

Monitoring huidmondjes in de kas: Gebruik van de nettostralingsmeter Deelrapport Anthurium



Februari 2022

G. Trouwborst, E.P. Noordhoek, J.O. Voogt, S.W. Hogewoning

Monitoring huidmondjes in de kas: Gebruik van de netto stralingsmeter Deelrapport Anthurium

Februari 2022

G. Trouwborst¹, E.P. Noordhoek¹, J.O. Voogt², S.W. Hogewoning¹

¹Plant Lighting B.V.

Doordraai 1

3981 PE Bunnik

info@plantlighting.nl

www.plantlighting.nl

²LetsGrow.com

Westlandseweg 190

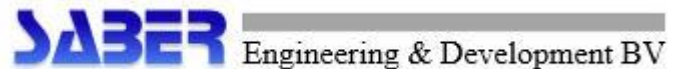
3131 HX Vlaardingen

REFERAAT

G. Trouwborst, E. P. Noordhoek, J.O. Voogt, S.W. Hogewoning. 2022. Monitoring huidmondjes in de kas: Gebruik van de netto stralingsmeter, deelrapport Anthurium. Plant Lighting B.V., Bunnik. 57p.



Ministerie van Landbouw,
Natuur en Voedselkwaliteit



Projectnummer: 20143

© 2021 Plant Lighting B.V.

Dit rapport is tot stand gekomen in opdracht van Kas als Energiebron. 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 Plant Lighting B.V. en de bovengenoemde opdrachtgever.

Plant Lighting B.V. is niet aansprakelijk voor eventuele schadelijke gevolgen als gevolg van gebruik van gegevens uit dit rapport.

Inhoudsopgave

REFERAAT	3
INHOUDSOPGAVE.....	4
DANKWOORD.....	5
SAMENVATTING.....	6
1 ACHTERGROND EN DOEL	8
1.1 Kader onderzoek.....	8
1.2 Probleemstelling onderzoek.....	8
1.3 Onderzoeksvragen en leeswijzer.....	10
2 WARMTELAST SCHERMEN	11
2.1 Inleiding.....	11
2.2 Methode warmtelast scherming.....	12
2.3 Stolk Brothers	13
2.4 Evanty.....	19
2.5 WE-Plants	20
2.6 Rijnplant.....	23
2.7 Evaluatie en conclusies warmtelast schermen	26
3 RESULTATEN HUIDMONDJESGELEIDBAARHEID	28
3.1 Methode stomatasensor anthurium.....	28
3.2 Aanpassingen energiebalansmethode	29
3.3 Resultaten per meetdag	29
3.4 Conclusies en aandachtspunten	43
3.4.1 Stomatasensor	43
3.4.2 Gebruik van de netto stralingsmeter in de kas.....	43
4 OPSTELLEN VANGRAILS: METHODE REAL TIME INZICHT IN HUIDMONDJESBEPERKING?	44
5 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN.....	48
6 SLOTBESCHOUWING GROEI-OPTIMALISATIE BIJ LAAG-VERDAMPENDE GEWASSEN.....	50
REFERENTIES.....	53
BIJLAGE 1. MEETVLAK PLANTTEMPERATUURMETER.....	54
BIJLAGE 2. WINDSNELHEID	55

Dankwoord

Dit deelrapport geeft de resultaten weer van onderzoek naar de huidmondjesopening (in dit rapport huidmondjesgeleidbaarheid genoemd) van anthurium. Het onderzoek vond plaats bij Stolk Brothers te Bleiswijk en was erop gericht om na te gaan of het gebruik van een netto stralingsmeter een betere methode is dan een PAR-meter om via de energiebalans (balans tussen energie-input en energie-output) de huidmondjesgeleidbaarheid te berekenen. Tevens is nagegaan hoe 'real time' inzichtelijk kan worden gemaakt wanneer huidmondjes beperkend zijn voor de fotosynthese. Hiernaast is via metingen van de zonnestraling en de netto straling onder verschillende situaties achterhaald wat de 'warmtelast' van schermen kan worden. Dit onderzoek is ondersteund door het programma 'Kas als Energiebron', gefinancierd door het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit en Glastuinbouw Nederland. De proef is mede ondersteund door LetsGrow. De gebruikte planttemperatuursensoren in het deelproject paprika zijn gesponsord door Exergen global B.V. en Saber B.V. en zijn ook een aantal dagen ingezet bij Anthurium. We willen de volgende personen hartelijk danken voor deelname aan dit project:

- Jan Voogt (LetsGrow) dank voor het fungeren als sparringspartner in dit project en dank voor het schrijven van de slotbeschouwing (Hoofdstuk 6). Joost Simons en Yvonne Smits (LetsGrow) dank voor de technische ondersteuning en het mogelijk maken van de koppeling van de stomatamodule met een netto stralingsmeter.
- Bram Stelt (Exergen Global/CleverIR) en Rene Stokwielder (Saber) dank voor het meedenken en beschikbaar stellen van de planttemperatuursensoren.
- Pieter Stolk en Ed Konijn (Stolk Brothers) dank voor het beschikbaar stellen van jullie locatie en de gastvrijheid.
- De bedrijven Rijnplant, WE plants, Evanty voor het beschikbaar stellen van hun locatie om op plantniveau de balans tussen zonnestraling en netto straling te bepalen.
- De gewascommissie Anthurium: Arthur van den Berg (coördinator Glastuinbouw Nederland, Pieter Stolk (Stolk Brothers), Rene Weerheim (WE-plants), Marco Evers (Evanty), Stefan Groenewegen & Richard van der Salm (Groene Tint), Kees van Zon (Kwekerij van Zon).

Als laatste willen we de onderzoekscoördinatoren Dennis Medema en Leo Oprel van het programma Kas als Energiebron bedanken voor hun steun bij de totstandkoming en uitvoering van dit project.

Februari 2022,

Sander Hogewoning

Samenvatting

Introductie en doelstelling

Huidmondjes spelen een cruciale rol in de assimilaten-, vocht- en energiebalans. Een te beperkte opening remt de groei. Echter, als huidmondjes verder open staan dan nodig, dan leidt de extra verdamping tot onnodig energieverbruik. “Live” inzicht in de openingsstand van de huidmondjes (huidmondjesgeleidbaarheid) is dus zeer gewenst. In het onderzoek zijn de volgende hoofdvragen geformuleerd:

1. Verschilt de balans tussen netto straling en zonnestraling onder verschillende schermtypen bij verschillende weertypen? Met andere woorden: Kan de ongewenste ‘warmtelast’ die via infrarood-straling vanuit het schermdoek het gewas opwarmt vermeden worden door andere type(n) schermdoek te gebruiken?
2. Werkt de energiebalans-aanpak (gevoed met een netto stralingsmeter) om huidmondjesgeleidbaarheid te berekenen bij anthurium?
3. Kan er een ‘vangrails’ tussen noodzaak en overmaat van de huidmondjesgeleidbaarheid worden opgesteld? Met andere woorden, wat moet de minimaal benodigde huidmondjesgeleidbaarheid zijn bij een bepaald lichtniveau zodat de CO₂-opname niet beperkt wordt?

Materiaal en methoden

Ter beantwoording van de eerste onderzoeksvraag is de verhouding tussen de netto straling en zonnestraling op plantniveau bepaald onder een aantal type schermen die bij Anthuriumtelers in gebruik zijn. Voor de tweede onderzoeksvraag is via steekproefsgewijze toetsingen de berekende huidmondjesgeleidbaarheid van de stomata-sensor vergeleken met de huidmondjesgeleidbaarheid gemeten met nauwkeurige fotosynthese-meetapparatuur als referentie. Dit is gemeten in een periode van een half jaar (winter via voorjaar naar zomer), zodat er ruime variatie was in klimaat: variatie in instraling en VPD. Voor de derde vraag is op basis van de resultaten berekend wat de minimaal benodigde huidmondjesgeleidbaarheid zal moeten zijn bij een bepaald lichtniveau zodat de CO₂-opname niet beperkt wordt.

Resultaten en conclusies

(1) De warmtelast van schermen speelt voornamelijk in situaties waarin er een stabiel hoge instraling is. Afwisseling van zon en wolk geeft een forse afkoeling van het scherm. Op donkere dagen werd er bij alle tuinders een balans van netto straling / zonnestraling overdag oplopend tot maximaal 0.7 gemeten. Dit verschilde per seizoen: Op lichte dagen in september liep bij Stolk Brothers en Evanty de balans op naar 1 (krijt eraf) terwijl dit niet gebeurde bij Rijnplant, WE-Plants en Stolk Brothers (april-juni; krijt erop). Dit had ook veel te maken met de (koelere) buitentemperatuur in het voorjaar. Op basis van deze metingen kan er geen harde uitspraak gedaan worden over verschillen tussen schermtypen bij de verschillende tuinders. De bottomline is dat alle waargenomen verschuivingen in de balans tussen netto straling en

zonnestraling op plantniveau het belang benadrukken om voor bepaling van de energiebalans te werken met een netto stralingsmeter. Als dit niet wordt meegenomen in de energiebalans, geeft dit een grote onderschatting in de berekende huidmondjesgeleidbaarheid.

(2) Het is gebleken dat de stomatasensor die gevoed wordt door een netto stralingsmeter schattingen van de huidmondjesgeleidbaarheid geeft die in dezelfde orde grootte liggen als die gemeten worden door nauwkeurige fotosynthese-apparatuur. De stomatasensor maakt een duidelijk onderscheid tussen:

- Winter- en zomersituaties
- Cultivars

Wel zijn er opnieuw enkele aandachtspunten naar voren gekomen. Het belangrijkste is dat de betrouwbaarheid van de stomatasensor afhangt van de betrouwbaarheid en representativiteit van de meetpositie van alle gebruikte sensoren. Alleen als de teler bereid is hier aandacht aan te besteden, is toepassing zinvol.

(3) Er zijn twee grote beperkingen van de fotosynthese, namelijk het CO₂-niveau in de kas en huidmondjesgeleidbaarheid. Alleen de beperking in huidmondjesgeleidbaarheid weergeven biedt te weinig informatie. Voor optimale sturing zullen beide beperkingen in beeld gebracht moeten worden. Beide beperkingen kunnen als volgt in beeld gebracht worden:

- Huidmondjesbeperking: 'Live' de huidmondjesgeleidbaarheid via de energiebalansmethode in beeld brengen ten opzichte van de gewenste huidmondjesgeleidbaarheid via een fotosynthesemodel
- CO₂-beperking: 'Live' de maximaal haalbare fotosynthese bij CO₂-verzaadiging in beeld brengen ten opzichte van een niet door huidmondjes beperkte fotosynthese en een 'live' fotosynthese die mogelijk door de huidmondjes wordt beperkt.

Van deze kennis kunnen klimaatcomputer-leveranciers gebruik maken om deze 'vangrails' ook 'live' inzichtelijk te maken voor tuinders. Daarom verdient het aanbeveling om de fotosynthese van topbladeren online in beeld te brengen. Dit kan door een mechanistisch fotosynthese-model mee te laten draaien op dataplatforms zoals Letsgrow. Als afgeleide hiervan kunnen relatief eenvoudig beperkingen in de fotosynthese in beeld worden gebracht. Als deze in beeld zijn dan kan licht, CO₂ en warmte efficiënter benut worden door te voorkomen dat de huidmondjesgeleidbaarheid beperkend is voor de fotosynthese. Anderzijds kan warmte efficiënter benut worden door te voorkomen dat huidmondjes onnodig ver open staan, waardoor meer (latente) warmte moet worden afgelucht (ontvochtigen) of kan door inzicht te geven in de huidmondjesgeleidbaarheid worden voorkomen dat onnodig veel verneveld wordt, waardoor veel warmte verloren gaat.

1 Achtergrond en doel

1.1 Kader onderzoek

Belichting is voor meer dan 80% verantwoordelijk voor het stroomverbruik in kassen. Het programma Kas als Energiebron zet, naast vergroening van de elektriciteit, volop in op reductie van elektriciteit voor belichting. Hierin is de overgang van SON-t naar LED cruciaal. Hiernaast wordt door Kas als Energiebron gewerkt aan reductie van CO₂-input om een klimaatneutrale glastuinbouw mogelijk te maken. De huidmondjes spelen een cruciale rol in de CO₂- en licht-benutting van planten. Voor een duurzame inzet van elektriciteit voor belichting en van CO₂ is het ook belangrijk dat huidmondjes de potentieel mogelijke CO₂-opname voor de fotosynthese nooit beperken. Het streven is immers zoveel mogelijk productie bij zo min mogelijk input. Anderzijds moet worden voorkomen dat de huidmondjes verder open staan dan nodig. Dan wordt namelijk de verdamping ook onnodig hoog, wat via het afvoeren van vocht veel energie kost. Huidmondjes fungeren dus tussen de vangrails van noodzaak en overmaat.

1.2 Probleemstelling onderzoek

Huidmondjes spelen een cruciale rol in de assimilaten-, vocht- en energiebalans. Een te beperkte opening remt de groei. Echter, als huidmondjes verder open staan dan nodig, dan leidt de extra verdamping tot onnodig energieverbruik. “Live” inzicht in de openingsstand van de huidmondjes is dus zeer gewenst. In 2019 is het project ‘Monitoring van huidmondjesopening in de kas’ afgerond (Trouwborst *et al.* 2019). De hoofddoelstelling van dat onderzoek was de ontwikkeling van een robuuste, betrouwbare en betaalbare methode om huidmondjesgeleiding (Gs) in een kassituatie vast te stellen. Het is gebleken dat de stomatasensor (gebaseerd op de energiebalans zoals geïntroduceerd door Voogt en van Weel, 2008) dit in principe kan bieden bij de testgewassen anthurium (laag verdampend) en paprika (middel- tot hoog verdampend afhankelijk van het seizoen). Dit houdt in dat deze aanpak kan gaan werken voor de meeste kasgewassen, omdat deze qua huidmondjesgeleidbaarheid en verdamping tussen een anthurium en een paprika inzitten. Voor het laagverdampende gewas Anthurium is er nog wel een aanpassing nodig.

Voor Anthurium is de belangrijke ontdekking gedaan dat bij hoge instraling er een belangrijk deel van de energielast die de planten ervaren, bestaat uit warmtestraling afkomstig van de binnenschermen die heel warm kunnen worden bij hoge instraling van de zon (6-7 graden boven de planttemperatuur). Infra-rood (IR)-straling wordt dan dus een belangrijke factor. Alleen als deze werd meegenomen in de energiebalans, gaf vergelijking van de stomatasensor met de Li-6800 fotosynthese-meetapparatuur goede resultaten. Het effect van deze IR-straling kan in beeld worden gebracht met een netto stralingsmeter. Vandaar dat in dit project de werking van deze meter als ‘voeding’ voor de stomatasensor is getoetst in de praktijk zodat

de energiebalans-aanpak ook gaat werken voor laag verdampende gewassen. Hierbij wordt ook de vraag beetgepakt of deze ongewenste warmtelast vermeden kan worden door andere type schermdoeken te gebruiken. Dit opent wellicht ook perspectief om een hogere lichtintensiteit toe te laten voor extra groei. Dit kan vooral aan de randen van het belichtingsseizoen energiebesparing opleveren. Het ligt voor de hand dat wat voor Anthurium nodig is, ook nodig is voor andere laagverdampende gewassen zoals Phalaenopsis, Miltonia, Cymbidium, Bromelia, Spatiphyllum, diverse palmen, etc.

Met inzicht in de huidmondjesdynamiek kan de tuinder uiteindelijk effectiever sturen op een optimale productie met een zo laag mogelijk energieverbruik: Niet meer verdamping dan nodig (energiebesparing doordat minder latente warmte hoeft te worden afgelucht), maar voldoende huidmondjesgeleidbaarheid om licht, CO₂ en warmte goed te kunnen benutten. Zeker bij de toepassing van LED lijkt dit inzicht erg belangrijk te worden. Dit leidt tot het volgende hoofddoel en bijbehorende doelstellingen per deelproject:

- Validatie en implementatie van een robuuste, betrouwbare en betaalbare methode om huidmondjes-opening in een kassituatie vast te stellen. Hiermee wordt de stap gemaakt van verkenning/ontwikkeling (vorig project) tot toepassingsrijpheid voor de praktijk.
 - WP1: Nut en noodzaak van huidmondjesopening onder LED-belichting bij het voorbeeldgewas paprika: wat is de minimale energietoevoer zodat de mate van huidmondjesopening de fotosynthese niet beperkt? Deze vraag geldt in brede zin bij telen onder full-LED belichting. Dit werkpakket is uitgewerkt in een apart deelrapport.
 - WP2: Ontwikkeling en validatie van de stomata-sensor die mede gevoed wordt door een netto stralingsmeter. Dit WP is uitgevoerd bij voorbeeldgewas anthurium.

Op basis van de inzichten uit voorgaand onderzoek wordt 'live' meting van de huidmondjesopening met een aangepaste versie van de stomatasensor getoetst in de praktijk. Steekproefsgewijze toetsingen zijn uitgevoerd in een periode van een half jaar (winter via voorjaar naar zomer), zodat er ruime variatie was in klimaat: variatie in instraling en VPD. Per meet sessie van een dag is de berekende huidmondjesgeleidbaarheid van de stomata-sensor vergeleken met de huidmondjesgeleidbaarheid gemeten met nauwkeurige fotosynthese-meetapparatuur.

1.3 Onderzoeksvragen en leeswijzer

In het onderzoek zijn de volgende hoofdvragen geformuleerd:

1. Kan de ongewenste 'warmtelast' die via infrarood-straling vanuit het schermdoek het gewas opwarmt vermeden worden door andere type(n) schermdoek te gebruiken? De verhouding tussen de netto straling en zonnestraling op plantniveau zijn bepaald onder een aantal type schermen die bij Anthuriumtelers in gebruik zijn. Hoofdstuk 2.
2. Werkt de energiebalans-aanpak (gevoed met netto stralingsmeter) om huidmondjesgeleidbaarheid te berekenen bij anthurium? Hoofdstuk 3.
4. Kan er een 'vangrails' tussen noodzaak en overmaat van de huidmondjesgeleidbaarheid worden opgesteld? Met andere woorden, wat moet de minimaal benodigde huidmondjesgeleidbaarheid zijn bij een bepaald lichtniveau zodat de CO₂-opname niet beperkt wordt? Hoofdstuk 4.

Hoofdstuk 5 geeft de slotconclusies weer, en Hoofdstuk 6 geeft een slotbeschouwing.

2 Warmtelast schermen

2.1 Inleiding

Een belangrijke vinding van het project ‘monitoring van huidmondjesopening in de kas’ (Trouwborst *et al.* 2019) was dat er een significante warmtelast van het scherm pakket afkomstig lijkt te zijn op dagen met forse instraling. Hierdoor leek de energiebalans die berekend werd op basis van inkomende PAR op gewasniveau niet volledig: de IR-straling ontbrak. Bij Anthurium wordt in de regel zwaar geschermd en geteeld onder 150-200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR (65-85W zonnestraling op gewasniveau). De warmtestraling kon volgens theoretische berekeningen met de wet van Stefan-Boltzman oplopen tot wel 40W (Trouwborst *et al.* 2019). Idealiter is de straling die het gewas moet verwerken voornamelijk PAR-straling en extra IR-straling is dus ongewenst. Schermen die de warmtelast niet of minder doorgeven, zouden een voordeel kunnen zijn.

De overdracht van langgolvige (IR-) straling wordt als volgt berekend:

$$G = \sigma \cdot (\epsilon T_{\text{gewas}}^4 - \epsilon T_{\text{kasdek}}^4)$$

- T_{gewas} en T_{kasdek} moeten hier in Kelvin (K) worden uitgedrukt. Voor T_{kasdek} kan ook T_{scherm} worden gelezen.
- σ is de constante van Stefan-Boltzmann ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2/\text{K}^4$).
- ϵ , emissiviteit, dimensieloos tussen 0-1. Deze is naar schatting voor glas en gewas hoger dan 0.9.

Bij een gewastemperatuur en een schermtemperatuur van respectievelijk 30°C (303K) en 36°C (309K) kan worden berekend dat bij een emissiviteit van 1 dit een warmtestraling van maximaal 39W oplevert richting de planten. Echter het is de vraag of de emissiviteit van de schermen richting de 1 gaat. Vanuit Svensson is gemeld dat de emissiviteit van schermen tussen de 0.1-0.7 ligt (persoonlijke mededeling Paul Arkensteijn) maar condens kan hierop een verhogende invloed hebben (Baart de la Faille *et al.* 2009). Deze lagere emissiviteit heeft dus grote invloed op de warmtelast die van een scherm kan komen. Vandaar dat het gebruik van een netto stralingsmeter nuttig is om na te gaan of de balans tussen netto straling en zonnestraling op gewasniveau verandert. Opgemerkt moet worden dat een dubbele pyrgometer zuiverder de warmtestraling in kaart brengt dan een netto stralingsmeter omdat bij een netto stralingsmeter ook de inkomende en gereflecteerde zonnestraling wordt meegemeten. Vanwege het nut van de netto straling voor de stomatasensor is in dit onderzoek gekozen voor het gebruik van een netto stralingsmeter.

2.2 Methode warmtelast scherming

Op vier locaties is onder verschillende weertypen de verhouding tussen de zonnestraling en de netto straling op plantniveau in de kas bepaald. De metingen zijn uitgevoerd met een mobiele meetunit met daarop de volgende sensoren (alle drie Kipp & zonen B.V, Delft, Nederland:

- PAR: 400-700 nm; PQS1 PAR Quantum Sensor → PAR
- Solarimeter: 300-2800 nm; SMP3 Pyranometer → UV+PAR+NIR
- Netto stralingsmeter; 200-100.000 nm NR Lite 2, net radiometer → UV+PAR+NIR+IR
 - Een netto stralingsmeter is eigenlijk een dubbele solarimeter: 1 gericht naar boven voor inkomende en 1 gericht naar de grond voor gereflecteerde zonnestraling) gecombineerd met een dubbele pyrgeometer (inkomende en uitgaande infraroodstraling)

Vooraf moet nog worden opgemerkt dat de absolute ijking van zelfde typen sensoren al tussen de 3-5% kunnen verschillen. Dit verschil wordt groter bij de absolute ijking van sensoren die van elkaar verschillen qua meetbereik en hoe straling wordt opgevangen (cosinuscorrectie) zoals de netto stralingsmeter en de solarimeter. Vandaar dat de methode gevolgd is om de sensoren in relatieve zin met elkaar te vergelijken. Hierbij is er gelogd op een serie van donkere (weinig scherming) en lichte dagen (veel scherming). De netto straling is de resultante van de inkomende en gereflecteerde (kortgolvlige) zonnestraling en de inkomende en uitgaande (langgolvlige) warmtestraling.

- Op donkere dagen wordt er nauwelijks geschermd en dan zal de netto straling naar verwachting lager liggen dan de zonnestraling op plantniveau in de kas.
- Op lichte dagen wordt er veel geschermd, en kan het scherm 4-10 graden hoger dan de planttemperatuur komen te liggen waardoor de netto straling voorbij de zonnestraling op plantniveau zou kunnen stijgen.

