

Monitoring van huidmondjesopening in de kas: ontwikkeling en validatie



December 2019

Govert Trouwborst, Jan Voogt, Peter Reijm, Sander Hogewoning

Monitoring van huidmondjesopening in de kas: ontwikkeling en validatie

December 2019

G. Trouwborst¹, J.O. Voogt², P. Reijm², S.W. Hogewoning¹

¹Plant Lighting B.V.

Veilingweg 46

3981 PC Bunnik

info@plantlighting.nl

www.plantlighting.nl

²LetsGrow.com B.V.

Westlandseweg 190

3131 HX Vlaardingen

REFERAAT

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

Projectnummer: 20089



Ministerie van Landbouw,
Natuur en Voedselkwaliteit



© 2019 Plant Lighting B.V.

Dit rapport is tot stand gekomen in samenwerking met het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit en Glastuinbouw Nederland in het kader van het programma Kas als Energiebron, ter stimulering van energiebesparende maatregelen in de tuinbouw. De resultaten mogen vrij gebruikt worden, mits de bronnen worden vermeld.

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

Inhoudsopgave

SAMENVATTING.....	5
DANKWOORD.....	7
1 INLEIDING EN DOELSTELLING.....	8
1.1 Kader onderzoek.....	8
1.2 Probleemstelling onderzoek.....	9
1.3 Doelstelling.....	10
1.4 Leeswijzer	10
2 WERKING VAN DE HUIDMONDJES IN HET KORT	11
3 MATERIAAL EN METHODEN.....	14
3.1 Inleiding werkpakketten	14
3.2 Metingen.....	15
4 STOMATASENSOR BIJ ANTHURIUM.....	20
4.1 Methode anthurium	20
4.2 Resultaten metingen Anthurium.....	21
4.3 Andere methoden voor inzicht in huidmondjesopening	27
4.4 Conclusies stomatasensor bij Anthurium	30
5 STOMATASENSOR BIJ PAPRIKA.....	31
5.1 Methode paprika	31
5.2 Resultaten metingen paprika	32
5.3 Conclusies stomatasensor bij paprika.....	40
6 CONCLUSIES EN EVALUATIE	41
6.1 Algemene conclusies	41
6.2 Evaluatie en toekomstbeeld	41
7 AAN DE SLAG.....	43
REFERENTIES.....	44
BIJLAGE 1. LITERATUURSTUDIE HUIDMONDJESMODELLEN.....	47
BIJLAGE 2. THEORIE ENERGIEBALANS VOOR STOMATASENSOR	60
BIJLAGE 3. GEBRUIK VAN JARVIS-MODEL VOOR PAPRIKA	62
BIJLAGE 4. METINGEN ANTHURIUM.....	65

Samenvatting

Introductie en doelstelling

De mate van de huidmondjesopening bepaalt mede hoeveel een plant verdampt en hoeveel CO₂ opgenomen kan worden. Huidmondjes werken daardoor op het snijvlak van de assimilatenbalans (efficiency belichting), de waterbalans (aan- en afvoer water), en de energiebalans (adiabatische koeling door verdamping). Real time inzicht in huidmondjesopening geeft dus inzicht in het moment dat huidmondjesopening beperkend wordt voor fotosynthese en groei. Dit leidt tot betere benutting van licht en CO₂ als groeimiddel en draagt daarmee bij aan duurzaamheid van de teelt. Daarnaast geeft het inzicht in de energie- en waterbalans van het gewas waardoor het indicaties geeft voor het moment van watergift, sluiting van het schermdoek, ofwel aansturing van de vernevelinstallatie.

Het goed kunnen bepalen van de huidmondjes-geleidbaarheid (Gs) in een kas is nog altijd een grote uitdaging. Veel factoren hebben invloed: VPD, convectieve warmteoverdracht tussen blad en kaslucht, instraling, lichtkleur, CO₂ en vocht- en EC-status in het substraat. Dit project beoogt de ontwikkeling van een robuuste, betrouwbare en betaalbare methode om huidmondjesopening in een kassituatie vast te stellen bij middelmatig en laag verdampende gewassen. Dit door (1) kennisontwikkeling over de meest geschikte manier om huidmondjes-geleidbaarheid in een tuinbouwkas te bepalen, en (2) validatie-metingen aan de al bestaande (en eventueel aangepaste) stomatasensor ontwikkeld door LetsGrow.

Opzet onderzoek

Er is gestart met een literatuuronderzoek naar de meest geschikte huidmondjesmodellen om toe te passen in een kasomgeving. Daarnaast zijn er steekproefsgewijze toetsingen uitgevoerd bij twee gewassen: (1) een middelmatig verdampend gewas (paprika), en (2) een laagverdampend gewas (anthurium). Dit is uitgevoerd in de periode van winter naar zomer 2019 zodat er ruime variatie was in toetsomstandigheden: variatie in instraling en VPD. De berekende Gs van de stomatasensor is vergeleken met de gemeten Gs via fotosynthese-apparatuur (Li-6800).

Conclusies literatuuronderzoek

Vanuit het literatuuronderzoek is de conclusie getrokken dat een deel van de huidmondjesmodellen (de zogenaamde Ball Woodrow Berry-modellen) op dit moment nog niet geschikt zijn voor de praktijk, vanwege de aanwezigheid van een berekende fotosynthese in de formule voor berekening van de huidmondjesopening. Dit type modellen kan dus alleen maar toegepast worden als ook de fotosynthese 'live' wordt berekend. De Jarvis-type modellen, waarin factoren onafhankelijk van elkaar invloed hebben op de huidmondjesopening (licht, temperatuur, VPD, etc.), zijn wel geschikter, maar er worden tegelijkertijd twee nadelen benoemd: (1) De vermeende onafhankelijke werking van de verschillende factoren waarop huidmondjes reageren, en (2) het parametriseren van dit type

modellen is bewerkelijk. De aanpak van Voogt & Van Weel via de energiebalans is het meest veelbelovend, omdat hier de Gs niet voorspeld wordt, maar de actuele toestand berekend wordt uit meetgegevens. Hierdoor vervalt de parametrisatie. Uiteraard wordt in deze berekening de werkelijkheid vereenvoudigd.

