. Eind april werd er nog steeds geen zichtbaar verschil in gewasstand tussen de behandelingen waargenomen. In het algemeen was er een goede groei en was het gewas goed in balans. De planten waren vrij zwaar van gewicht en bij indraaien was er kans op kopbreuk, waardoor besloten werd om clips te gaan gebruiken. Halverwege mei werd een verschil in gewasstand tussen de behandelingen duidelijk : behandeling 'Normaal' had een meer open bladstructuur gekregen, een meer generatief gewas met een sterkere tros, terwijl 'Minder' en 'Weinig' erg vergelijkbaar waren. Eind mei liep deze trend door en waren de vruchten in 'Normaal' zwaar (tot 200 gram), en was er een balans tussen vruchtgroei en bladgroei, ondanks dat het blad in 'Normaal' wat kleiner was dan in de overige behandelingen. Halverwege juni werd het verschil in gewasstand goed zichtbaar: behandeling 'Minder' stond goed op vrucht en had voldoende bladstrekking, 'Weinig' was groeizamer dan 'Minder' zoals zichtbaar door meer bladvolume, terwijl 'Normaal' een open gewastype had met wat smaller blad. De vruchten waren zeer grof, mede door het zeer zonnige weer. Eind juni werd de plantbelasting wat minder, de bladkwaliteit was overal goed, en was er een duidelijk verschil tussen de vrij normale vruchtgrootte in 'Weinig' en 'Minder' en de grove vruchten in 'Normaal'. In juli bleef dit onderscheid tussen 'Normaal' en de overige twee behandelingen. Er werd weinig invloed van het donkere weer op de troskwaliteit gezien. De trosstelen waren vrij lang, en behandeling 'Weinig' was vegetatiever en had een minder sterke tros dan de andere behandelingen. Eind juli werden weer 5 i.p.v. 6 vruchten per tros aangehouden om voldoende vruchtgewicht te houden. Begin augustus doorstond het gewas de hittegolf goed. Wel begonnen galmijt in alle afdelingen en neusrut in behandeling 'Minder' veel op te treden en werden bestreden. Dit heeft uiteindelijk niet tot uitval van planten of vruchten geleidt, m.u.v. een randrij in 'Minder'. In augustus was de trosontwikkeling ook bij 'Weinig' goed en het gewas minder vegetatief dan eerder. Vanaf week 37 werd de tros gebeugeld om knikken te voorkomen. Op 15 september werd de kop uit de plant gehaald. De gewassen tussen de behandelingen verschilden nauwelijks meer gedurende de rest van de teelt, alleen de vruchten in 'Weinig' waren wat fijner.

3.3 Productie en gewasgroei

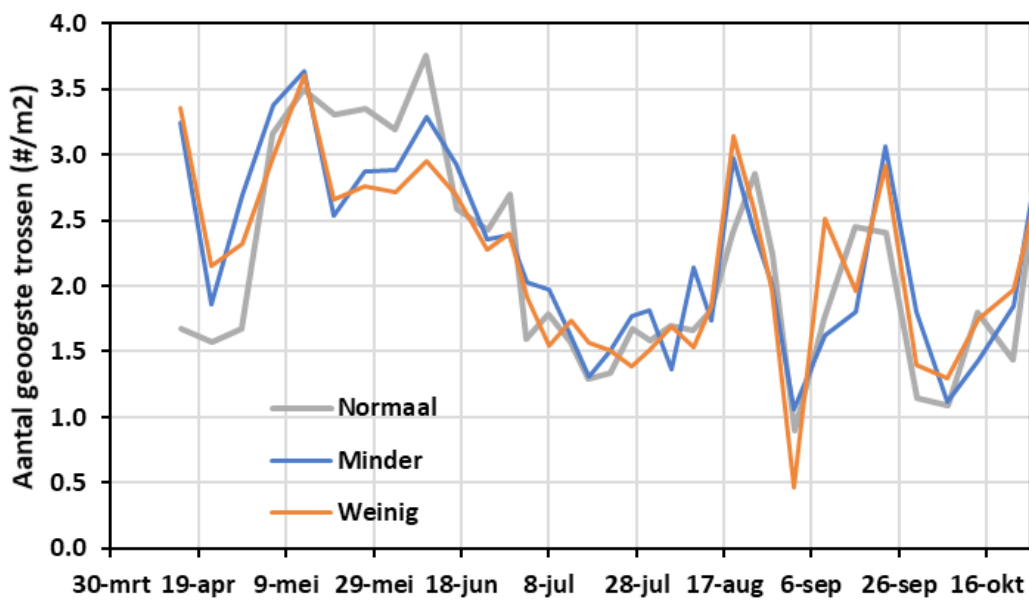
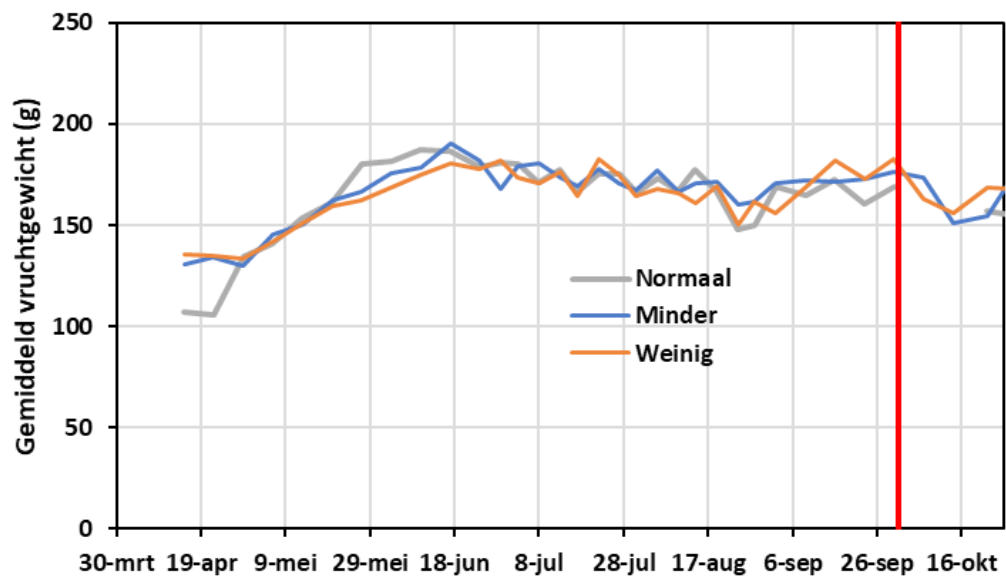
De gemeten vruchtproductie en de biomassa van de gewasdelen wordt in de volgende paragrafen besproken. Eigenschappen als gemiddeld vruchtgewicht, blad- en stengelbiomassa alsmede LAI zijn gemeten aan de meetplanten, terwijl de oogst aan de hand van de metingen van de gehele afdeling zijn bepaald. In Bijlage 3 staan producties van de meetplanten en de verschillen tussen noord- en zuidzijde van de afdeling vermeld.

3.3.1 Productie

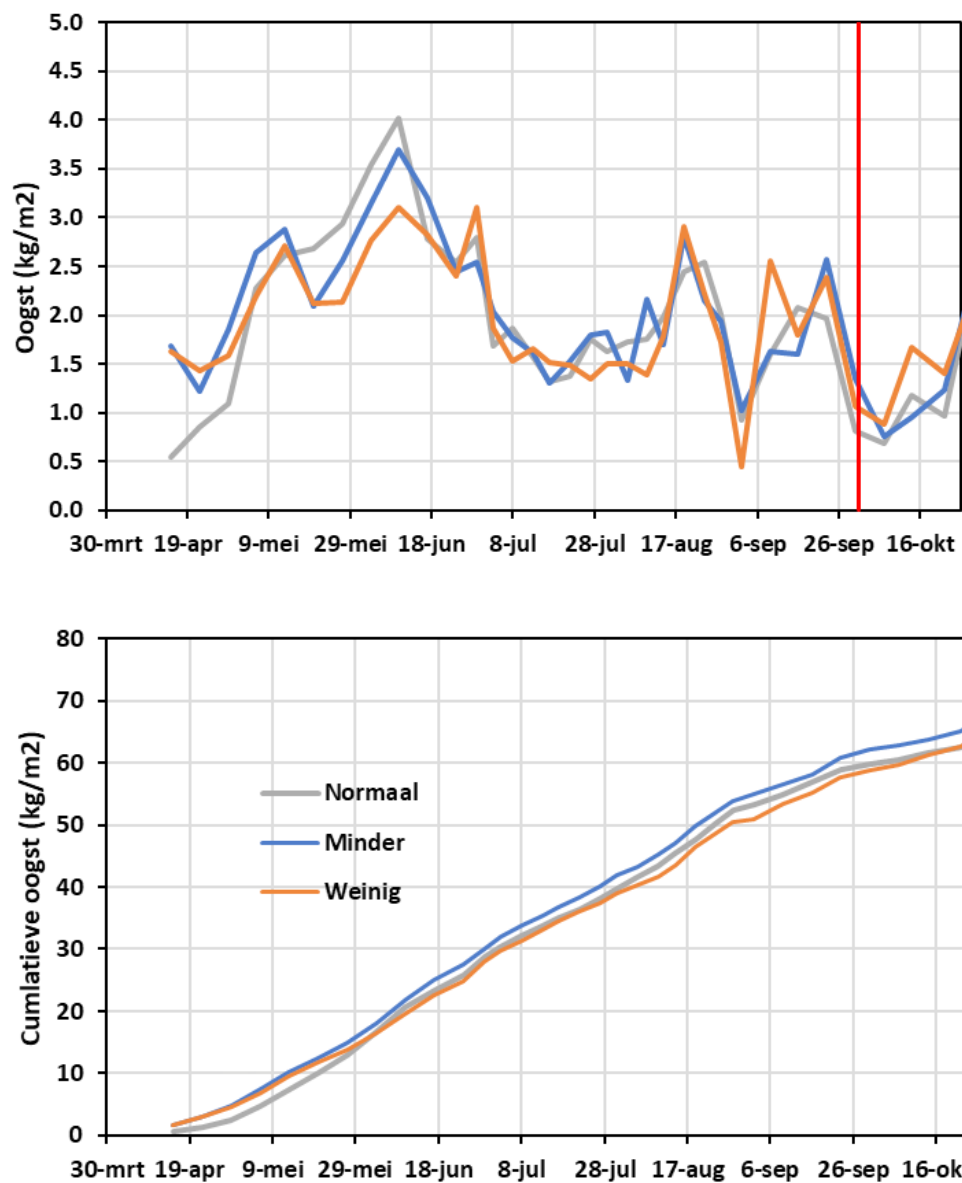
De gemiddelde vruchtgewichten fluctueerden binnen en tussen de behandelingen. Bij "Normaal" was het vruchtgewicht tot medio mei lager dan in de andere behandelingen, vervolgens een maand zwaarder, daarna gelijk en in het najaar lichter dan bij de andere behandelingen (Figuur 3.8). Het in het begin lage vruchtgewicht gecombineerd met de lagere tros aantallen betekende dat "Normaal" in de eerste 8 weken significant minder produceerde dan in "Minder" en "Weinig" (zie ook Tabel 3.2 met waarden per week). Het vruchtgewicht in "Minder" was iets hoger dan in "Weinig" tot half augustus, waarna, afgezien van de nodige fluctuaties, deze behandelingen gemiddeld niet verschilden.

De vruchtoogst gaf een zeer wisselend beeld gedurende de teelt. Bij de start kwam de productie bij "Normaal" langzamer op gang dan bij de andere behandelingen. Dit werd veroorzaakt door slechte zetting en resulteerde in lage tros- en vruchtaantallen en in de eerste 2 weken ook in lager vruchtgewicht. Het productieverhaal was pas in de 5^{de} oogstweek gelijkgetrokken met "Minder" (Figuur 3.8). In de daaropvolgende 5 weken volgde juist een hogere productie bij "Normaal" dan bij "Minder", die weer iets hoger lag dan "Weinig". Die verschillen werden veroorzaakt door de combinatie van hoger tros aantal en hoger vruchtgewicht. Vanaf medio juni zijn de oogstcijfers gelijk tussen de behandelingen. In september begint "Weinig" wat in te lopen qua cumulatieve productie op de andere behandelingen, door een hoger vruchtgewicht en soms een groter aantal trossen. Mogelijk was dit een gevolg van de weer verhoogde CO₂-dosering die vanaf eind augustus weer gelijk liep met de "Minder" behandeling door uitgestelde CO₂-doseringen vanuit de zomermaanden. Deze extra dosering loopt abusievelijk nog door in oktober door een defecte CO₂-sensor (zie toelichting bij 3.1.3; in de figuren aangegeven met een verticale rode lijn).

Samenvattend: de cumulatieve vruchtproducties laten een matige start zien bij "Normaal", die na enkele weken is gecompenseerd door een relatief hogere productie (Figuur 3.9). Vanaf eind mei is de cumulatieve oogst tot einde teelt hoger van "Weinig" ==> "Normaal" ==> "Minder". De laatste 3 weken van oktober zakt "Normaal" naar het niveau van "Weinig". Het verschil tussen "Normaal" en "Weinig" is dus uiteindelijk nihil, en beiden zijn 4% lager dan "Minder".



Figuur 3.8 Gemiddeld vruchtgewicht (boven) en aantal geoogste trossen (onder) in de behandelingen. Rode lijn: moment waarna in 'Weinig' net zoveel als in 'Minder' werd gedoseerd.



Figuur 3.9 Periodieke (boven) en cumulatieve (onder) oogst van de behandelingen. Rode lijn: moment waarna in 'Weinig' net zoveel als in 'Minder' werd gedoseerd.

Tabel 3.2

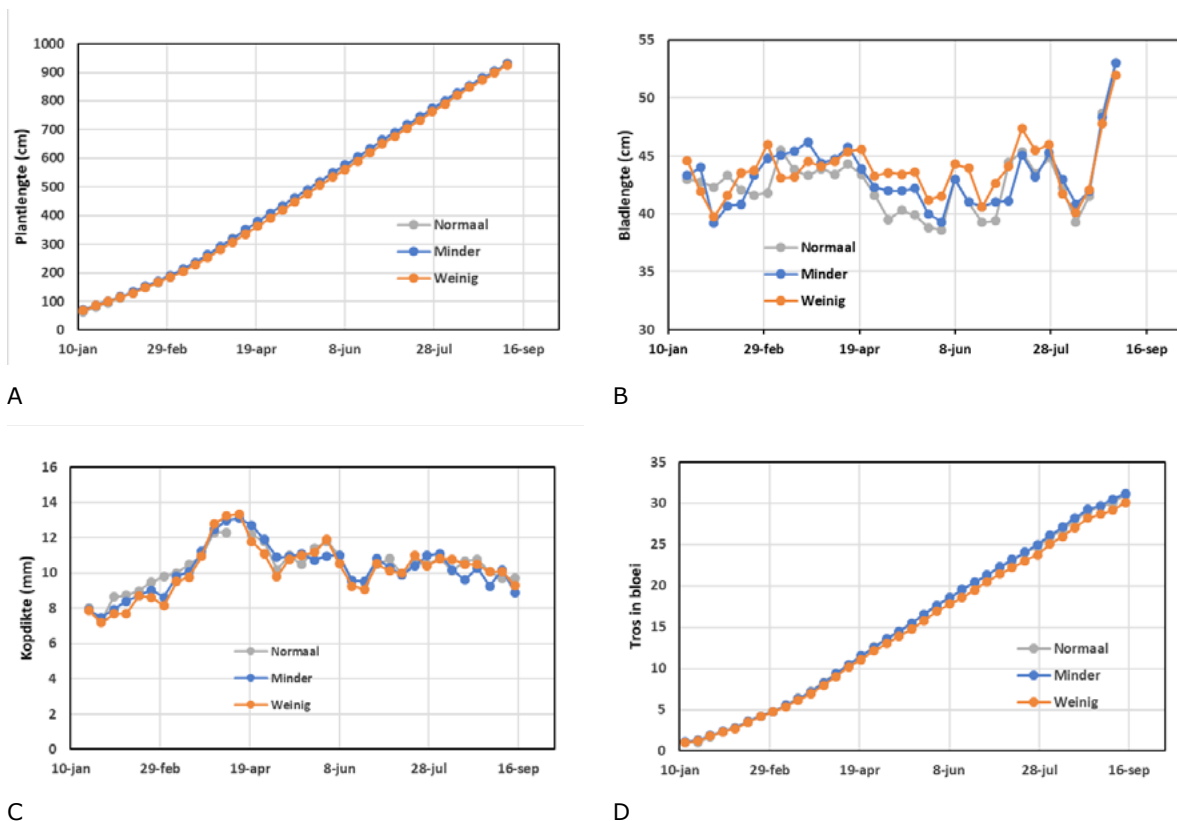
Cumulatieve oogst (kg m⁻²) in de behandelingen (data uit Figuur 3.10).

Datum	Normaal	Minder	einig
15-apr	0.55	1.69	1.63
22-apr	1.40	2.91	3.07
29-apr	2.49	4.77	4.65
06-mei	4.77	7.41	6.84
13-mei	7.38	10.29	9.56
20-mei	10.06	12.39	11.67
27-mei	13.00	14.95	13.81
03-jun	16.54	18.10	16.58
10-jun	20.56	21.79	19.68
17-jun	23.33	24.99	22.50
24-jun	25.88	27.43	24.90
29-jun	28.67	29.98	28.01
03-jul	30.35	32.02	29.87
08-jul	32.22	33.79	31.40
13-jul	33.79	35.40	33.05
17-jul	35.11	36.71	34.57
22-jul	36.48	38.24	36.05
27-jul	38.23	40.03	37.41
31-jul	39.86	41.86	38.91
05-aug	41.58	43.19	40.41
10-aug	43.34	45.35	41.80
14-aug	45.32	47.04	43.59
19-aug	47.76	49.85	46.50
24-aug	50.30	52.00	48.72
28-aug	52.32	53.94	50.45
02-sep	53.24	54.97	50.90
9-sep	54.83	56.59	53.45
16-sep	56.91	58.19	55.25
23-sep	58.87	60.76	57.64
30-sep	59.69	62.10	58.71
07-okt	60.39	62.86	59.59
14-okt	61.56	63.82	61.26
22-okt	62.53	65.06	62.67
28-okt	64.70	67.28	64.78
Incl groen	67.65	70.54	67.66

3.3.2 Gewasgroei

Het gewas ontwikkelde zich in de eerste maand na planten traag omdat de etmaaltemperatuur op 15°C werd gehouden ter vermindering van een tengere plant die ontstaat bij hogere temperatuur in combinatie met de relatief donkere kas. Halverwege januari verschenen de eerste bloeiwijzen. De zetting was bij eerste en tweede tros moeizaam, met name bij behandeling "Normaal". Dit komt vermoedelijk doordat dit de donkerste kas van de drie afdelingen was, vanwege lichtwegvang (tijdelijk) door een hoog gewas in de afdeling die er zuidelijk aan grensde. Die lichtreductie werd niet waargenomen met de PAR-sensor, die midden in de afdeling was gesitueerd.

De wekelijkse metingen aan 12 meetplanten per behandeling zijn volgens schema verlopen, zonder uitvallende planten. Aan deze planten zijn geen verschillen in lengtegroei tussen de behandelingen waargenomen (Figuur 3.10A). De bladlengte was in de "Normaal" behandeling in het voorjaar 2 a 3 cm kleiner dan in de overige behandelingen, die onderling niet verschilden (Figuur 3.10B). De kopdikte verschilde ook enige mate tussen de behandelingen. In het voorjaar was de kop dikker van "Weinig", naar "Minder" en het dikst in "Normaal". In de rest van de teelt waren de verschillen wisselend, wel is aan het eind de kop bij "Minder" dunner dan van de andere twee behandelingen (Figuur 3.10C). Het totaal aantal gevormde trossen totdat de kop er uit werd gehaald was in "Normaal" en "Minder" 31 per stengel, in "Weinig" 30 (Figuur 3.10D). Dit is toch ruim 3% minder aan trossen en een aanzienlijk verschil. Dit geeft een verschil in ontwikkelingssnelheid aan dat waarschijnlijk gerelateerd is aan assimilaten aanbod.



Figuur 3.10 Plant- en bladlengte, kopdikte en cumulatief aantal bloeiende trossen in de drie behandelingen volgens de wekelijkse plantregistraties

De LAI ontwikkelde zich in begin van de teelt gelijk tussen de afdelingen. In maart werd met de CO₂-behandelingen gestart en dit kan geleid hebben tot een dunner blad in behandeling "Weinig" in juni, met een hoger specifiek bladoppervlak (zie Bijlage 1). Dit resulteerde bij de gemeten bladbiomassa, vergelijkbaar aan die bij "Minder", in een hogere LAI dan de overige behandelingen (Tabel 3.3). "Normaal" bezat wat meer bladbiomassa dan "Minder" en had dus ook een hogere LAI. Aan het eind van de teelt is de LAI weer bepaald en gaf een ongewijzigd beeld te zien: de LAI was groter in de volgorde "Minder" < "Normaal" < "Weinig". Ook op dat meetmoment was het blad van "Weinig" het dunst (Bijlage 1). Bij de laatste meting was de LAI lager dan gedurende de teelt, uiteraard doordat 15 september de kop uit de plant was gehaald.