De buitentemperatuur kan ook een factor in het geheel worden. Bij koele buitenlucht zal het scherm effectiever gekoeld worden dan bij warme buitenlucht. Dus in april kan de verhouding tussen netto straling en zonnestraling bij dezelfde instraling en schermstanden anders liggen dan bijvoorbeeld in juli, omdat het op de ene dag 15°C is en de andere dag 25°C. Mogelijk kan deze verhouding zelfs over de dag verschillen omdat normaliter de ochtend koeler is dan de namiddag.

In de onderstaande paragrafen worden per tuinder 2-3 (Tabel 2) meetdagen getoond met een verschil in schermstanden door een bewolkte dag (nauwelijks schermgebruik) te vergelijken met een zonnige dag (volop schermgebruik) met of zonder buitenscherm of krijgt op het dek. De volgende twee onderzoeksvragen stonden centraal:

1. Klopt het dat de warmtestraling op kan lopen tot 40W (theoretische berekening in Trouwborst *et al.* 2019) of is uiteindelijk de emissiviteit van een scherm laag en daardoor de potentiële warmtelast (veel) lager?
2. Verschilt de balans tussen netto straling en zonnestraling onder verschillende schermtypen?

Tabel 1. Tijdlijn onderzoek balans tussen PAR en netto straling.

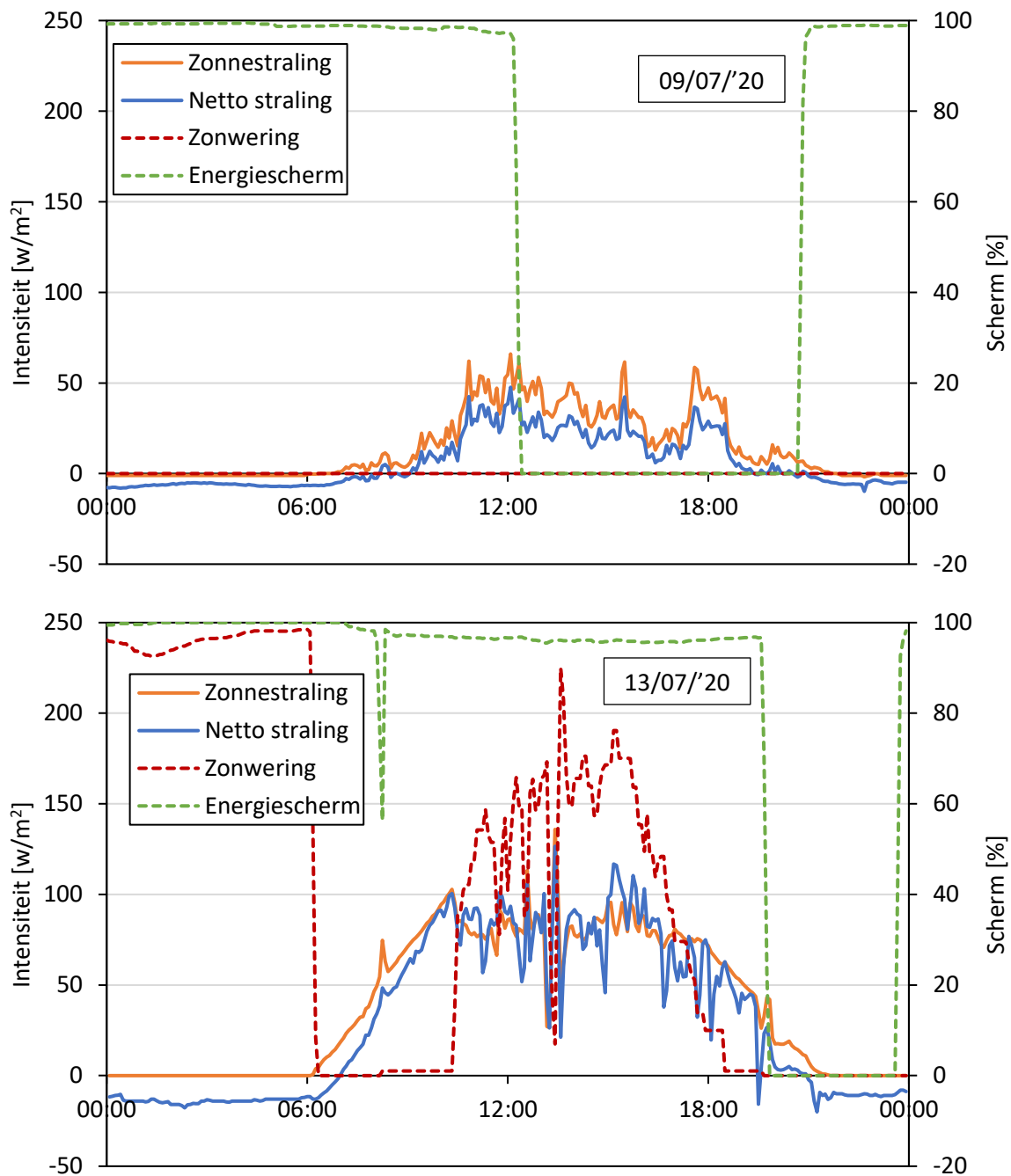
locatie	Periode	schermen
Stolk	juli 2020-juli 2021	- Energiescherm: LS10 - Zonwering: dicht LS17 (aluminiumbandjes) - Krijt: Eclipse 65% scherming
Evanty	september 2020	- Energiescherm: Phormium (vergelijkbaar met LS10) - Zonwering: Harmony 5747 FR, 57% scherming
WE-Plants	april 2021 / juni 2021	- Energiescherm: LS10 - Zonwering: Harmony 6920 O FR (witte bandjes) - Krijt: ~50% scherming
Rijnplant	mei 2021	- Energiescherm: type LS 10 Ultra (2009) - Zomerschermtyp: Verduisteringsscherm wit/zwart/zilver (2009). - Buitenschermtyp: 70% scherming (2009). - Krijt: Q4 met 60% scherming



Foto 1. Meting van de netto straling, de zonnestraling en de PAR bij Evanty te Moerkapelle.

2.3 Stolk Brothers

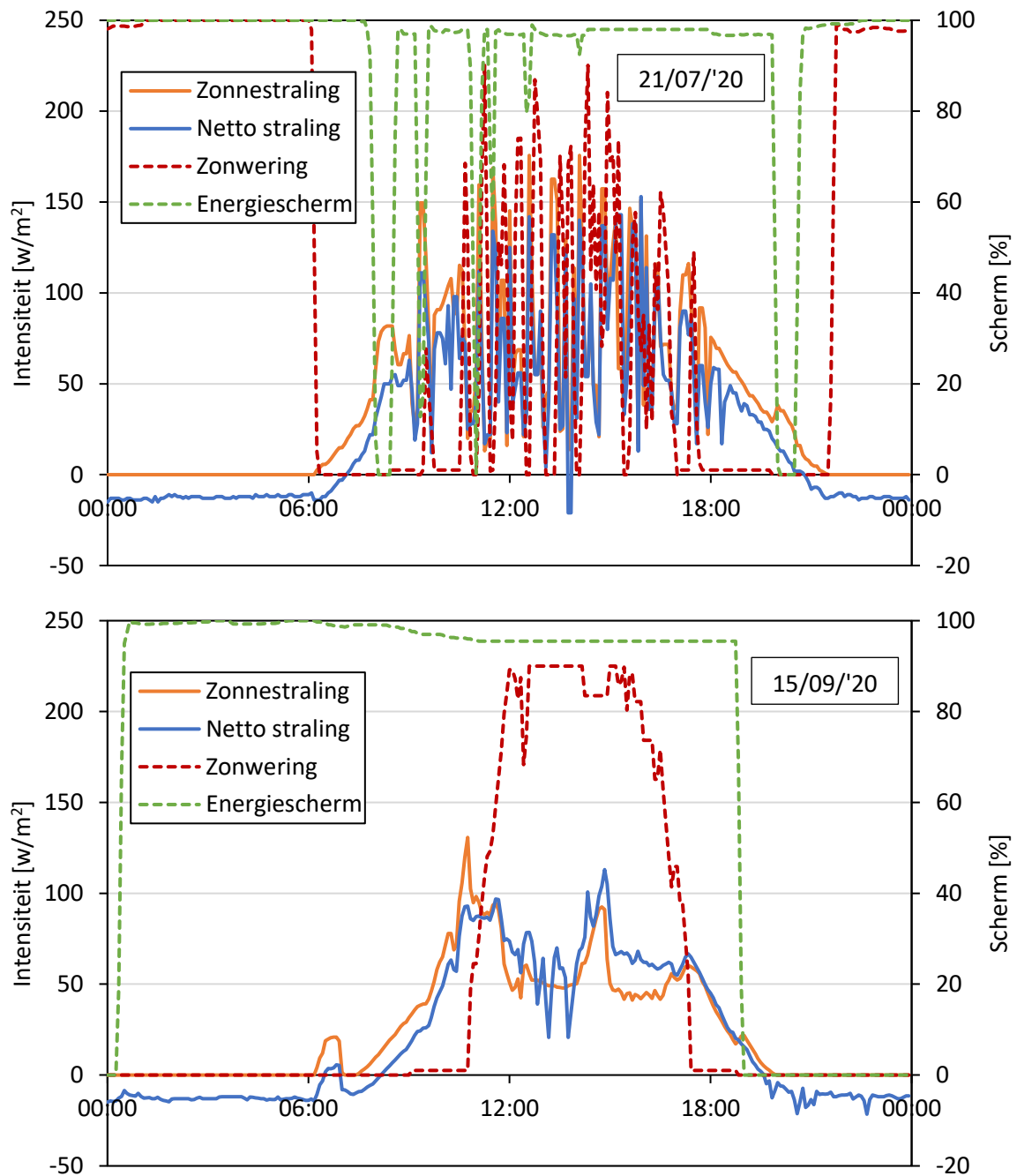
Figuur 1 en 2 laten enkele dagen zien bij Stolk Brothers. Het blijkt dat op donkere dagen de zonnestraling ruim boven de netto straling ligt (Figuur 1, 9 juli): De verhouding netto straling / zonnestraling ligt zelfs maar rond de 0.7. Een vuistregel voor reflectie van PAR-straling is dat deze tussen de 5-10% ligt. Dit suggereert dat er rond de 20% netto warmtestraling richting het kasdek verdwijnt als de ijking van de sensoren in absolute zin gelijk is. Op een lichte dag (Figuur 1, 13 juli) zien we dat de zonnestraling en netto straling dezelfde intensiteit hebben. Op sommige momenten komt de netto straling zelfs boven de zonnestraling uit en is de verhouding netto straling / zonnestraling hoger dan 1. De stijging van de netto straling ten opzichte van de zonnestraling op een lichte dag kan verklaard worden door een hogere warmtelast van de schermen.



Figuur 1. Schermstanden, zonnestraling en netto straling op gewasniveau gemeten bij Stolk Brothers op 9 juli en 13 juli 2020.

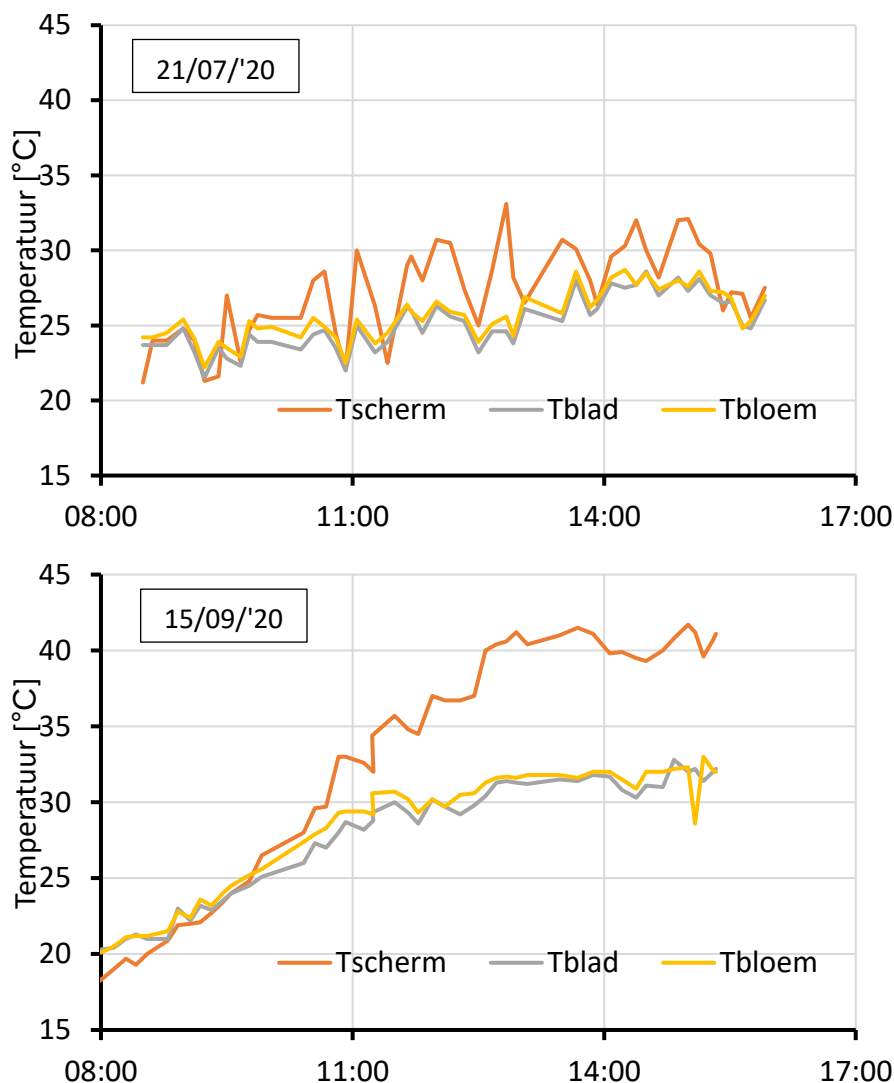
Op 21 juli en 15 september 2020 vond een vergelijkende meetdag plaats voor de huidmondjesgeleiding (hoofdstuk 4). 21 Juli (Figuur 2) was een dag waarin continu zon en wolk zich afwisselden. Op die dag werd de schermtemperatuur nauwelijks hoger dan de planttemperatuur en vond er continu snelle opwarming en afkoeling van het scherm plaats (Figuur 3). Vanuit het gegeven dat een scherm nauwelijks massa heeft, ligt dit voor de hand. Hierdoor blijft de netto straling lager dan de zonnestraling (Figuur 2, 21 juli). Warmtestraling door de schermen vindt dus voornamelijk plaats op momenten dat de zon onafgebroken het scherm beschijnt. Dit was zeer duidelijk het geval op een zonnige (parabool)dag waarop ook

het krijt van het kasdek was verwijderd (Figuur 2, 15 september). Die dag werden er schermtemperaturen tot wel 40°C gemeten (Figuur 3). Dit lag wel $\pm 3^{\circ}\text{C}$ hoger dan eerder gemeten onder krijt.



Figuur 2. Schermstanden, zonnestraling en netto straling op gewasniveau op de meetdagen 21 juli en 15 september 2020 bij Stolk Brothers (hoofdstuk 3). Op 21 juli varieerde de instraling fors. Hierdoor liep de schermtemperatuur maar beperkt op in temperatuur en bleef de netto straling onder de zonnestraling. Op 15 september was het krijt van het dek en werden er schermtemperaturen van 40°C gemeten. Dit geeft de volgende orde van grootte van warmtelast: netto straling is 65W, zonnestraling 44W. Dus tenminste 21W is direct toe te rekenen aan inkomende warmtestraling. Dit geldt alleen voor een klein deel van de dag

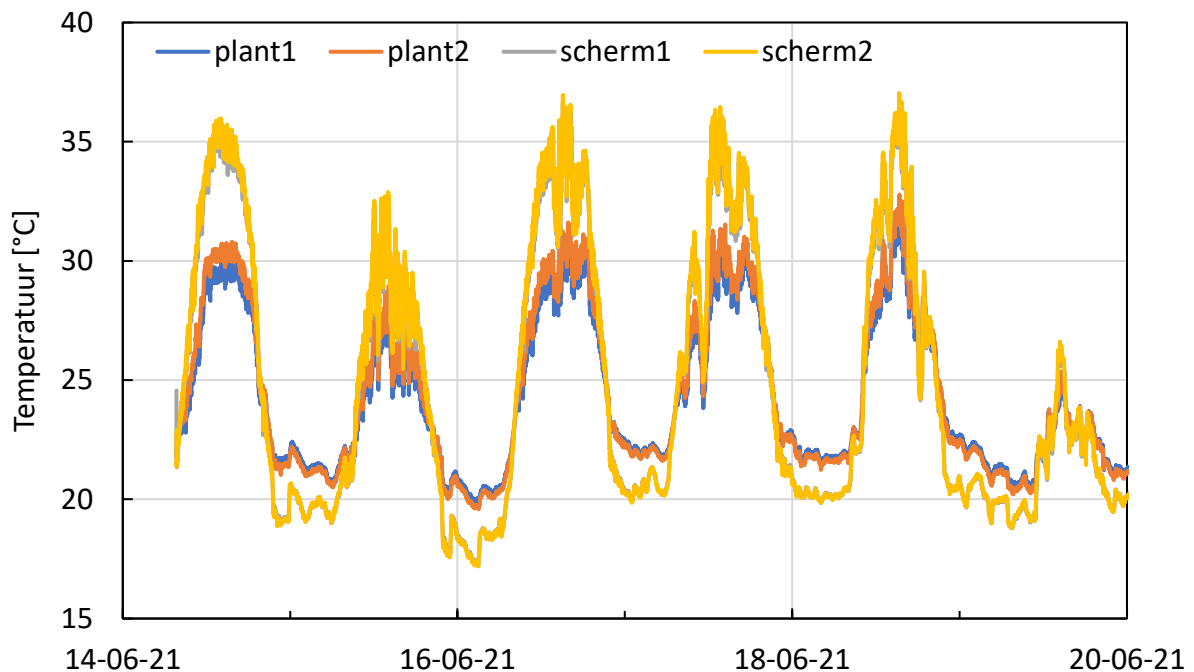
Figuur 2 laat voor een lichte dag zien (15 september) dat 's ochtends de netto straling onder de zonnestraling in de kas ligt, terwijl deze er 's middags ruim bovenuit gaat. In getallen is er tussen 15:00 en 17:00 uur ongeveer 40-44W zonnestraling en 62-65W netto straling. Dit betekent dat er tenminste 21W aan warmtestraling aan de warme schermen is toe te rekenen. Mogelijk is dit nog meer dan 21W, ervanuit gaande dat ongeveer 10% van de zonnestraling wordt weerkaatst. De werkelijke warmtelast kan in dit geval beter worden gemeten met een pyrgeometer. Als de warme schermen helemaal geen rol zouden spelen, dan ligt de ratio netto straling/zonnestraling op 0.8 (15 september 's ochtends). Vanuit dit gegeven zou er 's middags $44 \times 0.8 = 35\text{W}$ netto straling verwacht mogen worden. In werkelijkheid ligt de netto straling 's middags dus zo'n $65\text{W} - 35\text{W} = 30\text{W}$ hoger dan verwacht.



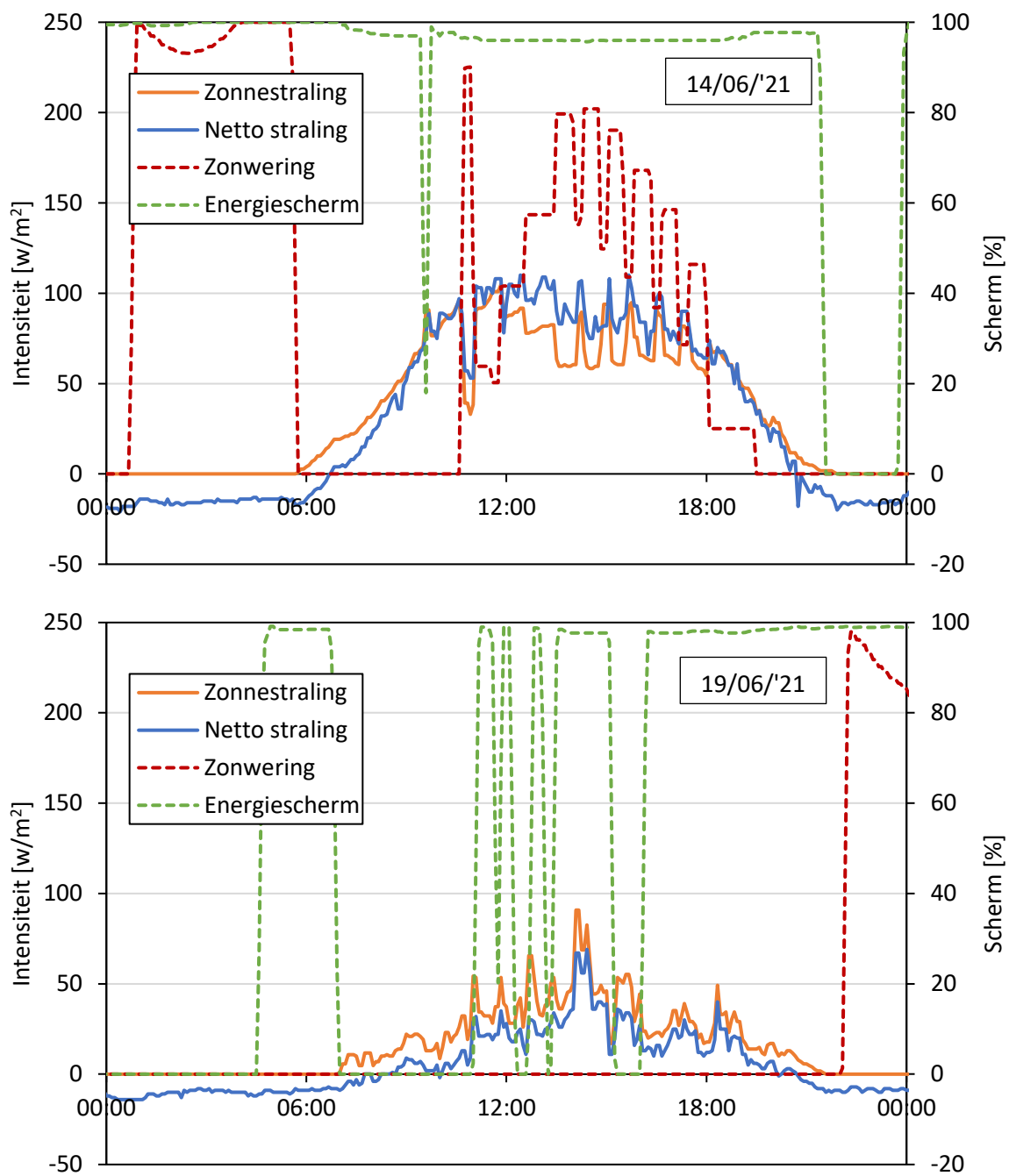
Figuur 3. Temperatuur van het blad, bloem en het scherm op 21 juli en 15 september 2020 bij Stolk Borthers. De temperatuur is bepaald met een Fluke 561 IR-thermometer, mogelijk is hierdoor de schermtemperatuur onderschat doordat de emissiviteitsfactor op 'hoog' stond.