Conclusies werking stomatasensor

Bij Anthurium is ontdekt dat de infraroodstraling een belangrijke factor is in de energiebalans. Alleen als deze wordt meegenomen in de energiebalans, geeft vergelijking van de stomatasensor met de Li-6800 goede resultaten. Dit zou eenvoudig moeten kunnen met een netto stralingsmeter, maar moet nog wel worden getoetst. Voor anthurium zijn er nog twee andere opties mogelijk ter beoordeling van de huidmondjesopening: (1) Via een weegoot, mogelijke nadelen zijn dat de weegoot een obstakel vormt voor de heftruck die de planten transporteert. Tevens moeten in een eb-vloedsysteem regelmatig planten gewisseld worden om verschil in watergift met ernaast staande planten te voorkomen. (2) Een warmtebeeldcamera (Thermoview) inclusief software kan gebruikt worden om 'live' verschil te maken tussen blad- en bloemtemperatuur: Hoe dichter bij elkaar, hoe meer huidmondjes 'knijpen'. Dit laatste geeft dus alleen kwalitatief inzicht en niet kwantitatief.

Bij paprika was de orde van grootte van de huidmondjesopening over de verschillende meetdagen gelijk tussen de stomatasensor en de Li-6800. Een uitzondering trad op bij laagstaande zon waardoor er schaduw viel op de meetpositie van de Li-6800 terwijl er direct licht was in het meetvlak van de PAR-meter en planttemperatuurmeter. Dit geeft direct het belang aan van een representatieve plaatsing van de sensoren. Aan de randen van de dag werden er soms onrealistisch hoge Gs-waarden berekend. Mogelijk ligt dit aan het ontbreken van de infrarood-energiestroom van gewas naar het kasdek of scherm. Ook hier zou een netto stralingsmeter theoretisch gezien beter zijn.

Evaluatie

De hoofddoelstelling van dit onderzoek was de ontwikkeling van een robuuste, betrouwbare en betaalbare methode om de huidmondjesgeleidbaarheid (Gs) in een kassituatie vast te stellen. Het is gebleken dat de stomatasensor (gebaseerd op de energiebalans) dit kan bieden. Deze aanpak werkt voor een laag verdampend gewas als Anthurium en voor een middelmatig (winter) tot hoog (zomer) verdampend gewas als paprika. Toevoeging van een nettostralingsmeter maakt de stomatasensor naar verwachting betrouwbaarder. Dit dient getoetst te worden.

De berekeningen van de stomatasensor, maar ook van welk ander model dan ook, zijn afhankelijk van de sensoren die in de kas beschikbaar zijn. De betrouwbaarheid van de sensoren en de representativiteit van de meetplaats voor het gewas als geheel zijn erg belangrijk. De verwachting is dat er in de nabije toekomst steeds meer gehandeld wordt op basis van gemeten feiten. Zo wordt "data driven growing" mogelijk. Dit vereist wel goede sensoren en voldoende aandacht voor positionering en onderhoud.

Dankwoord

Dit rapport geeft de resultaten weer van onderzoek naar het meetbaar maken van de huidmondjesopening bij Anthurium en Paprika middels de energiebalans van het gewas. De metingen vonden plaats in een proefkas Delphy Improvement Centre en in een productiekas potanthurium bij Stolk Brothers.

Dit onderzoek is een samenwerking tussen Plant Lighting en LetsGrow. Het onderzoeksdeel van Plant Lighting is ondersteund door het programma 'Kas als Energiebron', gefinancierd door het Ministerie van LNV en Glastuinbouw Nederland. Het onderzoeksdeel van LetsGrow werd door LetsGrow zelf gefinancierd.

We willen een aantal personen nog met name hartelijk bedanken voor hun bijdrage: Pieter Stolk (Stolk Brothers) voor het beschikbaar stellen van een meetlocatie in de kas en de betoonde gastvrijheid tijdens de meetsessies. Ditzelfde geldt voor Rick van den Burg en Lianne Helmus bij het Delphy Improvement Centre. Tevens willen we de volgende personen bedanken voor hun inbreng tijdens de BCO's: Pieter Stolk (Stolk Brothers), Stefan Groenewegen (Groene Tint), Sjaak van Kester (PowerGrow), Wouter Overgaag (kwekerij Overgaag). Joke Vreugdenhil (Glastuinbouw Nederland) wordt bedankt voor het coördineren van de BCO's. 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.

December 2019,

Govert Trouwborst

1 Inleiding en doelstelling

1.1 Kader onderzoek

Binnen het programma Kas als Energiebron is de ambitie uitgesproken dat in 2050 de gebruikte energie in de glastuinbouw volledig duurzaam is. Concreet houdt dit in dat de twee grote hulpbronnen, warmte en elektriciteit voor belichting, duurzaam moeten worden ingevuld. Minimalisatie van (of het tegengaan van verspilling van) deze hulpbronnen is dan ook een vereiste om economisch rendabel te zijn. Dit geldt ook voor CO₂, dat in een fossiel-vrije teelt een kostbaardere hulpbron is. Een duurzame glastuinbouw zal worden bereikt door enerzijds technische oplossingen zoals WKO, energiezuinige belichting (LED), en moderne kassen met minimale energie-lekken. Anderzijds speelt de (aansturing van de) plant een grote rol. Hierbij is een sleutelrol weggelegd voor de huidmondjes. De mate van huidmondjesgeleidbaarheid (Gs) bepaalt mede hoeveel een plant verdampt en hoeveel CO₂ opgenomen kan worden. Huidmondjes werken daardoor op het snijvlak van de assimilatenbalans (efficiency belichting), de waterbalans (aan- en afvoer water), en de energiebalans (adiabatische koeling door verdamping).