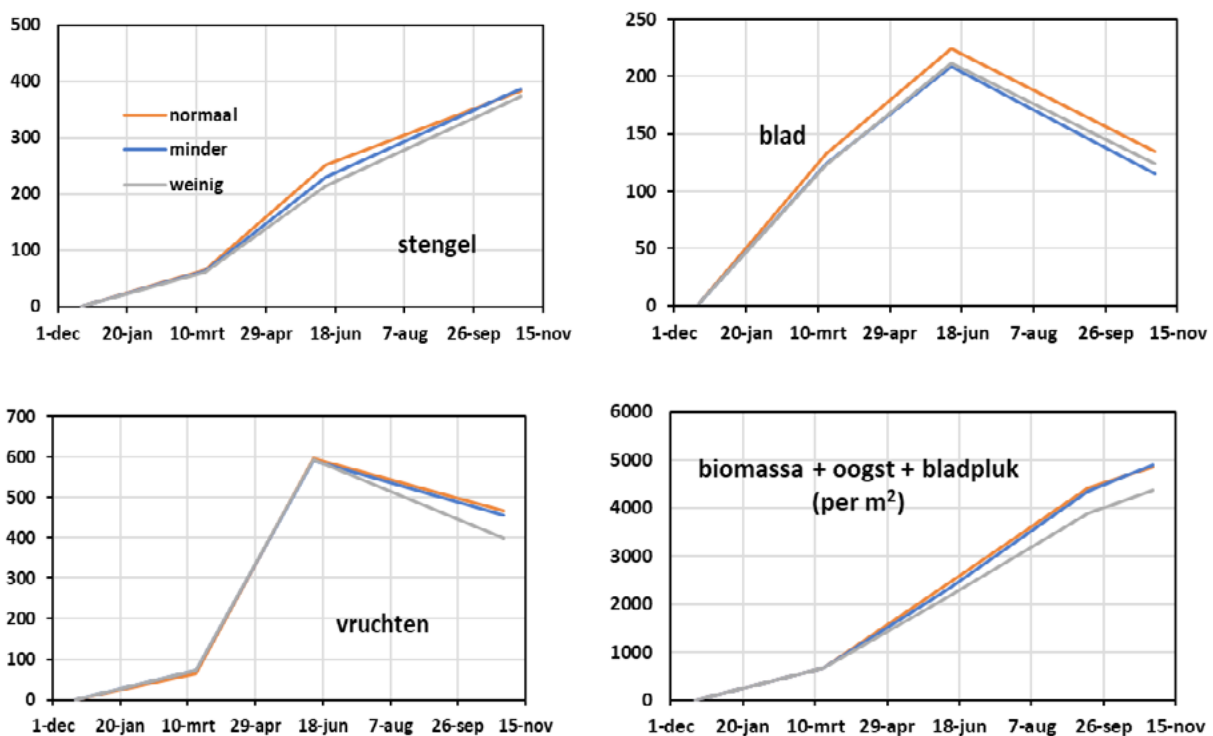
Tabel 3.3

LAI-verloop in de behandelingen.

Datum	Normaal	Minder	Weinig
18 dec '19	0.08	0.08	0.08
16 maart '20	3.25	3.21	3.23
11 juni '20	3.57	3.49	3.81
28 okt '20	2.15	1.78	2.55

3.3.3 Destructieve tussen oogsten en eind oogst: biomassa en koolstof opslag

Het gewas in "Normaal" had de gehele teelt de grootste biomassa en "Weinig" de minste (Figuur 3.11). Vooral de hogere stengel- en bladbiomassa in juni bij "Normaal" waren opmerkelijk, en duiden op een extra opslag van CO₂. De som van de biomassa aan het einde van de teelt en de biomassa van de totale oogst en bladpluk blijkt nauwelijks te verschillen tussen "Normaal" en "Minder", terwijl "Weinig" 10% lager uitvalt (Figuur 3.11). De lage waarde voor "Weinig" komt door een lagere productie dan "Minder" en de laagste eindbiomassa (vooral door lager aantal groene vruchten).



Figuur 3.11 Biomassa (g drogestof per m²) van gesloopte planten (n=5) in de behandelingen op 4 momenten (start proef op 17 dec, op 11 maart, 16 juni en 28 oktober, eind van de proef), voor stengel, blad aan de plant, vruchten aan de plant en het planttotaal inclusief geplukt blad en oogst van de meetplanten.

De planten in behandeling 'Normaal' bleken aan het eind van de teelt het zwaarst van alle behandelingen (Tabel 3.4). Dit bleek ook al bij de plantmeting in juni (2^{de} meetpunt in Figuur 3.11) en in de maanden daarna. Tevens produceerde deze behandeling de meeste bladbiomassa. Evenwel heeft behandeling 'Minder' iets meer drogestof geproduceerd dan 'Normaal' vanwege een hogere vruchtproductie, en daarmee de meeste CO₂ opgenomen van alle behandelingen. Het verschil met behandeling 'Normaal' is zeer klein (1%). Daarentegen was de biomassa van stengels en vruchten (zowel aan plant als geoogst) bij 'Weinig' het minst van alle behandelingen (Tabel 3.4 en Figuur 3.11). De totale drogestofproductie van "Weinig" was daardoor duidelijk minder (-10%) dan van het gemiddelde van de andere twee behandelingen (Tabel 3.5). De bladbiomassa bij 'Weinig' hield het midden tussen 'Normaal' en 'Minder'. Eerder werd al vermeld dat door een dunner blad het gewas bij 'Weinig' wel het grootste bladoppervlak van alle behandelingen had (§3.3.2 en Bijlage 1).

Tabel 3.4

Plantbiomassa aan het eind van de teelt in de drie behandelingen, in gram drogestof per m². Vruchtbijomassa en -aantal is van niet geoogst groen fruit.

Behandeling	Blad	Vrucht (g DS per stengel)	Stengel	Totaal	#vruchten
Normaal	54	187	312	553	29
Minder	47	183	304	544	30
Weinig	50	160	315	513	25

De som van biomassaproductie is dus bepaald door weging van destructief gemeten "sloopplanten" aangevuld met vruchtproductie en bladpluk van de meetplanten. De vruchtproductie bepaald ongeveer 60-70% van de totale drogestofproductie, en ook deze vruchtproductie laat vergelijkbare verschillen tussen de behandelingen zien: geen verschil tussen "Normaal" en "Minder", en daarnaast "Weinig" met een 10% lagere productie (Figuur 1D in Bijlage 3).

Er is geen duidelijke verschuiving in drogestofverdeling te zien (Tabel 3.5). Door de lagere oogst van de hele afdeling van "Normaal" t.o.v. "Minder" zou daar wellicht veel meer biomassa naar stengel en blad zijn gealloceerd. Dit is echter bij de meetplanten slechts een minimale toename van 1%, voor zowel "Normaal" als "Weinig", t.o.v. "Minder".

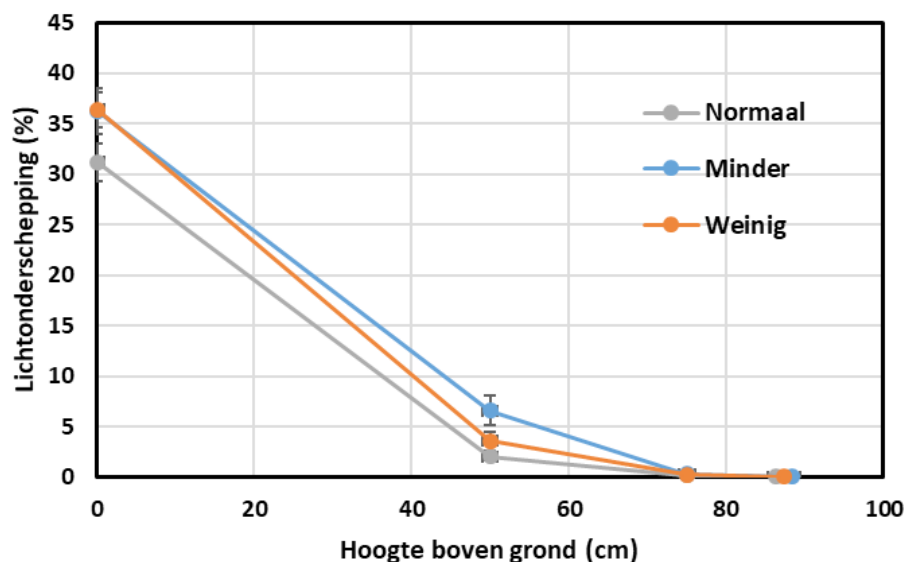
Tabel 3.5

Totale drogestofproductie (som van oogst, bladpluk en plantbiomassa aan eind van de teelt) volgens de 12 meetplanten in de drie behandelingen, in gram drogestof per m². Zie ook laatste meetpunt in Figuur 3.11 (rechts onder). Tevens is de drogestofverdeling naar de vrucht en de totale CO₂-opslag in biomassa vermeld.

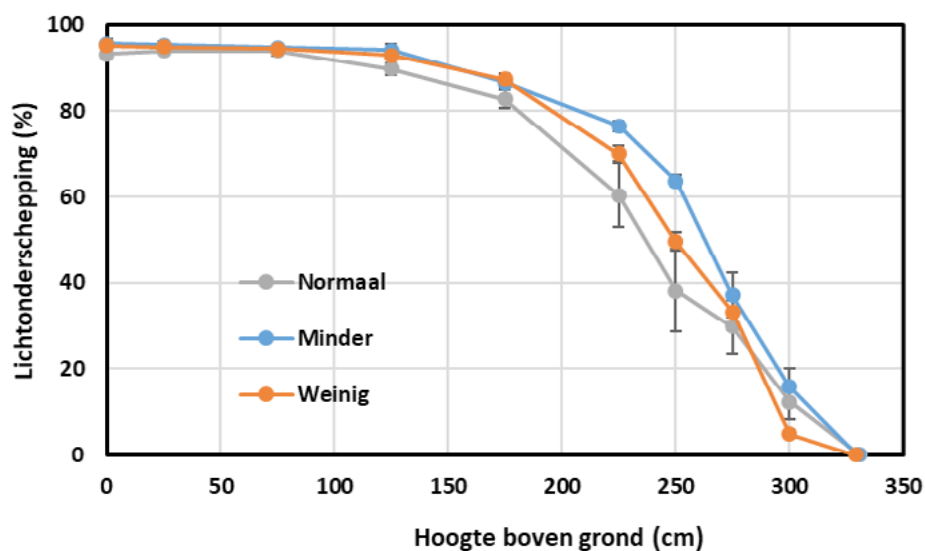
Behandeling	Plant	Vruchten	Bladpluk	Totaal	% naar vrucht	CO ₂ (kg m ⁻²)
Normaal	1083	3003	764	4851	62	7.11
Minder	1053	3095	745	4893	63	7.18
Weinig	986	2725	658	4369	62	6.41

3.4 Lichtonderschepping

Op beide tijdstippen dat de lichtonderschepping is bepaald bleek dat de lichtgradiënt verschilde tussen de behandelingen. In januari bleek "Normaal" in totaal minder licht te onderscheppen dan "Minder" en "Weinig" (Figuur 3.12). Dit verschil is waarschijnlijk te herleiden tot de mogelijk donkerder zuidhelft van de afdeling (niet gemeten), waarbij "Normaal" de kleinste planten heeft. In mei is het verschil veroorzaakt door CO₂-aanbod: "Normaal" heeft korter, dikker blad en een opener gewasstructuur, "Weinig" heeft een minder stevige plant, en met name het kleinere blad bij "Normaal" zorgt voor de lage lichtonderschepping midden in het gewas (Figuur 3.13). De totale lichtonderschepping gemeten onder het gewas is wel gelijk tussen de behandelingen en bedraagt 95%.



Figuur 3.12 Lichtonderschepping in de drie behandelingen zoals gemeten op 30 januari 2020.



Figuur 3.13 Lichtonderschepping in de drie behandelingen zoals gemeten op 11 mei 2020.

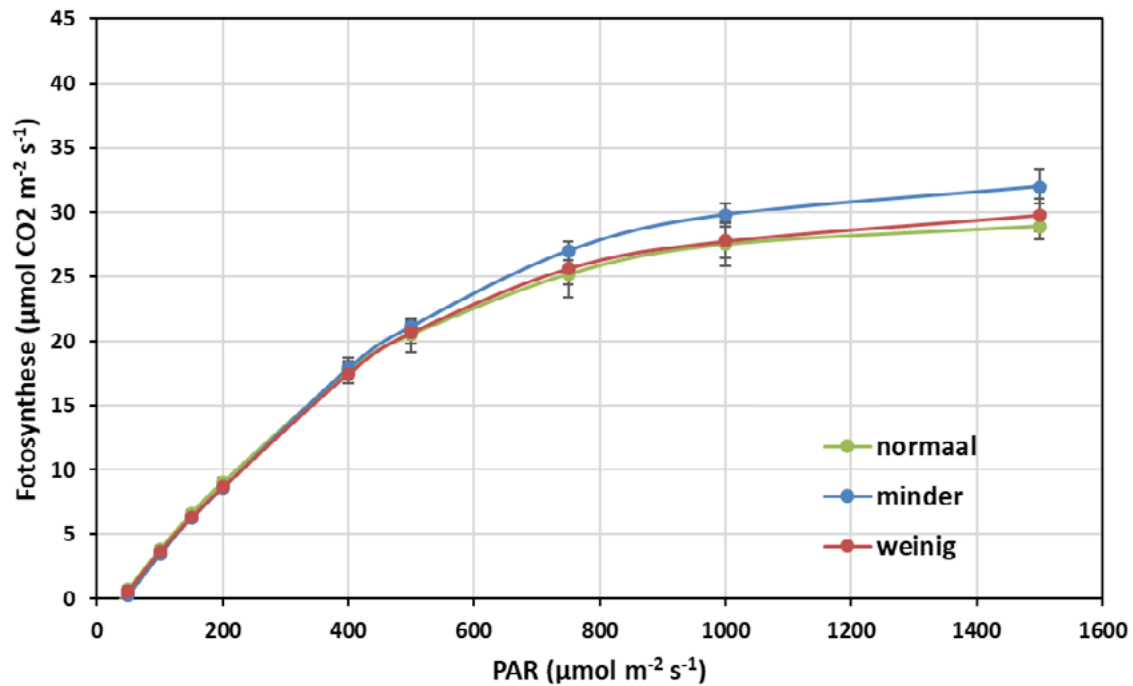
3.5 Fotosynthese

De fotosynthese is gemeten op het moment dat de CO₂-behandelingen inmiddels drie maanden waren toegepast zodat er in het gewas al een mogelijke aanpassing zichtbaar zou zijn. Tevens is direct na de zomerperiode, in september, de fotosynthese bepaald, om te zien of de behandelingen effectief waren geweest ondanks de vele ventilatie die in de zomer plaats vond. De fotosynthesekarakteristieken zijn bepaald voor de respons op PAR, op CO₂ en op temperatuur.

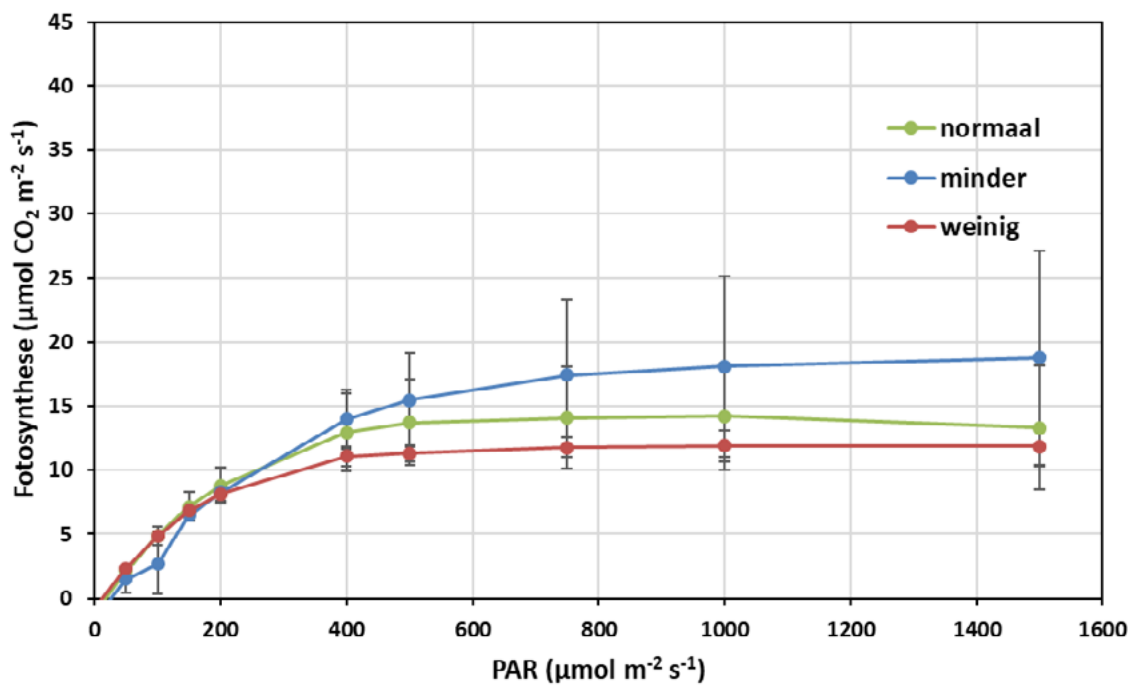
3.5.1 Juni

De fotosynthesesnelheid is niet significant verschillend tussen de behandelingen bij 400 ppm CO₂, ondanks de schijnbaar hogere fotosynthese bij behandeling 'minder' bij de hogere lichtniveaus (Figuur 3.14). De variatie tussen de metingen is betrekkelijk hoog bij de metingen laag in het gewas, en dan met name bij behandeling 'minder'. Dit geldt met name voor de toegediende hoge lichtintensiteiten, die normaal niet voorkomen onderin het gewas.

Boven in gewas:

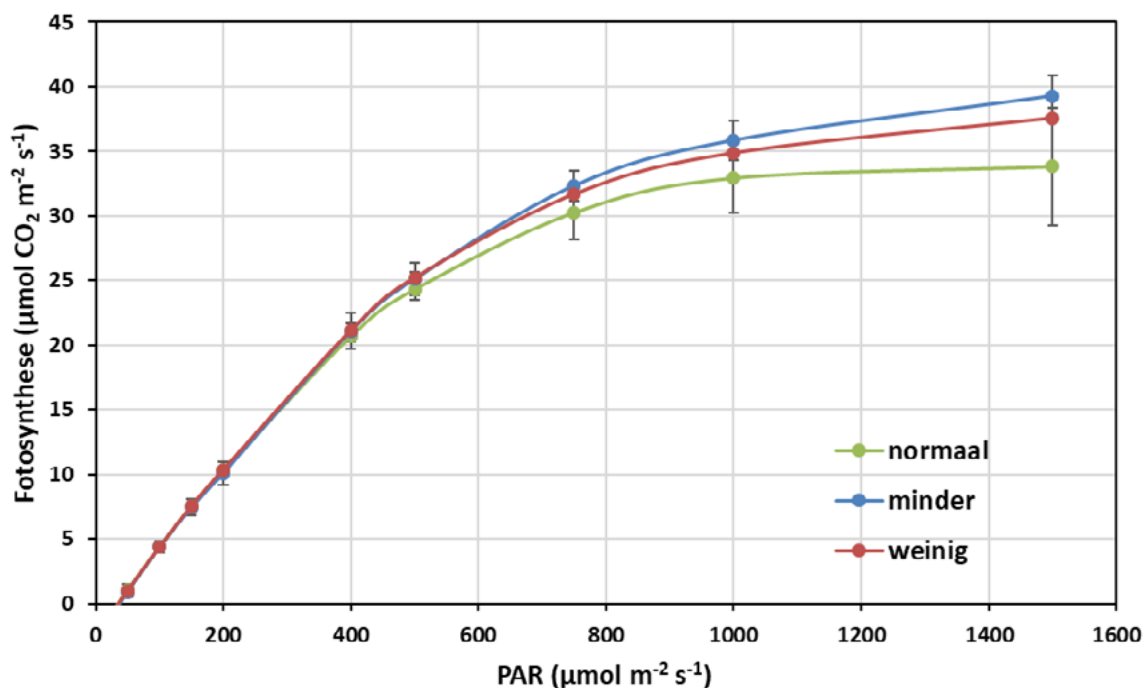


Onder in gewas:

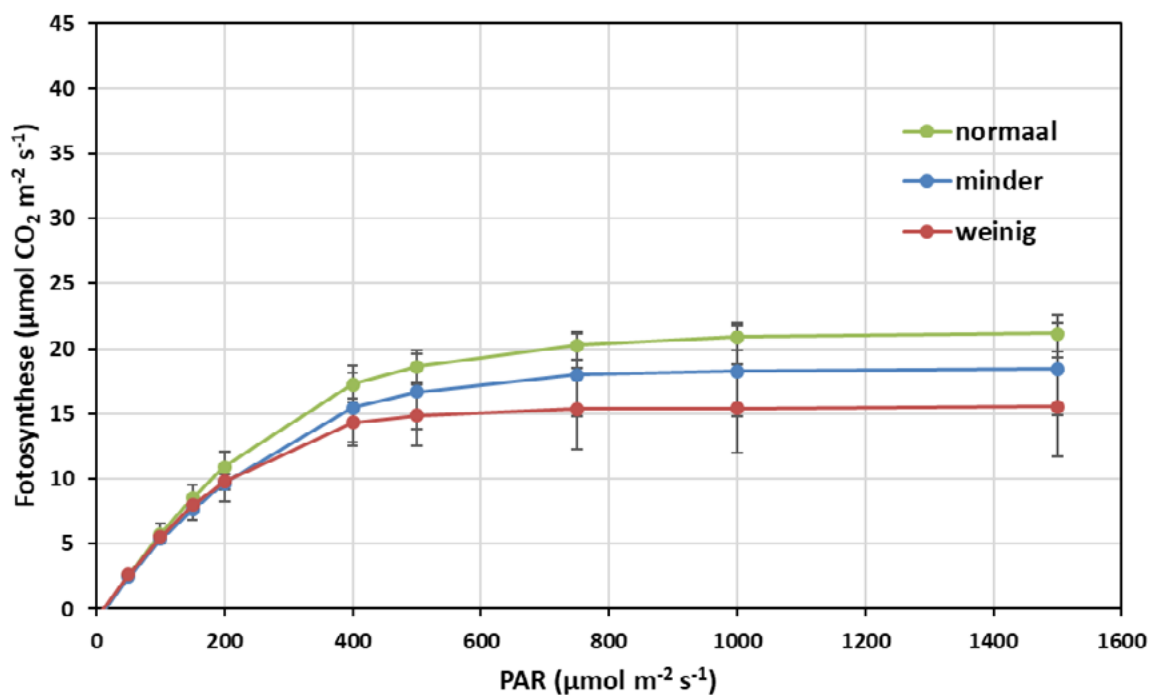


Figuur 3.14 Lichtrespons van fotosynthese in de 3 behandelingen, boven en onder in gewas, bij 400 ppm CO_2 .