Op 14 juni 2021 ligt de temperatuur van de schermen 5°C hoger dan de planttemperatuur (Figuur 4). Dit verschil in temperatuur kan een extra warmtelast richting het gewas veroorzaken. Dit is goed terug te zien in Figuur 5, 14 juni, waar de netto straling met 20-35%

boven de zonnestraling komt te liggen. Echter op 19 juni (Figuur 4) verschilden de schermtemperatuur en planttemperatuur nauwelijks van elkaar. Bij gelijke temperaturen vindt er netto geen uitwisseling van warmtestraling plaats. In Figuur 5 is te zien dat de netto straling op 19 juni lager blijft dan de zonnestraling, wat er dus op duidt dat er geen extra warmtelast voor het gewas optreedt. Dit bevestigt nogmaals dat een positief verschil in scherm- en planttemperatuur een extra warmtelast veroorzaakt voor het gewas.



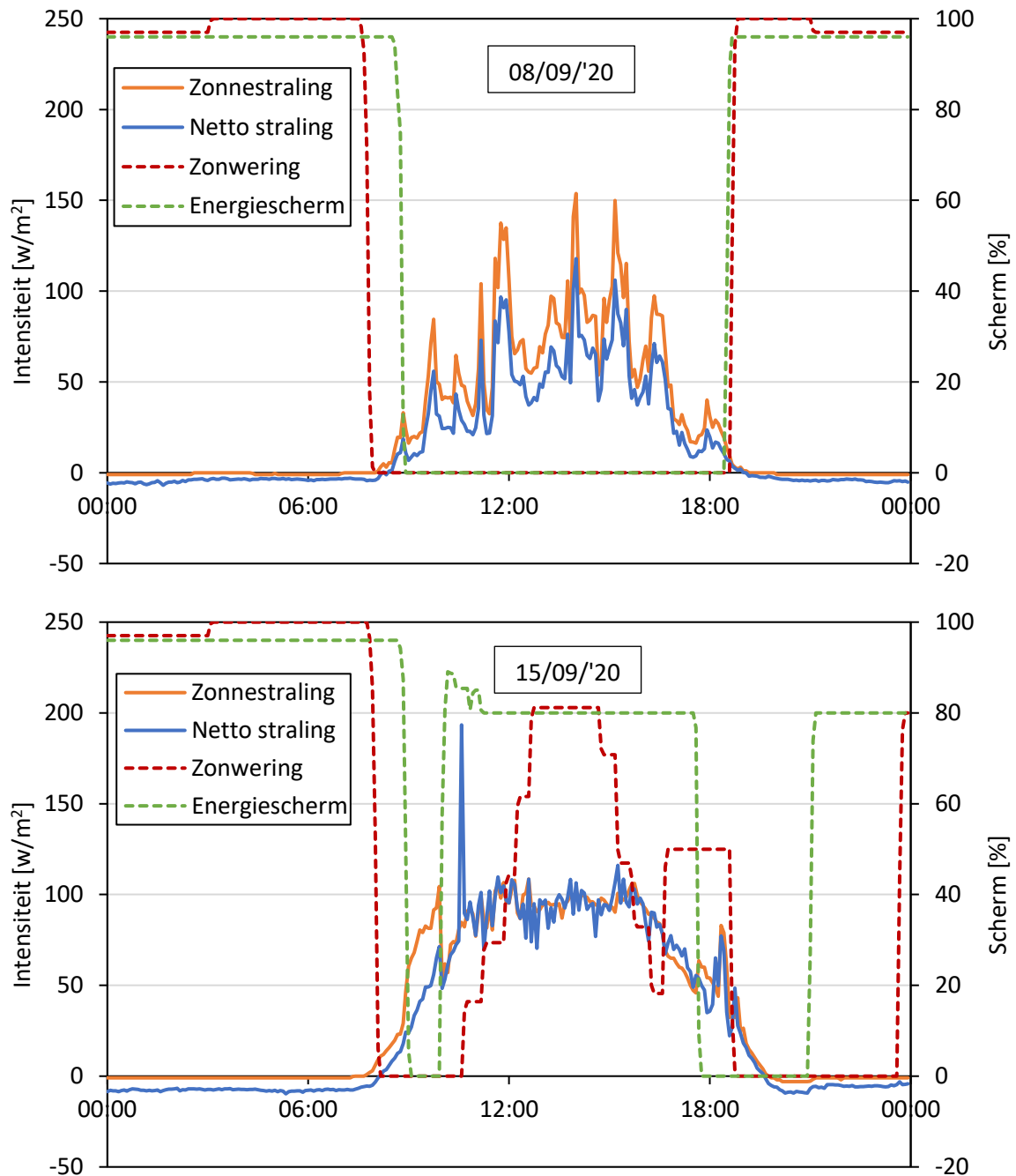
Figuur 4. Plant- en schermtemperatuur gemeten bij Stolk Brothers. Op 14 juni 2021 ligt de schermtemperatuur 5°C hoger dan de planttemperatuur, terwijl deze op 19 juni 2021 gelijk ligt aan elkaar. Bij gelijke temperaturen vindt er netto geen uitwisseling van warmtestraling plaats. De meting is uitgevoerd met 4 exergen micro-sensoren: 2 gericht op de planten en 2 gericht op de schermen.



Figuur 5. Schermstanden, zonnestraling en netto straling op gewasniveau gemeten bij Stolk Brothers op 14 juni en 19 juni 2021.

2.4 Evanty

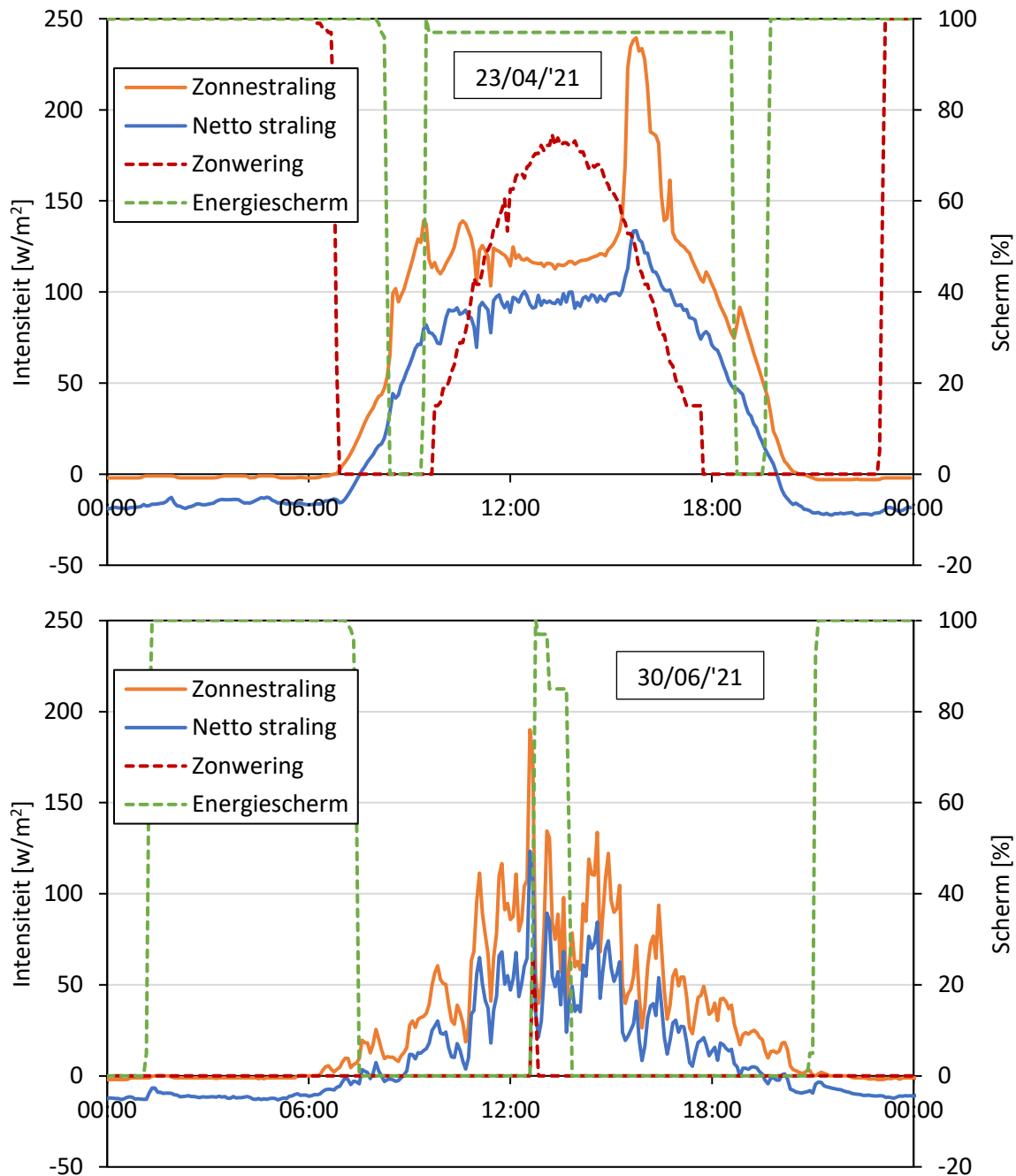
Figuur 6 laat een donkere dag en een lichte dag zien bij Evanty op 8 en 15 september 2020. De verschuiving in balans tussen netto straling en zonnestraling is helder waar te nemen. Op 8 september lag de ratio netto straling / zonnestraling op 0.7 en op 15 september op 1. Dit laat zien dat de warmtestraling van de schermen een significante bijdrage levert op de energiebalans van de bladeren, waardoor er tussen een donkere dag en een lichte dag de verhouding tussen netto straling en de zonnestraling zo'n 30% verschuift. Op ruwweg 100W instraling is dit een significante bijdrage aan de energiebalans van de bladeren.



Figuur 6. Schermstanden, zonne- en netto straling op gewasniveau bij Evanty op 8 en 15 september 2020. Op 15 september was het kruit van het dek. De netto straling/zonnestraling was 0.7 op 8 september en 1 op 15 september.

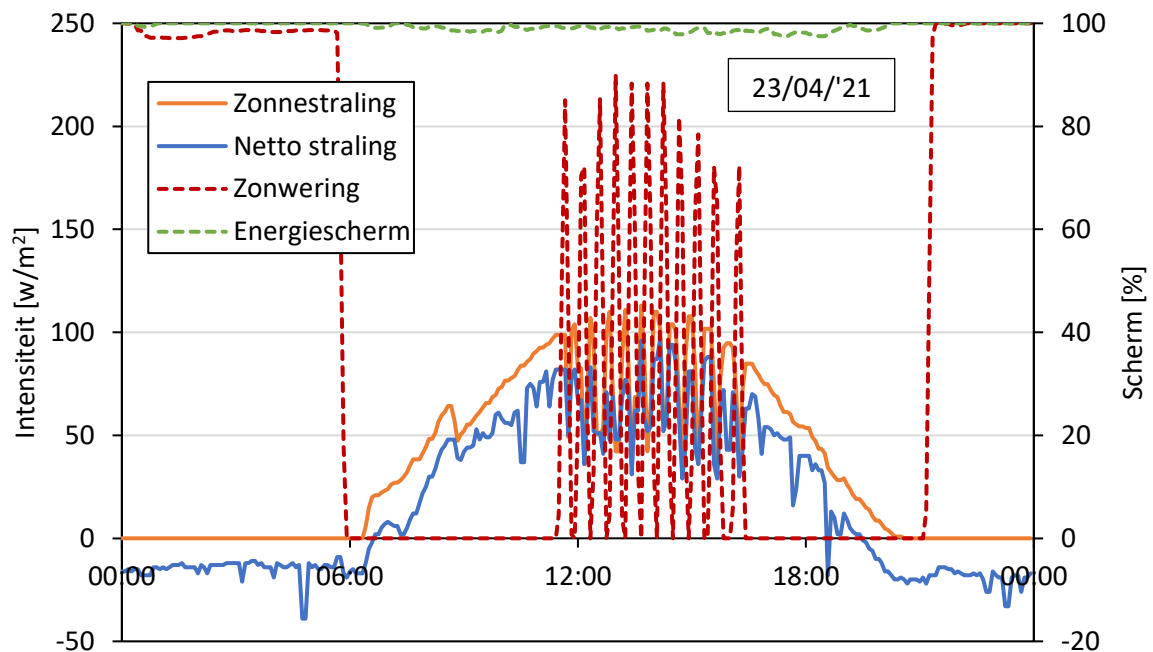
2.5 WE-Plants

Ook bij WE-Plants is op lichte en donkere dagen de netto straling en de zonnestraling gemeten. Op 23 april (parabooldag) lag deze verhouding op maximaal 0.8. Op een bewolkte dag (30 juni 2021) ligt de netto straling ook onder de zonnestraling en was deze verhouding in de middag 0.6. Tijdens een zonnige dag stijgt de netto straling dus wel ten opzichte van de zonnestraling. Echter, het lijkt dat dit effect op een lichte dag in april, wanneer de buitentemperatuur nog relatief laag is, minder aanwezig is vergeleken met een meting in bijvoorbeeld september bij Stolk en Evanty (Figuur 2 en 6), wanneer de buitentemperatuur hoger is.

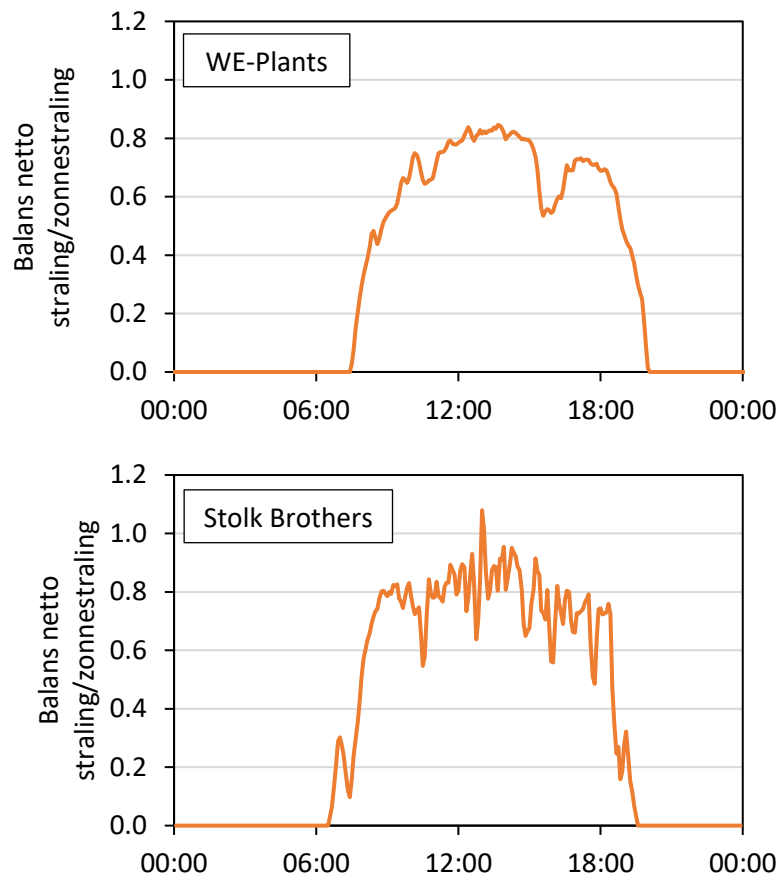


Figuur 7. Schermstanden, zonne- en netto straling op gewasniveau bij WE-Plants op 23 april 2021 en 30 juni 2021. Op 23 april lag de netto straling / zonnestraling midden op de dag op 0.8 en op 30 juni op 0.6.

Ter vergelijking met WE-plants op 23 april 2021, is de verhouding tussen netto straling en zonnestraling ook bepaald voor Stolk Brothers op deze dag (Figuur 8). Ook bij Stolk Brothers stijgt de netto straling niet tot nauwelijks boven de zonnestraling ondanks dat het een lichte dag is. Figuur 9 laat zien dat de verhouding netto straling/zonnestraling midden op de dag iets hoger ligt bij Stolk Brothers dan het geval is bij WE-Plants. Hoe dan ook, bij beide locaties blijft deze ratio ruim onder de 1. Hier valt uit te concluderen dat op het moment dat de buitentemperatuur nog relatief koel is in april, de schermen voldoende gekoeld worden zodat een extra warmtelast richting het gewas wordt voorkomen.



Figuur 8. Schermstanden, zonne- en netto straling op gewasniveau bij Stolk Brothers op 23 april 2021 ter vergelijking met WE-Plants op deze dag.

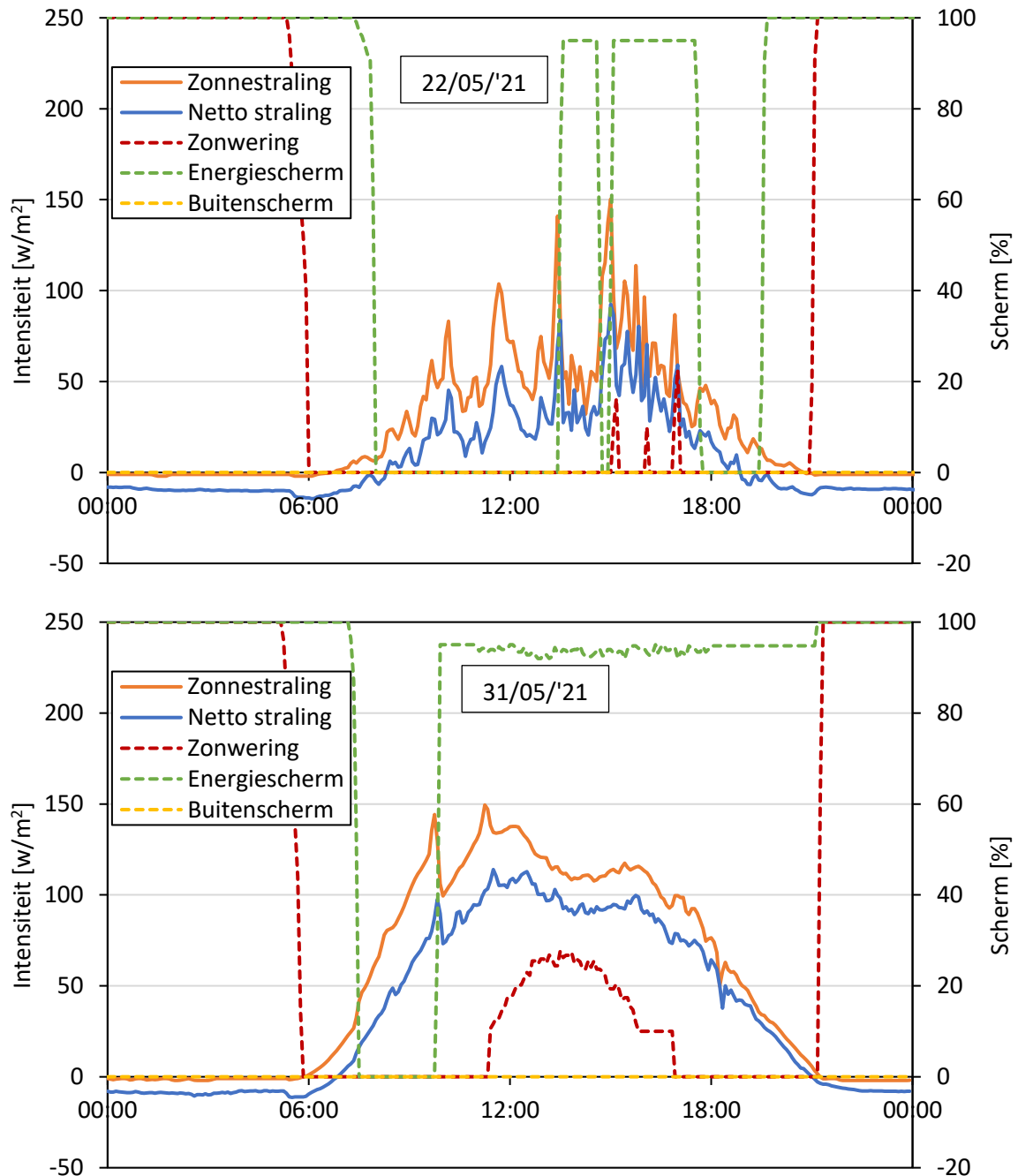


Figuur 9. Balans tussen de netto straling en de zonnestraling op 23 april 2021 zowel bij WE-Plants en Stolk Brothers.

2.6 Rijnplant

Bij Rijnplant was er ook een buitenscherm aanwezig en zijn er van drie situaties een grafiek gemaakt.