Dit onderzoek draait om momentaan inzicht verkrijgen in het huidmondjesgedrag, met een focus op middelmatig en laag verdampende gewassen. De huidmondjesstand laat zien of de fotosynthese al dan niet belemmerd wordt. Dit leidt tot betere benutting van licht en CO₂ als groeimiddel. Daarmee draagt het bij aan duurzaamheid van de teelt. Overigens zal een aanpak die werkt voor laag- en middelmatig verdampende gewassen, ook werken voor hoogverdampende gewassen

In tabel 1 worden enkele scenario's geschetst met betrekking tot energie en lichtbenutting voor verschillende gewasgroepen:

Tabel 1. Scenario's met betrekking tot energie- en lichtbenutting voor verschillende gewasgroepen.

groep	uitdaging
hoogverdampend zoals tomaat, lisianthus, chrysant	Beperking van verdamping om aan hoog vocht gerelateerde problemen te voorkomen: (a) Ontvochtigen via ventilatie als er verwarmd moet worden kost veel energie, en verlies aan CO ₂ en daardoor verlaging licht-efficiency. (b) Ontvochtigen via ventilatie bij voldoende instraling kost geen energie, maar wel verlies aan CO ₂ en daardoor verlaging licht-efficiency. Voorkomen van sluiting van de huidmondjes als gevolg van tekort aan water.
middelmatig verdampend zoals roos, lelie, alstroemeria, paprika	Voorkomen van slechte benutting van licht en CO ₂ door knijpende huidmondjes, meestal alleen te sturen door of vermindering van licht of door het geven van een (extra) watergift of inzet verneveling. Of juist beperking van verdamping om aan hoog vocht gerelateerde problemen te voorkomen (naast ziekten ook disfunctionele huidmondjes hierdoor slechte houdbaarheid eindproduct).
laag verdampend zoals anthurium miltonia, bromelia	Voorkomen van slechte benutting van licht en CO ₂ door knijpende huidmondjes, meestal te sturen door toepassing verneveling. De uitdaging is om niet meer te vernevelen dan nodig is en condensatie van vocht op het kasdek te minimaliseren. Bij geopende huidmondjes hoeft er uiteindelijk minder CO ₂ gedoseerd te worden voor eenzelfde effect op groei, tevens minder CO ₂ -productie als er geen warmtevraag is.

1.2 Probleemstelling onderzoek

Het goed kunnen bepalen van de huidmondjes-geleidbaarheid (g_s) in een kas blijkt nog altijd een grote uitdaging. Veel factoren hebben invloed: VPD, convectieve warmteoverdracht tussen blad en kaslucht, instraling, lichtkleur, CO₂ en vocht- en EC-status in het substraat. In een recent afgesloten onderzoek (Maximale daglichtbenutting voor minimale belichting Phalaenopsis, Trouwborst *et al.* 2017), zijn er in samenwerking met Jan Voogt (LetsGrow) verkennende metingen uitgevoerd met de stomatasensor bij de laagverdampende phalaenopsis. Deze metingen bieden aanknopingspunten voor verdere ontwikkeling en toepassing bij andere laagverdampende gewassen. Tevens is recent de thermoview-sensor op de markt gebracht die gedetailleerder dan de standaard planttemperatuurmeter de gewastemperatuur in beeld brengt. Deze sensor kan verschillende objecten onderscheiden. Dit maakt het mogelijk om met één meter verschillende temperaturen in beeld te brengen: planttemperatuur en referentie-object(en) voor een niet verdampend oppervlak en/of luchttemperatuur. Hierdoor valt ruis door afwijkingen tussen verschillende temperatuursensoren weg. Dit biedt mogelijkheden voor betrouwbaardere g_s metingen in de kas.

Kansrijke toepassingsgebieden voor een betrouwbare stomatasensor zijn:

- Verbetering van de licht- en CO₂-benutting bij middelmatig en laag verdampende gewassen door actie te ondernemen als huidmondjes sluiten.

- Voorkomen van overmatige luchtbevochtiging in de winter bij middelmatig tot laag verdampende gewassen, dat zeer veel energie kost: verneveling (verdampend water) kost vele malen meer energie dan het opwarmen van vochtige lucht. Hierbij moet worden opgemerkt dat naarmate er minder energie-lekken zijn in de kas (hetzij door ventilatie of door condensatie), de mate van verneveling verminderd kan worden.
- Vroegtijdige signalering van het bekende huidmondjesprobleem bij in de winter geteelde rozen en andere hiervoor gevoelige snijbloemen (o.a. lelie 'papierblad'): slechte houdbaarheid door niet sluitende huidmondjes op de vaas. Andersom geldt hier ook: niet méér ontvochtigen dan nodig en zo geen onnodig verlies van energie. Een betrouwbare stomatasensor geeft de teler inzicht in de te hanteren grenswaarden.

Kortom, om op het scherpst van de snede te kunnen telen is het gedrag van de huidmondjes een cruciale schakel. De huidmondjes fungeren als 'poortwachter'. In klimaatneutrale teelt is op het scherpst van de snede telen vereist: Precies genoeg licht, maar niet te veel, schermdoeken zo lang mogelijk dicht, maar niet te lang, en ontvochtigen of bevochtigen alleen als het echt moet. Een betrouwbare stomatasensor in de kas is hierbij onmisbaar.

1.3 Doelstelling

Ontwikkeling van een robuuste, betrouwbare en betaalbare methode om huidmondjesopening in een kassituatie vast te stellen. Dit door:

- Kennisontwikkeling over de meest geschikte manier om huidmondjes-geleidbaarheid in een tuinbouwkas te bepalen.
- Validatie-metingen aan de al bestaande (en eventueel aangepaste) stomatasensor van LetsGrow.