Boven in het gewas :



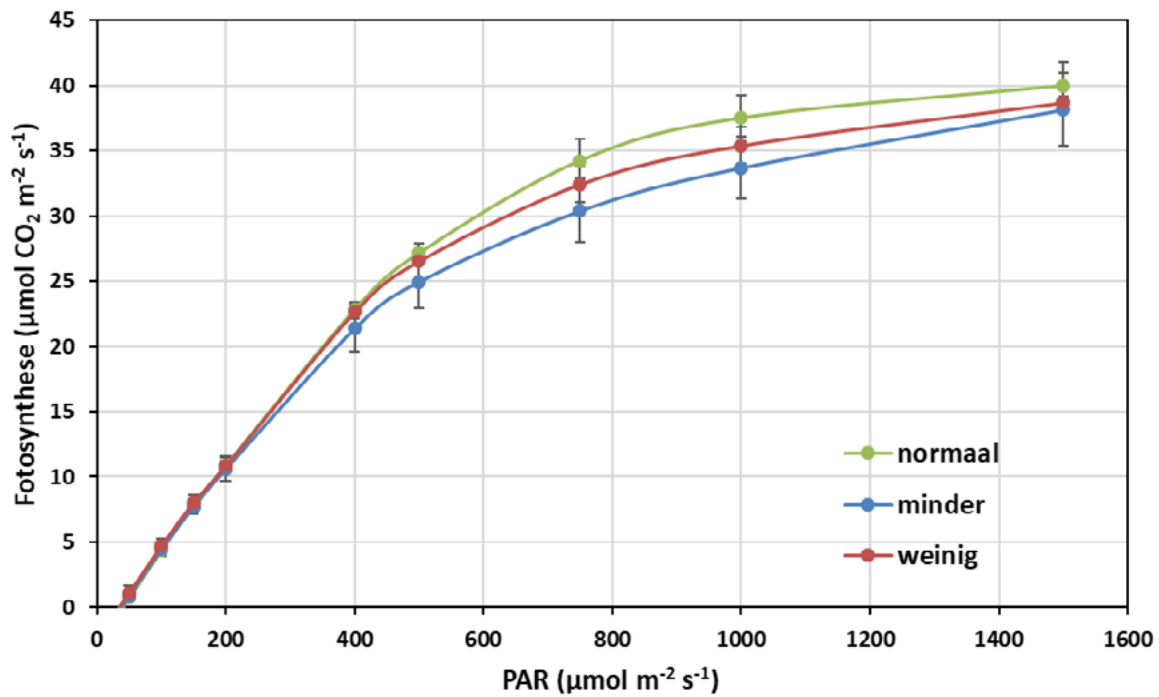
Onder in gewas:



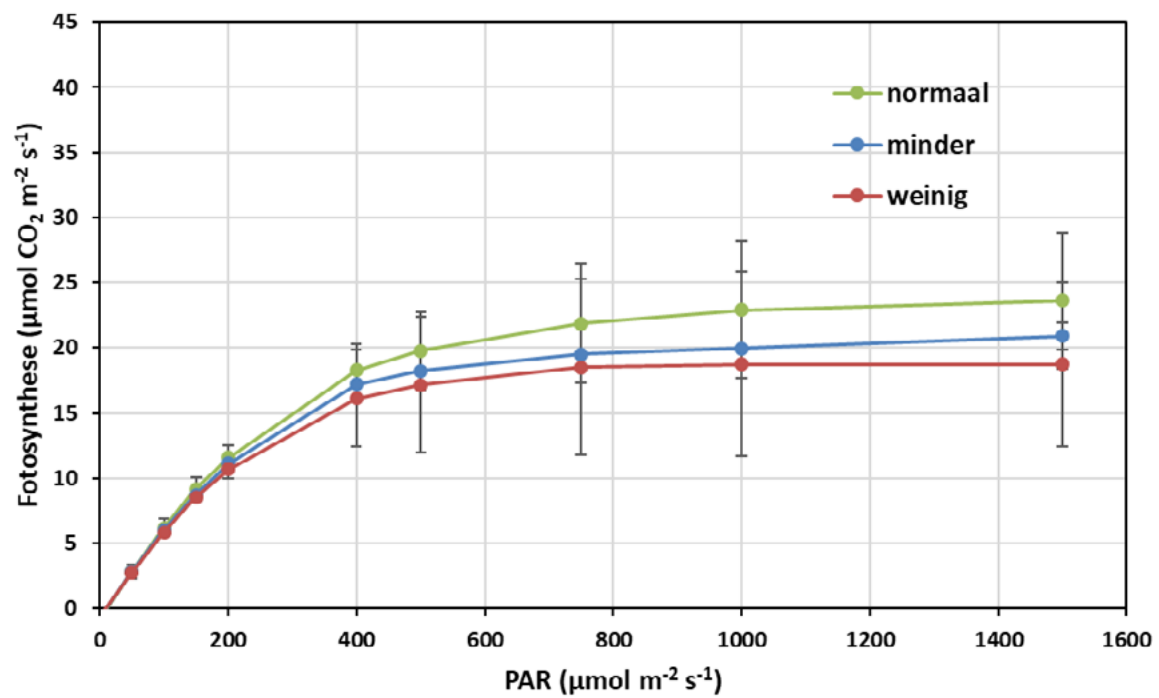
Figuur 3.15 Lichtrespons van fotosynthese in de 3 behandelingen, boven en onder in gewas, bij 600 ppm CO₂.

De fotosynthese bij 600 ppm lijkt bij 'normaal' boven in het gewas iets lager bij hogere lichtniveaus maar is door de spreiding tussen de metingen niet significant lager. De verschillen in fotosynthese onderin het gewas zijn wel significant, en neemt toe van 'weinig' naar 'minder' naar 'normaal' (Figuur 3.15). Dit beeld is ook te zien bij 800 ppm CO₂ (Figuur 3.16) en bij de CO₂-respons curven onderin het gewas (Figuur 3.17 en 3.18). Mogelijk vertraagt de hogere CO₂-concentratie tijdens de veroudering van het blad de onttrekking van stikstof, waardoor Rubisco en daarmee de carboxylatiesnelheid (VC_{max}) minder snel met de bladleeftijd afnemen.

Boven in het gewas:

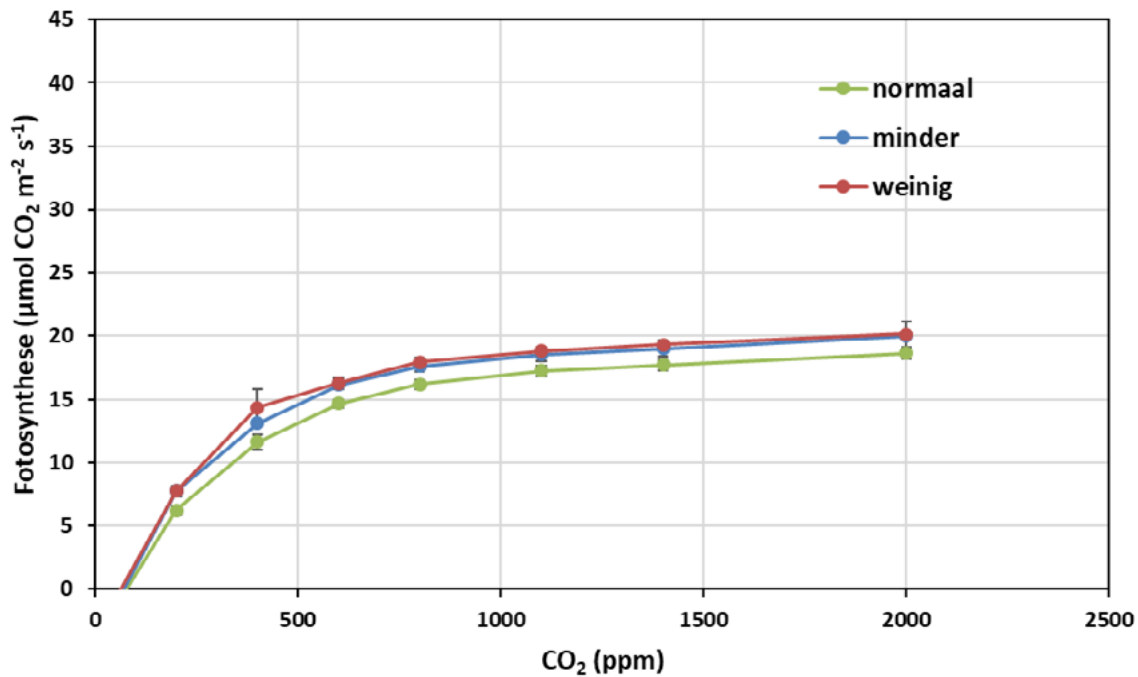


Onder in gewas:

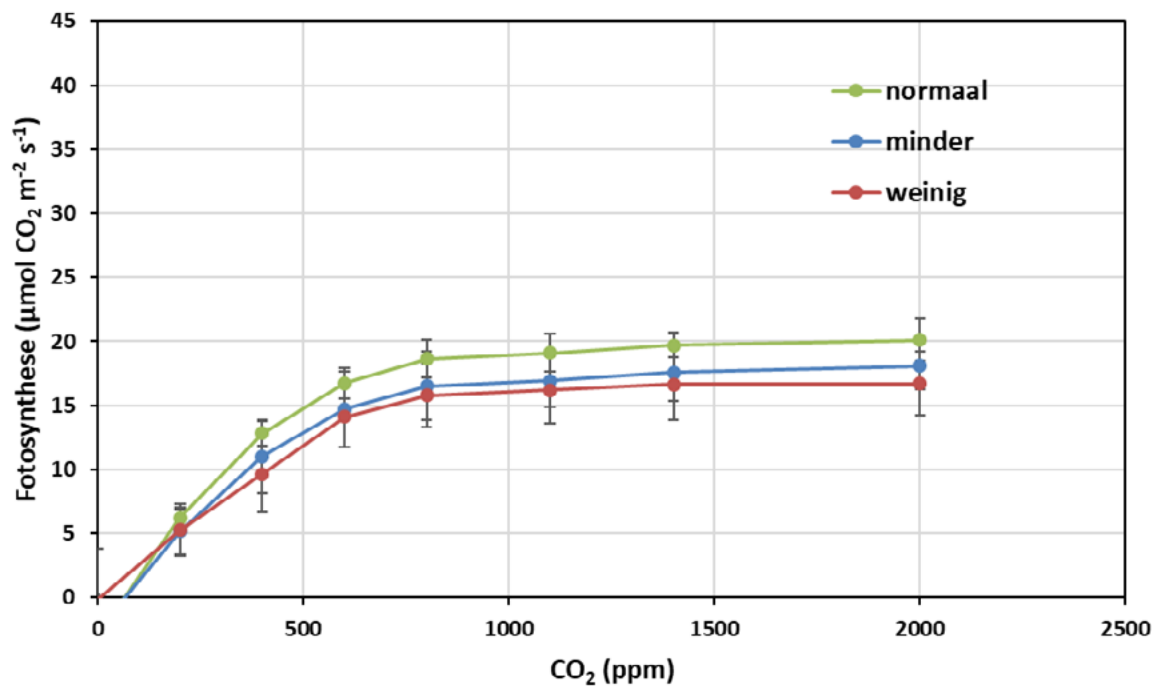


Figuur 3.16 Lichtrespons van fotosynthese in de 3 behandelingen, boven en onder in gewas, bij 800 ppm CO_2 .

Boven in het gewas:

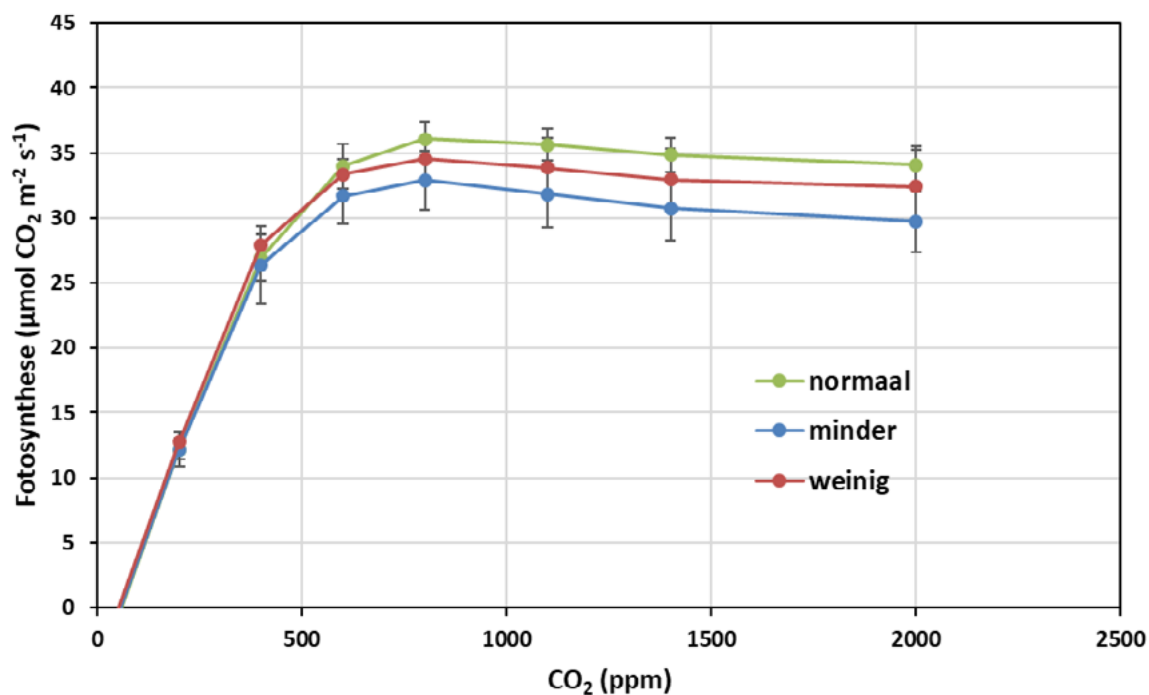


Onder in gewas:

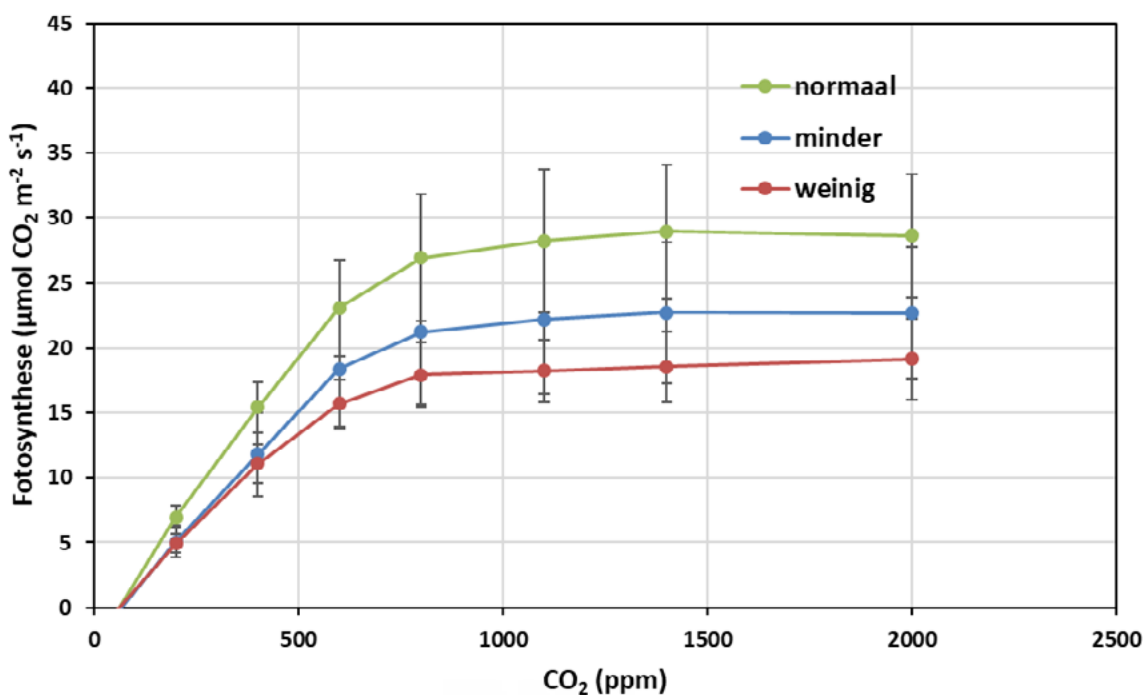


Figuur 3.17 CO₂-respons van fotosynthese in de 3 behandelingen, boven en onder in gewas, bij 300 $\mu\text{mol PAR}$.

Boven in het gewas:



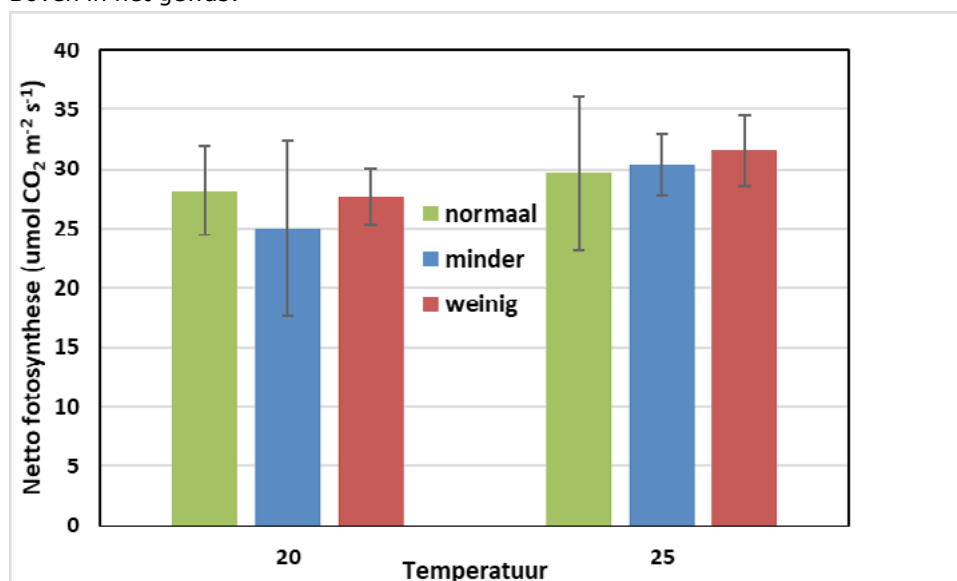
Onder in gewas:



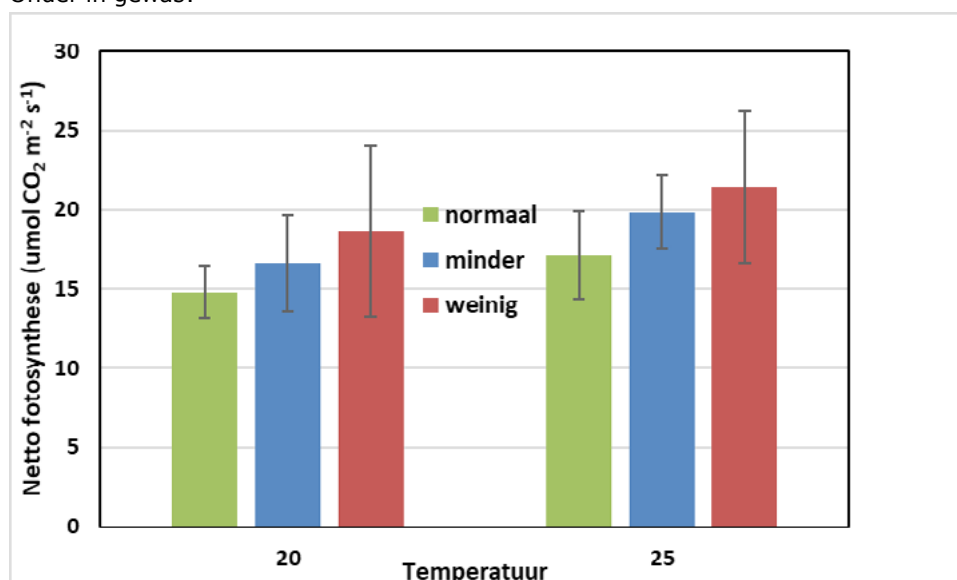
Figuur 3.18 CO₂-respons van fotosynthese in de 3 behandelingen, boven en onder in gewas, bij 1500 μmol PAR.

In juni is er geen verschil in temperatuurrepons van de fotosynthese gevonden bij de drie CO₂-behandelingen: bij beide temperaturen is de fotosynthese gemiddeld gelijk (Figuur 3.19). Er lijkt een lichte trend waarneembaar dat "Weinig" meer fotosynthese heeft bij het onderste bladpakket.

Boven in het gewas:



Onder in gewas:

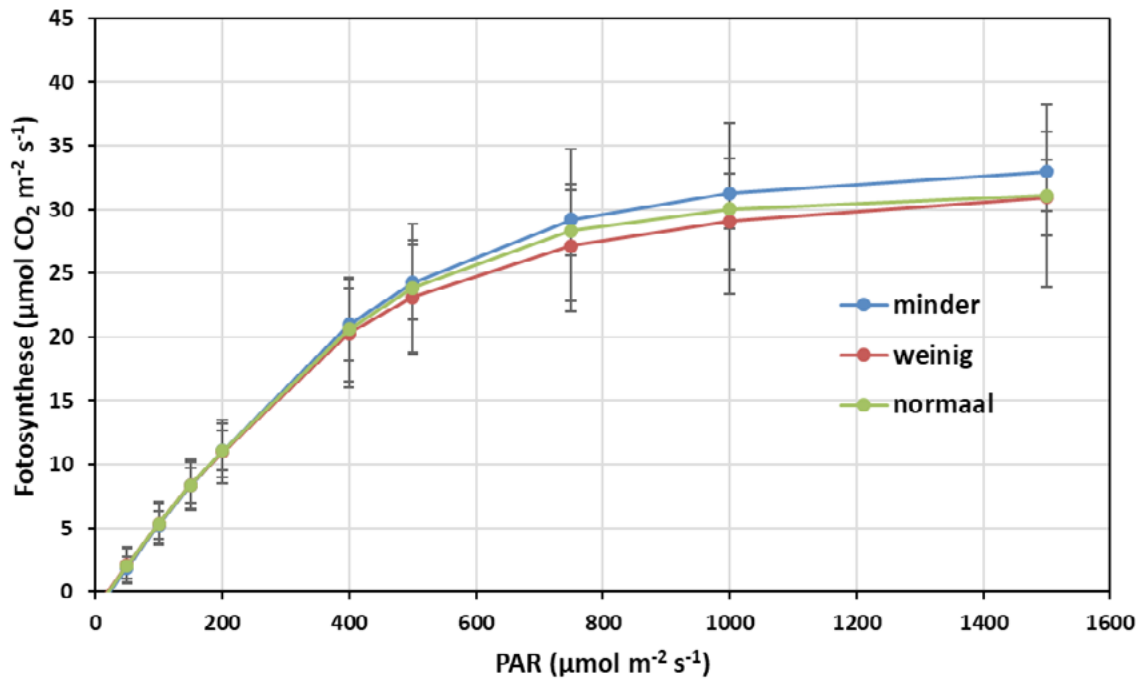


Figuur 3.19 Fotosynthese bij 20 en 25°C in de 3 behandelingen, boven en onder in gewas, bij 1250 $\mu\text{mol PAR}$ en 600 ppm CO_2 .