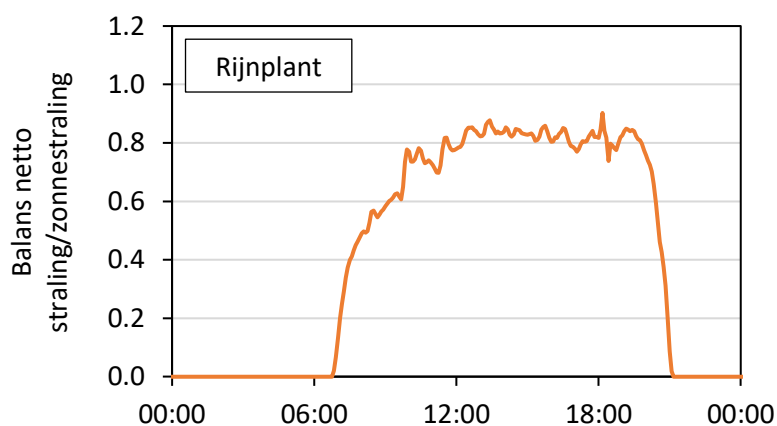
- Zonnige dag met buitenscherm (1&2 juni 2021)
- Zonnige dag met binnenscherm (31 mei en 3 juni 2021)
- Donkere dag (22 mei 2021)



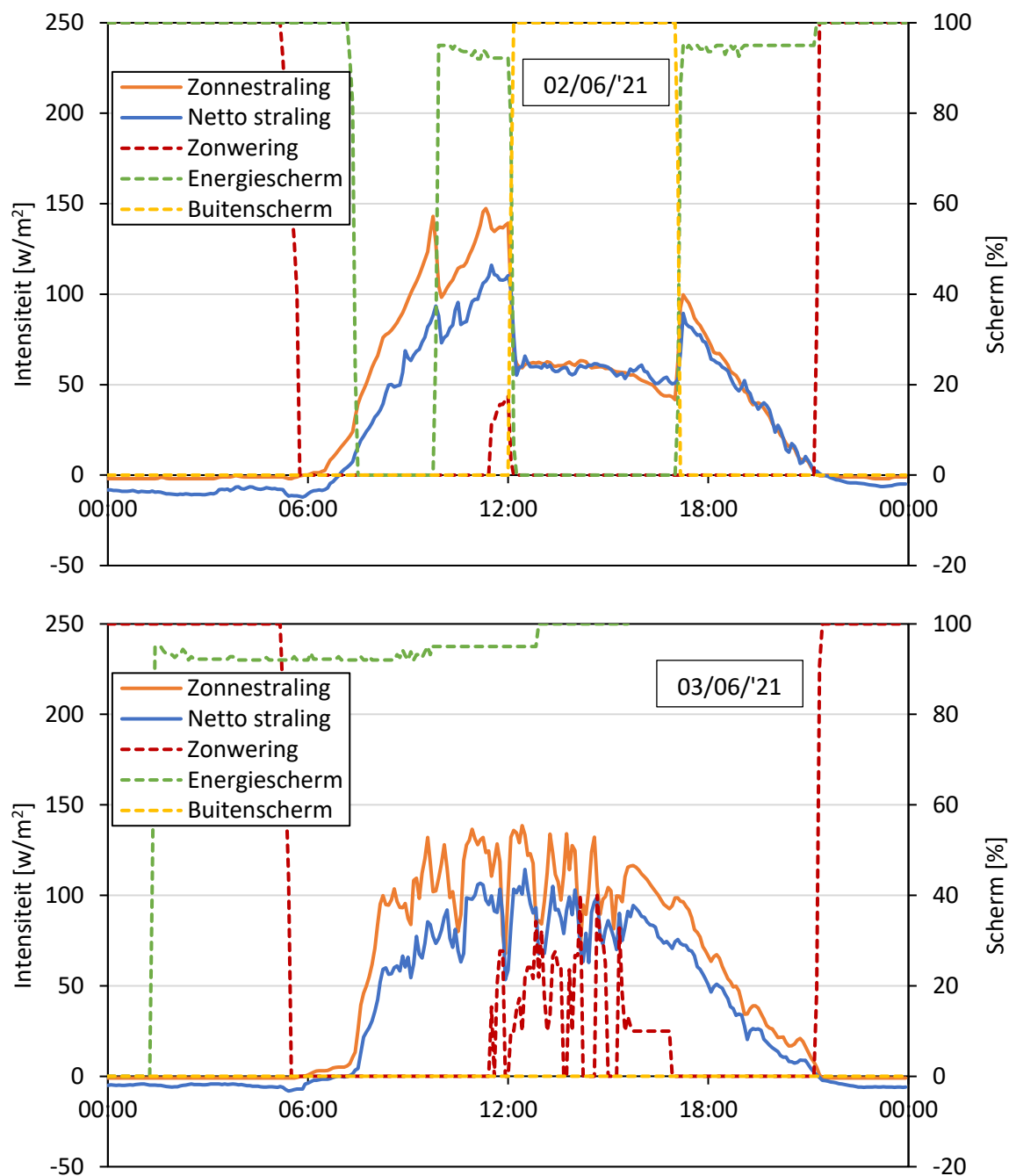
Figuur 10. Schermstanden, zonne- en netto straling op gewasniveau bij Rijnplant op 22 mei (donkere dag) en 31 mei 2021 (lichte dag). Op 22 mei lag de netto straling/zonnestraling op 0.7 en op 31 mei op ruim 0.8.

Opvallend is dat er visueel nauwelijks een verschuiving tussen de netto straling en de zonnestraling op gewasniveau plaats vindt (Figuur 10). In getallen verschuift de balans van maximaal 0.7 naar maximaal ruim 0.8. Op de dagen dat het buitenscherm gebruikt is (Figuur 12), verschuift deze balans echter naar 1. Dit is precies tegengesteld dan van tevoren verwacht werd omdat een buitenscherm effectiever gekoeld zou moeten worden door de buitenlucht dan binnenschermen. Mogelijk heeft dit (deels) te maken met het feit dat 2 juni de warmste dag was in een reeks van zonnige dagen (maximale buitentemperatuur van $\pm 27.5^{\circ}\text{C}$ ten opzichte van $\pm 22.5^{\circ}\text{C}$ op 31 mei en $\pm 23^{\circ}\text{C}$ op 3 juni). Ter vergelijking laat 3 juni een balans van netto straling/zonnestraling zien van maximaal rond de 0.8. Door de fors lagere buitentemperatuur zou mogelijk de temperatuur van het binnenscherm zelfs koeler kunnen zijn dan de temperatuur van het buitenscherm een aantal dagen later. Echter de buitentemperaturen van 1 juni (gebruik buitenscherm maar grafiek niet getoond) en 3 juni liggen dicht bij elkaar terwijl op 1 juni de netto straling door het gebruik van het buitenscherm op het niveau van de zonnestraling komt te liggen. Dit is niet het geval op 3 juni. Dit suggereert dat de emissiviteit van de binnenschermen lager is dan van het glas en het buitenscherm. Hoe lager de emissiviteit, hoe minder warmteoverdracht van warme schermen naar de planten.

Opvallend is ook het patroon van de zonnestraling en de netto straling op 31 mei 2021. 's Ochtends verschillen de lijnen meer van elkaar dan 's middags (Figuur 10). Dit suggereert het effect van opwarming gedurende de dag. In getallen is de balans tussen netto straling en zonnestraling bij 50W zonnestraling in de ochtend 0.4 (7:30 met 12.5°C buitentemperatuur) en in de namiddag 0.8 (19:00 met 20°C buitentemperatuur), zie Figuur 11.



Figuur 11. Balans tussen de netto straling en de zonnestraling op gewasniveau bij Rijnplant op 31 mei 2021. Bij 50W zonnestraling is de balans tussen netto straling en zonnestraling in de ochtend 0.4 (7:30) en in de namiddag 0.8 (19:00).



Figuur 12. Schermstanden, zonne- en netto straling op gewasniveau bij Rijnplant op 2 en 3 juni (beide lichte dagen). Op 2 juni werd het buitenscherm gebruikt en op 3 juni de binnenschermen. De netto straling/zonnestraling lag respectievelijk op 1 en 0.8.

2.7 Evaluatie en conclusies warmtelast schermen

In dit deelonderzoek is er een antwoord gezocht naar de volgende twee vragen:

1. Klopt het dat de warmtestraling op kan lopen tot 40W (theoretische berekening in Trouwborst *et al.* 2019) of is uiteindelijk de emissiviteit van een scherm laag en daardoor de potentiële warmtelast (veel) lager?
2. Verschilt de balans tussen netto straling en zonnestraling onder verschillende schermtypen?

Ad1. Kan de warmtestraling door warme schermen oplopen tot 40W?

Vanuit het geheel van de metingen komt naar voren dat de balans tussen de netto straling en de zonnestraling kan verschuiven van maximaal 0.7 op donkere dagen naar rond de 1 op lichte dagen. Dit geeft dus een verschuiving in warmtelast van ~30%. Bij een zonnestraling van ruwweg 100W op plantniveau betekent dit een verschuiving in de stralingsbalans van ruwweg 30W, en ligt dus iets lager dan de eerdere theoretische berekening (Trouwborst *et al.* 2019). Deze verschuiving van 30% benadrukt de noodzaak van het gebruik van de netto stralingsmeter—in plaats van de PAR-meter die met een vaste verhouding omgerekend wordt naar inkomende energie—voor het opstellen van de energiebalans bij zwaar geschermd teelten zoals Anthurium. De meetdag van 21 juli 2020 bij Stolk Brothers maakte inzichtelijk dat deze verschuiving in balans voornamelijk optreedt op heldere dagen. Op dagen dat de instraling fors fluctueert door afwisselend zonnig en bewolkt koelt het scherm snel af.

Ad2. Verschilt de balans tussen netto straling en zonnestraling onder verschillende schermtypen?

Alle vier de bedrijven hadden als onderste schermdoek een energiescherm LS10 of wat daarop lijkt. Als bovendoek waren de verschillen groter: van compleet verduisterend (Rijnplant) tot zo'n 60-70% scherming met witte of aluminium bandjes. Op donkere dagen werd er bij alle tuinders een balans van netto straling / zonnestraling overdag oplopend tot maximaal 0.7 gemeten. Op lichte dagen in september liep bij Stolk Brothers en Evanty de balans op naar 1 (krijt eraf) terwijl dit niet gebeurde bij Rijnplant, WE-Plants en Stolk Brothers (april-juni; krijt erop). Dit had veel te maken met de (koelere) buitentemperatuur. Opvallend was dat bij Rijnplant het buitenscherm een negatieve invloed had op de balans ten opzichte van het gebruik van een binnenscherm. Deels lijkt dit met de (warmere) buitentemperatuur te maken en deels met de emissiviteit van het energiescherm die lager dan het glas zou moeten zijn (energiescherm maximaal 0.7 en glas dicht bij de 1). Hoe lager de emissiviteit, hoe lager de energieoverdracht van warme schermen richting de planten.

Op basis van deze metingen kan er geen harde uitspraak gedaan worden over verschillen tussen tuinders. Wel kunnen de volgende aanbevelingen gedaan worden:

- Als het puur gaat om (netto) warmtelast is een dubbele (netto) pyrgeometer makkelijker te interpreteren.
- Voor de volledige interpretatie van de gepresenteerde gegevens zou idealiter de buitentemperatuur, de plant en schermtemperatuur ook moeten zijn gemeten.

- De emissiviteit van schermen kan het best op lab-schaal worden nagemeten (zie o.a. Baart de la Faille *et al.* 2009; Bronchart & Corbala 2021).

De bottomline is dat alle waargenomen verschuivingen in de balans tussen netto straling en zonnestraling op plantniveau het belang benadrukken om voor bepaling van de energiebalans te werken met netto stralingsmeter. Als dit niet wordt meegenomen in de energiebalans, geeft dit een grote onderschatting in berekende huidmondjesgeleidbaarheid.

3 Resultaten huidmondjesgeleidbaarheid

3.1 Methode stomatasensor anthurium

Metingen aan het gewas Anthurium met een Li-6800 voor de fotosynthese en de huidmondjesgeleidbaarheid (Foto 2) vonden plaats bij Stolk Brothers te Bergschenhoek. Er zijn op 7 dagen vergelijkende metingen uitgevoerd (Tabel 2). Voor de berekeningen van de energiebalans moeten de volgende zaken gemeten worden. Idealiter alles in hetzelfde meetvlak:

- Luchttemperatuur en RV (via de meetbox)
- Planttemperatuur (standaard PT-meter, Heitronics CT11; zie Bijlage 1 voor meetoppervlak)
- Netto straling (en/of PAR) via een fytawatch (Saber B.V)

Tijdens de meetdagen is met een Fluke 561 handthermometer de plant- en bloemtemperatuur en de schermtemperatuur bepaald. Op deze handmeter zit een instelbare emissiviteitsfactor. Deze moet voor planten op 'hoog' staan. Mogelijk vallen schermen in de categorie 'medium'. In dat geval is de schermtemperatuur waarschijnlijk enigszins onderschat.



Foto 2. Metingen Gs en CO₂-opname met een Li-6800 (links) en meetopstelling met een netto stralingsmeter bij Stolk Brothers (rechts).

Tabel 2. Tijdlijn proef Stolk Brothers.

Datum	Actie
21-7-2020	meetdag Li-6800 aan cv 'Fiesta'
15-9-2020	meetdag Li-6800 aan cv 'Fiesta'
22-12-2020	meetdag Li-6800 aan cv 'Fiesta'
25-1-2021	meetdag Li-6800 aan cv 'Vanilla'
31-5-2021	meetdag Li-6800 aan cv 'Sizou'
3-6-2021	meetdag Li-6800 aan cv 'Sizou'
14-6-2021	meetdag Li-6800 aan cv 'Fiesta'

3.2 Aanpassingen energiebalansmethode

Voogt en van Weel (2008) hebben de energiebalansmethode in de Nederlandse tuinbouw geïntroduceerd. In Trouwborst *et al.* 2019 staat in bijlage 2 de energiebalans uitgebreid uitgewerkt. Om te komen tot een berekening van de huidmondjesgeleidbaarheid worden de Energiebalans-theorie gecombineerd met de Massa-transfer theorie (Katsoulas & Stanghellini, 2021). Kort samengevat komt het op het volgende neer:

- Energiebalans: $l \cdot E = R_n - Q$
- Massa transfer: $G_s = E / VPD$

Hierbij staat l voor de verdampingswarmte van water (2256 kJ/kg), E voor transpiratie (kg/m²/s), R_n (W/m²) voor de netto straling. Q voor de convectieve warmteoverdracht (W/m²) en VPD voor het dampdrukdeficit tussen kaslucht en de plant (kPa) en G_s voor de huidmondjesgeleiding (kg/m²/s/kPa). Q wordt berekend als:

$$Q = h(T_{kas} - T_{gewas})$$

Hierbij staat h voor de warmteoverdrachtscoëfficiënt (W/m²/K) en T_{kas} en T_{gewas} voor de lucht- en planttemperatuur (°C of K). Meerdere onderzoeken hebben uitgewezen dat hoewel h formeel afhankelijk is van de grenslaagweerstand en dus ook van de windsnelheid, er met een vaste constante mag worden gerekend (Stanghellini *et al.* 2019, Katsoulas & Stanghellini, 2021). In bijlage 2 zijn gemeten windsnelheden bij Anthurium opgenomen.

De stomatasensor draait op het dataplatform van LetsGrow. Normaliter wordt het model gevoed door de gemeten PAR in de kas om te rekenen naar straling. Voor dit onderzoek is het model geschikt gemaakt om de netto stralingsmeter in te lezen.

3.3 Resultaten per meetdag

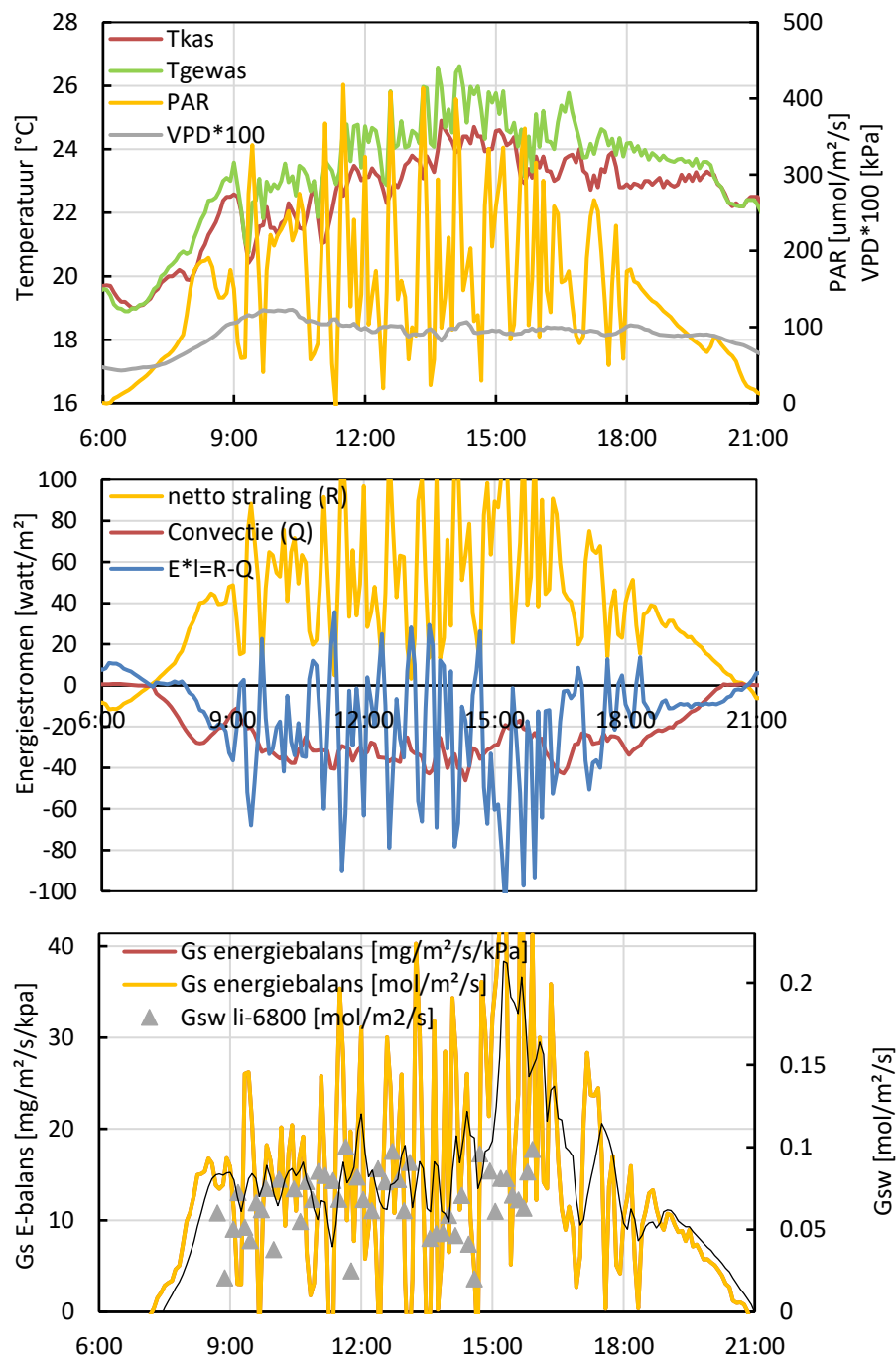
Figuur 13 geeft de meetresultaten weer van 21 juli 2020. Dit was een dag waarop het zeer wisselend zonnig en bewolkt was. De PAR en netto straling in de kas en de planttemperatuur laten dan ook een zeer piekerig verloop zien. De gemeten G_s via de Li-6800 liet een vrij stabiel patroon zien, terwijl de berekende G_s logischerwijze een zeer piekerig patroon laat zien. Hieruit is te zien dat de berekende G_s uitgaat van een balans terwijl er ook tijdelijk netto opwarming of netto afkoeling van de bladeren kan zijn. Dit komt terug in het piekerige verloop van de planttemperatuur. De orde van grootte van beide methodes komt wel goed overeen. De stomatasensor op LetsGrow is gebaseerd op een lopend gemiddelde van 30 minuten; 6 meet/rekenpunten) waardoor er automatisch een rustiger beeld ontstaat.

Een ander belangrijk leerpunt van deze dag was het effect op de schermtemperatuur. Door de wisselende instraling kon worden waargenomen dat het scherm snel afkoelt tijdens een wolk voor de zon (een scherm heeft nauwelijks massa en komt dus snel weer in de buurt van de luchttemperatuur). Dit is besproken in hoofdstuk 2.

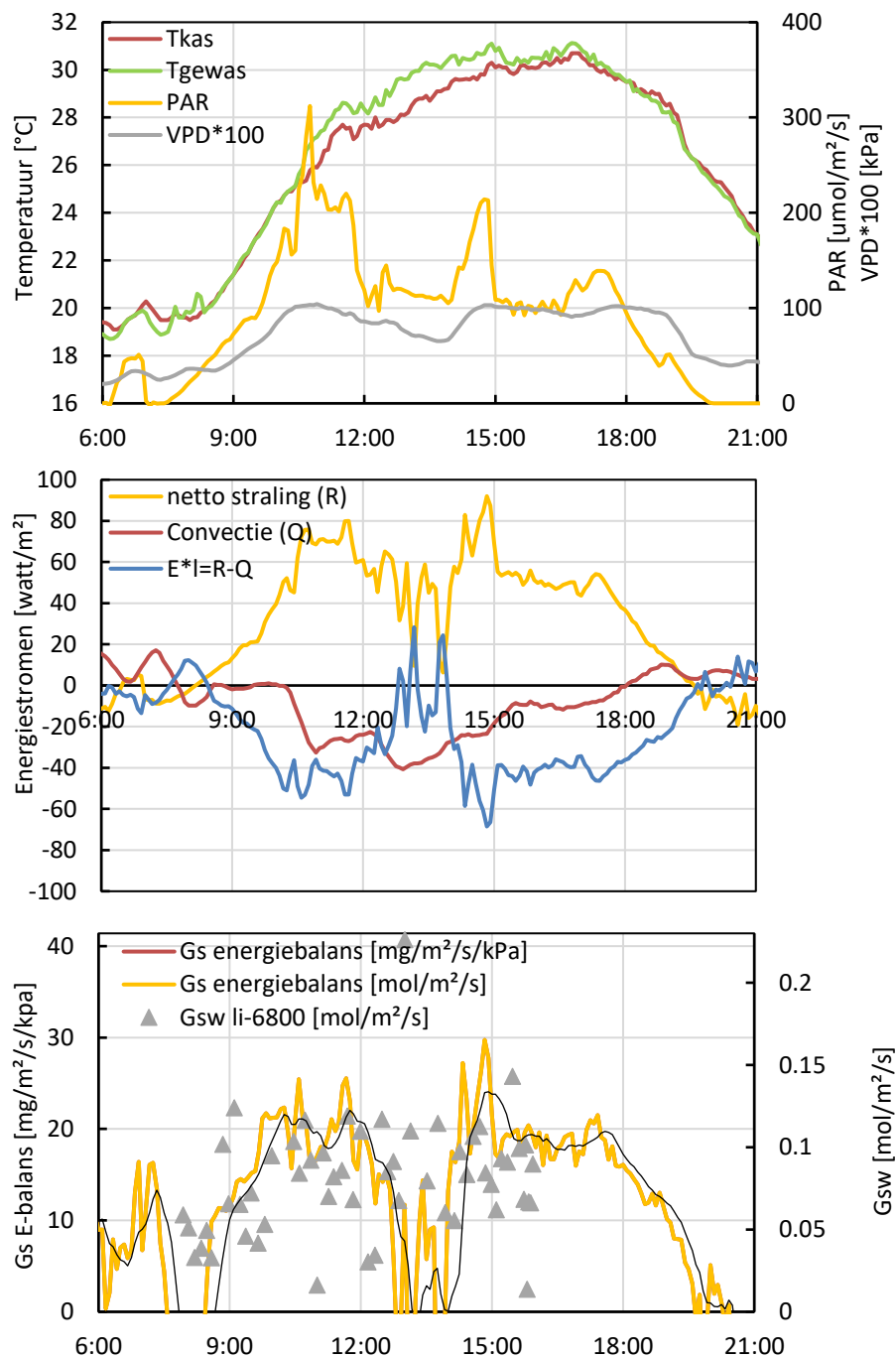
Op de tweede meetdag (15 september 2020) gebeurden er twee opvallende zaken (Figuur 14). Beide waren een direct gevolg van het feit dat het krijt van het dek was verwijderd:

- De schermtemperatuur steeg tot 40°C als de zon op het scherm brandde.
- Doordat een laag krijt werd gemist (maakt licht deels diffuus) ontstond er een licht- en schaduwbaan op het gewas als het energiedoek samen met het zomerdoek gebruikt werd (Foto 3). Doordat het meetvlak van de PT-meter voor een groot deel buiten de lichtbaan viel, ontstond er rekenkundig een artefact: een relatief lage planttemperatuur bij een forse instraling én andersom.
 - Ruwweg wordt er tussen 12:00 en 15:00 een relatief hoge planttemperatuur ten opzichte van de luchttemperatuur gemeten, terwijl de instraling op de netto stralingsmeter op dat moment relatief laag is. Hierdoor wordt de convectieve afvoer van energie kunstmatig zo hoog dat de berekende verdamping nihil wordt zodat er een huidmondjessluiting wordt berekend. Deze huidmondjessluiting is met de Li-6800 niet waargenomen (grijze punten in Figuur 14).