1.4 Leeswijzer

Het rapport is als volgt opgebouwd: Hoofdstuk 2 geeft een kort een aantal punten rondom de werking van huidmondjes weer. Hoofdstuk 3 beschrijft de opbouw van het onderzoek. Hoofdstuk 4 biedt de behaalde resultaten bij Anthurium. Hoofdstuk 5 geeft de behaalde resultaten bij paprika weer. Hoofdstuk 6 geeft puntsgewijze conclusies en bevat een evaluatie. Bijlage I bevat het literatuuronderzoek dat nodig was voor het uitvoeren van dit project. Bijlage II bevat overige resultaten bij Anthurium.

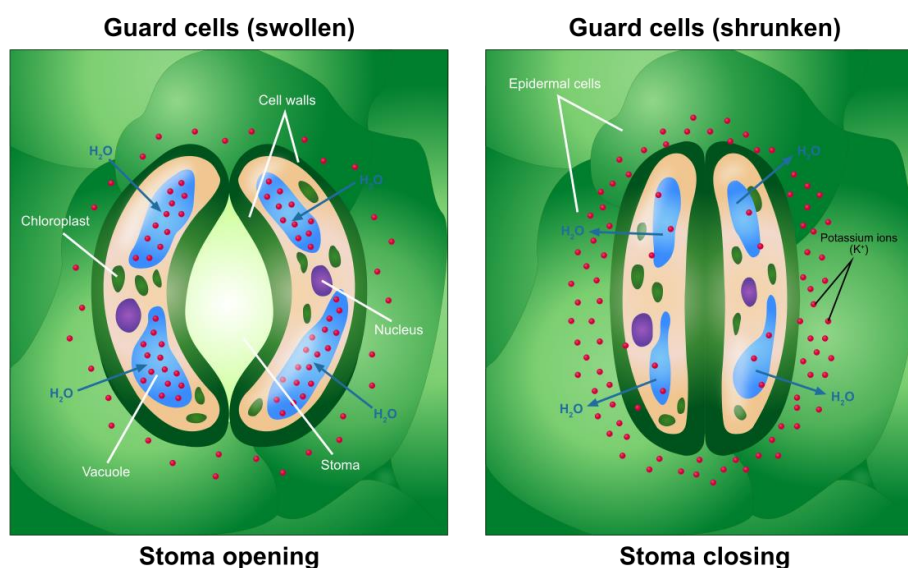
2 Werking van de huidmondjes in het kort

Dit hoofdstuk bevat een aantal hoofdpunten uit het literatuuronderzoek dat in Bijlage I staat. Op de volgende vragen wordt ingegaan:

1. Wat is een huidmondje?
2. Wat beïnvloedt de huidmondjesopening?
3. Hoe moet de wet van Ohm voor verdamping worden geïnterpreteerd?
4. Moet een huidmondje altijd zover mogelijk open staan?

Ad1. Wat is een huidmondje?

Huidmondjes zijn poriën in bladeren die actief geopend en gesloten kunnen worden. Huidmondjes (stomata) bestaan uit twee sluitcellen (guard cells). Opname en verlies van water in de sluitcellen verandert de turgordruk en het volume van de cellen. Dit reguleert opening en sluiting (Figuur 1).



Figuur 1. Opening en sluiting van huidmondjes. Gezwollen huidmondjes zorgen voor een opening. Gekrompen huidmondjes zorgen voor sluiting van de porie. Bron: wikipedia <https://en.wikipedia.org/wiki/Stoma>

Ad2. Wat werkt in op de huidmondjesopening.

Huidmondjes staan bloot aan zeer veel verschillende stuursignalen: Direct of indirect reageren ze zoal op VPD, convectieve warmteoverdracht tussen blad en kaslucht, instraling, lichtkleur, CO₂, en vocht- en EC-status in het substraat (plant waterstatus).

Meer dan te kijken naar de afzonderlijke werking van bovengenoemde factoren, is het nuttiger om te kijken naar wat zinvol is voor de plant. Dit wordt beoogd met het balansdenken zoals beschreven in 'De basisprincipes van Het Nieuwe Telen' (Geelen *et al.* 2015). Kort samengevat door Jan Voogt: 'Huidmondjes zijn er gewoon om de noodzakelijke verdamping en koeling van de plant mogelijk te maken (energiebalans), terwijl er ook CO₂ naar binnen moet en O₂ naar buiten (assimilatenbalans), maar ook om de plant te beschermen tegen uitdroging (vochtbalans).

Als voorbeeld de CO₂-concentratie in de kas in samenhang met vocht(tekort):

- Bij voldoende waterbeschikbaarheid zal het huidmondje in het geheel niet reageren op de CO₂ concentratie in de kas (met uitsluiten van CAM-planten).
- Als er watertekort dreigt en de interne CO₂ kan op peil gehouden worden bij een deels gesloten huidmondje dankzij een hoge CO₂-concentratie in de kas, dan zal de plant kiezen voor een beperkte verdamping.
- Is de externe CO₂ laag, dan zal de plant kiezen voor een hoger waterverlies ten gunste van een hogere CO₂ inname mits er geen vochttekort is.

De plant kiest dus zelf door middel van een aantal mechanismen voor de beste, of in geval van stress voor de minst slechte, combinatie van groeifactoren. Anders gezegd; je hoeft helemaal niet te weten hoe het allemaal werkt, om te begrijpen waarom het zo werkt.'

Ad3 het gebruik van de wet van Ohm en de VPD

Naar analogie van de wet van Ohm voor elektriciteit (Stroom=Spanning/Weerstand) kan de verdamping worden beschreven met: Verdamping= $VPD_{\text{blad-lucht}}$ / huidmondjesweerstand. NB deze formule kan ook als Verdamping= $VPD_{\text{blad-lucht}}$ * huidmondjesgeleidbaarheid (Gs) worden weergegeven.

Het is dan verleidelijk om $VPD_{\text{blad-lucht}}$ als drijvende kracht achter de verdamping te beschouwen, zoals bij een kraan de waterdruk de drijvende kracht is en de stand van de kraan te vergelijken is met de stand van het huidmondje. Echter formeel zegt de wet van Ohm niets over wat de drijvende kracht is, maar legt de *relatie* tussen spanning, stroom en weerstand. De wet geldt dus ongeacht of een spanningsbron of een stroombron de drijvende kracht is.