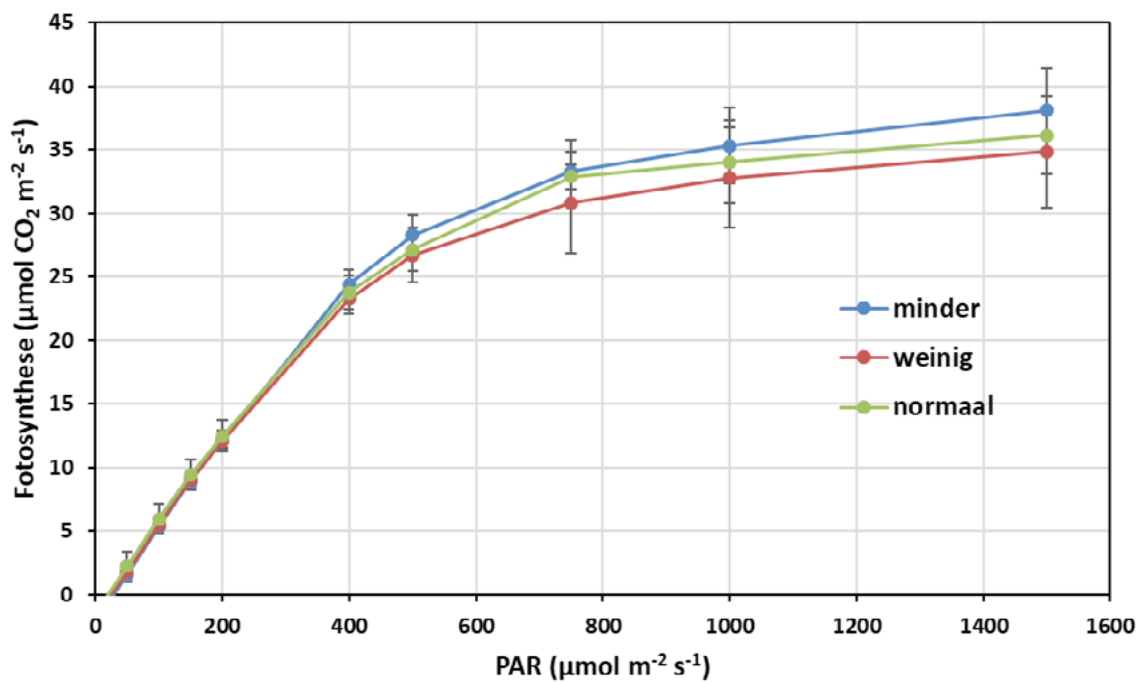
3.5.2 September

Op dit tijdstip is alleen het blad bovenin het gewas doorgemeten op fotosynthese karakteristieken. Er zijn geen significante verschillen tussen de behandelingen, maar wel een lichte tendens: een toename van fotosynthese capaciteit van "Weinig" < "Normaal" < "Minder". Opmerkelijk, aangezien dit dezelfde tendens is als wordt gezien in de productiecijfers. Doordat onderin het gewas niet is gemeten kan de tendens van juni dat "Weinig" lager is dan de andere behandelingen niet bevestigd worden.

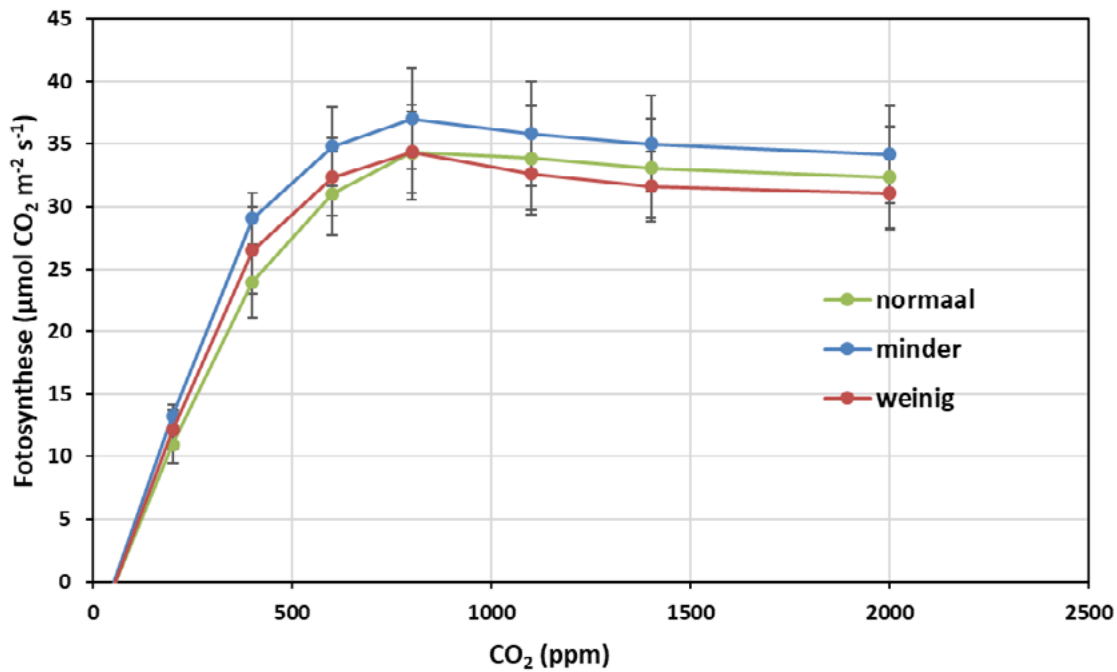
Bij 400 ppm CO₂



Bij 800 ppm CO₂

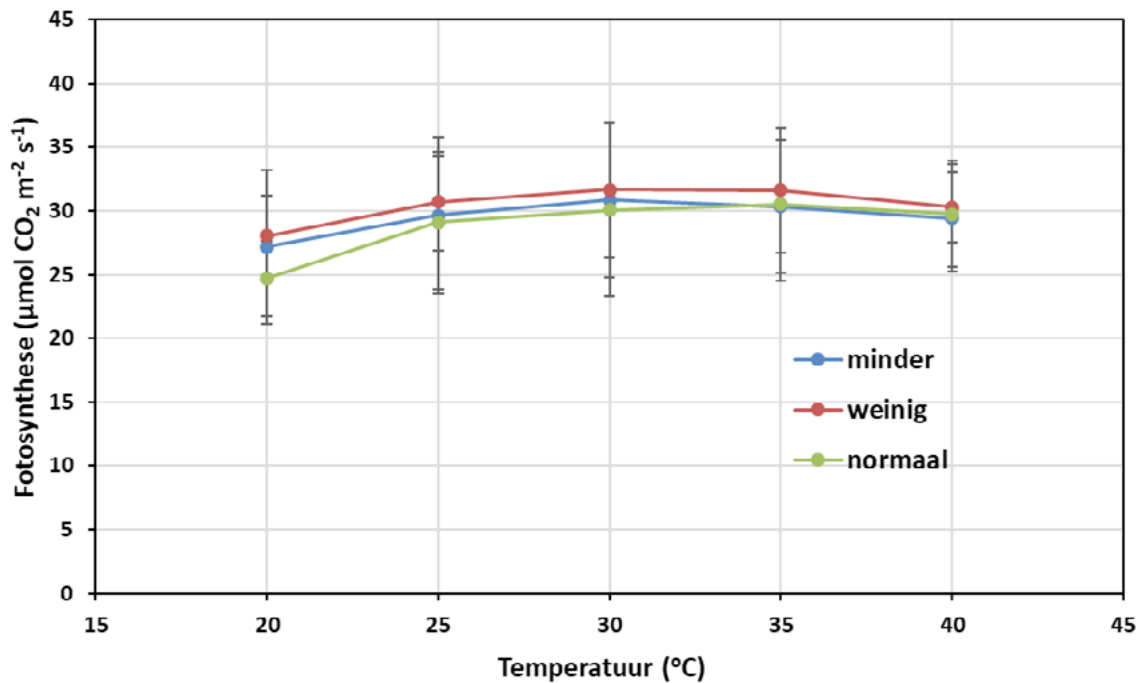


Figuur 3.20 Lichtrespons van fotosynthese in de 3 behandelingen, boven in het gewas, bij 400 en 800 ppm CO₂.



Figuur 3.21 CO₂-respons van fotosynthese in de 3 behandelingen, boven in het gewas, bij 1500 μmol PAR.

Het temperatuuroptimum voor de fotosynthese blijkt zich tussen 30 en 35°C te bevinden, terwijl zelfs bij 40°C nog een fotosynthese plaats vind vergelijkbaar met die bij 25°C (Figuur 3.22). Er zijn geen duidelijke verschillen tussen de behandelingen.



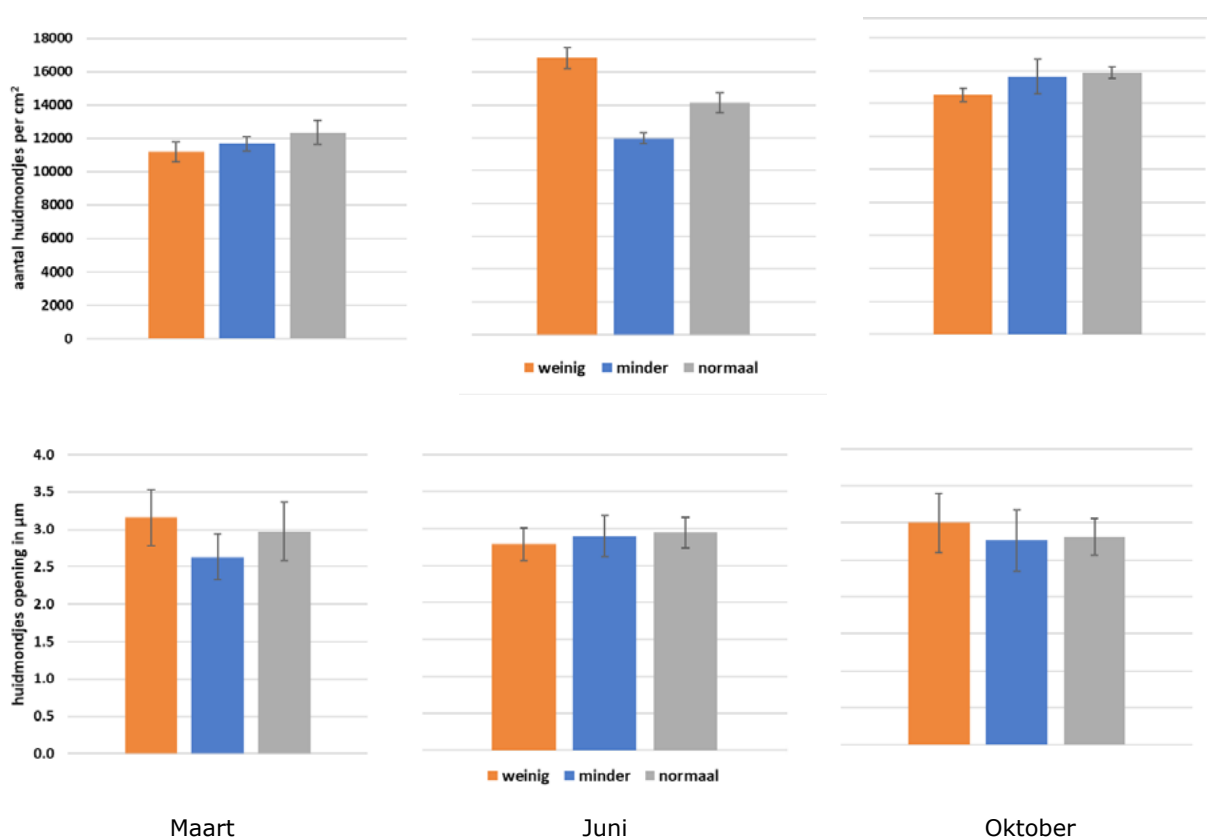
Figuur 3.22 Temperatuurrepons van fotosynthese in de 3 behandelingen, boven in het gewas, bij 1200 μmol PAR en 600 ppm CO₂

Samenvattend: in juni en september is er geen significant verschil gemeten in de fotosynthese karakteristiek, dus zowel in de respons op PAR als op CO₂. Hierbij is de parameter die de efficiëntie van de conversie van licht naar fotosynthese aangeeft (initiële helling van de curve) niet verschillend. Tevens is de potentiële carboxylatie snelheid Vcmax (evenredig aan het maximum van de lijn), die mogelijk wijzigt bij adaptatie aan meerdaagse lagere of hogere CO₂-concentraties, niet verschillend tussen de behandelingen.

3.6 Huidmondjes

Het huidmondjesaantal is bij de start van de behandelingen in maart niet verschillend tussen de afdelingen (Figuur 3.23). Dit geldt ook voor de huidmondjesopening. De 'minder' behandeling geeft een wat lagere waarde aan, maar deze is niet significant gezien de grote standaardafwijking.

In juni, als de CO₂-behandelingen ruim drie maanden bezig zijn, is het aantal huidmondjes significant hoger in de 'weinig' behandeling t.o.v. de andere twee behandelingen die onderling niet significant verschillen. In oktober, aan het eind van de teelt, zijn zowel huidmondjesaantal als – opening niet verschillend tussen de afdelingen.



Figuur 3.23 Huidmondjesaantal (boven) en -opening (onder) op drie tijdstippen in de teelt

3.7 Vruchtkwaliteit

Er zijn slechts zeer kleine verschillen in vruchtkwaliteit waargenomen (Tabel 3.6). Op 23 september is het Brix-getal en het zuurgehalte hoger in "Minder". De "Bite" lijkt tot 29 juli in "Weinig" hoger dan gemiddeld.

Tabel 3.6

Smaakeigenschappen van tomaat in de behandelingen, op 6 tijdstippen in de teelt. Tomaat geoogst in de noord- (N) of zuidzijde (Z) van de afdeling.

11 mei 2020:

Behandeling	Smaak	Brix	Zuur	%Sap	Bite	Gewicht
Minder N	32	3.9	5.6	23	33	157
Minder Z	30	3.5	5.6	21	41	146
Weinig N	34	3.9	5.6	24	45	152
Weinig Z	32	3.6	5.7	23	48	141
Normaal N	35	3.8	5.3	29	42	155
Normaal Z	34	3.5	5.3	30	38	143

3 juni 2020:

Behandeling	Smaak	Brix	Zuur	%Sap	Bite	Gewicht
Minder N	35	4.1	5.5	25	37	185
Minder Z	34	4.1	5.3	24	39	169
Weinig N	36	4.1	5.4	25	48	168
Weinig Z	34	4.1	5.2	24	44	164
Normaal N	36	4.2	5.2	27	37	181
Normaal Z	33	3.8	5.2	24	48	189

1 juli 2020:

Behandeling	Smaak	Brix	Zuur	%Sap	Bite	Gewicht (g)
Minder N	33	3.9	5.5	26	29	170.3
Minder Z	31	3.5	5.2	26	30	159.6
Weinig N	31	3.5	5.0	26	34	157.7
Weinig Z	34	3.8	5.1	30	28	171.2
Normaal N	34	3.6	5.0	31	33	179.8
Normaal Z	33	3.8	5.2	27	30	176.3

29 juli 2020:

Behandeling	Smaak	Brix	Zuur	%Sap	Bite	Gewicht (g)
Minder N	37	4.2	5.2	30	37	170
Minder Z	37	4.1	5.4	30	37	174
Weinig N	38	4.1	5.2	31	42	168
Weinig Z	36	4.1	5.3	26	43	171
Normaal N	35	4.1	5.1	29	33	179
Normaal Z	35	4.1	5.3	26	36	162

26 aug 2020:

Behandeling	Smaak	Brix	Zuur	%Sap	Bite	Gewicht (g)
Minder N	33	3.9	5.5	26	29	170.3
Minder Z	31	3.5	5.2	26	30	159.6
Weinig N	31	3.5	5.0	26	34	157.7
Weinig Z	34	3.8	5.1	30	28	171.2
Normaal N	34	3.6	5.0	31	33	179.8
Normaal Z	33	3.8	5.2	27	30	176.3

23 sept 2020:

Behandeling	Smaak	Brix	Zuur	%Sap	Bite	Gewicht
Minder N	32	3.5	6.3	21	50	159.4
Minder Z	30	3.3	5.4	25	29	147.1
Weinig N	31	3.1	5.2	29	37	159.6
Weinig Z	28	3.1	5.4	24	29	157.3
Normaal N	32	3.2	5.1	32	33	148.7
Normaal Z	31	3.1	5.2	29	28	178.4

3.7.1 Houdbaarheid

De houdbaarheid is op drie momenten gedurende de teelt gemeten waarbij de verschillen tussen de CO₂-behandelingen wisselden (Tabel 3.7). Op 12 juni lijkt de houdbaarheid toe te nemen van 'Normaal', naar 'Minder' naar 'Weinig'. Op 5 augustus was de gemiddelde houdbaarheid 18 dagen, en waren de verschillen binnen de afdeling groter dan tussen de behandelingen. Op 30 september, 2 weken nadat de kop er uitgehaald was, is zichtbaar dat de houdbaarheid in behandeling 'Normaal' lager is dan in de overige twee behandelingen, die onderling niet verschilden.

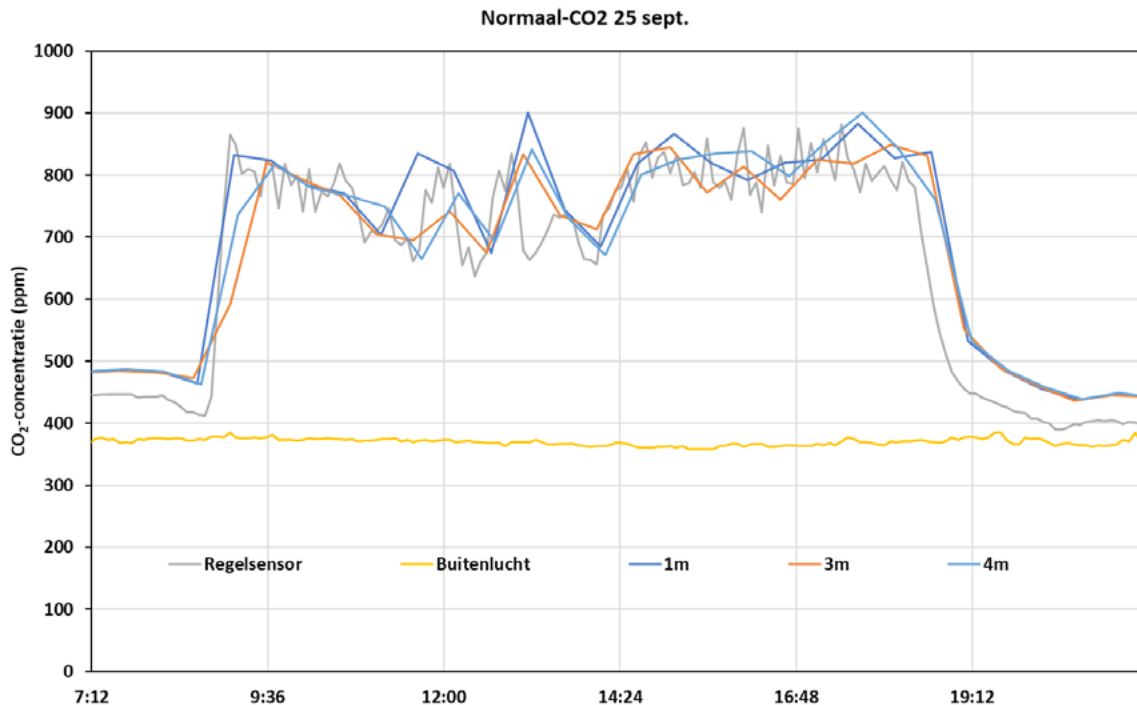
Tabel 3.7

Houdbaarheid van de tomaat uit de behandelingen na oogst op drie tijdstippen. Tomaat geoogst in de noord- (N) of zuidzijde (Z) van de afdeling.