Idealiter moet dus de netto stralingsmeter in het meetvlak van de PT-meter worden opgesteld. De conclusie ligt voor de hand dat onder diffuus licht er minder snel van dit soort artefacten zullen voorkomen.



Figuur 13. Klimaat, energiebalans gewas en gemeten (grijze driehoekjes) en berekende huidmondjesgeleiding op 21 juli 2020 bij cv Fiësta. Ieder driehoekje is een afzonderlijk meetblad. Per meetdag zijn er rond de 50 verschillende bladeren gemeten. NB de getallen voor huidmondjesgeleidbaarheid verschillen met factor 180 tussen de linker- en rechteras omdat de eenheid waarin huidmondjesgeleidbaarheid berekend wordt anders is; de rode lijn ligt precies onder de gele lijn; de zwarte lijn geeft een lopend gemiddelde weer waardoor er automatisch een rustiger beeld ontstaat.



Figuur 14. Klimaat, energiebalans gewas en gemeten (grijze driehoekjes) en berekende huidmondjesgeleiding op 15 september 2020 bij cv Fiësta. Ieder driehoekje is een afzonderlijk meetblad. Per meetdag zijn er rond de 50 verschillende bladeren gemeten. NB de getallen voor huidmondjesgeleidbaarheid verschillen met factor 180 tussen de linker- en rechteras omdat de eenheid waarin huidmondjesgeleidbaarheid berekend wordt anders is; de rode lijn ligt precies onder de gele lijn; de zwarte lijn geeft een lopend gemiddelde weer waardoor er automatisch een rustiger beeld ontstaat.

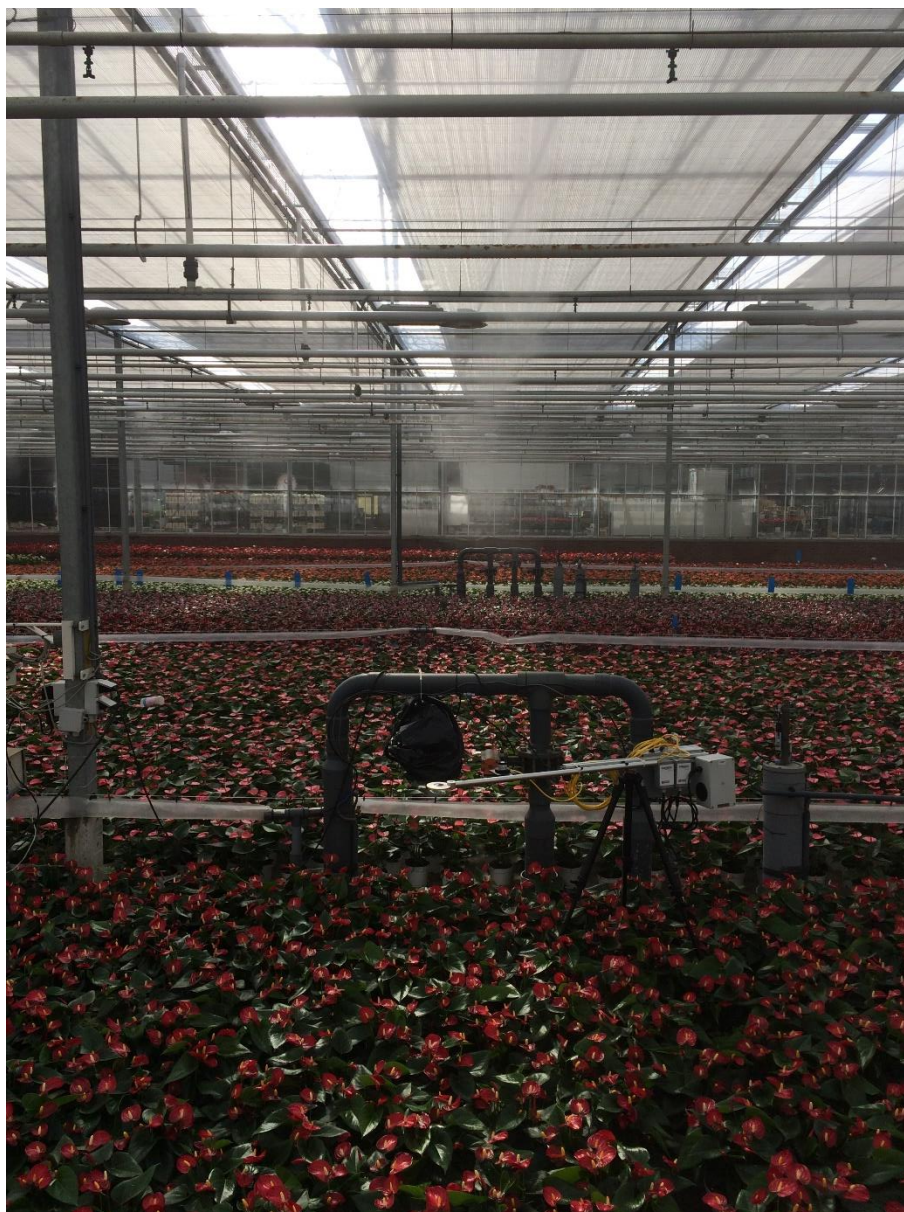
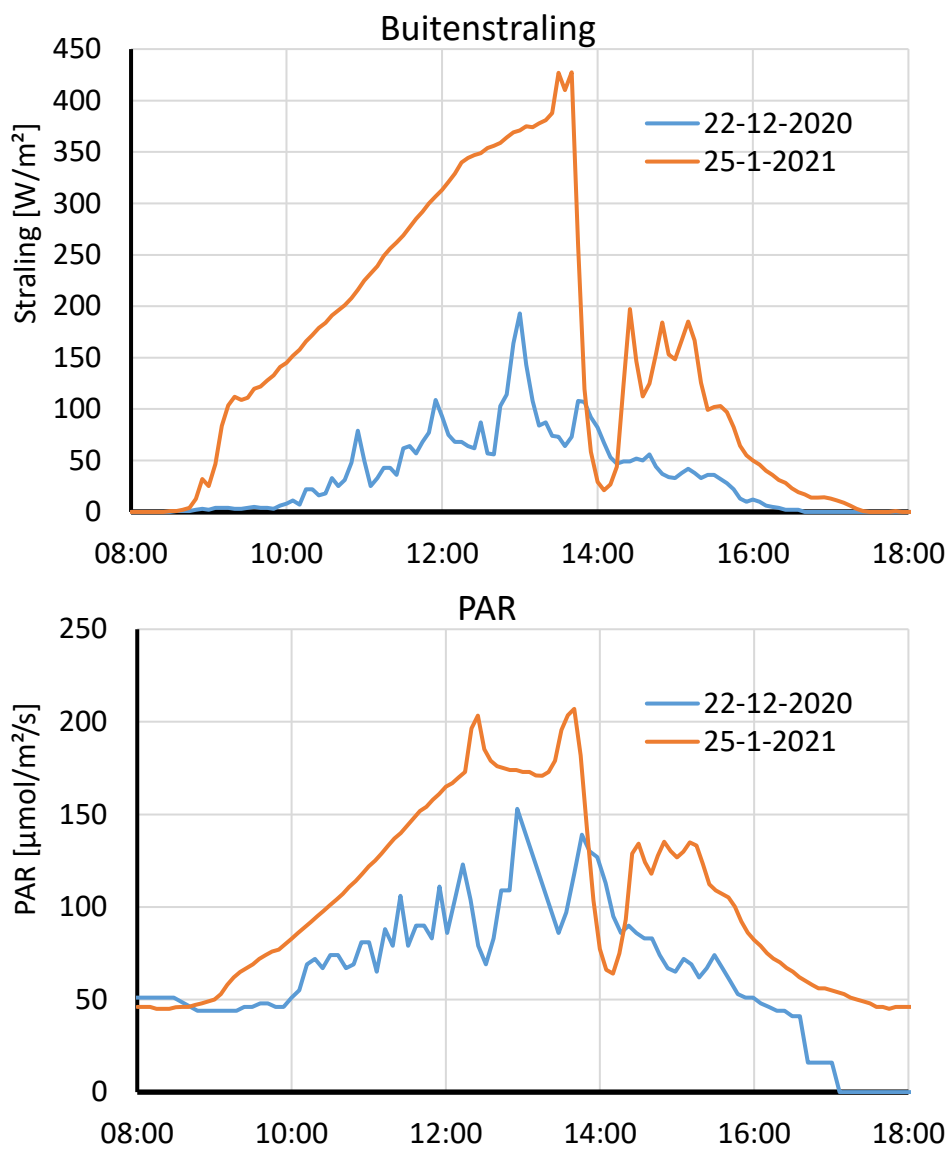


Foto 3. Rond 15:00 loopt er een lichtbaan op de PAR-meter omdat krijt eraf is, terwijl het meetoppervlak van de planttemperatuurmeter voor een groot deel op de planten in de schaduwbaan valt, waardoor er een rekenkundig artefact ontstaat. NB het energiedoek (onderste doek) zit voor praktisch 100% dicht. Idealiter moet dus de netto stralingsmeter in het meetvlak van de PT-meter worden opgesteld. De conclusie ligt voor de hand dat onder diffuus licht er minder snel van dit soort artefacten zullen voorkomen (foto 15 september 2020).

Op 22 december 2020 en 25 januari 2021 zijn de wintermetingen verricht. Hierbij was 22 december een donkere winterdag en werd er voornamelijk aan cv. 'Fiësta' gemeten en 25 januari een lichte winterdag (Figuur 15) en werd er voornamelijk aan cv 'Vanilla' gemeten. Tevens waren op 25 januari schilders bezig in de kas waardoor de verneveling die dag uitstond. Op 25 januari lag de gehele dag de gemeten fotosynthese en huidmondjesgeleidbaarheid lager dan 22 december (Figuur 16). Mogelijk komt dit door de hogere VPD van 1.5 kPa. Niet uit te sluiten valt dat het een cultivar-effect is waarbij 'Vanilla' dus gevoeliger blijkt te zijn dan 'Fiësta'. Op beide meetdagen zijn echter ook enkele planten van respectievelijk 'Vanilla' en 'Fiësta' gemeten die niet afweken van de rest van de metingen.

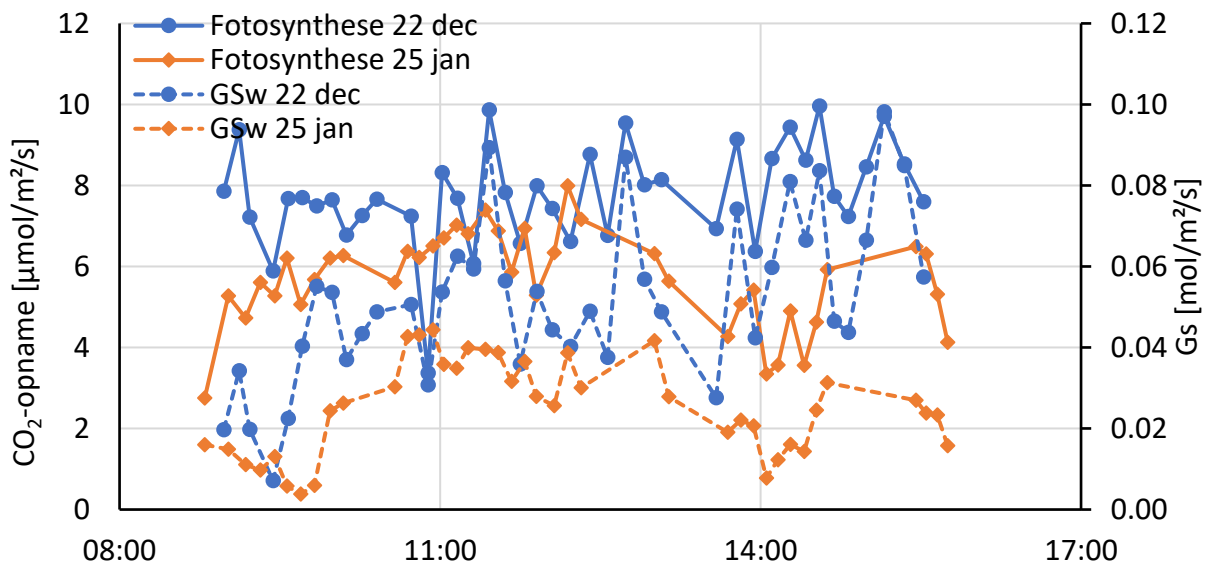
Op beide dagen lag de gemeten netto straling in de belichte nacht rond de 4W. In de onbelichte nacht van 25 januari lag de netto straling zelfs op -18W. Er vindt dan dus veel warmtestraling van het gewas richting het gesloten scherm plaats (energieverlies). De handmatig gemeten schermtemperaturen lagen ook 4 tot 6°C lager dan de gewastemperatuur. Bij $\sim 50 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ SON-T belichting ($\sim 20\text{W}$ energie) levert dat dus maar een zeer lage netto straling op waardoor er geen 'noodzaak' tot huidmondjesopening is. Op beide dagen was de gemeten en berekende huidmondjesgeleidbaarheid aan het begin van de dag zeer laag (Figuur 17 en 18), maar bij $50 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR hoeft een huidmondje ook niet ver open te staan om niet beperkend te zijn voor de fotosynthese. In het geval dat er $\sim 50 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ LED-belichting ($\sim 14\text{W}$ energie bij $3.5 \mu\text{mol}/\text{joule}$) zou zijn toegepast, blijft de netto straling dus onder de 0W hangen. Hoe dan de huidmondjes zouden reageren is onbekend en wel een aandachtspunt!

De gemeten huidmondjesgeleidbaarheid lag op 22 december op het niveau van de berekende huidmondjesgeleidbaarheid (Figuur 17). Op 25 januari tekent zich een overschatting van de berekende huidmondjesgeleidbaarheid af, maar ook de berekening laat gemiddeld lagere waarden zien. Mogelijk heeft de bloemkleur ook nog invloed: Op 25 januari is gemeten aan cv 'Vanilla'; handmetingen van de blad- en bloemtemperatuur laten zien dat de 'witte' bloemen relatief iets koeler zijn dan de rode bloemen van cv 'Fiësta', waardoor de PT-meter gemiddeld een fractie lagere planttemperatuur zal meten bij 'Vanilla' dan bij 'Fiësta' (Op basis van 50 gepaarde waarnemingen verschilt de blad-bloemtemperatuur bij 'Vanilla' 0.02°C en bij 'Fiesta' 0.37°C). Door een temperatuurscorrectie van slechts $+0.3^\circ\text{C}$ toe te passen, is de berekende overschatting van de huidmondjesgeleidbaarheid al verdwenen: De maximale waarde voor Gsw daalt van ~ 0.07 naar $0.05 \text{ mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Dit laat zien dat een zuivere afstemming van blad- en luchttemperatuur zeer belangrijk is.

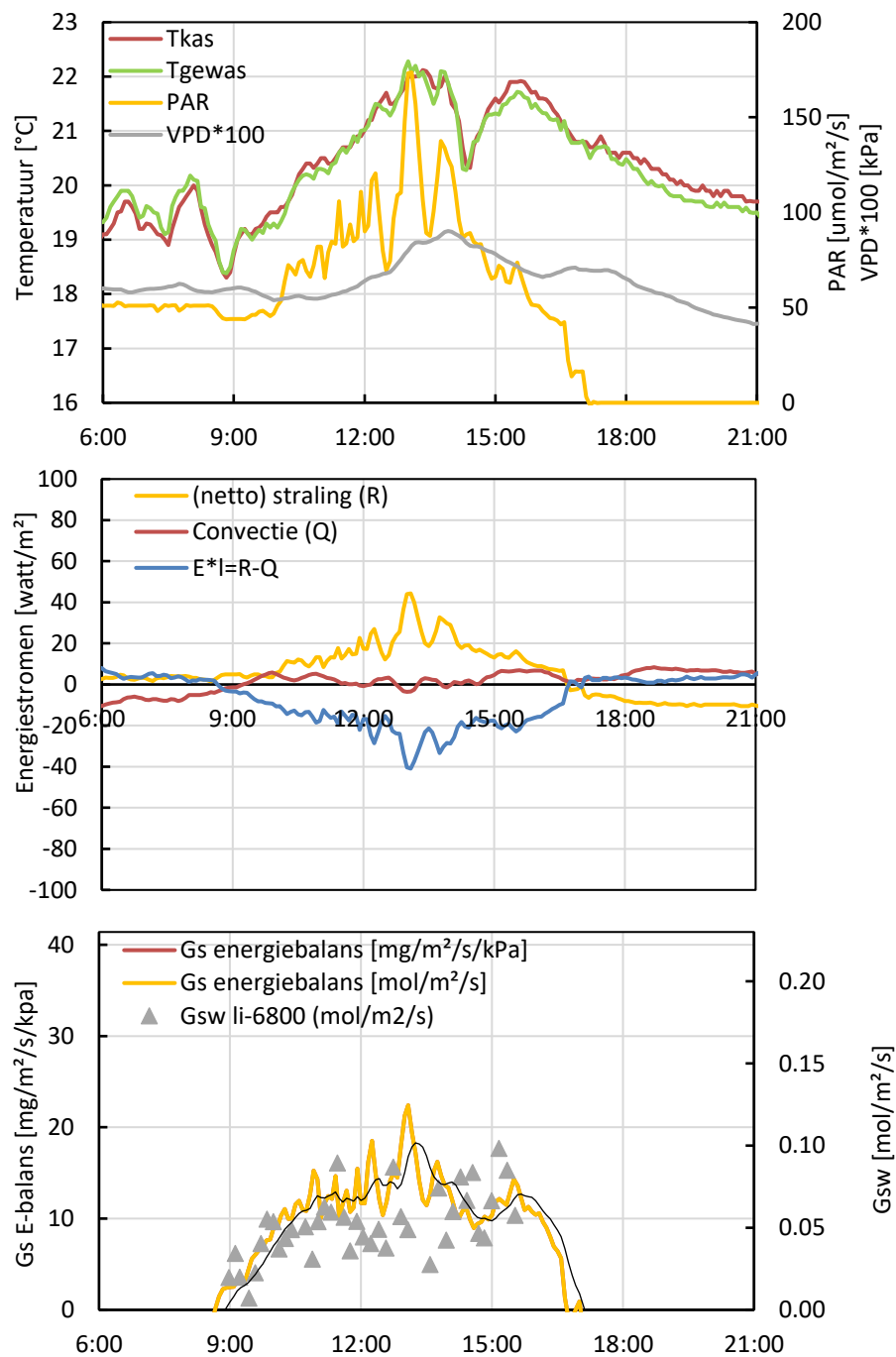


Figuur 15. Buitenstraling en PAR in de kas op de winterdagen 22 december 2020 en 25 januari 2021.

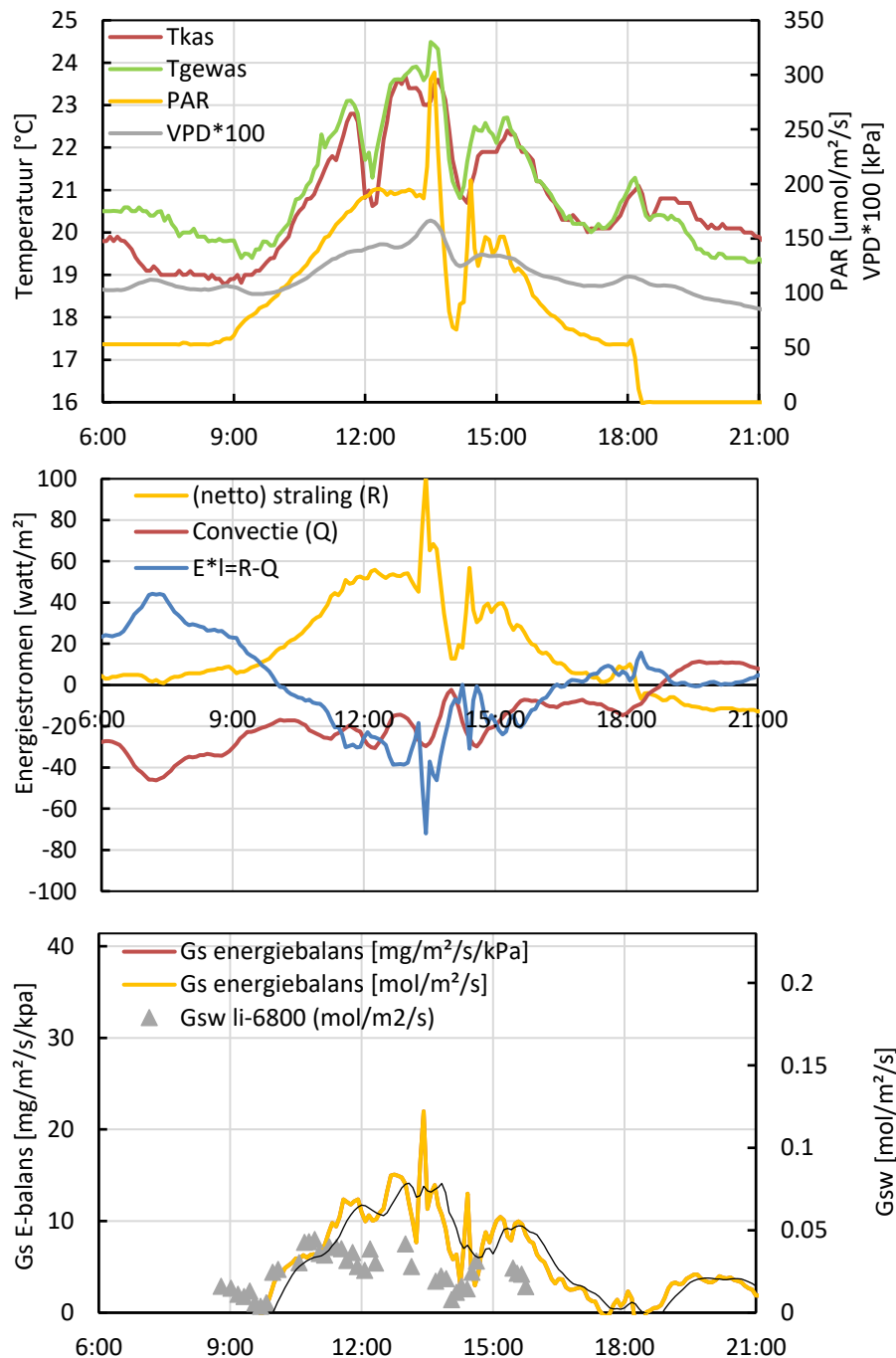
Fotosynthese en Gs bij 200 $\mu\text{mol PAR}$



Figuur 16. Gemeten fotosynthese en huidmondjesgeleidbaarheid bij 200 $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ PAR en 600 ppm CO_2 op 22 december 2020 bij cv 'Fiesta' en op 25 januari 2021 bij cv 'Vanilla'. Te zien is dat de fotosynthese en huidmondjesopening op 25 januari over de hele dag lager ligt dan 22 december. Mogelijk wordt dit veroorzaakt door de hogere VPD van rond de 1.5 kPa op 25 januari.