- Een spanningsbron (constante spanning en variabele stroom) is bijvoorbeeld een batterij met een bepaalde vaste spanning, zeg 1.5 Volt. Als je daar een weerstand van 1 Ohm overheen zet gaat er een stroom lopen van 1.5 Ampere. De wet van Ohm.
- Een stroombron (constante stroom en variabele spanning) is lastiger voor te stellen, dit is een bron die een vaste stroom levert, bijvoorbeeld 1.5 Ampere. Als je daar dezelfde weerstand overheen zet levert dat een spanning op van 1.5 Volt. Dezelfde wet van Ohm.

Als we deze voorbeelden overzetten op verdamping, zou je kunnen zeggen dat voor convectieve verdamping de $VPD_{\text{blad-lucht}}$ (spanningsbron) de initiële oorzaak is van de verdamping, en dat voor stralingsverdamping het beeld van de stroombron het beste past. Maar als je bedenkt dat convectieve verdamping alleen bestaat als er luchtbeweging is, dan past hier het beeld van de stroombron ook heel goed. Als we nu een blad opvatten als een stroombron die waterdamp produceert evenredig met de toegevoerde energie (via straling of luchtbeweging), dan wordt de spanning over de weerstand ($=VPD_{\text{blad-lucht}}=VP_{\text{blad}}-VP_{\text{lucht}}$) bepaald door de weerstand (=huidmondjesopening). In dat geval is dus juist VPD een gevolg en geen oorzaak van de verdamping. Binnen zekere grenzen is dan dus de bladtemperatuur (die onder VP_{blad} zit) een gevolg van instraling en huidmondjesstand. Als kanttekening moet onthouden worden dat in de term VPD ook de factor VP_{lucht} zit. Deze wordt, in tegenstelling tot buitenteelten, alleen in kassituaties en indoorteelten deels beïnvloedt door de verdamping

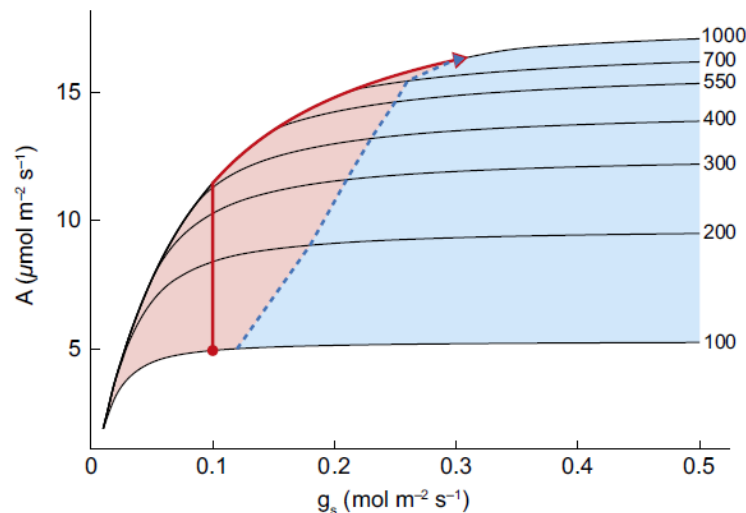
van de plant, en wordt sterk beïnvloedt door de mate van luchten (invloed op RV en luchttemperatuur) en de verneveling. In bijlage I wordt rondom tabel 5 een getallenvoorbeeld uitgewerkt hoe VPD en huidmondjesopening op elkaar inwerken. Wat voor beeld we ook gebruiken, de basis blijft dat door verdamping energie wordt onttrokken aan het blad. Er zal dus energietoevoer via straling of convectie moeten plaats vinden om te blijven verdampen.

Ad4. Moet een huidmondje altijd zover mogelijk open staan?

Nee, de noodzaak van huidmondjesopening neemt toe bij meer licht. Dit wordt mooi geïllustreerd in Figuur 1. Het volgende is te zien:

- Iedere curve laat bij een gegeven lichtniveau van 100 tot 1000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR de fotosynthese (y-as) zien bij een toenemende huidmondjesopening (x-as).
- De blauw gestreepte lijn geeft de mate van huidmondjesgeleidbaarheid aan die nodig is om 95% van het maximum van de CO_2 -opname bij een gegeven lichtintensiteit te bereiken.
- Het rood gearceerde gebied is dus gelimiteerd door de huidmondjesopening.
- Het blauw gearceerde gebied geeft aan waar er onnodig waterverlies plaats vindt ten opzichte van de CO_2 -opname.
- De rode lijn laat het traject zien van de CO_2 -opname nadat de lichtintensiteit van 100 naar 1000 μmol gaat (rode punt als initiële G_s en pijlpunt als eindpunt van de G_s).

Naarmate het lichtniveau stijgt, is er dus een hogere G_s nodig om de CO_2 -opname niet te beperken.



Figuur 2. Theoretische relatie tussen de netto CO_2 -opname (A) en de huidmondjesgeleidbaarheid (G_s) als een functie van de lichtintensiteit van 100 naar 1000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Iedere 'lichtcurve' laat de netto CO_2 -opname terwijl de G_s toeneemt. De rode lijn laat het traject zien van de CO_2 -opname nadat de lichtintensiteit van 100 naar 1000 μmol gaat (rode punt als initiële G_s en pijlpunt als eindpunt van de G_s). De CO_2 -opname reageert in eerste instantie direct, gevolgd door een langzame toename van de CO_2 -opname die gelimiteerd wordt door de (langzame) huidmondjesopening. De blauw gestreepte lijn laat de G_s zien die nodig is om 95% van het maximum van A bij een gegeven lichtintensiteit te bereiken. En representeert het traject als A en de G_s volledig synchroon zouden lopen. Waardes aan de linkerkant van de blauwe lijn (rood beschaduwde gebied) zijn G_s -gelimiteerd terwijl aan de rechterzijde er onnodig waterverlies plaats vindt ten opzichte van CO_2 -winst. Temperatuur en RV waren constant in deze berekening (Bron: Lawson et al. 2018).