Behandeling	Houdbaarheid (dagen)		
	12 juni	5 augustus	30 september
Normaal N	14.0	18.7	11.7
Normaal Z	16.0	17.5	11.8
Minder N	16.3	17.3	13.2
Minder Z	16.1	18.4	15.1
Weinig N	18.1	18.9	14.0
Weinig Z	18.5	17.8	13.5

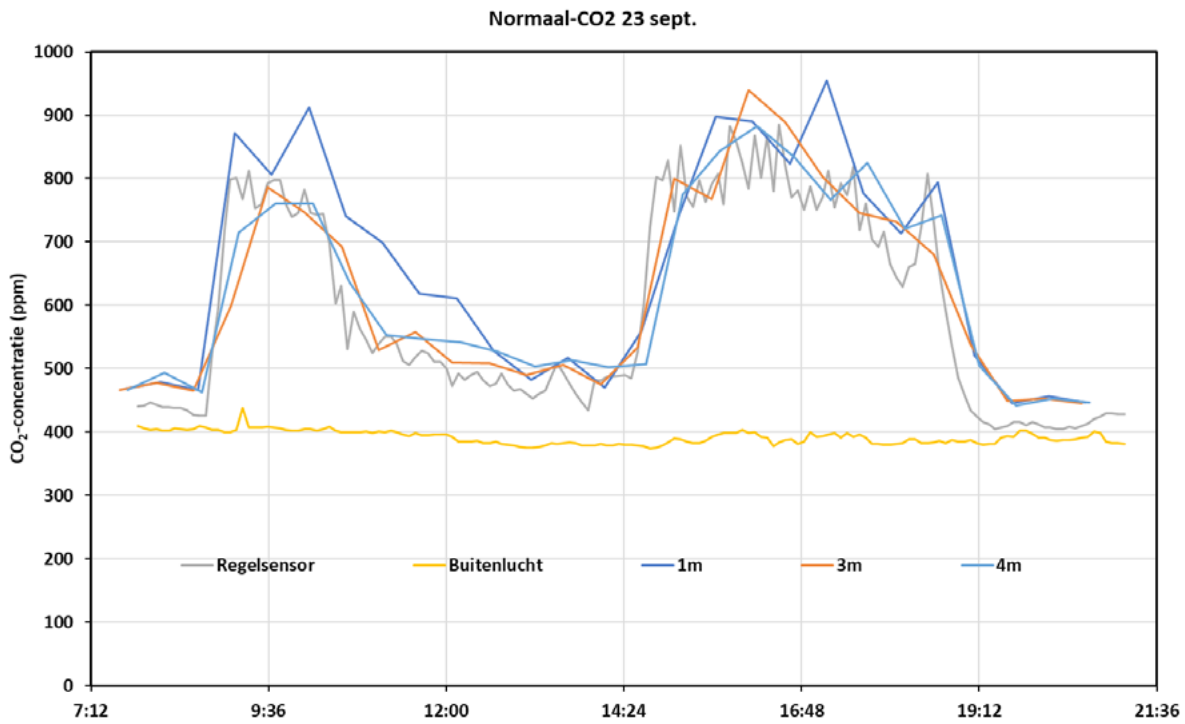
3.8 Verticale verdeling van CO₂

De concentraties op de verschillende hoogten in het gewas zijn bepaald met de 8-kanaals multiplexer. Op dagen dat er weinig gelucht wordt, is er vrijwel geen verschil in CO₂-concentratie tussen de meetpunten op 1, 3 en 4 m hoogte boven de grond (Figuur 3.24).



Figuur 3.24 Verloop van CO₂-concentratie op 25 september op 3 hoogten in behandeling "Normaal", bij regelsensor en in buitenlucht

Met een raamstand groter dan 20% zorgde de uitwisseling met de buitenlucht er voor dat de CO₂-concentratie op 3 en 4 m hoogte al bij de start van de dosering tot 100 ppm lager was dan op 1 m hoogte. In de loop van de ochtend ging dan zelfs op 1 m hoogte de concentratie uiteindelijk naar buitenluchtwaarde, maar herstelde weer snel richting setpoint toen de ramen dicht gingen (rond 14.30hr, zie Figuur 3.25). Vervolgens verdween in de namiddag de gedoseerde CO₂ op alle hoogten ook weer snel door het ruime luchten tot de avond.



Figuur 3.25 Verloop op 23 september van (1) CO₂-concentratie op 3 hoogten in behandeling "Normaal", bij regelsensor en in buitenlucht (boven) en (2) raamstanden in de 3 behandelingen (onder; max. 50%).

4 Resultaten CO₂-berekeningen

In dit hoofdstuk worden de CO₂-stromen in kas en gewas op basis van de metingen herleid. Tevens is het kas- en gewasmodel gebruikt om vervolgens de teeltproef door te rekenen gerekend om ontbrekende CO₂-stromen zoals fotosynthese en ventilatieverliezen per uur te berekenen. Daarvoor is het model m.b.v. de proefmetingen eerst geijkt. Daarna is het model ingezet om een andere teelt- en/of doseerstrategie door te rekenen die mogelijk meer CO₂ benut of meer productie oplevert.

4.1 Gemeten CO₂-opname door het gewas

De opgenomen CO₂ is berekend door middel van de gemeten totale drogestofproductie bestaande uit vruchtproductie en plantengroei. Iedere kilo drogestof bestaat uit een gedeelte C, en deze C is afkomstig van netto geassimileerde CO₂. De vruchtoogst waarden bestaan uit de versproducties van de totale afdeling, omgerekend naar drooggewicht en vervolgens naar opgenomen CO₂. De opname in plantbiomassa is afkomstig van de metingen aan de biomassa van de meetplanten. Dit laatste verklaart waarom voor 'Normaal' de opgenomen CO₂ hoger wordt dan voor 'Weinig' ondanks de lagere vruchtproductie: de planten in 'Normaal' waren zwaarder en hebben meer blad geproduceerd dan bij 'Weinig'.

De berekening voor opname na 30 september, de dag waarna de CO₂-sensor in behandeling 'Weinig' niet correct meer werkte waardoor de CO₂-concentraties naar 800 ppm stegen i.p.v. de geplande 600 ppm, is als volgt gedaan: (1) aangenomen dat blad- en stengelbiomassa niet meer toenam omdat de kop 15 september al verwijderd was, (2) de biomassa op 30 september dus gelijk was aan die op 28 oktober maar wel aangevuld met het blad wat daarna nog wekelijks geplukt – en gewogen – was, (3) de gemiddelde vruchtgroei in oktober gelijk was aan de gemiddelde oogst.

Uit Tabel 4.1 blijkt dat de opname in verhouding tot de gift de helft tot een-zesde is. Bij 'Weinig' is de helft van de gedoseerde CO₂ door de plant benut. Dit betekent niet dat de helft van de gedoseerde CO₂ door de plant is opgenomen en de andere helft door de ramen naar buiten is afgevoerd. Tijdens ventilatie vindt een intensieve uitwisseling plaats tussen buitenlucht en kaslucht waardoor een deel van de gedoseerde CO₂ verwisseld wordt met buiten-CO₂. Het netto resultaat is echter dat de helft van de CO₂ als CO₂-verlies moet worden beschouwd. Bij 'Normaal' is het netto verlies 85%.

Tabel 4.1

Totale gemeten vruchtproductie, gemeten gedoseerde CO₂ en berekening van in plant en vruchten netto opgenomen CO₂ op basis van de biomassameting. Peildatum 30 september is ook toegevoegd om het effect uit te sluiten van de daarna slecht werkzame CO₂-sensor in 'Weinig'.

Behandeling	Oogst (kg vers m ⁻²)	Gedoseerde CO ₂ (kg m ⁻²)	Opgenomen CO ₂ (kg m ⁻²)	Opname vs. dosering aan CO ₂ (%)
30 september				
Normaal	59.7	46.6	6.97	15
Minder	62.1	23.5	7.02	30
Weinig	58.7	10.7	6.24	59
28 oktober				
Normaal	72.3#	49.0	7.11	15
Minder	70.4#	24.5	7.18	29
Weinig	68.4#	11.8	6.41	54

incl. groen fruit aan plant

4.2 Gemodelleerde CO₂-opname en -verliezen

Het gebruikte kasklimaatmodel Kaspro is een fysisch model waarmee het kasklimaat kan worden berekend als functie van de kas-eigenschappen, de buitenomstandigheden en de instellingen van de klimaatregelaar. De kaseigenschappen volgen uit de bouwtekeningen van de kas, aangevuld met metingen van de lichttransmissie. De klimaatregelaar-instellingen werden afgeleid uit het regelgedrag dat in de Letsgrow database is vastgelegd. Het model blijkt het klimaat zeer correct na te rekenen.

Het gewasmodel moest worden aangepast van het ras Komeett naar Merlice. Dit betrof maximale vruchtgrootte, afsplitsingssnelheid van trossen, LAI, drogestofgehalten en fotosynthese. De overeenkomsten tussen model en meting wordt hieronder gepresenteerd.

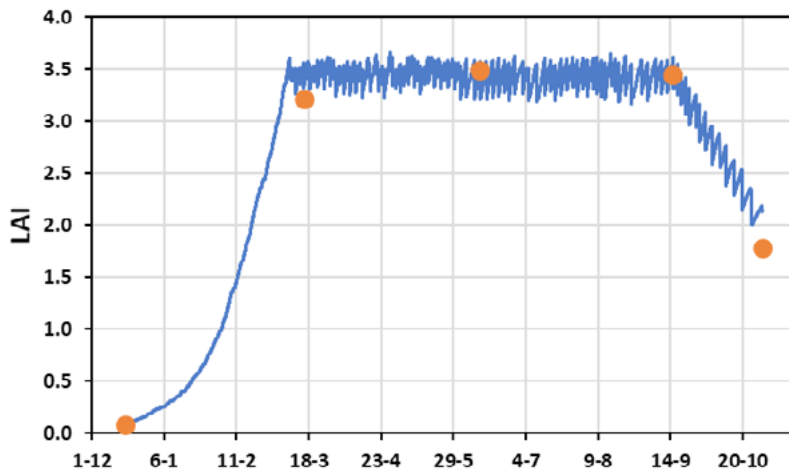
Met het model wordt dan ingezoomd op CO₂ m.b.t. de relatie tussen dosering, vraag door fotosynthese en ventilatieverlies. Vervolgens wordt besproken waarom er verschillen tussen de CO₂-behandelingen optraden volgens de fysiologie in het model. Tot slot worden met het geijkte model enkele alternatieve strategieën doorgerekend.

4.2.1 Groei en productie volgens het model

Met exact dezelfde modelinstellingen bij alle drie de behandelingen simuleert het model totale vruchtproducties van 68.4, 70.4 en 72.3 (incl. niet geoogst groen fruit aan plant) kg m⁻² van "Weinig", "Minder" en "Normaal" respectievelijk. De onderlinge verschillen van 2 kg, i.e. 3% van de productie, zijn volledig toe te schrijven aan de verschillen in CO₂-concentratie, aangezien de andere klimaatfactoren gelijk waren tussen de behandelingen (zie eerder). Daarbij komt het oogstverschil tussen "Weinig" en "Minder" vooral door de verschillen in streefconcentratie (450 vs. 600 ppm) bij grote raamstand, en tussen "Minder" en "Normaal" doordat het zonnige voorjaar de concentratie van 800 ppm bij "Normaal" voor de fotosynthese een zekere meerwaarde had t.o.v. 600 ppm.

In werkelijkheid was de plantontwikkeling en vruchtzetting bij start en einde teelt door de kwaliteit van het plantmateriaal echter minder bij "Normaal". Dit is in het model verwerkt, aangezien het doel was om de CO₂-benutting te simuleren bij de waargenomen plantontwikkeling. Die ontwikkeling is in het model verwerkt als volgt:

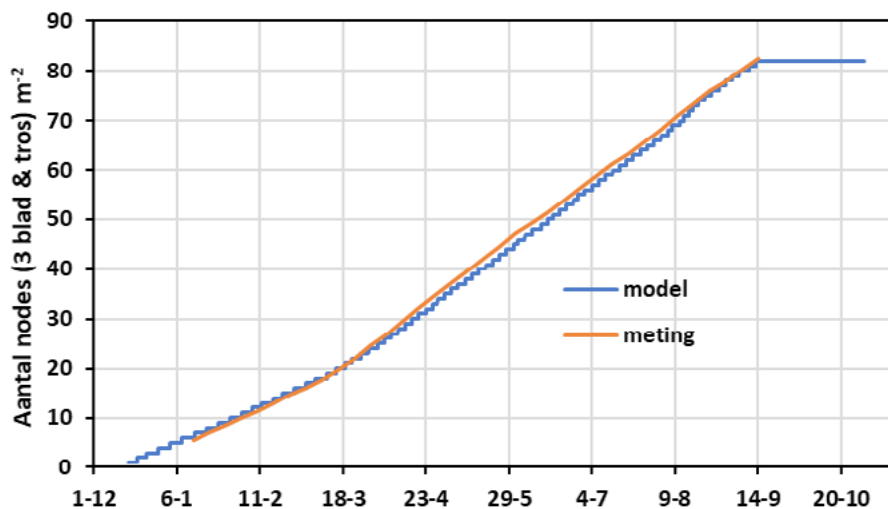
Aangezien de eerste trossen zich bij behandeling "Normaal" slecht ontwikkelden t.o.v. de andere twee behandelingen, is in het model voor "Normaal" bij de eerste 2 weken bloei geen zetting gesimuleerd, wat ongeveer 1.5 tros per stengel minder opleverde in het model. In de metingen toonde zich dit door een oogst achterstand van 1.5 kg m⁻². Vanaf de 4^{de} weekoogst was de productie volgens de metingen geheel hersteld en weer vergelijkbaar met de andere twee behandelingen. Ook aan het slot van de teelt zakte bij "Normaal" de gemeten productie wat in, wat in het model met verminderd aantal vruchten per tros werd ingevoerd. De LAI is in het model voor alle behandelingen gelijk gehouden (Figuur 4.1) aangezien de verschillen zo klein waren dat de lichtonderschepping niet beïnvloed zou worden; deze bedroeg 95%. Dit betreft dan vooral de grotere LAI door dunner blad in "Weinig".



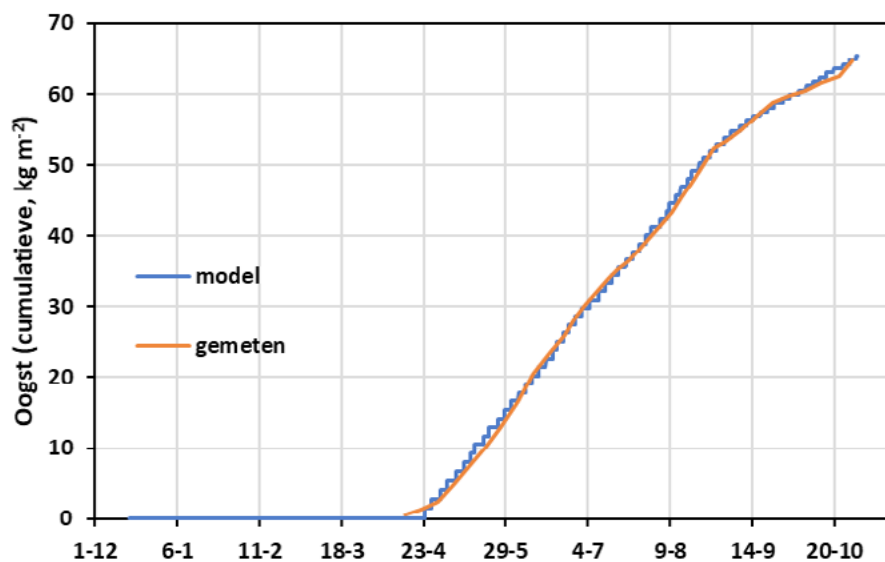
Figuur 4.1 Verloop van de LAI volgens meting en model in behandeling 'Minder'.

Behandeling "Weinig" had in totaal 1 tros per stengel minder afgesplitst dan behandelingen "Minder" en "Normaal", ook dit is in het model opgelegd door de afsplitsingssnelheid met 3% te verlagen. Al de overige modelparameters zijn gelijk gehouden tussen de behandelingen.

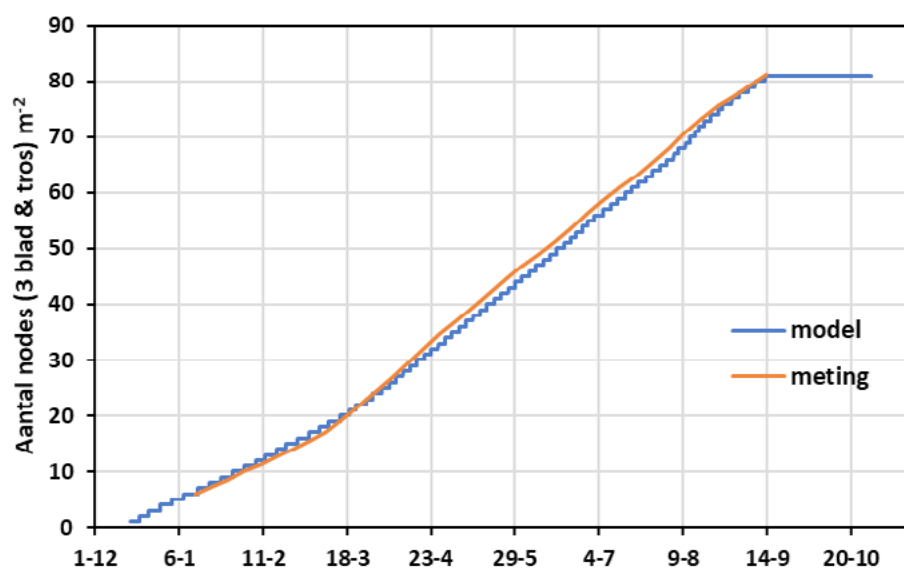
Na ijking van de blad- en trosafplitsing is de fit tussen gemeten en gesimuleerde aantal trossen correct in alle behandelingen. Vervolgens is ook de parameter voor maximale vruchtgrootte geijkt, deze werd 210 g versgewicht, en daarmee werd vervolgens de cumulatieve vruchtproductie ook goed gesimuleerd.



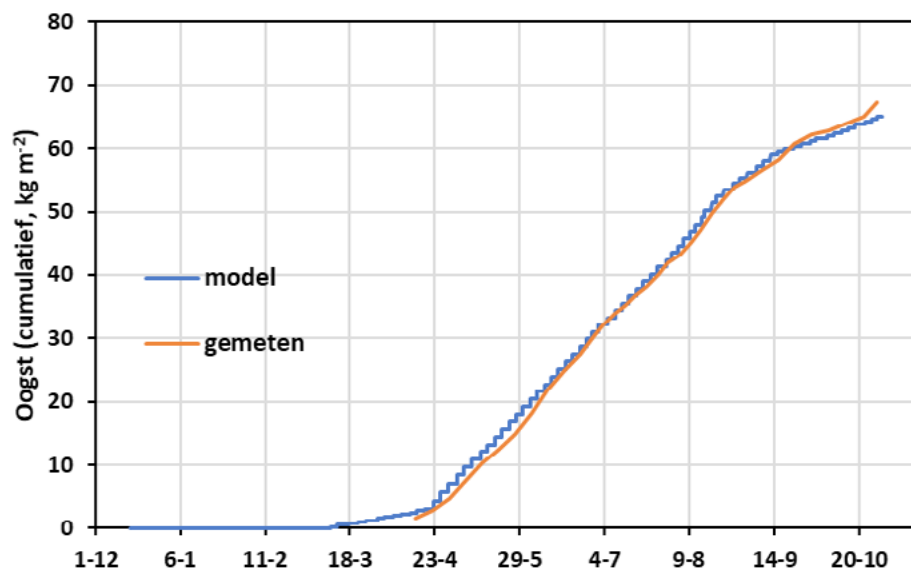
Figuur 4.2 Cumulatief aantal trossen in behandeling "Normaal" zoals gemeten en gemodelleerd (aantal m^{-2}).



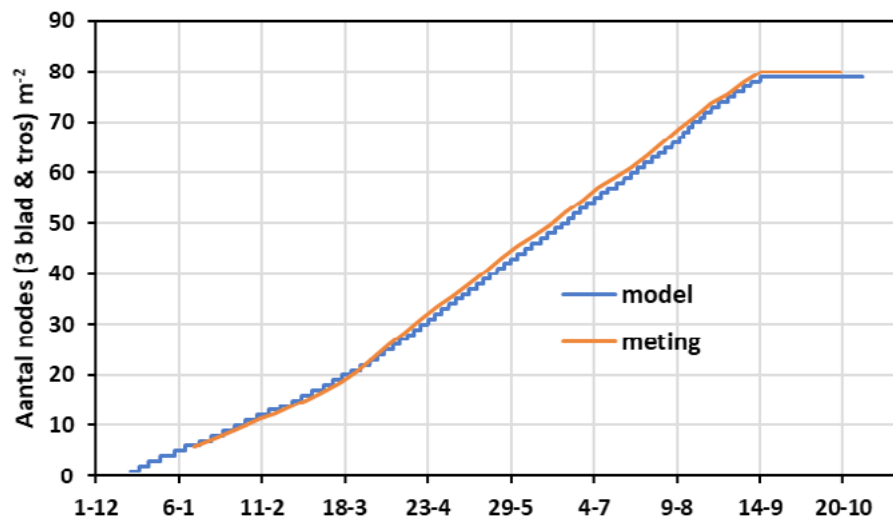
Figuur 4.3 Cumulatieve oogst in behandeling "Normaal" zoals gemeten en gemodelleerd (kg m⁻² versgewicht).



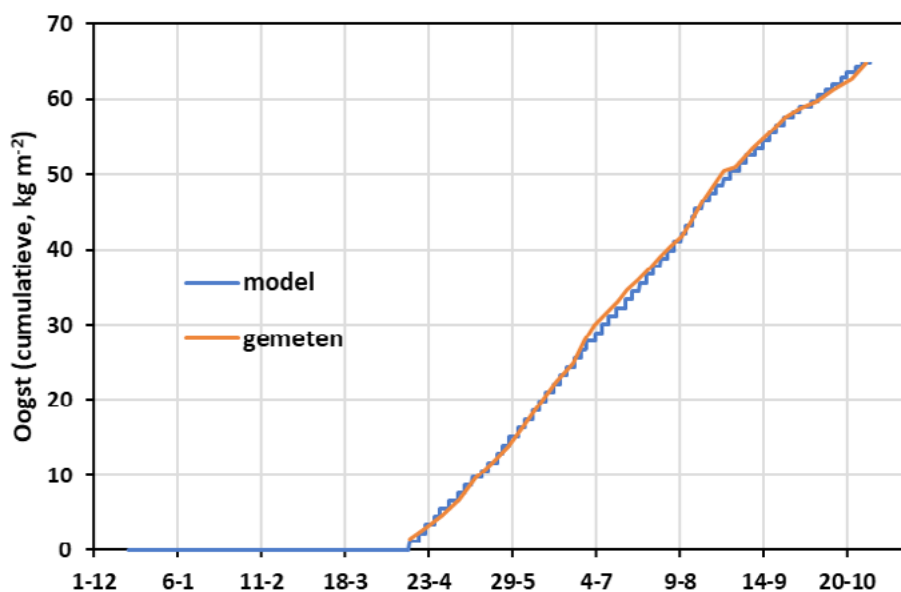
Figuur 4.4 Cumulatief aantal trossen in behandeling "Minder" zoals gemeten en gemodelleerd (aantal m⁻²).