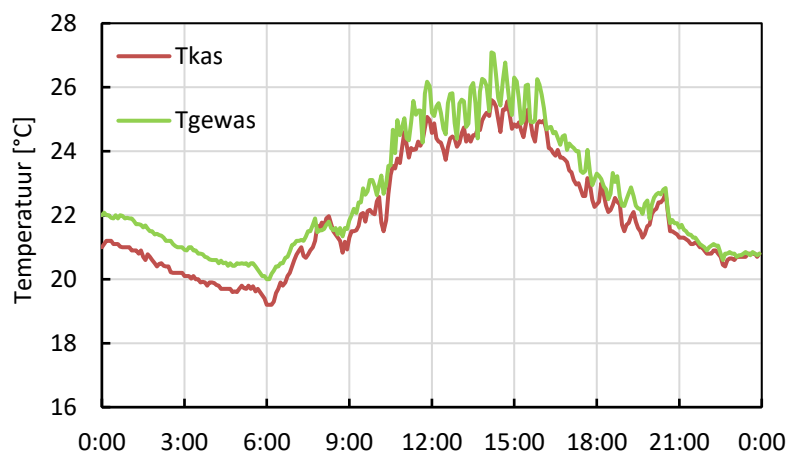
Figuur 17. Klimaat, energiebalans gewas en gemeten (grijze driehoekjes) en berekende huidmondjesgeleiding op 22 december 2020 bij cv Fiësta. Ieder driehoekje is een afzonderlijk meetblad. Per meetdag zijn er rond de 50 verschillende bladeren gemeten. NB de getallen voor huidmondjesgeleidbaarheid verschillen met factor 180 tussen de linker- en rechteras omdat de eenheid waarin huidmondjesgeleidbaarheid berekend wordt anders is; de rode lijn ligt precies onder de gele lijn; de zwarte lijn geeft een lopend gemiddelde weer waardoor er automatisch een rustiger beeld ontstaat.



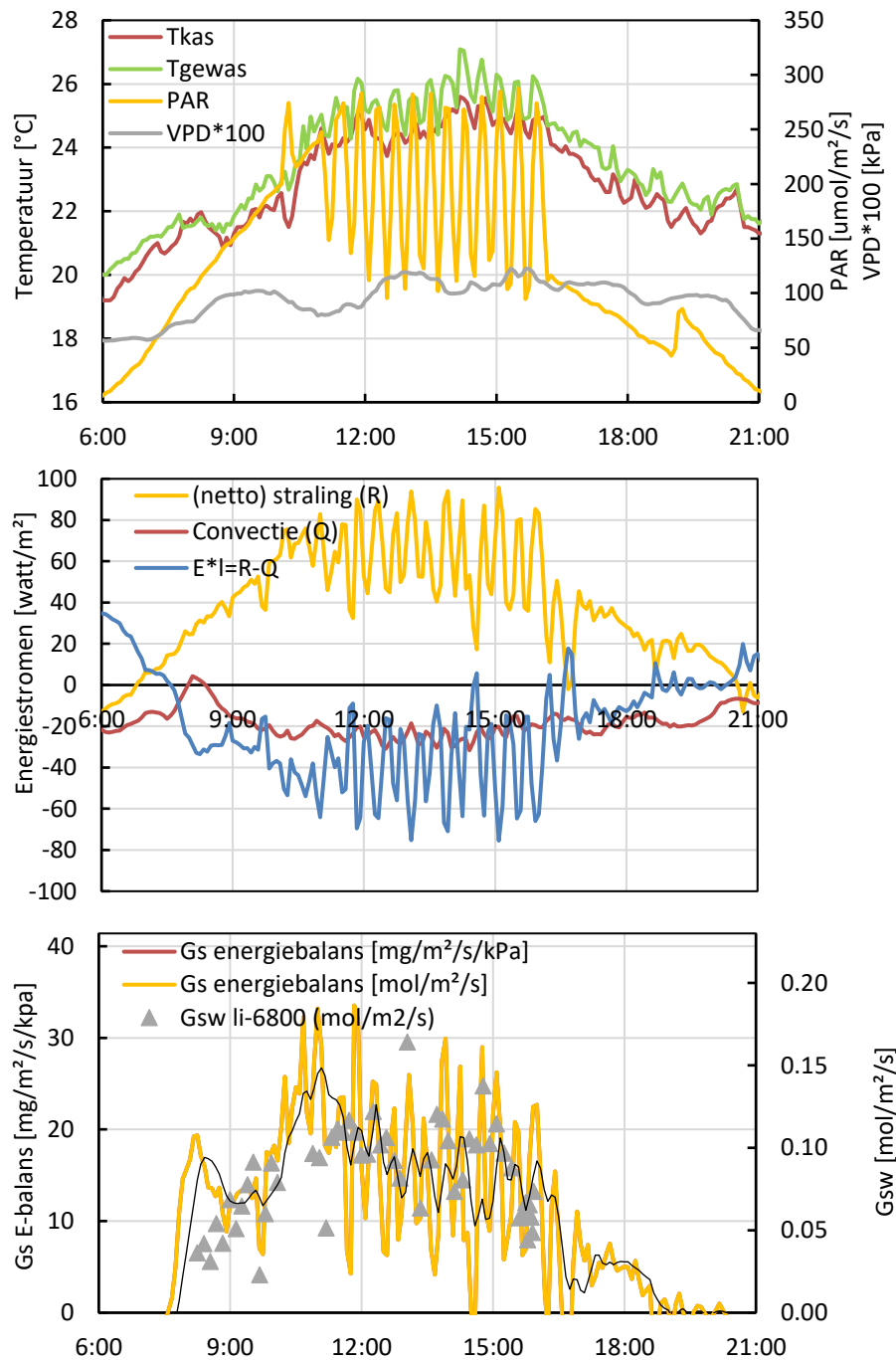
Figuur 18. Klimaat, energiebalans gewas (grijze driehoekjes) en gemeten en berekende huidmondjesgeleiding op 25 januari 2021 bij cv 'Vanilla'. Ieder driehoekje is een afzonderlijk meetblad. Per meetdag zijn er rond de 50 verschillende bladeren gemeten. NB de getallen voor huidmondjesgeleidbaarheid verschillen met factor 180 tussen de linker- en rechteras omdat de eenheid waarin huidmondjesgeleidbaarheid berekend wordt anders is; de rode lijn ligt precies onder de gele lijn; de zwarte lijn geeft een lopend gemiddelde weer waardoor er automatisch een rustiger beeld ontstaat. De planttemperatuurmeter stond in eerste instantie te meten op een lege vloer en is rond 9:00 goed gezet vandaar dat er voor die tijd een foutieve (!) negatieve transpiratie wordt berekend.

Op 31 mei 2021 bleek dat de PT-meter gericht stond op een plek waar er planten waren geraapt voor de verkoop. Deels werd dus de vloertemperatuur gemeten: In de nacht lag de gewastemperatuur bijna een graad hoger dan de kasttemperatuur terwijl de gewastemperatuur in de nacht naar verwachting ongeveer 0.1-0.3° onder de kasttemperatuur zou moeten liggen. Er is dan namelijk geen positieve instraling en er vindt altijd wel enige verdamping plaats waardoor het blad dus koeler moet zijn dan de lucht.

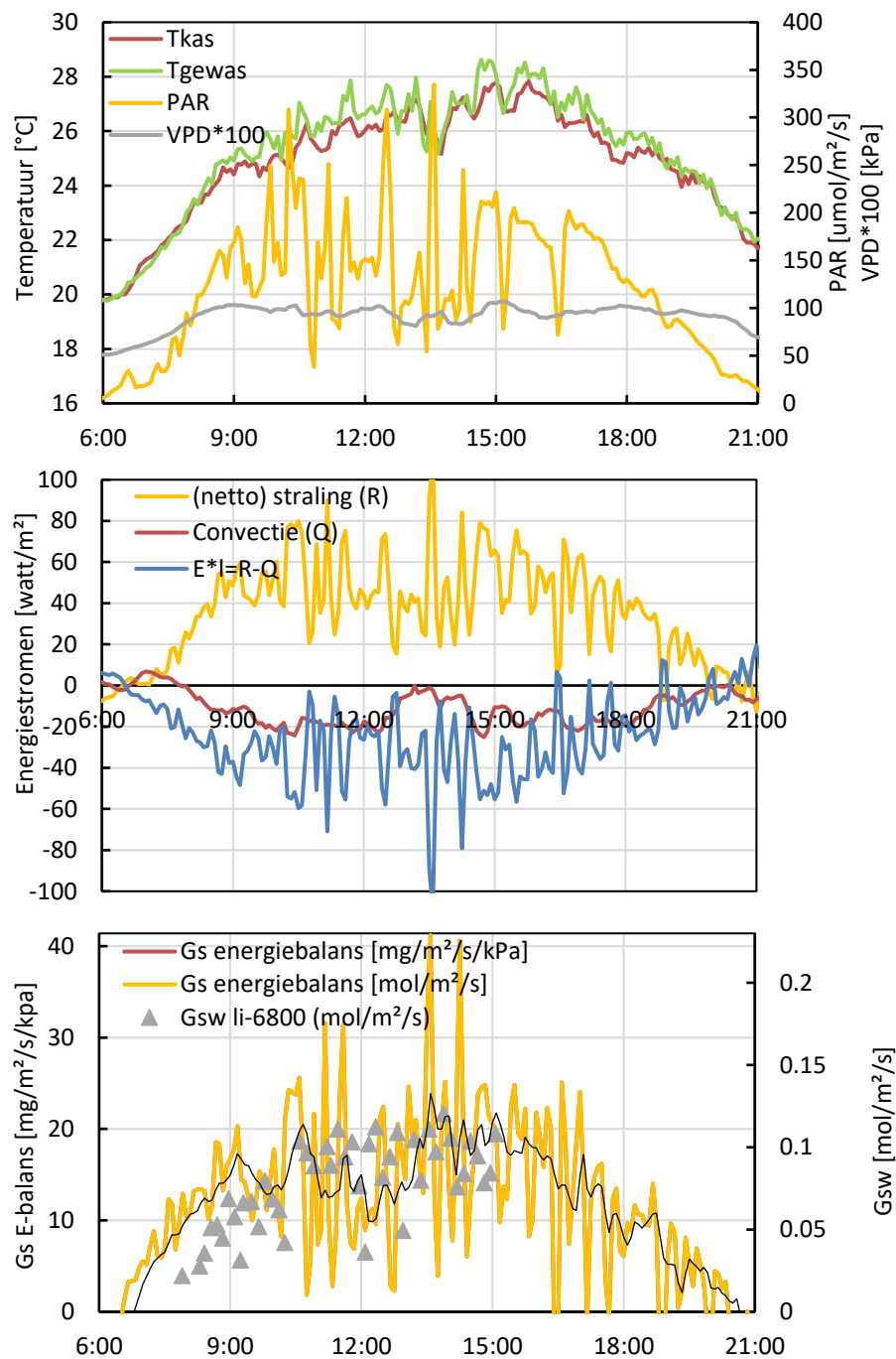
Ook was er een probleem met de schermregeling waardoor het zomerscherm pendelde waardoor ook de PAR en de netto straling fors fluctueerde (Figuur 20). Net zoals de meetdag van 21 juni 2020 levert dit nooit een stabiele energiebalans op: er vindt continu opwarming en afkoeling van de bladeren plaats, in dit geval zelfs van bijna 2°C (Figuur 19). Het lopend gemiddelde laat zien dat de berekende orde van grootte goed overeenkomt met de gemeten huidmondjesgeleidbaarheid met de Li-6800. Deze ligt flink hoger dan beide winterdagen en is voornamelijk toe te schrijven aan de cultivar 'Sizou' die een fors hogere verdamping heeft dan 'Fiësta' of 'Vanilla'. Ditzelfde geldt voor de meetdag van 3 juni (Figuur 21). Ook hier was de schermregeling nog niet rustig terwijl er wel een redelijk stabiele buitenstraling was. Qua orde grootte komen beide methodes goed overeen.



Figuur 19. Gewas- en kasttemperatuur op 31 mei 2021. Het feit dat de gewastemperatuur in de nacht boven de kasttemperatuur uitkomt laat zien dat de onderlinge sensoren niet goed staan afgesteld. In dit geval werd de vloertemperatuur meegemeten doordat er al planten geraapt waren voor de verkoop.

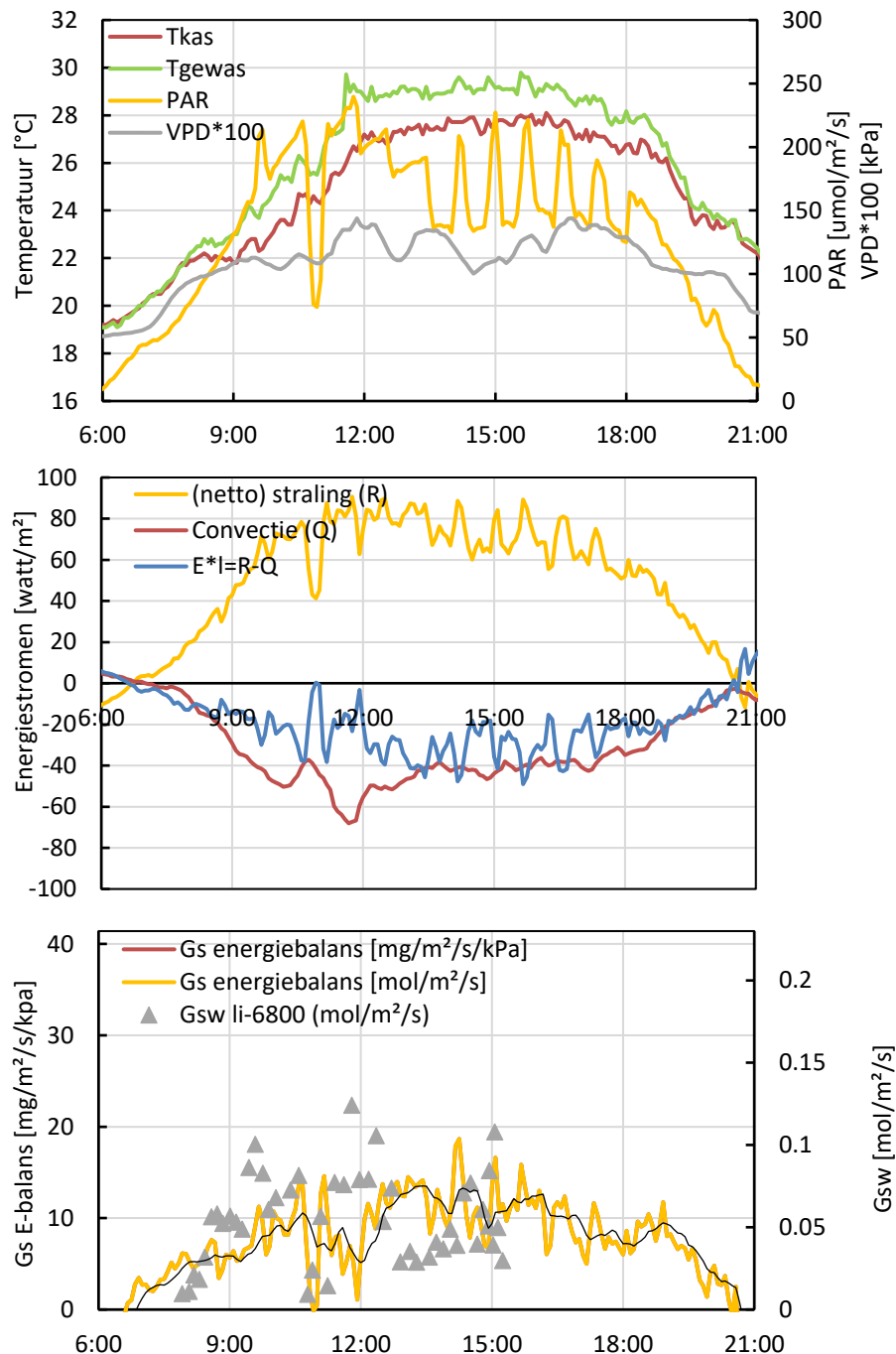


Figuur 20. Klimaat, energiebalans gewas en gemeten (grijze driehoekjes) en berekende huidmondjesgeleiding op 31 mei 2021 bij cv 'Sizou'. Ieder driehoekje is een afzonderlijk meetblad. Per meetdag zijn er rond de 50 verschillende bladeren gemeten. NB de getallen voor huidmondjesgeleidbaarheid verschillen met factor 180 tussen de linker- en rechteras omdat de eenheid waarin huidmondjesgeleidbaarheid berekend wordt anders is; de rode lijn ligt precies onder de gele lijn; de zwarte lijn geeft een lopend gemiddelde weer waardoor er automatisch een rustiger beeld ontstaat. NB er was een probleem met de regelkring van het zomerscherp, hierdoor pendelde deze waardoor PAR en netto straling ook fors fluctueerden. De planttemperatuurmeter stond in eerste instantie te meten op een deels lege vloer en is rond 8:00 goed gezet. Vandaar dat er voor die tijd een foutieve (!) negatieve transpiratie wordt berekend.



Figuur 21. Klimaat, energiebalans gewas en gemeten en berekende huidmondjesgeleiding (grijze driehoekjes) op 3 juni 2021 bij cv 'Sizow'. Ieder driehoekje is een afzonderlijk meetblad. Per meetdag zijn er rond de 50 verschillende bladeren gemeten. NB de getallen voor huidmondjesgeleidbaarheid verschillen met factor 180 tussen de linker- en rechteras omdat de eenheid waarin huidmondjesgeleidbaarheid berekend wordt anders is; de rode lijn ligt precies onder de gele lijn; de zwarte lijn geeft een lopend gemiddelde weer waardoor er automatisch een rustiger beeld ontstaat.

Als afsluiting is op 14 juni opnieuw cv 'Fiësta' gemeten. Nog steeds laat de schermregeling wat uitschieters zien. Belangrijker is dat duidelijk te zien is dat de gemiddelde huidmondjesgeleidbaarheid op de meetdag veel lager wordt gemeten en berekend. Er kan dus gesteld worden dat de stomatasensor het cultivar-effect goed oppakt.



Figuur 22. Klimaat, energiebalans gewas en gemeten en berekende huidmondjesgeleiding (grijze driehoekjes) op 14 juni 2021. Ieder driehoekje is een afzonderlijk meetblad. Per meetdag zijn er rond de 50 verschillende bladeren gemeten. NB de getallen voor huidmondjesgeleidbaarheid verschillen met factor 180 tussen de linker- en rechteras omdat de eenheid waarin huidmondjesgeleidbaarheid berekend wordt anders is; de rode lijn ligt precies onder de gele lijn; de zwarte lijn geeft een lopend gemiddelde weer waardoor er automatisch een rustiger beeld ontstaat.

3.4 Conclusies en aandachtspunten

3.4.1 Stomatasensor

Het is gebleken dat de stomatasensor die gevoed wordt door een netto stralingsmeter schattingen van de huidmondjesgeleidbaarheid geeft die in dezelfde orde grootte als de Li-6800 liggen. De stomatasensor maakt een duidelijk onderscheid tussen:

- Winter- en zomersituaties
- Cultivars

Wel zijn er opnieuw enkele aandachtspunten naar voren gekomen. De belangrijkste zijn:

- Wat meet de PT-meter, planten of (deels) een lege vloer?
- Tijdelijke netto opwarming of afkoeling van de planten door sterk wisselende instraling geeft een foutief berekende huidmondjesgeleidbaarheid. Dit kan deels opgevangen worden door de huidmondjesgeleidbaarheid via een lopend gemiddelde van meerdere meetpunten weer te geven.
- Opstelling van de sensoren: Alle te gebruiken sensoren moeten hetzelfde meetvlak beslaan: Het moet niet zo zijn dat de PAR-sensor in de schaduw staat en de PT-meter een onbeschadwd vlak meet. De klimaatbox moet dus in zelfde meetvlak worden opgehangen. Dit alles op een representatieve plaats in de kas.
- Onderlinge afstelling van de temperatuursensoren is belangrijk: 0.3°C afwijking tussen de PT-meter en luchttemperatuursensor geeft een groot effect. Idealiter zouden deze via hetzelfde meetprincipe moeten meten zodat het verschil in plant-luchttemperatuur zuiver wordt bepaald.
- Het gebruik van een netto stralingsmeter in plaats van de PAR-meter is een must bij zwaar geschermd gewassen vanwege het relatief grote effect van de warmtelast die van de schermen kan afkomen op de netto straling die de plant ontvangt (orde grootte van ~30%).

De betrouwbaarheid van de stomatasensor hangt af van de betrouwbaarheid en representativiteit van de meetpositie van de sensoren. Alleen als een teler bereid is hier aandacht aan te besteden, is toepassing zinvol.

3.4.2 Gebruik van de netto stralingsmeter in de kas

Buiten het gebruik in de stomatasensor om is gebleken dat de netto stralingsmeter extra informatie biedt zoals de lage netto straling in de belichte winternachten en de fors negatieve netto straling in de onbelichte nachten. Tevens biedt het inzicht in de warmtelast van de schermen op dagen met een hoge instraling. Deze genoemde zaken kunnen overigens ook inzichtelijk gemaakt worden met een dubbele (netto) pyrgeometer.