3 Materiaal en methoden

3.1 Inleiding werkpakketten

Er zijn twee werkpakketten uitgevoerd: Literatuuronderzoek en toetsing in de praktijk.

WP1: Literatuuronderzoek modellen huidmondjesopening

Inventarisatie en analyse van verschillende methoden om de huidmondjesgeleidbaarheid (G_s) voor middelmatig en laag verdampende gewassen in de kas vast te stellen. Dit levert een overzicht van wat er is aan methoden om de G_s te bepalen, plus een analyse van geschiktheid/robuustheid van die methoden voor toepassing in de glastuinbouw. Dit onderzoek wordt weergegeven in Bijlage I. Hieruit bleek de aanpak van Voogt & Van Weel via de energiebalans (stomatasensor) het meest veelbelovend omdat hier de G_s niet voorspeld wordt maar de actuele toestand berekend wordt op basis van meetgegevens: PAR, luchttemperatuur, planttemperatuur en RV. De theorie achter de stomatasensor wordt in Bijlage II weergegeven.

WP2: Toetsing in de praktijk

De meest kansrijke methoden zijn uitgewerkt en in een kassituatie getoetst via parallelle steekproefsgewijze metingen met fotosynthese-apparatuur en/of weeggoten.

Dit is uitgevoerd bij twee gewassen:

- een laagverdampend gewas (anthurium)
- een middelmatig verdampend gewas (paprika)

De steekproefsgewijze toetsingen zijn uitgevoerd in de periode van winter naar zomer 2019 zodat er ruime variatie was in instraling en VPD. Per meetdag is de berekende G_s van de stomatasensor vergeleken met de gemeten g_s via nauwkeurige fotosynthese-apparatuur (Li-6800). Dit laatste door middel van metingen die dermate kort duren zodat de actuele huidmondjesopening van het gewas over de dag gemeten wordt, zonder dat er sprake kan zijn van sluitende huidmondjes als reactie op het inklemmen van het blad in de meetapparatuur (zes dagen per gewas). In het geval van potplanten is er rekening gehouden met pot- en plantverdamping. De haalbaarheid van een robuuste, betrouwbare en betaalbare softsensor voor de G_s in de kas is zo duidelijk geworden.

3.2 Metingen

3.2.1 Klimaatbox en gewastemperatuur

Via de klimaatbox is luchttemperatuur en RV gemeten. De richtlijn vanuit Hoogendoorn voor de positie van de klimaatbox is voor hogedraadteelt (paprika) 20 cm onder de kop en bij lage gewassen zoals Anthurium 20 cm boven het gewas. De gewastemperatuur is gemeten met een Planttemperatuur-meter (PT-meter type CT11). Deze was dusdanig opgesteld dat er enkele vierkante meters gewas werden gemeten (Tabel 2).

Tabel 2. Relatie ophanghoogte met de eigenschappen van het meetvlak van een planttemperatuurmeter CT11 onder de standaard richthoek van 79°.

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)
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

3.2.2 Weeggoot

Bij Anthurium zijn er weeggoten ingezet. Deze logden eens per 5 minuten het plantgewicht. Het bleek dat om op grond van het plantgewicht de verdamping op 5-minutenniveau te bepalen de weeggoten heel stabiel moesten zijn. Het gebruikte eb- en vloedsysteem veroorzaakte op de dagen van watergift oscillaties van het meetsignaal. Potverdamping werd uitgesloten door de bovenkant van de pot af te dekken met plastic (Foto 8).

3.2.3 Drainmeter

Bij paprika werd via een drainmeter de wateropname van de planten berekend. Via een tuningsalgoritme werd de cumulatieve gewasverdamping vergeleken met de netto opname gift minus drain. Bij afwijkingen worden de relevante parameters in het model automatisch gecorrigeerd (voor details zie Dieleman *et al.* 2016).

3.2.4 Thermoview

Met de thermoview wordt inzicht verkregen in de verdeling van de energie/water balans omdat individuele hotspots en coldspots in beeld komen. Voor Anthurium is het dan interessant om het verschil in temperatuur te kunnen meten van de bladeren ten opzichte van

de bloemen: want er is een min of meer gelijke hoeveelheid invallend licht terwijl bloemen niet of nauwelijks verdampen. Uiteraard speelt voor de nauwkeurigheid van de meting de afstand tussen de meter en het object een rol. De thermische camera heeft een resolutie van $80 \times 60 = 4800$ pixels. De visuele foto (Foto 1) heeft een geschatte oppervlakte van 2-2.5 m². Dit geeft een oppervlak van $2.5 \text{ m}^2 / 4800 = 5.2 \text{ cm}^2$ per thermische pixel. De grootste bladeren en bloemen hebben een gemiddelde oppervlakte van:

- Een blad $\sim 65 \text{ cm}^2 > 65 / 5.2 = 12.5$ pixels per blad
- Een bloem $\sim 35 \text{ cm}^2 > 35 / 5.2 = 6.7$ pixels per bloem

Per bloem/blad blijven er dan nog maar weinig pixels over, waarvan de meeste pixels ook nog eens aan de randen van de bladeren of bloemen liggen. Aan het einde van het project is nog een dataset verzameld waar er ingezoomd is op twee planten om het verschil in blad- en bloemtemperatuur te monitoren.

Tijdens het grootste deel van de looptijd van het project waren er problemen met de firmware waardoor metingen opeens onbetrouwbaar konden worden. Aan het einde van dit project was er nieuwe firmware beschikbaar gesteld door de fabrikant waardoor er nog wat betrouwbare beelden konden worden verzameld.