Figuur 4.5 Cumulatieve oogst in behandeling "Minder" zoals gemeten en gemodelleerd (kg m^{-2} versgewicht).



Figuur 4.6 Cumulatief aantal trossen in behandeling "Weinig" zoals gemeten en gemodelleerd (aantal m^{-2}).



Figuur 4.7 Cumulatieve oogst in behandeling "Weinig" zoals gemeten en gemodelleerd (kg m^{-2} versgewicht).

Na de ijking en de geslaagde fit met de metingen is met het model de uiteindelijke productie berekend. Gesimuleerde oogst is vergelijkbaar met de gemeten oogst dankzij modelaanpassing van de zetting (Tabel 4.2). Daarbij zijn de verschillen afgerond: "Normaal" 2 kg m^{-2} minder dan "Minder", en "Weinig" nog weer een kg minder oogst dan "Normaal". Dezelfde verschillen komen naar voren in modellering van de CO_2 -opname: deze is hoger van "Weinig" naar "Normaal" en als hoogste "Minder".

Tabel 4.2

Gemeten en gesimuleerde oogst (versgewicht in kg m^{-2}) tot 30 september en voor vruchttotaal incl. groene vruchten aan de plant op 28 oktober 2019, alsmede totaal aantal trossen en de gesimuleerde CO_2 -opname.

	Normaal		Minder		Weinig	
	Meting	Model	Meting	Model	Meting	Model
Oogst tot 30 sept (kg m^{-2})	59.7	60.0	62.1	61.8	58.7	59.0
Vruchtproductie t/m 28 okt (kg m^{-2})	67.7	67.8	70.5	70.8	67.7	67.5
Aantal trossen ($\# \text{ m}^{-2}$)		33		33		32
CO_2 -opname t/m 28 okt ($\text{kg CO}_2 \text{ m}^{-2}$)	7.1	6.8	7.2	7.0	6.4	6.6

Dat productie en CO_2 -opname dezelfde verschillen vertonen is volgens verwachting, omdat (a) de productie bijna 70% van de gevormde biomassa van het gewas vertegenwoordigt, en (b) in de berekening elke kg biomassa een vaste hoeveelheid koolstof, direct afkomstig van CO_2 -opname, herbergt.

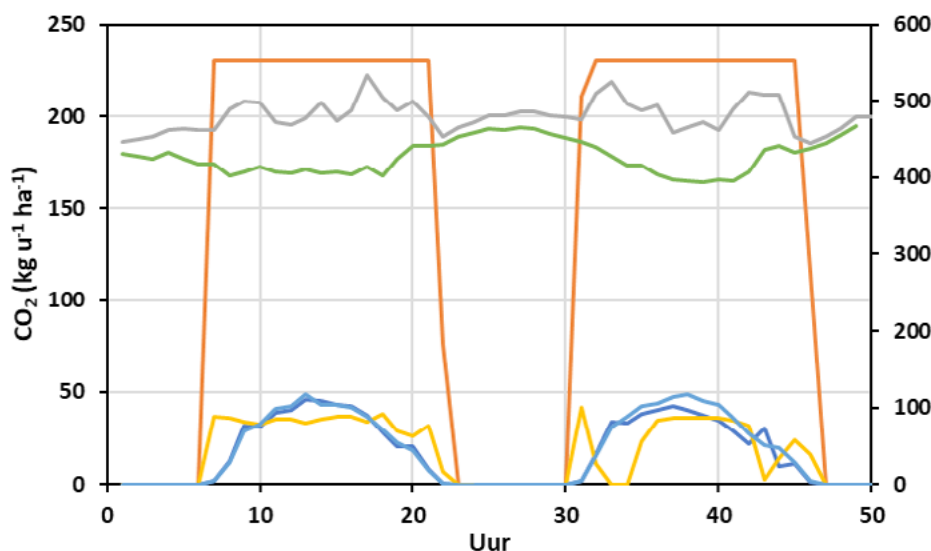
Aanname vaste hoeveelheid C in biomassa:

We nemen aan dat de droge biomassa geheel uit koolhydraat, CH_2O (dat is 40 gewichtsprocent C) bestaat, en dat elk C-atoom van 1 molecuul vastgelegde CO_2 afkomstig is. Aangezien de gewichtsverhouding tussen een molecuul CO_2 en een molecuul CH_2O 44/30 is, is 1 kg biomassa gevormd uit 44/33 kg CO_2 , dus 1.47 kg . Dit is een lichte onderschatting van de hoeveelheid C in biomassa, want naast koolhydraat komen er ook moleculen voor die meer C bevatten zoals cellulose en lignine, waarmee het C-gehalte in realiteit iets hoger is dan 40% (maar niet bekend voor deze proef).

Het model kan de CO₂-vastlegging berekenen via fotosynthese- en groeismulatie, en heeft de gemeten drogestofpercentages in blad, steel en vrucht als invoer. Voor alle behandelingen berekent het model een iets lagere CO₂-opname (0.2-0.4 kg m⁻²) dan de meting (Tabel 4.2). Reden is dat de grotere opslag van CO₂ in stengel en dikker blad bij "Normaal" niet in het model wordt gesimuleerd, evenals het dunnere blad bij "Weinig".

4.3 CO₂-dosering en -opname binnen de dag: verliezen?

De CO₂-opname door het gewas gedurende de dag is te berekenen met het model, op basis van de hoeveelheid PAR, de kasluchttemperatuur, de CO₂-concentratie en de grootte van het bladpakket. Daaruit blijkt dat op zeer zonnige dagen het gewas met de grootte zoals in juni-juli maximaal 70 kg CO₂ ha⁻¹ uur⁻¹ opneemt mits de CO₂-concentratie minimaal 800 ppm is. Tijdens de hittegolf in augustus kwam de concentratie niet boven 500 ppm, en is de fotosynthese maximaal 1.3 kg s⁻¹ m⁻² oftewel 47 kg ha⁻¹ uur⁻¹. Dit kan alleen het model uitrekenen, zie Figuur 4.8 voor de nauwelijks verschillende fotosyntheses voor "Normaal" en "Weinig" begin augustus, terwijl de doseerhoeveelheden een factor 6 verschillen. De dosering bij "Weinig" is maximaal 36 kg ha⁻¹ uur⁻¹, en levert bijna zoveel als de fotosynthese vraagt.



Figuur 4.8 Verloop van CO₂-concentratie (grijze lijn, in ppm), fotosynthese (blauwe lijn) en CO₂-dosering (bruine lijn) (beiden in kg m⁻² s⁻¹) in behandeling "Normaal" op 10 en 11 augustus volgens het model. Daarnaast fotosynthese (lichtblauwe lijn) en CO₂-dosering (gele lijn) in behandeling "Weinig".

Kanttekening daarbij: die vraag geldt voor fotosynthese bij 500 ppm; bij 800 ppm is er dus max. 70 kg vraag bij veel PAR (zie ook boven). De dosering bij "Normaal" op 10 en 11 augustus gaat grotendeels verloren en kan de CO₂-concentratie nauwelijks verhogen.

4.4 Mogelijke invloed van overige groeifactoren op de verschillen tussen de afdelingen

Groei en productie waren in de afdeling 'Normaal' bij start van de teelt minder dan in 'Minder' hoewel volgens de sensormetingen de klimaatcondities hetzelfde waren. De planten waren bij aanvang gemiddeld zichtbaar zwakker. Vermoedelijk heeft de schaduwwerking van de hoge planten in de zuidelijke buurafdeling een lager lichtinval veroorzaakt. Dit was niet meetbaar met de PAR-sensor die precies midden in de afdeling stond, dus de lagere lichtniveaus hebben betrekking op de planten zuidwaarts van de sensor, mogelijk bijna de helft van de kas dus. Inderdaad is bij 'Normaal' de oogst in de zuidelijke kashelft relatief lager dan bij 'Weinig' en 'Minder' hoewel daar de zuidhelft ook lagere oogst kent dan de noordhelft (Bijlage 3). Hoewel bij afdeling 'Minder' bij de start wel meer symptomen van het (gevaccineerde) pepino-virus waren te zien dan bij de andere twee afdelingen heeft dit niet geleid tot groeireductie. De achterstand van 'Normaal' op 'Minder' is in de loop van de teelt gedeeltelijk vermindert door de positieve groeirespons op hoger CO₂-aanbod. Met de modelberekening blijkt dat de mislukte eerste tros de achterstand veroorzaakte en de iets zwaardere vruchten gedurende de teelt de 'inhaalactie' verklaart.

4.5 Adaptatie van plant aan lager CO₂-aanbod

Volgens de metingen in juni bleken er diverse adaptaties op te treden. De behandeling "Weinig" had bladeren met een hoger aantal huidmondjes per oppervlakte-eenheid, terwijl "Normaal" en "Minder" niet verschilden. Daarnaast was de bladvorm gewijzigd tussen de behandelingen: een dunner blad bij "Weinig" en dikker blad bij "Normaal". Het dikkere blad en de iets zwaardere stengel resulteerden in de hoogste plantbiomassa in "Normaal". De waarnemingen in juni wijzen op een verband met het CO₂-aanbod door de consistentie van het resultaat in alle drie de behandelingen. De waarnemingen in maart en oktober zijn minder concluderend: in maart lijkt het blad bij "Normaal" dunner dan bij de andere behandelingen, net als voor "Weinig" in oktober, maar andere aspecten lijken niet te wijzen op CO₂ als oorzaak. Bovendien was in maart de CO₂-behandeling nog maar 2 weken bezig, en is in september/oktober in "Weinig" net zoveel CO₂ gegeven als in "Minder". In juni is gevonden dat de fotosynthese capaciteit sneller lijkt te verlagen bij veroudering van het blad. Zoals al in §3.5 gemeld: mogelijk vertraagt de hogere CO₂-concentratie tijdens de veroudering van het blad de onttrekking van stikstof, waardoor Rubisco en daarmee de carboxylatiesnelheid (V_{Cmax}) minder snel met de bladleeftijd afnemen.

De vruchtkwaliteit lijkt te reageren op de behandelingen: de "Bite" is hoger in "Weinig" tot eind juli, en buiten de zomermaanden is de houdbaarheid bij "Normaal" lager dan bij de andere behandelingen. Dit laatste kan ook veroorzaakt zijn door een wat matiger gewas dan bij de rest.

4.6 Korte modelverkenning van alternatieve CO₂-strategieën

Het geijkte modellenkoppel Kaspro/INTKAM is gebruikt voor productieprognoses bij andere CO₂-scenario's. Daarnaast is de invloed van de prijs voor CO₂ hierbij doorgerekend. Hieronder volgt de beschrijving en het resultaat van de gekozen scenario's.

Er is een hogere, meer praktijkconforme kastransmissie van 70% gebruikt dan in de proefkas in Bleiswijk (55%). Vervolgens is de doseerstrategie van 'Normaal' gebruikt en twee teeltstrategieën voor de Merlice: stengeldichtheid zoals (a) in de proef gebruikte ongewijzigde (2.5 m⁻²) en (b) een extra stengel per twee planten vanaf 15 maart (naar 3.75 m⁻²). De hogere stengeldichtheid is een logische teeltmaatregel als de kas meer licht binnenlaat, en genereert meer vruchten per m⁻² zodat de vraag ('sink') naar CO₂ hoger is dan in de WUR-proef. Dan zal er mogelijk minder CO₂ verloren gaan door ventilatie dan in de WUR-proef en dan in het scenario met minder stengels en sinks.

Vervolgens is met dezelfde kastransmissie van 70% voor hogere stengeldichtheid voor strategie 'Minder' berekend wat de CO₂-opname en verliezen zijn. Hierbij was de doseercapaciteit (1) steeds constant, (2) of verlaagd tot 30 kg in de 2 zomermaanden + verhoogd tot 200 kg in september, globaal zoals in de behandeling 'Weinig' in de proef. Doel was te testen of de 30 kg in de zomer wel tot een acceptabel gemiddeld vruchtgewicht leidt en de oogst niet teveel minder wordt.

Tabel 4.3

Resultaat van scenario's met geijkte model.

Scenario	CO ₂ -aanpak	Oogst (kg m ⁻²)	GVG (g)	CO ₂ gift (kg m ⁻²)	CO ₂ in gewas (kg m ⁻²)	CO ₂ in gewas (%)
Stengeldichtheid proef (2.5 st/m ²) + 55% transmissie	230 kg, 800 ppm	72.4	188	58.3	6.9	12%
Meer stengels (3.75 st/m ²)	230 kg, 800 ppm	86.2	151	58.7	8.1	14%
Idem + 70% transmissie	230 kg, 800 ppm	95.8	164	61.0	9.0	15%
Idem + 55% transmissie	130 kg, 600 ppm	80.7	141	31.4	7.6	24%
Idem + 70% transmissie	130 kg, 600 ppm	90.1	154	33.1	8.5	26%
Idem + 70% transmissie	130 kg, ppm: 600/450/600#	84.5	145	16.5	8.0	48%

450 ppm in juli en augustus

Allereerst blijkt dat de behandeling "Normaal" met een hogere stengeldichtheid en goede zetting een hogere productie levert dan in de proef is waargenomen. Door de grotere vraag naar CO₂ (meer stengels en meer vruchtensinks) is de gift ook hoger om dezelfde concentratie te bereiken. De hoeveelheid aan ventilatie verloren CO₂ is echter aanzienlijk (50 kg) en 86% van de gift. Die verliezen blijven in verhouding hetzelfde als de kastransmissie verhoogd wordt naar praktijkwaarde, de productie stijgt wel significant (+11%).

De scenario's met een 100 kg verlaagde en dus bijna gehalveerde doseercapaciteit geven wel een substantiële productiedaling (-12%) maar een aanzienlijk verhoogde, bijna drievoudige CO₂-benutting (van 12 naar 26-48%).

4.7 Terug in CO₂-gebruik: mogelijke teeltstrategie en consequenties voor opbrengst

Telers zullen zich afvragen wat ze in hun teelt kunnen met de resultaten uit deze studie. Is het mogelijk om iets te zeggen over hoe men de teeltstrategie kan aanpassen als de CO₂ erg duur wordt? Hoe kan een teler anticiperen op een CO₂-tekort in de zomer door de teeltstrategie aan te passen. Hoe en wanneer moet je dat doen? Om hierop enig zicht te krijgen is het mogelijk om voor enkele prijzen van CO₂ en tomaat CO₂- en teeltstrategieën door te rekenen om een beeld te krijgen hoe de kosten van CO₂ zich verhouden tot de baten van de extra oogst.

Allereerst moeten de proefcondities vertaald worden naar de praktijksituatie. Een proef zoals hier gerapporteerd is niet 1-op-1 vertaalbaar naar de praktijk. Bij vertaling is het o.a. van belang een hogere stengeldichtheid te nemen dan zoals in de proef gebruikt (2.5 st/m²) en het feit dat praktijkkassen meestal een hogere lichttransmissie kennen dan onze onderzoekskas.

Voor de teelt van Merlice met losse tomaat zijn de kosten en baten van een verminderd CO₂-gebruik in te schatten met berekeningen op basis van een groeimodel. Het bestaande groeimodel voor tomaat is met de gegevens uit deze proef gevalideerd. Daarnaast zijn de prijs van CO₂ en tomaat meegenomen om een idee van de financiële consequenties voor een praktijkbedrijf te krijgen. Uiteraard zijn de berekeningen slechts inschattingen, maar ze kunnen een leidraad bieden hoe de teler op basis van dit onderzoek een beeld krijgt van een rendabele teelt met een efficiëntere en lagere inzet van CO₂.

De volgende aannamen zijn gedaan:

- Voor de prijs van tomaat is een vast seizoenspatroon gebruikt wat ontleent is aan de veilingprijzen in Naaldwijk. Hetzelfde patroon is gebruikt in een eerdere WUR-studie (De Visser *et al.* 2019).
- Er zijn 3 kostprijzen voor CO₂ gebruikt: 5, 10 en 15 ct/kg.
- Onbelichte teelt met plantdatum 1 december, heeft 3.4 stengels per m² vanaf februari, en de kop wordt 15 september verwijderd, en de teelt eindigt 30 oktober.
- Lichttransmissie door het kasdek is 70% (in de WUR-proef was dit lager)
- CO₂-bron is pure CO₂ die nauwkeurig kan worden gedoseerd.

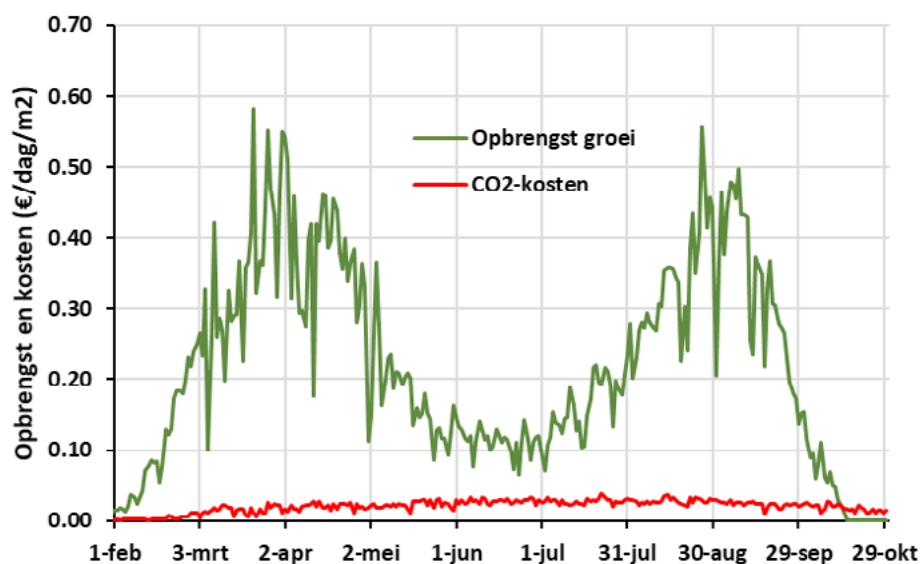
De opbrengst op de veiling in €/kg kent een seizoensverloop. De productie per dag is vermenigvuldigd met de prijs per kg om een bruto opbrengst in €/m² te berekenen. De kosten voor de CO₂ zijn afhankelijk van de hoeveelheid gedoseerde CO₂ over het jaar en de prijs per kg. De kosten CO₂ kunnen ook per dag worden berekend. Om het netto effect van opbrengst en kosten te bepalen zijn de verschillen berekend ten opzichte van de referentie.

In Figuur 4.9 is te zien wat het seizoensverloop is van de opbrengst op de veiling op elke dag en de kosten van de dan gedoseerde CO₂, voor de Referentie-strategie bij 15 cent per kg CO₂. Het verloop laat een flinke daling in de opbrengst zien in mei/juni, waarna de opbrengst in de nazomer weer snel stijgt. De groei levert dus in maart-april en augustus-september de meeste euro's op. Dit betekent dat vruchten die aan het begin van die perioden zijn gezet het meeste opleveren. Dit geeft ook aan dat vruchtzetting begin augustus heel relevant is voor de financiële opbrengst van de teelt, want deze vruchten worden in september geoogst, en dit geeft een uitdaging m.b.t. CO₂-benutting gezien de meestal grote ventilatieverliezen in augustus.

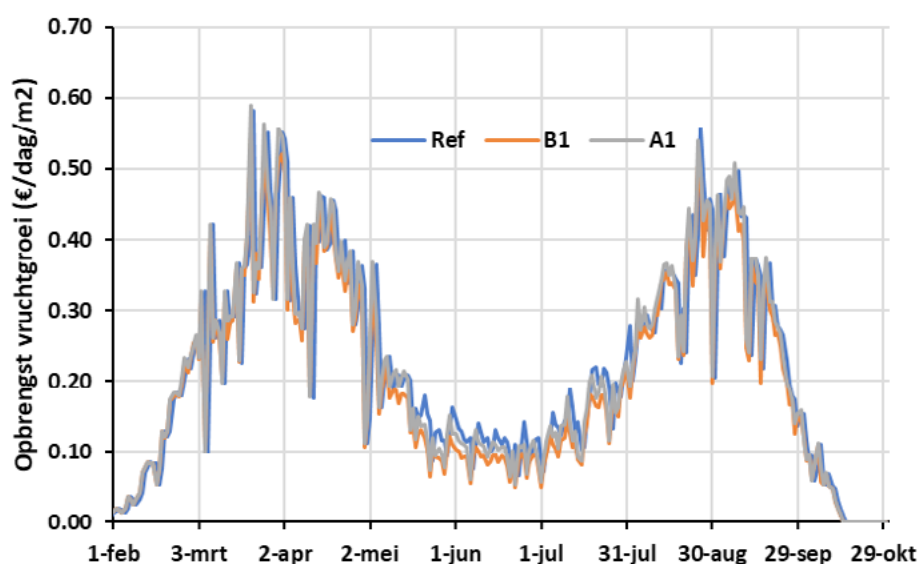
In de scenario's is steeds één onderdeel gewijzigd en vervolgens het effect berekend. Bij elke stap zijn de veranderingen **vetgedrukt**. Voor het beoordelen van de scenario's is er van uitgegaan dat het gewas niet te zwaar belast mocht worden, want dan kan een te hoge plantbelasting resulteren in een zwakke plant en een te laag geoogst vruchtgewicht. Dit werd vermeden door aanpassing van het aantal vruchten per tros en het aantal stengels per m² om een acceptabel geoogst vruchtgewicht (160-190 g) op alle tijdstippen te behouden. Toch vertoonden twee strategieën (A0 en B0) in de zomer een te laag vruchtgewicht (< 160 g), hoewel het seizoen gemiddelde acceptabel was (Tabel 4.4). Strategieën A1 en B1 zijn de respectievelijke strategieën die na A0 en B0 zijn getest en deze gaven wel een goed vruchtgewicht in de zomer.