4 Opstellen vangrails: Methode real time inzicht in huidmondjesbeperking?

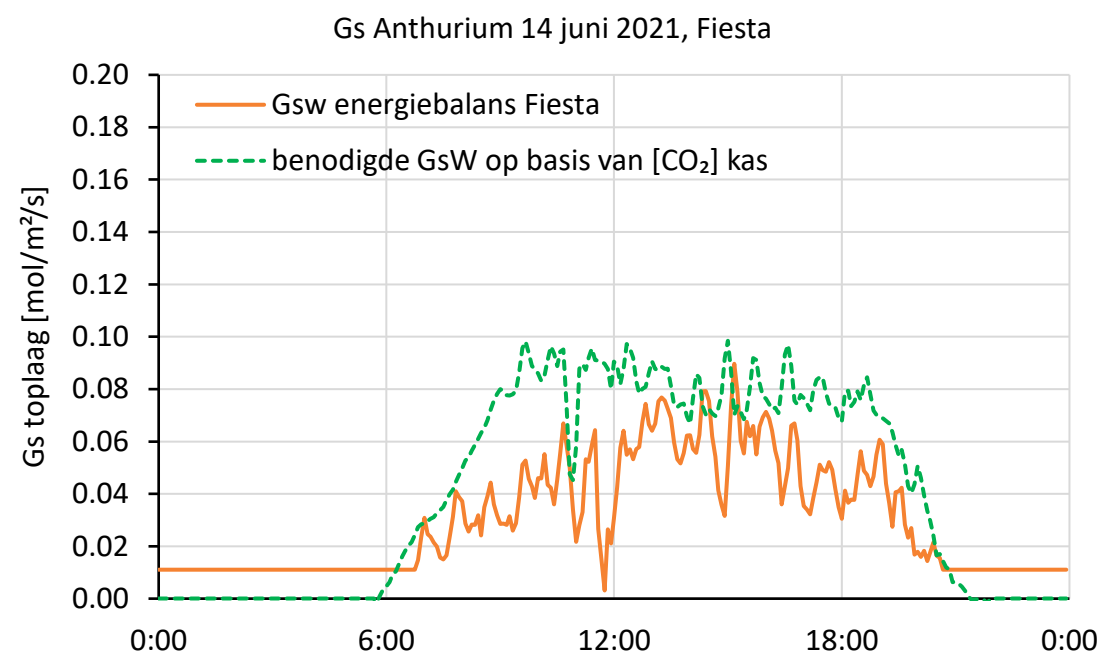
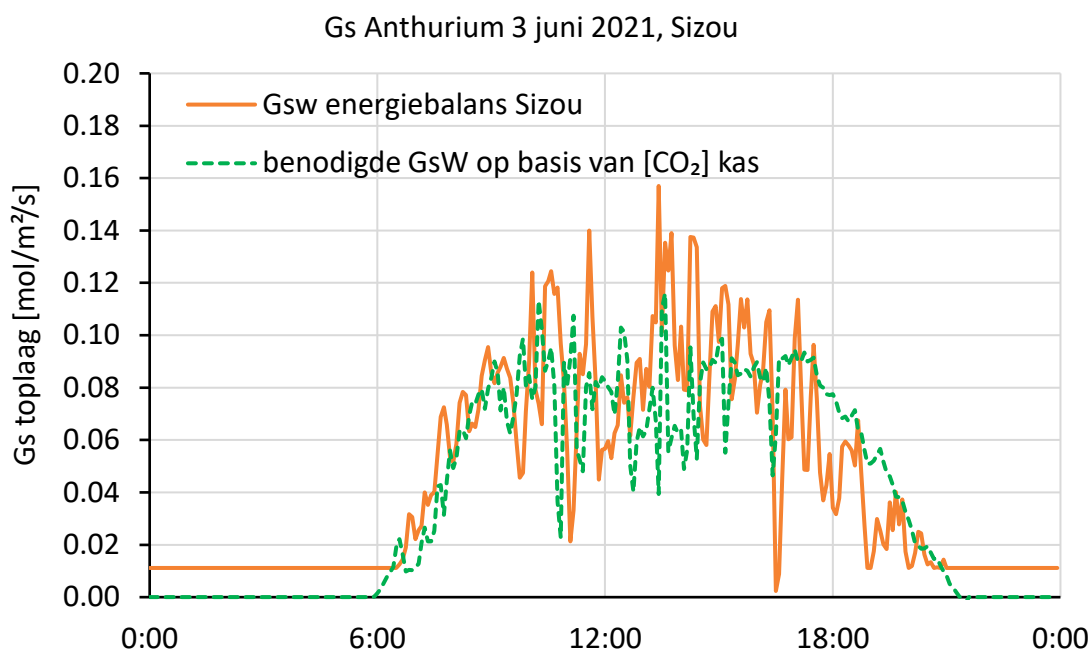
Het derde doel van dit onderzoek was om op basis van de resultaten de minimaal benodigde huidmondjesgeleidbaarheid (G_s) te berekenen zodat bij een bepaald lichtniveau de CO_2 -opname niet beperkt wordt. De noodzaak voor huidmondjesgeleidbaarheid neemt toe met meer licht en minder CO_2 in de kas. Vandaar dat er geen vaste huidmondjesgeleidbaarheid kan worden aangegeven. In de kas spelen twee grote beperkingen van de fotosynthese bij een gegeven lichtniveau en temperatuur een rol:

- Sub-optimale CO_2 -omstandigheden. Voor C_3 -planten ligt het theoretisch maximum op ongeveer 600 ppm *in het blad* (intern CO_2 -gehalte: C_{intern}). Hiervoor is een CO_2 -niveau van tussen de 700-1000 ppm *in de kas* nodig.
- De huidmondjesopening zelf. Bij knijpende huidmondjes kan het CO_2 -gehalte in het blad fors lager liggen dan rondom het blad. Huidmondjesbeperking wordt in dit rekenvoorbeeld gedefinieerd als het CO_2 -gehalte in het blad op minder dan 75% ligt dan in de kaslucht. Dus:
 - Bij 800 ppm CO_2 moet het CO_2 -gehalte in het blad boven de 600 ppm blijven om niet aangemerkt te worden als huidmondjesbeperking.
 - Bij 400 ppm CO_2 moet het CO_2 -gehalte in het blad boven de 300 ppm blijven om niet aangemerkt te worden als huidmondjesbeperking. Er is hier echter wel een CO_2 -beperking van de fotosynthese.

Met behulp van het mechanistische Farquhar, Von Caemmerer & Berry model (FvCB-model; Farquhar *et al.* 1980) kan bij een gegeven CO_2 -niveau in de kas de minimaal gewenste huidmondjesgeleidbaarheid berekend worden door de fotosynthese van de bovenste bladlaag te berekenen bij het CO_2 -niveau in de kas en bij niet beperkende huidmondjesgeleidbaarheid ($C_{\text{intern}} = 0.75 \cdot \text{CO}_{2\text{-kas}}$). Door middel van de wet van Ohm: $\text{Assimilatie} = G_s \cdot (\text{CO}_{2\text{-kas}} - C_{\text{intern}})$, kan dan de bijbehorende benodigde huidmondjesgeleidbaarheid worden berekend. Dit is voor de twee meetdagen in juni 2021 berekend voor 'Sizou' en 'Fiësta' (Figuur 23). Duidelijk is te zien dat de G_s van 'Sizou' meestal boven de benodigde G_s ligt, terwijl dit voor 'Fiësta' andersom is.

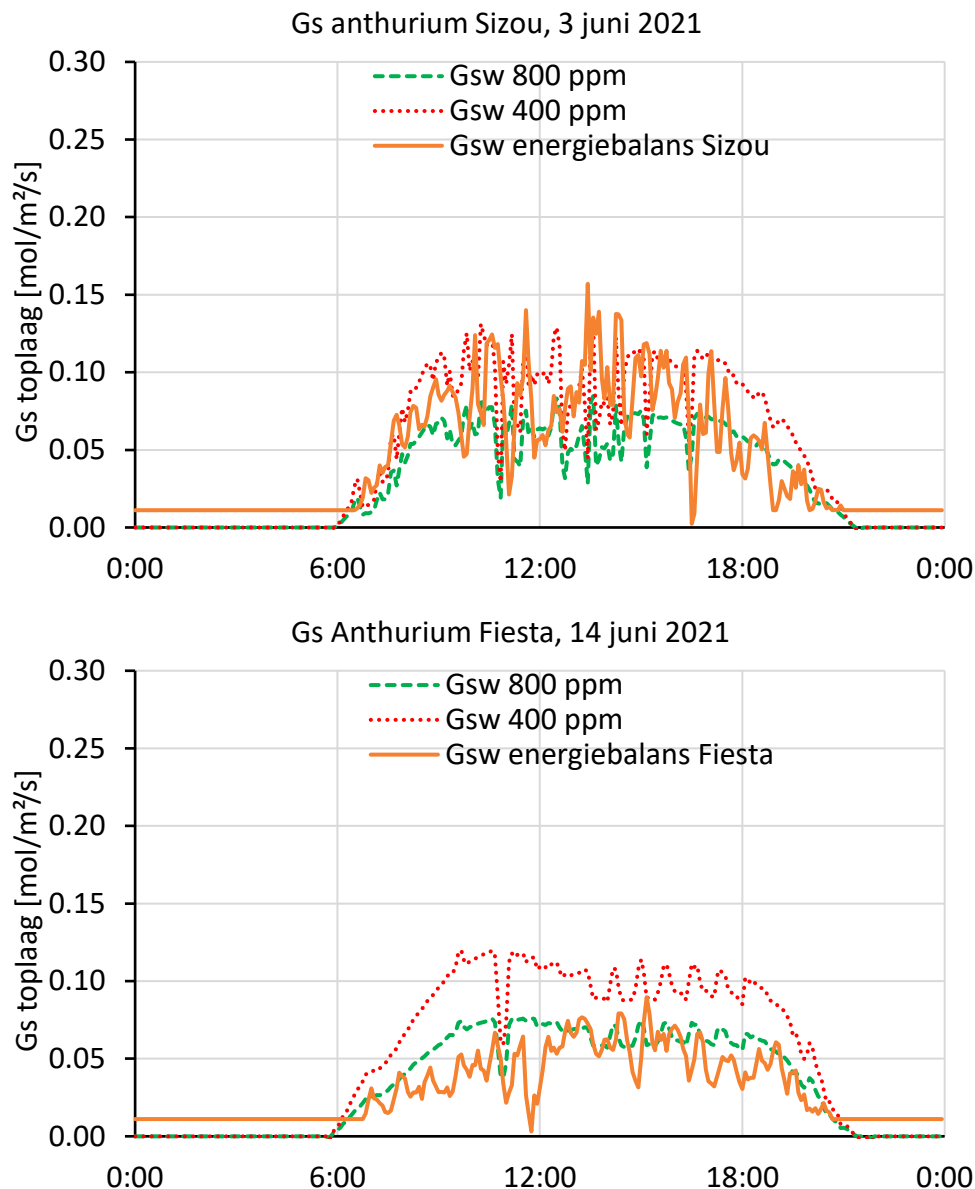
Figuur 23 maakt wel duidelijk wanneer er een overmaat is aan huidmondjesopening of een beperking van de fotosynthese, maar maakt twee zaken niet duidelijk.

- Niet duidelijk wordt dat er ook een CO_2 -beperking in de kas kan zijn.
- Niet duidelijk wordt *hoeveel* de fotosynthese wordt beperkt omdat er geen lineair verband zit tussen huidmondjesgeleidbaarheid en fotosynthese. Figuur 23 suggereert voor Fiësta een forse huidmondjesbeperking van de fotosynthese. Deze ligt echter eerder in de orde van 10-15% (Figuur 25).



Figuur 23. Huidmondjesgeleidbaarheid van 'Sizou' op 3 juni en Fiësta op 14 juni ten opzichte van de benodigde huidmondjesgeleidbaarheid om de fotosynthese niet te beperken bij een bepaald CO₂-niveau in de kas. Te zien is dat de Gsw van 'Sizou' grotendeels boven de benodigde huidmondjesgeleidbaarheid ligt, terwijl deze voor Fiësta voornamelijk 's ochtends beperkend was voor de fotosynthese.

Bovenstaande berekening kan ook uitgevoerd worden bij 400 en 800 ppm. Dit suggereert een soort 'vangrails' waartussen de Gs zich zal moeten bevinden (Figuur 24). Echter het manco van deze benadering is dat de CO₂-beperking van de fotosynthese niet duidelijk wordt terwijl deze bij 400 ppm CO₂ aanzienlijk is.



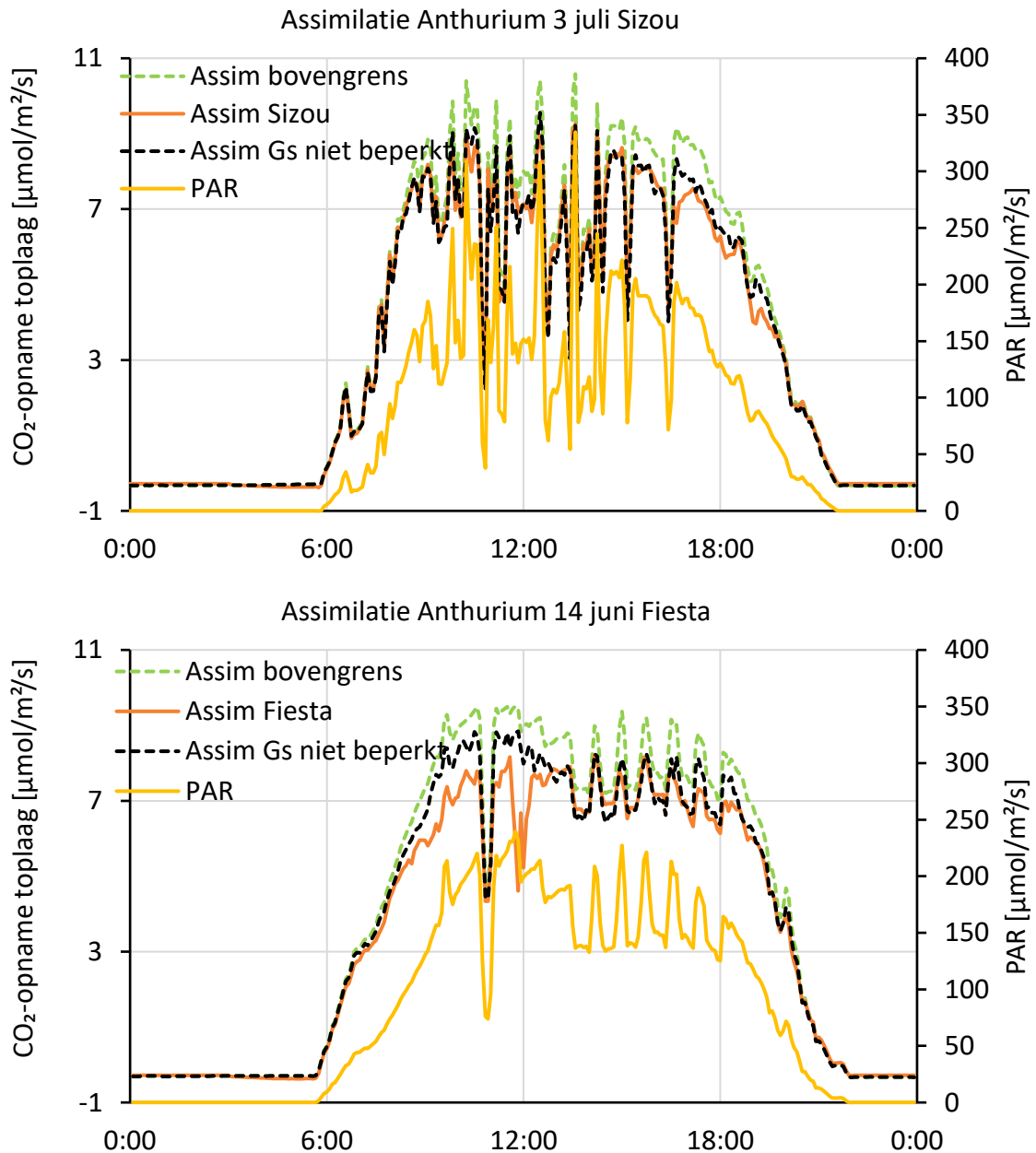
Figuur 24. Huidmondjesgeleidbaarheid tussen de 'vangrails'. De huidmondjesgeleidbaarheid bij 400 en 800 ppm is berekend met behulp van het FvCB-model met een intern CO₂-gehalte van 0.75 maal 400 of 800 ppm. Het bezwaar van deze methode is dat de CO₂-beperking van de fotosynthese bij 400 ppm niet zichtbaar is terwijl deze aanzienlijk is.

De CO₂-beperking kan in beeld gebracht worden door de fotosynthese van de bovenste bladlaag weer te geven bij verschillende niveaus van intern CO₂-gehalte (Figuur 25):

- Bij 800 ppm CO₂ in de kas en 600 ppm CO₂ in het blad, dit geeft een waarde aan die dicht bij het theoretisch maximum van de fotosynthese gegeven het lichtniveau uitkomt (groen gestreept).
- Bij heersende CO₂-omstandigheden in de kas, waarbij het interne CO₂-gehalte op 0.75 ligt van de kaswaarde. Dit geeft een waarde aan van de fotosynthese die niet beperkt wordt door de huidmondjes maar mogelijk wel door het CO₂-gehalte in de kas (zwart gestreept).
- 'Live' fotosynthese van het topblad aan de hand van de berekende

huidmondjesgeleidbaarheid (oranje lijn).

Als de zwart gestreepte lijn onder groen gestreepte lijn ligt, dan is het CO₂-niveau suboptimaal. Als de 'live' fotosyntheselijn (oranje) afwijkt van de zwart gestreepte lijn, toont dit een huidmondjesbeperking aan. Zo blijkt er bij 'Sizou' op 3 juni nauwelijks tot geen huidmondjesbeperking te zijn terwijl er wel een lichte CO₂-beperking is. Bij 'Fiësta' op 14 juni blijkt er een CO₂-beperking van 5-10% en een huidmondjesbeperking van 10-15% te zijn.



Figuur 25 Voorbeeldberekening Anthurium tussen de vangrails. Met behulp van het FvCB-model is de fotosynthese behorend bij het lichtniveau berekend bij 800 ppm CO₂ zonder huidmondjesbeperking (min of meer theoretisch maximum; groen gestreept) ten opzichte van de fotosynthese bij CO₂-kasniveau met (oranje) en zonder huidmondjesbeperking (zwart gestreept). Als de zwart gestreepte lijn onder groen gestreepte lijn ligt, dan is het CO₂-niveau suboptimaal. Als de 'live' fotosyntheselijn (oranje) afwijkt van de zwart gestreepte lijn, toont dit een huidmondjesbeperking aan. Bij Fiësta op 14 juni blijkt er een CO₂-beperking van 5-10% en een huidmondjesbeperking van 10-15% te zijn.

5 Conclusies en aanbevelingen

Dit onderzoek startte met de volgende drie vragen:

1. Kan de ongewenste 'warmtelast' die via infrarood-straling vanuit het schermdoek het gewas opwarmt vermeden worden door andere type(n) schermdoek te gebruiken?
2. Werkt de energiebalans-aanpak (gevoed met netto stralingsmeter) om huidmondjesgeleidbaarheid te berekenen bij anthurium?
3. Kan er een 'vangrails' tussen noodzaak en overmaat van de huidmondjesgeleidbaarheid worden opgesteld? Met andere woorden, wat moet de minimaal benodigde huidmondjesgeleidbaarheid zijn bij een bepaald lichtniveau zodat de CO₂-opname niet beperkt wordt?

Ad 1. Warmtelast schermen

De warmtelast van schermen speelt voornamelijk in situaties dat er een stabiel hoge instraling is. Afwisseling van zon en wolk geeft forse afkoeling van het scherm. Op donkere dagen werd er bij alle tuinders een balans van netto straling / zonnestraling overdag oplopend tot maximaal 0.7 gemeten. Op lichte dagen in september liep bij Stolk Brothers en Evanty de balans op naar 1 (krijt eraf) terwijl dit niet gebeurde bij Rijnplant, WE Plants en Stolk Brothers (april-juni; krijt erop). Dit had ook veel te maken met de buitentemperatuur. Op basis van deze metingen kan er geen harde uitspraak gedaan worden over verschillen tussen tuinders. Wel kunnen de volgende aanbevelingen gedaan worden:

- Als het puur gaat om de (netto) warmtelast tussen gewas en schermdoek is een dubbele pyrgeometer makkelijker te interpreteren dan de netto stralingsmeter. De netto stralingsmeter is echter weer van belang voor het opstellen van de energiebalans van het gewas.
- Voor de volledige interpretatie van de gepresenteerde gegevens zou idealiter de buitentemperatuur, de plant- en schermtemperatuur ook moeten zijn gemeten.
- De emissiviteit van schermen kan het best op labschaal worden nagemeten.

De bottomline is dat alle waargenomen verschuivingen in de balans tussen netto straling en zonnestraling op plantniveau het belang benadrukken om voor bepaling van de energiebalans te werken met een netto stralingsmeter. Als dit niet wordt meegenomen in de energiebalans, geeft dit een grote onderschatting in berekende huidmondjesgeleidbaarheid.

Ad2. Vaststellen huidmondjesgeleidbaarheid via energiebalans

Het is gebleken dat de stomatasensor die gevoed wordt door een netto stralingsmeter schattingen van de huidmondjesgeleidbaarheid geeft die in dezelfde orde grootte als de Li-6800 liggen. De stomatasensor maakt een duidelijk onderscheid tussen:

- Winter- en zomersituaties
- Cultivars

Wel zijn er opnieuw enkele aandachtspunten naar voren gekomen. De belangrijkste zijn:

- Wat meet de PT-meter, planten of (deels) een lege vloer?

- Tijdelijke netto opwarming of afkoeling van de planten door sterk wisselende instraling geeft een foutief berekende huidmondjesgeleidbaarheid. Dit kan deels opgevangen worden door de huidmondjesgeleidbaarheid via een lopend gemiddelde van meerdere meetpunten weer te geven.
- Opstelling van de sensoren: Alle te gebruiken sensoren moeten hetzelfde meetvlak beslaan: Het moet niet zo zijn dat de PAR-sensor in de schaduw staat en de PT-meter een onbeschaduwd vlak meet. De klimaatbox moet dus in zelfde meetvlak worden opgehangen. Dit alles op een representatieve plaats in de kas.
- Onderlinge afstelling van de temperatuursensoren is belangrijk: 0.3°C afwijking tussen de PT-meter en luchttemperatuursensor geeft een groot effect. Idealiter zouden deze via hetzelfde meetprincipe moeten meten zodat het verschil in plant-luchttemperatuur zuiver wordt bepaald.
- Het gebruik van een netto stralingsmeter in plaats van de PAR-meter is een must bij zwaar geschermd gewassen vanwege het relatief grote effect van de warmtelast die van de schermen kan afkomen op de netto straling die de plant ontvangt (orde grootte van ~30%).

De betrouwbaarheid van de stomatasensor hangt af van de betrouwbaarheid en representativiteit van de meetpositie van alle gebruikte sensoren. Alleen als de teler bereid is hier aandacht aan te besteden, is toepassing zinvol.