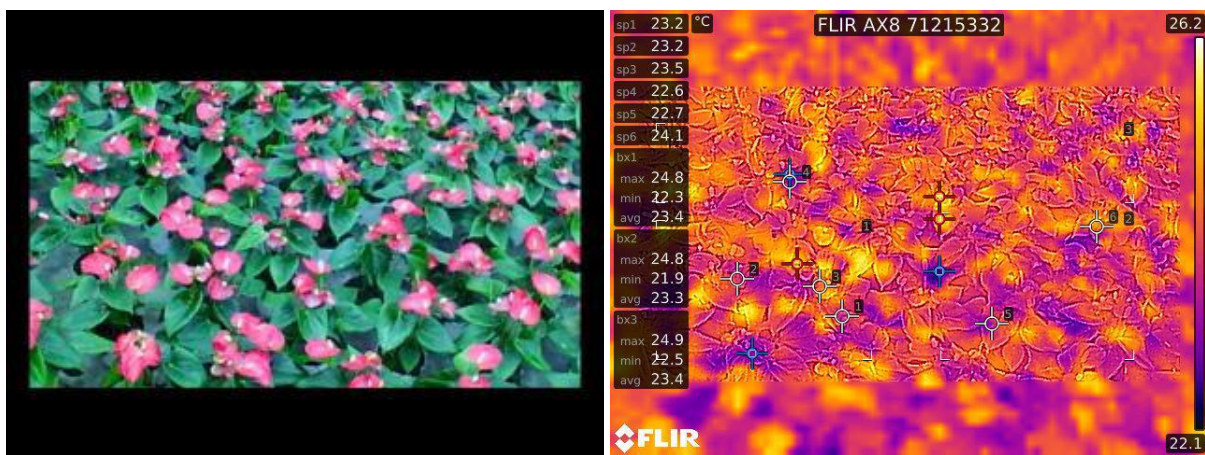


Foto 1. Voorbeeld Thermoview. Op de linkerfoto het visuele beeld en rechts het warmtebeeld (foto 13 mei 14:00).

3.2.5 Li-6800 fotosynthesemeter

De Li-6800 (Foto 2) is een geavanceerde draagbare fotosynthesemeter en is momenteel wereldwijd een goede standaard. Dit apparaat meet zeer nauwkeurig de fotosynthese en verdamping van het ingesloten stuk blad. Hiermee komt direct de vraag op of het gemeten stukje blad representatief is voor de andere bladeren. Dit nadeel wordt (deels) ondervangen door veel bladeren te meten. Het is voor te stellen dat juist in stressvolle omstandigheden de variatie tussen bladeren fors toe kan nemen omdat sommige bladeren nog net geen stress ervaren terwijl andere dit al wel ervaren. Eventueel kunnen huidmondjes op hetzelfde blad al variabel reageren op waterstress (patchiness).



Foto 2. Li-6800 Fotosynthesemeter bij Anthurium.

Op het moment dat een blad in de meetcuve wordt ingesloten, zal de energiebalans van het blad drastisch veranderen: lichtbron (LED) en lichtintensiteit zijn anders (straling). Tevens is de luchtsnelheid op bladniveau anders door de interne ventilator (convectie). Dit kan de stand van de huidmondjes beïnvloeden. Het is bekend dat over het algemeen huidmondjes traag reageren (minutenschaal) terwijl de Li-6800 al rond de minuut een stabiele waarde geeft. Door kortdurende metingen te doen, kan dus telkens de huidmondjesstand onder de voorgaande omgevingstoestand worden vastgelegd. Deze methode zou mis kunnen gaan bij zeer snel reagerende gewassen zoals Olifantsgras (McAusland *et al.* 2016).

3.2.6 Principe van de stomatasensor

De stomatasensor gaat uit van de gemiddelde energie/water balans van het (bovenste deel van het) gewas omdat het werkt met de gemiddelde bladtemperatuur van de top van het gewas via de PT-meter, de luchttemperatuur en RV rondom de topbladeren via de meetbox en de instraling (via de PAR-meter) gemeten boven het gewas. Via de Figuren 3-5 worden de rekenstappen toegelicht.

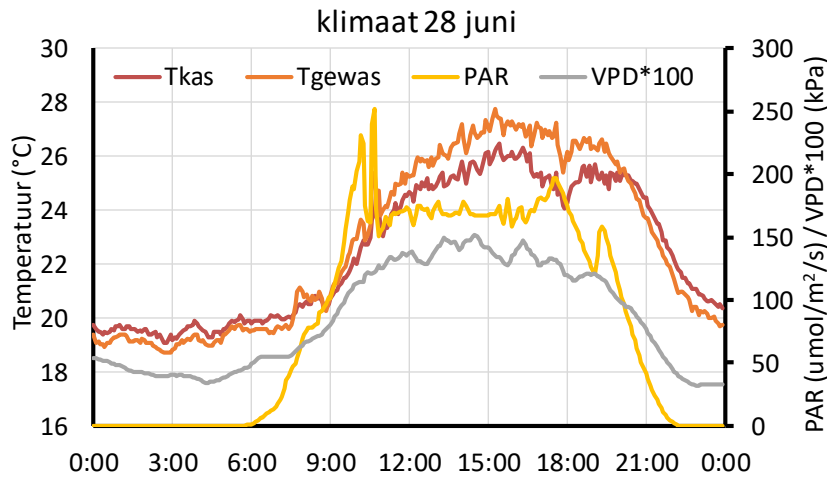
Zoals uit Bijlage II blijkt, is de berekening van de stomatasensor gebaseerd op drie energiestromen:

- Straling, omgerekend via PAR op gewasniveau (De verhouding PAR/NIR-straling is voor daglicht en SON-t min of meer gelijk, maar fors anders voor LED)
- Convectie via verschil lucht- en planttemperatuur
- Verdamping