	Teeltstrategie	Doseercapaciteit en setpoints
REF	Stengeldichtheid 3.4 st/m ² , altijd 6 vr/tros	220 kg CO ₂ /(ha.uur); altijd 800 ppm
	Om minder CO ₂ te verliezen bij het vele luchten in de zomer verlagen we het CO ₂ -setpoint in de zomer overdag van 800 naar 450 ppm:	
A0	Stengeldichtheid 3.4 st/m ² , altijd 6 vr/tros	220 kg CO ₂ /(ha.uur); juni/aug 450 ppm
	In de maanden met kleine raamstanden kan het CO ₂ -setpoint omhoog want bij veel licht geeft 1000 ppm nog wat extra productie ten opzichte van 800 ppm, zonder dat tot veel verlies leidt. De doseercapaciteit blijft hetzelfde:	
A1	Stengeldichtheid 3.4 st/m ² , altijd 6 vr/tros	1000 ppm m.u.v. juni/aug (450ppm)
	Een strategie met een lagere doseercapaciteit. Dan zal minder vaak het niveau van 800 ppm worden gerealiseerd. Maar de verwachting is dat de CO ₂ verliezen kleiner zijn:	
B0	Stengeldichtheid 3.4 st/m ² , altijd 6 vr/tros	130; altijd 800 ppm
	Wat is nu bij de lagere doseercapaciteit het effect van een lager setpoint (450 ppm) en dus minder benodigde CO ₂ in de zomermaanden? Gelijktijdig wordt de plantbelasting verlaagd door minder vruchten per tros in de zomer aan te houden, want er zal dan soms CO ₂ -tekort optreden en we willen geen zwakke tros en kleine vrucht:	
B1	Stengeldichtheid 3.4 st/m ² , 5 vr/tros mei t/m juli	130; juni/aug 450 ppm
	Bij de simulatie van B1 lijkt het of de tros in augustus toch nog zwak is. Daarom ook die maand nog lagere plantbelasting door aanhouden met lager vruchtaantal per tros:	
B2	Stengeldichtheid 3.4 st/m ² , 5 vr/tros mei t/m aug	130; juni/aug 450 ppm
	Een andere strategie kan zijn om na zomer de wat te lage zomerproductie proberen in te halen met een aangesterkte, stevige plant, door meer plantbelasting in september-oktober: 7 i.p.v. de gangbare 6 vruchten per tros:	
B3	Stengeldichtheid 3.4 st/m ² , 5 vr/tros van medio april, 7 vr/tros na 31 aug	130; juni/aug 450 ppm
	Scenario bijna gelijk aan dat in de proef "Weinig" CO ₂ , maar dan voor praktijkkas en met iets hogere stengeldichtheid en dus iets langere periode 450 ppm. Voor behoud van een acceptabel gemiddeld vruchtgewicht moet in de zomer de tros gesnoeid worden tot 3 vruchten:	
C1	Stengeldichtheid 3.1 st/m², 3 vr/tros aug	60; 600 ppm, juni/aug 450 ppm

Het verschil tussen de strategieën Referentie, A1 en B1 laat zien dat vooral in de zomer er minder opbrengst in B1 is – door minder CO₂-dosering – terwijl het verschil in voor- en najaar met de andere strategieën minimaal is. Strategie A1 geeft iets meer opbrengst in voor- en najaar, al is dit lastig te zien in Figuur 4.10. Strategie A0 levert bij een hoge CO₂-prijs uiteindelijk de meeste opbrengst op, namelijk 1.02 €/m² meer dan de standaard REF strategie.



Figuur 4.9 Opbrengst vruchtgroei en kosten van gedoseerde CO₂ (in euro dag-1 m⁻²) voor REF.



Figuur 4.10 Opbrengst in euro van de dagelijkse groei van de vrucht voor de strategieën REF, A1 en B1.

Uit Tabel 4.4 blijkt dat bij de strategie met de goedkoopste CO₂ de referentie het meest winstgevend is. Er is echter veel CO₂-verlies (32 kg m⁻²). Als de CO₂-prijs hoger is wordt het rendabeler minder CO₂ te doseren in de zomer. Ondanks het belang van de vruchtgroei in de zomermaanden, ten behoeve van dure vruchten in september, is strategie A0 uiteindelijk het meest winstgevend. Strategie A0 heeft nog wel een behoorlijk CO₂-verlies van 21 kg m⁻² (niet in de tabel). Het verlagen van de doseercapaciteit is minder rendabel (strategieën B), ook als de teeltstrategie hierop wordt aangepast om een acceptabel vruchtgewicht te behouden. Als een lager vruchtgewicht zou worden getolereerd, zou door het aanhouden van meer vruchten wel meer productie per m² mogelijk zijn. Maar dat zal dan het risico op abortie en uitval van planten (tros- en stengelbreuk) verhogen. Bij het laagste doseerniveau (strategie C1) is het CO₂-verlies minimaal (ca. 6 kg CO₂ per m² voor de hele teelt), maar de financiële opbrengst bij een hogere CO₂-prijs toch nog beduidend minder dan de referentie-strategie en lijkt daarmee economisch niet haalbaar.

Tabel 4.4

Doorgerekende strategieën, hun opbrengst en verschil met de REF-strategie per CO₂-prijsklasse. GVG = gemiddeld vruchtgewicht per seizoen.

Strategie	Opbrengst	CO ₂ in	Kosten CO ₂ (€/m ²)			GVG	Opbrengst na aftrek CO ₂ -kosten (€/m ²)		
			5	10	15		5	10	15
			€/m ²	kg/m ²	ct/kg		g		
REF	59.33	42.69	2.13	4.27	6.40	184	57.20	55.06	52.93
Verschil met REF (€/m ²):									
A0	58.36	29.40	1.47	2.94	4.41	178	-0.31	0.36	1.02
A1	58.71	33.86	1.69	3.39	5.08	179	-0.19	0.25	0.69
B0	56.83	21.86	1.09	2.19	3.28	174	-1.46	-0.42	0.62
B1	55.32	21.58	1.08	2.16	3.24	191	-2.95	-1.90	-0.84
B2	54.22	21.68	1.08	2.17	3.25	183	-4.06	-3.01	-1.96
B3	56.43	21.69	1.08	2.17	3.25	181	-1.85	-0.80	0.25
C1	52.58	13.19	0.66	1.32	1.98	179	-5.28	-3.80	-2.33

Concluderend: bij een vrij lage inkoopprijs voor CO₂ (5 ct kg⁻¹) levert de standaard strategie met 220 kg ha⁻¹ uur⁻¹ doseercapaciteit en een CO₂-setpoint van 800 ppm financieel meer op dan een strategie met minder dosering. Dit is berekend met het kasklimaat/groeimodel, en een aangenomen veilingprijs, en na aftrek van de kosten van ingekochte, gedoseerde CO₂. Bij een hogere CO₂-prijs van 10 of 15 cent per kg is het rendabeler om in de zomer een laag setpoint van 450 ppm aan te houden. Het kost teveel CO₂ en dus geld om buiten de zomermaanden 1000 ppm in plaats van 800 ppm aan te houden bij de laagste CO₂-prijs (strategie A1), maar die strategie is financieel wel aantrekkelijker dan de referentie-strategie als de CO₂ 10 cent of meer kost per kilo. Bij een CO₂-jaargift die de helft is van de referentie-strategie is bij de hoge CO₂-prijs iets meer financieel rendement te halen bij een strategie (B3) met minder vruchten per tros in de zomer en in het najaar iets meer vruchten dan de referentie, bij verder gelijke stengeldichtheid. Het berekende CO₂-verlies is dan bijna 3x lager dan de referentie, namelijk 12 kg m⁻². Scenario C1 met zeer beperkt CO₂ doseren is economisch niet rendabel.

Indien alleen CO₂ uit de ketel wordt gebruikt, is het kostenplaatje complex, o.a. door wisselende gas- en electraprijzen. Evenwel kan dan bovengenoemde vruchtsnoei- en stengelstrategie (B3, C1) helpen om minder last te hebben van CO₂-tekorten in de zomer.

5 Discussie en conclusies

Groei en productie

In het begin van de proef lijkt behandeling 'Minder' enkele kleine voordelen te hebben gehad en behandeling 'Normaal' wat nadeel. De kas van behandeling 'Minder' leek tot 20 februari een iets hogere PAR-som te hebben ontvangen dan de andere kasafdelingen. Daarnaast had deze kas tevens mogelijk voordeel in de eerste maanden van de warme noordwand (door een andere proef), en de kas van 'Normaal' een nadeel van hoge planten in de aangrenzende, zuidelijk kas. Dit kan mogelijk verklaren waarom de eerste trossen bij 'Minder' meer kilo's opleverden dan het proefgemiddelde, en 'Normaal' aanzienlijk minder dan gemiddeld. Gebrekkige eerste trossen kunnen uiteindelijk toch het verschil maken in totale vruchtproductie. Dit tonen de modelberekeningen aan, die de geregistreerde zetting hebben gebruikt en zo de gemeten producties correct narekenden.

De gewasbehoefte aan CO₂ wordt bepaald door een samenspel van klimaatfactoren en teeltstrategie. Die behoefte is zo niet eenduidig weer te geven in een aantal kilo CO₂ per jaar. Voor de huidige proef is de behoefte vooral bepaald door het opgetreden lichtklimaat (de sleutelfactor die via fotosynthese samen met CO₂ de 'source' aanmaakt voor groeiprocessen) in combinatie met de gevolgde teeltaspecten stengeldichtheid en vruchten per tros (de 'sink' voor CO₂). In de tomatenteelt, en vooral een onbelichte teelt, is het licht een bepalende factor waar de overige groeifactoren (stengeldichtheid, snoei-strategie, temperatuur, CO₂, water en voeding) op afgepast moeten worden om het gewas in balans te laten groeien. Dat is de drijfveer achter de RTR-regel die bepaalt welke etmaaltemperatuur nodig is bij het optredende licht. De RTR-regel aanvullen met een factor die de optredende CO₂-concentratie en de resulterende fotosynthese meeneemt zou een nog betere onderbouwing geven van de gewenste temperatuur (en daarmee de groeisnelheid).

Om CO₂ in de zomer langer binnen te houden zouden de luchtramen langer gesloten moeten blijven. De dan oplopende kastemperatuur is dan echter niet meer in overeenstemming met de optimalisatie van licht, CO₂ en temperatuur zoals boven genoemd. Een belangrijke constatering uit dit rapport is dat er vanuit fotosynthese-overweging in ieder geval geen reden is om de temperatuur beperkt te houden (onder de 30°C). De fotosynthese bij tomaat heeft z'n maximale waarde ergens tussen de 30 en 35°C (Qian *et al.* 2012).

Effect van proef-technische verstoringen

Hoewel de teelt van met name behandeling "Weinig" door een goede aanpak in een productief en gezond gewas leidde gelet op de zeer lage CO₂-voorziening, waren in de andere afdelingen en aan het eind van de teelt enkele onvoorziene proef-technische tekortkomingen. Deze hebben het algemene beeld en de resultaten niet beïnvloed maar behoeven enige toelichting.

1. Afdeling "Minder" grensde aan een warmere afdeling, zodat tot maart in de nacht meer geventileerd moest worden om de temperatuur gelijk te trekken met de andere twee compartimenten van de proef. De ca. 5% lagere relatieve luchtvochtigheid zal weinig invloed op de groei hebben gehad (gemiddelde overdag nooit onder 60%). De hogere CO₂-verliezen door de extra ventilatie hadden een verwaarloosbaar effect op de gedoseerde hoeveelheid tot maart (Figuur 3.4).
2. Afdeling "Normaal" werd aan de zuidzijde begrensd door een afdeling met een hoog gewas dat tot maart wat licht wegving. Dit heeft in de beginfase tot een groeivertraging t.o.v. de andere twee afdelingen geleid die echter in juni weer was ingehaald. Als we hiervoor een correctie toepassen – de groei tot maart gelijk stellen aan de andere afdeling – zou deze afdeling een jaarroost hebben behaald die minstens zo groot was als in "Minder". Dit wordt bevestigd door de cumulatieve biomassa van de meetplanten, die niet verschilden tussen "Minder" en "Normaal" (zie o.a. Figuur 3.11). Deze meetplanten hadden waarschijnlijk minder last van lichtbeperking door de zijwand, want in het midden van de afdeling gesitueerd.
3. De CO₂-sensor in de afdeling "Weinig" had vanaf 30 september een onjuiste waarde aangegeven waardoor gedoseerd is tot 800 ppm waar het 600 ppm had moeten zijn. De voor het projectresultaat gebruikte metingen beperkten we tot aan 30 september, mits anders aangegeven. De mogelijke groeistimulans door de extra CO₂ had geen effect op de plantengroei (de plant was 15 september getopt), maar wel iets op het restant van de vruchtgroei. Desalniettemin betekende de extra CO₂ in oktober dat de totale gift precies gelijk was aan de planning van 12 kg CO₂ m⁻².

Vertaling naar de praktijk bij diverse CO₂-prijzen

De vertaling van de proefresultaten naar een rendabele teelt in de praktijk met weinig tot veel verminderde CO₂-doseringen en -verliezen is uitgevoerd met het via de proef geijkte gewasgroeimodel en groeiomstandigheden conform de praktijk (m.n. juiste lichttransmissie en stengeldichtheid). Bij een hogere CO₂-prijs van 10 of 15 cent per kg is het rendabeler om in de zomer een laag setpoint van 450 ppm aan te houden. Omdat de teeltstrategie niet hoeft te wijzigen – plantbalans en vruchtgewicht blijven volgens het groeimodel voldoende in de zomer – is dit een goed implementeerbare CO₂-strategie. Daarbij is dan in voor- en najaar een setpoint van 1000 i.p.v. 800 ppm voor extra productie uiteindelijk te kostbaar. Een doseercapaciteit van 130 i.p.v. de als standaard gebruikte 220 kg CO₂/(ha.uur) betekent dat de teeltstrategie moet worden aangepast om het gewenste vruchtgewicht van 180 gram te behouden. Dit gaat ten koste van het aantal geoogste vruchten en van de financiële opbrengst, hoewel de CO₂-verliezen drastisch dalen t.o.v. de gebruikte referentie.

De twee beschikbare CO₂-optimizer rekentools (De Ridder, WUR) zijn niet gebruikt omdat die geen rekening houden met bovengenoemde gewaskenmerken. Die kenmerken zijn van belang en moeten aan eisen voldoen zoals de praktijk ze stelt, zoals een minimaal gemiddeld vruchtgewicht of een voldoende aantal vruchten per tros. Indien de juiste teeltstrategie ingevoerd kan worden, kunnen de CO₂-optimizers als vervolg op deze studie wél ingezet worden voor die strategie, omdat zij in aanvulling op ons gewasgroeimodel automatisch de dosering van de totaal in de teelt beschikbare CO₂ over die momenten kunnen verspreiden dat minder ventilatieverlies optreedt en de CO₂ toch rendabel is voor de fotosynthese. De noodzaak voor gebruik van een CO₂-optimizer is er vooral als er een maximum aan de beschikbaarheid van CO₂ of aan de kosten ervoor zit. Gezien de duidelijke toename van de fotosynthese bij een verhoogde CO₂-concentratie zal een teler bij lage kosten voor CO₂ logischerwijs veel CO₂ toedienen.

Fysiologie en CO₂

In de proef is gewasadaptatie gevonden aan de aangeboden CO₂-concentraties: het blad werd dikker en korter naarmate er meer CO₂ aanwezig was. Dit is hoogstwaarschijnlijk een gevolg van de lagere sink/source doordat er relatief minder vruchten t.o.v. de source waren en de assimilaten in mindere mate uit het blad konden worden afgevoerd. Een extra vrucht per tros had mogelijk die assimilaten wel benut. Nu werd een deel van het teveel aan assimilaten in de stengel opgeslagen. Vruchten werden ook grover als gevolg van dezelfde lagere sink/source. Er werd ook meer bladbiomassa gevormd, met evenwel dikker blad omdat die bladaantallen de source nog niet geheel konden benutten. Dikker blad is vaak een gevolg van opslag van zetmeel wat een cm² blad zwaarder maakt. Dikker blad kan ook meer chlorofyl per cm² blad bevatten en dan mogelijk hogere fotosynthese geven. Anderzijds kan een ophoping van assimilaten (meer zetmeel in blad geeft verdikking) ook de fotosynthese remmen. Uit de fotosynthesemetingen kan niet worden vastgesteld welke van deze twee factoren de overhand heeft aangezien in sommige metingen de responsies van de bladeren die onder hogere CO₂-concentraties gevormd waren een hogere maximale assimilatiesnelheid te zien gaven en in andere metingen juist weer lagere.

Literatuur

Besford, R.T., 1993.

Photosynthetic acclimation in tomato plants grown in high CO₂. *Vegetatio* 104/105, 441-448.

Gelder, Arie de, Mary Warmenhoven, Wanne Kromdijk, Esther Meinen, Feije de Zwart, Herbert Stolker, Marc Grootsholten, 2012.

Gelimiteerd CO₂ en het nieuwe telen Tomaat. *Rapport GTB-1159*, Wageningen UR Glastuinbouw.

Hogewoning, S., Persoon, S.H., Trouwborst, G., Pot, C.S., Sanders, J., 2015.

Zuiniger met CO₂ bij gelijkblijvende of hogere productie? Plant Lighting B.V., Bunnik. 55p.

Janse, Jan, Marcel Raaphorst, Pieter de Visser, Kees Weerheim en Trudy van Twist, 2021.

Energiezuinige winterteelt framboos met focus op CO₂. Rapport WPR-1056, Wageningen UR Glastuinbouw.

Telgen, van H. J., J. O. Voogt, M. Warmenhoven & P.A. van Weel. 2009.

Huidmondjesopening – Onderzoek naar het meetbaar maken van de huidmondjesopening met als doel om de klimaat regeling mede daarop te baseren. Rapport 266, Wageningen UR Glastuinbouw..

Visser, Pieter de, Arie de Gelder, Mary Warmenhoven, Anna Petropoulou, 2019.

CO₂ op zoek naar de grens. Rapport WPR-909, Wageningen UR Glastuinbouw.

Qian, D., Dieleman, J.A., Elings, A., Marcelis, L.F.M., 2012,

Leaf photosynthetic and morphological responses to elevated CO₂ concentration and altered fruit number in the semi-closed greenhouse. *Sci.Hort.* 145, 1-9.

Verkerke *et al.* 2011.

Smaakmodel Tomaat versie 2.1. Wageningen UR Glastuinbouw

Bijlage 1 Plantbiomassa

Tabel B1

Biomassa van gesloopte planten (n=5) op 4 momenten in de teelt (g drogestof m⁻²).

Behande-ling	Totaal (g DS m ⁻²)	Blad	Stengel	Vrucht	Vr/tot (%)	#trossen/ stengel	LAI (m ² /m ²)	SLA (cm ² g ⁻¹)
16 december 2019								
Allen	2.4	1.8	0.6	-	-	-	0.077	434
16 maart 2020								
Normaal	263.4	133.1	64.3	66.0	25	5.0	3.25	244
Minder	258.1	123.6	62.1	72.4	28	4.8	3.21	260
Weinig	259.8	123.4	62.1	74.3	29	4.8	3.23	262
11 juni 2020								
Normaal	1072.2	224.4	251.2	596.5	56	9.8	3.57	159
Minder	1029.4	208.3	230.0	591.1	57	9.7	3.49	168
Weinig	1046.8	211.7	241.1	594.0	57	9.7	3.81	180
30 oktober 2020								
Normaal	984.7	134.2	383.1	467.3	47	4.7	2.15	160
Minder	957.5	114.7	386.5	456.2	48	5.2	1.78	155
Weinig	896.3	123.7	373.4	399.2	45	4.2	2.55	206

Bijlage 2 Verloop proef en stand gewas

Deze tekst is tot stand gekomen door samenvoeging van de observaties van Henk Kalkman (Delphy), als teeltbegeleider aan de proef verbonden, en van Bram van Haaster, teeltmanager van de proef namens WUR. De kascompartimenten 6.07, 6.08 en 6.09 refereren aan de CO₂-behandelingen "Minder", "Weinig" en "Normaal" respectievelijk.

Datum 18 dec 2019: Etmaal temperatuur van 18 naar 15°C om de jonge planten met het beperkte licht tot een krachtige plant te ontwikkelen.

Datum: 9 januari 2020

Henk Kalkman heeft proef bezocht. De eerste bloemen worden waargenomen, in ca. 1 op de 10 planten. Plant is nog steeds niet zo stevig, maar tros ziet er goed uit. De eerste wortels dringen door in de steenwolmat. Watergift moet omhoog, is nu 150 g eens in de 2 dagen. Druppel EC is 4, in mat is EC 4.5, dus voeding is ruim voldoende. Vermoedelijk zal de tros pas na 1 a 2 weken gaan zetten, en dan wordt het tijd voor de CO₂-behandelingen en temperatuurverhoging.

Klimaat: kastemperatuur setpoint is 2 graden hoger gezet, als licht boven 300 W komt. Dit zal tot een etmaalT van max. 15.5 graden leiden. CO₂-doseercapaciteit van afd. 6.07 is teruggebracht van 75 naar 60 kg (overige afdelingen staan op 50 kg, want daar wordt minder gelucht en is dan voldoende aanvoer voor bereiken setpoint van 600 ppm).

20 februari:

Er wordt afgesproken dat het geplukte blad per afdeling wordt gewogen, want dit is deel van de koolstofstromen. Trossen doen het slecht, waarschijnlijk door te trage groei door lage etmaalT: bij eerste tros is er een zeer onregelmatige zetting, met vruchtaantal variërend van 2 tot 5; teveel bloemen bij tros 2 en niet sterk en abortie; bevlieging in afd. 6.07 slecht terwijl daar PARsom het hoogste lijkt (ander fabrikaat sensor? Sensor hangt wel goed horizontaal, op zelfde locatie als bij andere afdelingen).