Ad 3. Opstellen 'vangrail' voor huidmondjesgeleidbaarheid

Er zijn twee grote beperkingen van de fotosynthese, namelijk het CO₂-niveau in de kas en huidmondjesgeleidbaarheid. Alleen de beperking in huidmondjesgeleidbaarheid weergeven biedt te weinig informatie. Voor optimale sturing zullen beide beperkingen in beeld gebracht moeten worden. Beide beperkingen kunnen in als volgt in beeld gebracht worden:

- Huidmondjesbeperking: 'Live' de huidmondjesgeleidbaarheid via de energiebalansmethode in beeld brengen ten opzichte van de gewenste huidmondjesgeleidbaarheid via een fotosynthesemodel
- CO₂-beperking: 'Live' de maximaal haalbare fotosynthese bij CO₂-verzadiging in beeld brengen ten opzichte van een niet door huidmondjes beperkte fotosynthese en een 'live' fotosynthese die mogelijk door de huidmondjes wordt beperkt.

Van deze kennis kunnen klimaatcomputer-leveranciers gebruik maken om deze 'vangrails' ook 'live' inzichtelijk te maken voor tuinders. Daarom verdient het aanbeveling om de fotosynthese van topbladeren online in beeld te brengen. Dit kan door een mechanistisch fotosynthese-model mee te laten draaien op dataplatforms zoals LetsGrow. Als afgeleide hiervan kunnen relatief eenvoudig beperkingen in de fotosynthese in beeld worden gebracht. Als deze in beeld zijn dan kan licht, CO₂ en warmte efficiënter benut worden door te voorkomen dat de huidmondjesgeleidbaarheid beperkend is voor de fotosynthese. Anderzijds kan warmte efficiënter benut worden door te voorkomen dat huidmondjes onnodig ver open staan, waardoor meer (latente) warmte moet worden afgelucht (ontvochtigen) of kan door inzicht te geven in de huidmondjesgeleidbaarheid worden voorkomen dat onnodig veel verneveld wordt, waardoor veel warmte verloren gaat.

6 Slotbeschouwing groei-optimalisatie bij laag-verdampende gewassen

Door: Jan Voogt, LetsGrow

Op basis van dit rapport en Trouwborst *et al.* 2019 wordt een helder inzicht in de problematiek van groei-optimalisatie bij laag verdampende gewassen in kassen geboden. Als optimalisatiefactoren kunnen worden onderscheiden:

- A. Hoeveel PAR is toelaatbaar zonder het chlorofyl te overbelasten (fotosynthese capaciteit)?
- B. Hoeveel energietoevoer is toelaatbaar zonder water stress te veroorzaken (sluiting van huidmondjes / verdampingscapaciteit)?
- C. Wanneer is het (lage) CO₂ niveau belemmerend voor fotosynthese (CO₂ beperking)?
- D. Wanneer wordt de CO₂-opname via huidmondjes opening belemmerend voor fotosynthese (huidmondjes beperking) ?
- E. Wanneer is de huidmondjesopening onnodig groot en veroorzaakt onnodige verdamping?

Ad A en B.

Dit is plant / cultivar bepaald. De gangbare praktijk van krijten en schermen is gebaseerd op onderzoek en ervaring. In het begin van de ontwikkeling van HNT is echter gebleken dat er in het verleden weinig onderscheid is gemaakt tussen factoren A en B. Men heeft meestal gemeten in “praktijk conforme” situaties waarbij hoge instraling ook vaak gepaard gaan met lage RV en hogere temperatuur. In diverse gevallen bleek namelijk dat met name sommige siergewassen aanzienlijk meer PAR licht kunnen verwerken dan eerder aangenomen als door een geschikte regeling van RV de convectieve verdamping wordt verminderd. Anders gezegd: wat eerder werd gezien als lichtstress bleek in werkelijkheid grotendeels waterstress te zijn.

In het eerdere onderzoek van Trouwborst *et al.* (2019) en in dit onderzoek bevestigd, kwam er nog een heel andere “dubbele bodem” in dit verhaal aan het licht, namelijk de extra warmtelast die het gewas te verwerken krijgt als er PAR licht wordt weg geschermd terwijl dit scherm door de zon wordt opgewarmd. In feite werkt het schermen dan averechts, omdat er groei wordt ingeleverd (minder PAR) terwijl het nauwelijks helpt voor het verminderen van de waterstress. Als we erin slagen om deze warmtelast te verminderen, ontstaat er dus ruimte om meer PAR toe te laten ten gunste van extra groei.

Volgens de principes van Plant Empowerment moet er dan wel ook meer CO₂ worden gedoseerd, en een hogere temperatuur worden aangehouden om de extra assimilaten ook nuttig te verwerken. Beperkt ventileren is de aangewezen weg om deze gecombineerde actie van hogere RV, hogere CO₂ en hogere temperatuur tegelijk te realiseren. Hogedruk-verneveling geeft een extra vrijheidsgraad om dit te verwezenlijken.

Globaal wordt de optimale fotosynthese bereikt als het PAR niveau zo hoog mogelijk is, zonder dat de verdampingscapaciteit beperkend is. Dit kan in beeld worden gebracht door

een netto stralingsmeter te gebruiken naast een PAR meting bij het monitoren van de energiebalans van het gewas. Tegelijk dienen dan ook de CO₂-concentratie en de temperatuur voldoende hoog te zijn om het fotosynthese proces optimaal te laten verlopen.

Ad C en D.

Voor de CO₂-concentratie moeten we dan kijken naar de interne CO₂-concentratie in het blad en die wordt bepaald door 2 factoren, namelijk de externe concentratie en de huidmondjes opening. Dat betekent dat ofwel de eerste beperkend kan zijn (factor C) ofwel de tweede (factor D) of allebei (*GT: In hoofdstuk 4 wordt een suggestie gedaan om dit in beeld te brengen*).

Ad E.

Mijns inziens geeft deze wijze van benadering niet zomaar een zinvol handvat voor de praktijk. De algemene gedachte is dat de verdamping evenredig is met de huidmondjes opening. Dat is echter niet zo. Je moet steeds naar 3 factoren kijken: verdamping, huidmondjesweerstand en VPD. Net als bij de wet van Ohm: je hebt stroom, weerstand en spanning. Bij een plant wordt de verdamping bepaald door de energie toevoer. Je kunt verdamping daarom zien als een "stroombron" die aangestuurd wordt door de energietoevoer. Het openen van de huidmondjes wordt voornamelijk gestuurd door licht dat de "Kalium pompjes" aandrijft waardoor de guard-cellen worden opgepompt door osmotische druk en het huidmondje opent. Je zou kunnen zeggen dat een plant zijn huidmondjes daarmee zo ver mogelijk openzet voor CO₂-opname, tenzij er een tekort op de waterbalans ontstaat. De verdamping wordt aangedreven door energietoevoer (straling en convectie) en hangt alleen *indirect* samen met de huidmondjesopening. Wel is het zo dat een kleinere huidmondjesopening bij dezelfde verdamping een hoger dampdrukverschil over het huidmondje (VPD) vereist, en daardoor stijgt dan de bladtemperatuur ten opzichte van de kasluchttemperatuur. Dat geeft een verschuiving op de energiebalans: de aanvoer van convectieve warmte wordt kleiner (bij bladtemperatuur < kasluchttemperatuur) òf de afvoer van convectieve warmte wordt hoger (bladtemperatuur > kasluchttemperatuur). En dat leidt vervolgens tot een lagere verdamping. Kortom, de huidmondjesopening heeft een *indirect* effect op de verdamping via de energiebalans. Als er sprake is van "onnodige" verdamping (meestal zal dat in de nacht zijn, maar mogelijk ook op donkere dagen) is de aangewezen weg dus het verminderen van de energietoevoer naar het gewas door lagere convectie (via een hogere RV) of warmtestraling (lagere minimumbuis).

"Onnodige" verdamping staat in dit rapport in het licht van ongehinderde fotosynthese door de huidmondjes. Het volgende getallenvoorbeeld maakt dit duidelijk:

- 100 µmol/m²/s PAR in kas (schermen open)
- Tlucht=21°C
- Tplant-Anthurium=22°C
- Tplant-onkruid=20°C
- Huidmondjesopening Anthurium is hoog genoeg is voor ongehinderde fotosynthese.

Hieruit kan worden geconcludeerd dat het onkruid sowieso een hogere verdamping heeft dan de anthurium (zelfde gewashoogte: dus gelijke PAR en luchtbeweging). Door de koelere

bladtemperatuur van het onkruid zal de VPD iets lager zijn dan voor de Anthurium. De huidmondjes van het onkruid staan dus veel verder open. Uit de ongehinderde fotosynthese bij Anthurium kan worden geconcludeerd dat de huidmondjesgeleiding en verdamping van het onkruid veel te hoog zijn: er is onnodige verdamping. In de zomer is dit gewenst, in de winter kan dit energie kosten.

Bij een plant wordt zoals gezegd, de verdamping bepaald door de energietoevoer. Je kunt verdamping daarom zien als een "stroombron" die aangestuurd wordt door de energietoevoer. Zolang er voldoende water beschikbaar is, zal het huidmondje ver open staan en is de VPD dus ook laag ($VPD = \text{verdamping} \times \text{huidmondjes weerstand}$). Als de waterbeschikbaarheid laag is, zal het huidmondje sluiten en is er een hogere VPD nodig om dezelfde verdamping mogelijk te maken. Daardoor stijgt de temperatuur van het blad en daardoor verschuift de energiebalans voor wat betreft de convectieve energietoevoer. Eerst vermindert de toevoer ($T_{\text{blad}} < T_{\text{lucht}}$) en vervolgens neemt de afvoer toe ($T_{\text{blad}} > T_{\text{lucht}}$). Daardoor blijft minder energie over voor de verdamping en die neemt dus af. Het effect van de huidmondjes is dus indirect via de energiebalans.

In het getallenvoorbeeld is de bladtemperatuur van Anthurium hoger dan de luchttemperatuur. Dit duidt er dus op dat de huidmondjes zoveel weerstand geven dat er een hogere VPD nodig is (*GT: om een bepaalde verdamping te handhaven*), en dat een deel van de energietoevoer wordt afgevoerd door convectie. Kennelijk is de waterbeschikbaarheid onvoldoende om de energie die wordt toegevoerd bij dit lichtniveau volledig door verdamping af te voeren. Het onkruid heeft dit probleem niet. Er is water genoeg en de huidmondjes staan wijd open. Het onkruid neemt zelfs convectie-energie op uit de lucht en helpt daarmee de kas te koelen. Het onkruid verdampt niet omdat het moet, maar omdat het kan. Dat zou je dan onnodig kunnen noemen, omdat de huidmondjes ver genoeg open staan voor CO₂-opname. Maar het is een gevolg van de energietoevoer en niet van de (grote) huidmondjesopening. Er is natuurlijk wel een *indirect* effect van een grotere huidmondjesopening op de convectieve-verdamping. Als de huidmondjes verder open staan is de benodigde VPD om de waterdamp naar buiten te krijgen lager en dus kan de bladtemperatuur verder zakken richting de nattebol-temperatuur van de lucht. Door dit grotere temperatuurverschil zal dan bij dezelfde luchtbeweging de convectie-energie toenemen en daarmee de verdamping totdat er een nieuw evenwicht is tussen energietoevoer en -afvoer.

Als je "onnodige" verdamping wil vermijden zijn er diverse opties:

- Verhogen van de RV: Hiermee dwing je de nattebol-temperatuur en daarmee de bladtemperatuur naar boven waardoor de convectie-energie afneemt (temperatuursverschil kaslucht - blad wordt kleiner).
- Verlagen van de lichtsnelheid, ook dit vermindert de toevoer van convectie energie
- Verlagen van de energie toevoer door langgolvige straling (verwarmingsbuizen en warme schermen bovenin de kas).

Een aandachtspunt is wel dat de verdamping steeds voldoende moet zijn voor de nutriënt opname.

Referenties

Baart de la Faille L, Campen J, Oversloot H, 2009. U-waarde kas met scherm, meetprotocol voor schermdoeken. TNO, Delft. 53p.

Bronchart F, Corbala L. 2021. Van het meten van de warmtestralingseigenschappen van schermen tot het berekenen van de isolatiewaarde van een schermstelsel. Universiteit Gent, Gent. 25p.

Farquhar GD, von Caemmerer S, Berry JA, 1980. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta* 149, 78–90.

Geelen PAM, Voogt JO, Van Weel PA, 2015. De basisprincipes van het nieuwe telen. LTO Glaskracht Nederland, Bleiswijk. 167p.

Goudriaan J, Van Laar HH, 1994. Modelling potential crop growth processes. Textbook with exercises. (Current issues in production ecology; No. 2). Kluwer Academic Publishers. 238p

Katsoulas N, Stanghellini C. Modelling Crop Transpiration in Greenhouses: Different Models for Different Applications. *Agronomy* 2019, 9, 392.

Nelson JA, Bugbee B, 2015. Analysis of Environmental Effects on Leaf Temperature under Sunlight, High Pressure Sodium and Light Emitting Diodes. *PLoS ONE* 10(10)

Nobel, PS. 2009. Physicochemical & environmental plant physiology. Academic press. 582p.

Schapendonk AHCM, Rappoldt C, Pot CS, 2016. Effecten van grenslaagweerstand op de fotosynthese bij tomaat en Freesia; Theorie aangevuld met Explorer-Kasklimaat simulaties; EcoCurves rapport 23, EcoCurves, Haren en Photosyntax, Wageningen. 28 blz.

Schymanski, SJ, Or D. (2016) Wind increases leaf water use efficiency. *Plant, Cell & Environment*, 39: 1448– 1459.

Stanghellini, C, Oosfer, B, Heuvelink, E., 2019. Greenhouse horticulture: technology for optimal crop production. Wageningen Academic Publishers.

Stanghellini C, 1987. Transpiration of greenhouse crops: an aid to climate management. PhD Thesis. IMAG. 161p.

Trouwborst G, Voogt JO, Reijm P, S.W. Hogewoning. 2019. Monitoring van huidmondjesopening in de kas: ontwikkeling en validatie. Plant Lighting B.V., Bunnik. 68p.

Bijlage 1. Meetvlak planttemperatuurmeter

Het meetvlak van de planttemperatuurmeter is ovaal van vorm. Bij de standaard cilindrische CT11 (Heitronics) planttemperatuurmeter met een richthoek van 79° kan in tabel 3 worden afgelezen hoe groot het meetvlak is.

Tabel 3. Meetvlak planttemperatuurmeter.

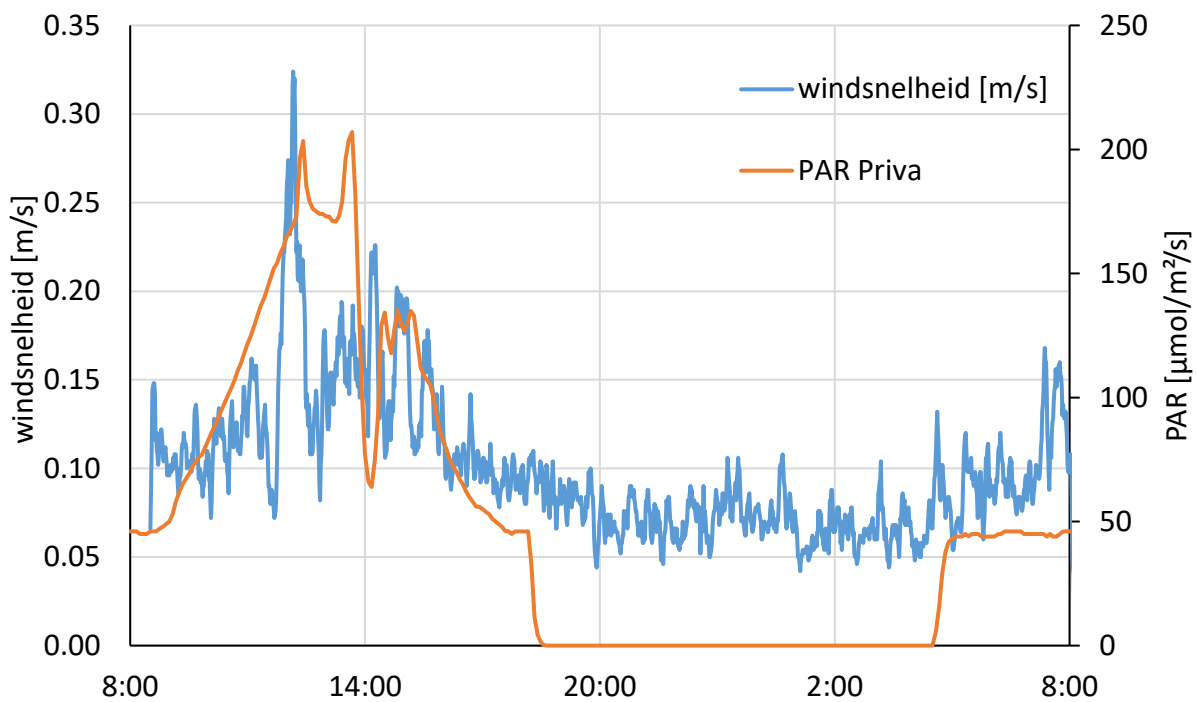
PT-meter type (model)	Hoogte PT-meter ofwel afstand tot gewas (m)	afstand lens tot eerste raakpunt (m)	afstand lens tot verste raakpunt (m)	lengte diameter van de ovale meetspot (m)	breedte diameter van de ovale meetspot (m)	oppervlakte meetspot (m ²)
Type CT11 (cilindrisch)	0.10	0.33	1.23	0.90	0.14	0.10
	0.20	0.65	2.52	1.87	0.29	0.42
	0.25	0.80	3.16	2.35	0.36	0.67
	0.35	1.12	4.44	3.32	0.51	1.33
	0.40	1.28	5.08	3.80	0.59	1.75
	0.50	1.59	6.36	4.77	0.73	2.75
	0.75	2.39	9.57	7.18	1.11	6.25

Bijlage 2. Windsnelheid

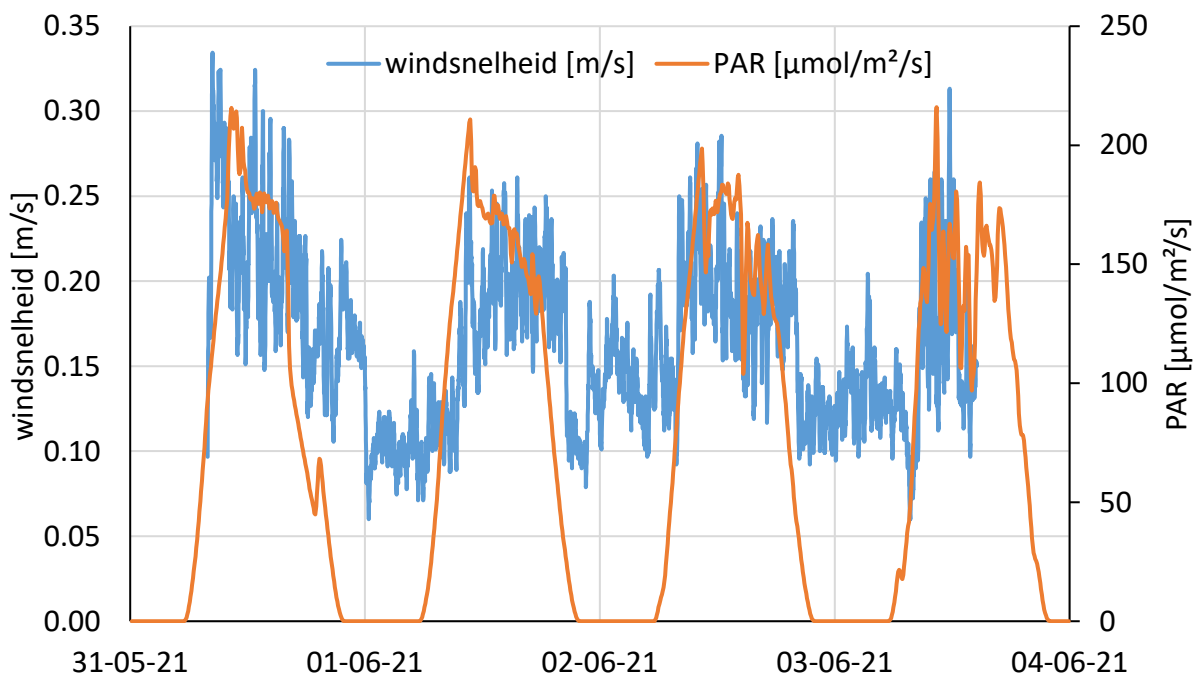
Op twee meetdagen is ook de luchtstroom (TSI 8475-150, omni-directionele luchtstroommeter) op het niveau van top gewas (Foto 4) bepaald. Op 25 januari 2021 lag de windsnelheid 's nachts rond de 0.07m/s en overdag ruwweg tussen de 0.1-0.2m/s met een piek naar 0.3 m/s. In juni lagen de nachtwaarden rond de 0.1m/s en de dagwaarden ruwweg tussen de 0.15-0.3m/s. Deze waarden komen overeen met de bandbreedte genoemd door Schapendonk *et al.* (2016).



Foto 4. Gebruik van een omni-directionele luchtstroommeter om de luchtstroom op het niveau van top gewas te bepalen.



Figuur 26. Windsnelheid en PAR op 25 januari 2021.



Figuur 27. Windsnelheid en PAR tussen 31 mei en 3 juni. NB PAR is weergegeven als lopend gemiddelde van 5 meetwaarden (25 minuten) vanwege problemen met het pendelend zomerscherp.

In diverse publicaties (o.a. Stanghellini et al. 2019) wordt Stanghellini (1987) geciteerd dat de relatief kleine variaties in luchtbeweging in een kas ervoor zorgen dat de grenslaagweerstand voor een tomatengewas redelijk constant blijft. Tevens toonde ze aan dat in zulke kasomstandigheden de transpiratie van het tomatengewas vrijwel ongevoelig is voor de

grenslaagweerstand zodat er slechts een beperkt verlies aan accuratesse is als er een constante wordt gebruikt. Gezien de orde grootte van de transpiratie van tomaat (~60%) ten opzichte van de convectieve afvoer, die rond de 10-20% zou moeten liggen, (Geelen *et al.* 2015) ligt dit voor de hand. Bij Anthurium lijkt eerder een aandeel convectie tot 50% af te tekenen waardoor variatie in luchtbeweging veel meer invloed op de energiebalans kan hebben. Meerdere methodes om de warmteoverdrachtscoëfficiënt afhankelijk van windsnelheid te schatten gebruiken daarvoor de wortel uit de windsnelheid. Dit geeft bij een verdubbeling van de windsnelheid van 0.1 naar 0.2 m/s een toename van 1.41 van de warmteoverdrachtscoëfficiënt (Goudriaan & van Laar 1994; Nobel 2004; Schymanski *et al.* 2016; Nelson&Bugbee 2015). In dat geval lijkt windsnelheid alsnog een grote invloed te kunnen hebben op de energiebalans. Uit Figuur 27 blijkt echter dat de grootste verschillen in windsnelheid tussen de dag en de nacht zitten terwijl gedurende de dag of nacht verschillen in windsnelheid beperkt zijn.