Planten hebben genoeg dikke kop nu (10-12 mm), binnenkort etmaalT dus verhogen; door trage groei is er deels pepino ingekomen, vooral bij Noord rij in afd. 6.07; Bram meent dat dit kan verdwijnen als verhoging temperatuur tot snellere groei gaat leiden. Bladkleur was afgelopen dagen nog niet best, is nu niet dof meer en goed. Soms staat in de ochtend het blad blond en dan moet de temperatuur wat omhoog. EtmaalT volgt netjes de gerealiseerde PARsom.

Henk Kalkman is weer geweest: zijn vraag: wordt het niet tijd de CO₂-behandeling te starten? We zijn al bij bloei van 3^{de} tros! En er is weinig verschil tussen afdelingen.

21 februari:

Joyce heeft de IR-camera voor planttemperatuur in afd. 6.09 nu ook aangesloten. Tevens heeft ze alle camera's nu meer naar beneden (op het gewas) gericht.

Mary heeft met succes weer een week data van de CO₂-multiplexer kunnen uitlezen, de data staan op W. Probleem met niet/slechte communiceren met de SD-kaart is door ICT verholpen.

28 februari:

Vandaag kas 6.09 Max 100 kg en 800 ppm, kas 6.07 Max 50 kg en 600 ppm en kas 6.08

De doseer capaciteit wordt beperkt als de ramen samen meer dan 5% open staan, door van de 50 kg/ha.uur er 25 kg/ha.uur af te halen, maar als er voldoende licht is gaat de dosering weer naar 50 kg/ha.uur.

2 maart:

Klimaat gelijkheid is nu op orde. Gewasstand is ook voldoende vergelijkbaar. Teelt verloopt vrij traag; maar dit komt ook door de lage lichtsommen van de laatste 3 weken. Doel van de 1e teeltfase was een gelijk/vergelijkbaar gewas weg te zetten.

30 maart:

De etmalen zijn nu dicht bij praktijkniveau, maar plantbelasting is lager. Gewas had week geleden nog een vrij slanke kop maar wordt nu sterker.

Er hoeft geen blad uit de kop, gelet op de lage stengeldichtheid van 2.5 st per m².

6 april:

Deze week (15) wordt gestart met trossnoei van 5 naar 6 om voldoende aanmaak te krijgen.

30 april:

De verschillen in gewasontwikkeling zijn nog erg klein. In de behandeling laag CO₂ komt de CO₂-concentratie nu voor het eerst onder de buitenwaarde. We continueren de bestaande dosering en kijken of het gewas zich aanpast aan lagere CO₂.

Verder in het algemeen groeit het gewas goed en is er een goede balans.

De planten zijn vrij zwaar van gewicht en bij indraaien is er kans op kopbreuk. Besloten om clippen te gaan gebruiken.

6 mei:

Vruchten slaan nat, dus instellingen verlaagd; etmaalT Max 21 want kop te dun

15 mei:

Nu 5^e tros geoogst.

609 laat een meer open blad structuur zien. Ook wat bladrandjes. Gewas hier ook meer generatief en met een sterkere tros dan bij andere afdelingen.

608 en 607 zit qua gewasstand nog vrij dicht bij elkaar. In 609 zijn de vruchten grover. Vanaf week 18 wordt er geclipd ipv indraaien om kopbreuk te voorkomen.

Klimaat aangepast met invloed RV op ventilatie + 5,5 C van 65% tot 55%.

Dit in combinatie met de lichtinvloed direct => + 5,5 van 200 tot 700 watt zal in de ochtend het vocht beter beheersen. De vocht instelling loopt ook door naar de avond/nacht en op de windzijde.

Watergift start + 2,5 uur na zon op. Bij 100 Joule kan de 1e beurt eerder komen. De 1e drain is er bij 3 beurten en 400 Watt. In Letsgrow zie je de 1e 3 beurten niet ivm met het volume (kleine kas). De gift zit de laatste week op 3 cc/J. EC gift verlaging op straling blijkt technisch niet mogelijk te zijn. Voedingscijfers zijn op orde. Paar kleine aanpassingen gedaan.

28 mei:

609 de bladkwaliteit is op orde; blad strekking nog voldoende. Het gewas heeft balans tussen vruchtgroei en blad ontwikkeling.

De geoogste vruchten zijn zwaar => 200 gr. Dus trossen van 1,2 kg

Productie nu > 2,5 kg/week en 609 meest productief => laat de cijfers maar komen!

608 en 607 lijken nog veel op elkaar; het vruchtgewicht gaat het verschil maken.

Het clippen is een zeer goede actie => geen kopbreuk en geen uitgezakte planten; plantgewicht gaat naar de 6 kg.

Trossnoei in alle afdelingen => altijd de laatste bloem eraf en minimaal 5 vruchten per tros. Trossen met > 7 bloemen worden nog op 6 vruchten gesnoeid. Doel balans houden en groene puntvrucht en/of gescheurde vruchten voorkomen.

Scherfstrategie is aangepast met een grote pyrgo invloed vanaf -1 voor zon onder. Met temp kier van 20% Het zijn wel kleine afdelingen waar door minder afkoeling mogelijk meer geventileerd moet worden wat een negatieve invloed heeft op de vochttopbouw in de nacht.

11 juni:

Nu duidelijke verschillen in gewasstand te zien.

607: Staat goed op vrucht met voldoende bladstrekking.

608: Staat meer groeizaam => wat meer bladvolume tov 607

609: Open gewasstype met wat smaller blad => je kijkt duidelijk meer door het gewas heen.

Grove vruchten hoog in de plant. Oogt zeer productief maar de vraag of er voldoende voortgang is? Staat eigenlijk te weinig gewas (koelcapaciteit)

In de klimaat regeling wordt alles nog zoveel mogelijk gelijk gehouden. Is bespreekpunt voor as maandag. De warmte input nu 100% op het ondernet (buisrail) gezet. Doel vruchttemp en doorkleuring 6^e vrucht. Op dit moment zeer hoog gvg

26 juni:

607 en 608 in gewasstand visueel dicht bij elkaar. Groei is goed met voldoende bladstrekking. Bladkwaliteit is goed; mooi groen zonder bladpunten. Vruchtgroei is normaal, geen echt grove vruchten hoog in de plant.

609: Gewas is wat groeizamer geworden; bladkwaliteit in orde, geen bladpunten meer. Gewas is wel meer open tov 607/608. Ook hoger in de plant grovere vruchten. Piek van de plantbelasting is eraf.

Snoeibeleid blijft -1 met max 6 vruchten per tros.

Acties

Overwegen om de CO₂ dosering in 608 nu te sparen en straks meer te geven.

CO₂ gift in 609 gaat zeer veel verloren naar buiten! Moet slimmer kunnen met relatie ventilatievoud. Verschil in gehalte bij 100% lucht is niet te meten.

Bij hoog CO₂ hogere dagtemperatuur accepteren om CO₂ binnen te houden; zeker als straks de dagtemperatuur buiten weer naar 20/23C gaat.

Overig

Verder gezonde gewassen met krachtige groei. Gewasbescherming netjes op orde; gewasverzorging ook. Watergift en EC op orde. Per behandeling zijn 2 stengels/1 plant voor onderzoek weggehaald.

9 juli:

Stand van het gewas:

607: Voldoende groeizaam gewas; iets aan troskracht ingeleverd door enkele donkere dagen. Opvolging vruchtgrootte en gvg te oogsten vrucht netjes in balans. Wel te zien dat de doorkleuring van de 6^e vrucht wat trager verloopt.

608: Zelfde beeld alleen lijken de vruchten in het midden van de plant minder groot tov 607. Bladvolume kleine plus tov 607.

609: Meer open gewasstype. Met name de bovenste meter van het gewas. Bladkwaliteit is goed; geen bladranden meer te zien. Middenstuk duidelijk grover tov 607/608 maar minder groot verschil tov week 24 en 26. Algemeen door de lage stengeldichtheid is de invloed van donkere dagen op de troskwaliteit minder tov de praktijk.

Plantbelasting is vrijwel gelijk over de afdelingen. 607 => 130; 608 => 132; 609 => 134 op 24 juni.
Met deze plantbelasting kan de trossnoei op -1 bloemetje blijven; 80% van de trossen gaan dan op 6 vruchten.
Dan gaan we uit van een topdatum in week 36 en laatste zetting eind week 37. Einde productie is dan half november.

Klimaat: actief sturen met de licht/temp balans => vanaf -4 zon onder een lagere basis temperatuur ingesteld met lichtsom verhoging tussen 800 en 2000 Joules.

Het blijkt moeilijk om gedurende de nacht op de buitenwaarde temp te komen => gevel en omgevings invloeden.

Gewasbescherming:

Veel macrolophus in het gewas, wat prikschade op de vruchten.

1e galmijt gevonden. Wordt behandeld met zwavel. De zwavelverdamers 5 uur per nacht aan zetten.

23 juli:

Algemeen vrij lange trosstelen en ruim geschakelde tros. Is voor 6 vruchten per tros wel beter. Gevaar kniktrossen zit er wel aan te komen.

De kleur in de kop is mooi groen en egaal.

In alle afdelingen is het gewas vrij uniform en zijn de planten netjes verdeelt in de ruimte.

607: heeft nog steeds een zichtbaar zware pepinovirus aantasting met name tegen de buitengevel die wat warmer is door naastliggende proef. Sterke bladsymptomen met invloed op de vruchtzetting en zelfs open vruchten. Het betreft gelukkig de buitenste 3 rijen. Voldoende gewasgroei. Tros wordt ook zwakker. Afdeling naast 607 is weer opgestart en heeft invloed op klimaat => wordt warmer en daardoor meer ventileren.

608: gewas met meer bladvolume vanaf de kop tot middenstuk; bladlengte en bladbreedte. Tros zwakker tov 609 en ook meer onregelmatige trossen. Visgraat niet regelmatig en tros op tros. In deze afdeling ook abortie te zien. Balans is hier vrij vegetatief.

609: Vrij open gewastype met mooie trossen; wel wat lange trossteel. Zetting op orde=> 6^e vrucht wordt moeilijk.

Acties

Start snoei op 5 vruchten per tros => op 6 blijven snoeien gaat te veel afval geven. Beter op 5 en hoger gvg.

Doorkleuring 6^e vrucht vraagt meer buistemp in de nanacht en ochtend => staat nu minimaal.

Watergift verder aanpassen op afnemend licht. Stoptijd vervroegd. Ec mat streef naar 4,5 a 5 .

Galmijt bestrijden 3 keer om de 5 dagen met zwavel spuiten.

10 augustus:

Gewas komt goed door 1e fase hitte periode. Op LetsGrow zien we lage RV gedurende de dag en namiddag.

Op vrijdag 7 augustus zelfs de 35% RV aangetikt. Hier zie je geen zichtbare schade van in het gewas. Door de ruime stengelafstand blijft het gewas mooi uniform en krachtig. De planten zijn ook netjes verdeelt in de rij. De trossteel is in vergelijking met bezoek week 30 wat sterker geworden. Beugelen is nog niet nodig.

Zetting wat achterstand opgelopen in week 32. Nu goede hommelactiviteit; deze week tros wat later snoeien zodat er 5 goede vruchten aan blijven.

607 Minder CO₂: Deze afdeling heeft de grootste onderlinge verschillen in groei. Tegen de zijgevel (cannabis) al wat meer verzwakking. De ernstige pepino beelden zijn minder. In de middenrij spontane groei met voldoende bladlengte.

608 Weinig CO₂: Gewas toont nog wat groeizamer met mooi mals blad. CO₂ gift is verhoogd; ben benieuwd naar de reactie.

609 Normaal CO₂: Wat korter blad en sterkere tros tov 607/608. Wel voldoende groei en bladoppervlakte.

Acties

Bemestingsschema aangepast op hittegolf om neusrot te voorkomen.

Bevlieging 3 keer per week controleren => achterstand in zetting voorkomen; evt hommels bijzetten.

De paar galmijtplanten spuiten met vertimec; de 3 afdelingen zijn al 3 keer gespoten met zwavel.

CO₂-dosering: omdat raamstand boven de 20% blijft is de dosering bij "Weinig CO₂" nog steeds 30 kg/ha.uur.

20 augustus:

607: Gewasgroei op orde maar wel wat neusrot langs betonpad. Zetting ondanks hoge etmalen redelijk gebleven. Meer ruimte voor de planten scheelt veel.

608: Duidelijk meer gewasontwikkeling. Tros kracht eigenlijk gewoon goed. Ook vaak 8 knoppen per tros. Dosering in 608: er is ruimte in het geplande CO₂-jaartotaal om extra CO₂ te doseren naar het einde van de teelt in 6.08. Dus 21 aug wordt de basis dosering in 6.08 verhoogd naar 90 kg/ha.uur en daar bij open luchtramen dan 30 kg/ha.uur af te halen zodat de dosering dan 60 kg/ha.uur wordt in plaats van de 30 nu. Daarmee geven we nog wat versterking aan de laatste trossen voor de kop er uit gaat (15 sept).

609: Sterk vergelijkbaar met andere afdelingen; verschil in juni was veel groter.

Algemeen:

Temperatuur verschil afd 607 nu structureel warmer door gevelinvloed. Verschil in RV is nog groter => raamstand effect. Dit veroorzaakt wrs hier en daar neusrot.

Galmijt => flink actie op gezet om dit in te dammen. Als er preventief niets gedaan is gaat galmijt erg snel. Witte vlieg => neemt toe; Ruim Eretmoserus inzetten.

Blad/LAI => gaan streven naar 16 bladeren per stengel. Nu 2 weken 4 bladeren per week eraf. Algemeen => groei in zomerperiode gaat echt goed hier; zeker ook effect van diffuus glas. Nu gaat de zonnestand weer lager en komen de beperkingen van de afdelingen weer sterker naar voren.

Trossnoei blijft op 5

Tros beugelen vanaf week 37 om de sink zoveel mogelijk gelijk te houden. 2 a 3 trossen.

3 september:

De gewassen in de 3 afdelingen zijn sterk vergelijkbaar. Kop van het gewas is vrij open door de lengte groei. Ook de trossteel is langer en dunner geworden.

Nog 1 a 2 trossen met 6 vruchten te oogsten. Bij oogst trossen van 5 kan de oogstfrequentie naar 1 keer per week. Geen melding van gescheurde vruchten.

Nu is wel zichtbaar dat de proefkassen een lagere lichttransmissie hebben tov de praktijk.

Ook naast 609 nu een "warme afdeling" => dit wordt zoveel mogelijk gecorrigeerd met ventileren.

Er is nu 1 tros gebeugeld en dit wordt doorgezet tot de laatste tros.

Begin week 37 koppen op tros met 1 bloem open. 1 blad boven de laatste tros is voldoende bij clippen. Ondergrens klimaat verhoogd ivm lagere buitentemperatuur. Bij zon-op moet de kastemperatuur 17C zijn. Dit is ook nodig voor de kleuring van de 6^e tomaat.

Acties:

Basistemperatuur stook verhoogd naar min etmaal 17C

Koppen en bloei eruit 15 september.

Acties op spint en galmijt. => is uitgevoerd.

Lichtverhoging op directe straling; minder ventileren met windzijde tbv beperken ventilatievoud.

Intering op min 12% tbv zuurstof bij de wortels.

17 september:

Alles is getopt. Deze week laatste bloei en zetting.

Trossteel laatste 2 trossen duidelijk dikker ten opzichte van week 36.

Nu oogst van trossen met 5 vruchten 1 keer per week.

In 607 is goot 1 aangetast door galmijt => heeft invloed op productie (kijk eens goed naar de metingen en hoe te beoordelen)

In 609 hoog CO₂ blekere bladkleur van de laatste bladeren. Gevolg van hogere plantbelasting door hoger gvg???

Acties:

Min etmaal naar 17,5 en 3,5C licht invloed bereikt bij 20 par binnen. Om dit min etmaal te bereiken is de nachttemperatuur verhoogd.

Komende periode ook luchting beperken bij hogere instraling en buitentemp < 18C => Doel CO₂ binnenhouden.
Gewasbescherming:

Galmijt doodspuiten met Vertimec; tegen witte vlieg etc Sivanto

1 oktober:

Nog 6 trossen te oogsten. Dit zou nog een kleine 10 kg moeten worden.

Klimaatstrategie verder aangepast aan afnemende plantbelasting en uitgroeiduur.

Min etmaal naar 17,5 en 3,5C licht invloed bereikt bij 12 par binnen.

Streef etmaal 19 C gerealiseerd op week basis. Bram houdt dit in de gaten.

Ventilatie strategie verder aangepast om CO₂ verlies te beperken. Max stand windzijde is 5% de insteek is dat luw niet verder opent dan 15/20%. Alleen bij ws < 2 m/2 meer ruimte geven overdag. Gedurende de nacht kan er ruimer gelucht worden boven het schermdoek.

In laag CO₂ zijn de vruchten nog wat fijner tov de andere 2 afdelingen.

Gewasbescherming: Nog een behandeling met vertimec nodig tegen galmijt en spint.

15 oktober:

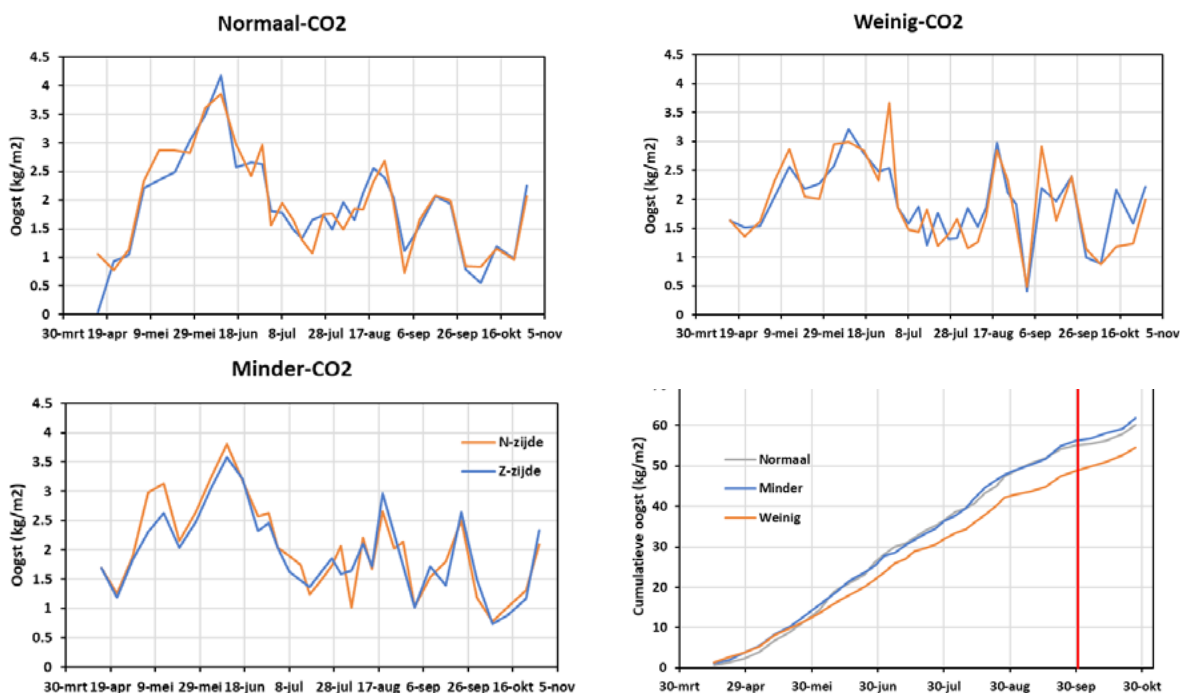
Nog 5 en soms 6 trossen per stengel te oogsten. De vruchten gezet in de hitte periode zijn er nu vrijwel af. Kwaliteit nu normaal; grofheid nog goed op orde.

Nachttemperatuur verder verhoogd om etmaal op 19C te houden. Ook de lichtinvloed op de dag agressiever gezet om de zon energie optimaal te benutten.

Galmijt voor de zekerheid nog een keer behandelen.

Bijlage 3 Oogst variaties binnen de afdeling

In het rapport wordt de oogst op schaal van de afdeling gebruikt om de gewasreactie op de CO₂-behandelingen te interpreteren. Dit is goed gebruik, omdat de behandelingen op kasniveau worden opgelegd. Om meer inzicht in processen te krijgen kan informatie over verschillen in de kas echter zinvol zijn. Hier wordt gerapporteerd wat de verschillen in oogst zijn tussen het Noord- en Zuidgedeelte van de gebruikte afdelingen en tussen meetplanten onderling en het kasgemiddelde.



Figuur B3.1 A t/m C. Vruchtoogst gedurende de teelt in de noordelijke (bruine lijn) en zuidelijke (blauwe lijn) helft van de drie behandelingen.

Figuur B3.1 D. Cumulatieve oogst van de 12 meetplanten per behandeling.

Verschillen tussen noord- en zuidzijde van de afdelingen

De planten aan de noordzijde laten gemiddeld genomen een hogere productie zien, bij alle behandelingen, dan bij de zuidzijde. Dit patroon wordt bij alle proeven bij WUR gevonden, doordat de zuidzijde minder zonlicht ontvangt door schaduwwerking van de zuidelijke kaswand. Opmerkelijk is dat afdeling 'Weinig' hierop een uitzondering vormt, vooral door een hoge oogst op 14 oktober (Figuur B3.1.B). De wekelijkse oogsten zijn qua variatie in de tijd per afdeling wel zeer vergelijkbaar tussen noord- en zuidzijde. De totale, cumulatieve oogsten van de noord- en zuidzijde per behandeling zijn:

Behandeling	Noord	Zuid	Gemiddeld
Normaal	65.24	64.37	64.70
Minder	68.33	66.22	67.28
Weinig	64.18	65.37	64.78

Verschillen in oogst tussen meetplanten en kasafdeling

In tegenstelling tot de oogstresultaten van de afdelingen als geheel, is bij de meetplanten de behandeling "Normaal" juist steeds gelijk aan die van "Minder", terwijl "Weinig" continue sterk achterblijft (Figuur B3.1.D). "Weinig" heeft op 30 september een 13% en op 30 oktober (dus incl. niet geoogst groen fruit) een 11% lagere totale productie dan "Minder" en "Normaal", die vergelijkbare producties laten zien.

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



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

Rapport WPR-1106

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, 6.800 medewerkers (6.000 fte) en 12.900 studenten 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.