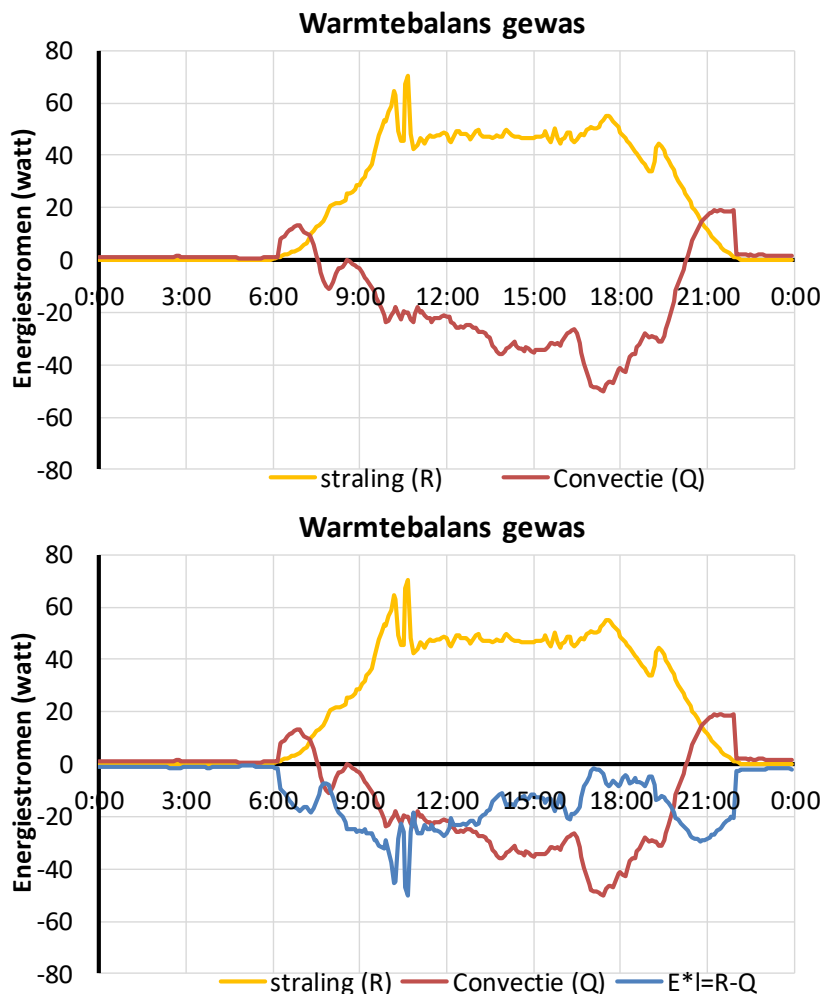
De basis wordt dus gemeten door de klimaatbox (luchttemperatuur en RV), de PT-meter en de PAR-meter. De warmtestroom via IR-straling wordt dus niet meegenomen, deze bleek voor Anthurium essentieel (Hoofdstuk 4). Figuur 3 geeft het klimaat weer.

De inkomende straling (300-3000nm) wordt via de PAR-meter (400-700nm) omgerekend (Figuur 4 geel). De convectie via het verschil in blad- en luchttemperatuur en de

warmteoverdrachtscoëfficiënt (h , zie Hoofdstuk 3.2; Figuur 5 rood). Het verschil tussen de inkomende straling en de convectie is dus de verdampingsenergie ($E^*I=R-Q$; Figuur 5 blauw).



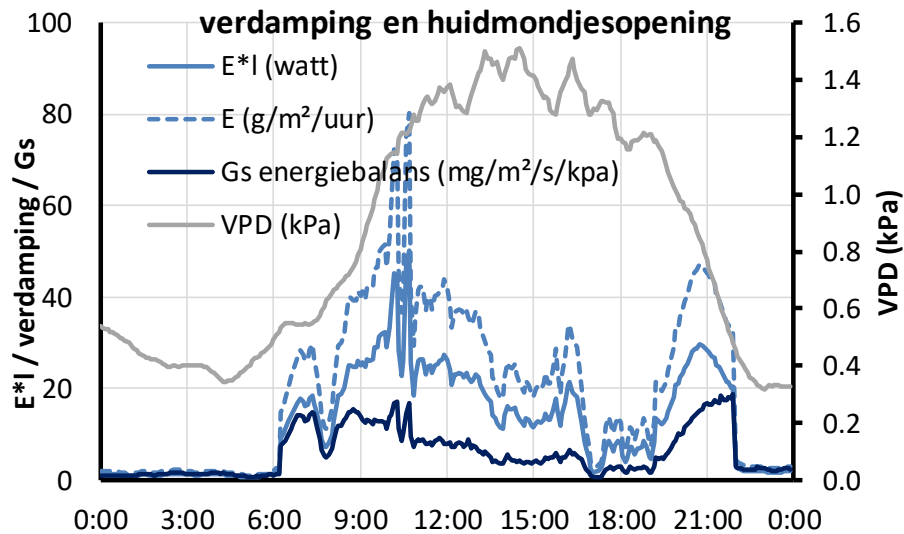
Figuur 3. Klimaat op een voorbeelddag bij Anthurium (data 28 juni 2019).



Figuur 4. Energiestromen rondom het blad gebaseerd op het klimaat weergegeven in Figuur 3. De stralingsenergie op plantniveau wordt berekend vanuit de PAR-meting (geel) en de convectieve warmteoverdracht vanuit het verschil tussen de blad- en luchttemperatuur maal de warmteoverdrachtscoëfficiënt (rood). De verdampingsenergie (E^*I ; blauw) is de resultante van de straling minus de convectie.

Zo gauw het verloop van de verdampingsenergie (blauwe lijn in Figuur 4 en 5) bekend is, kan de huidmondjesgeleidbaarheid worden berekend via:

- Verdamping E [$\text{g}/\text{m}^2/\text{uur}$] = verdampingsenergie [watt] / 2257 [joule/gram] (Figuur 5: blauw gestreepte lijn)
- Huidmondjesgeleidbaarheid [$\text{mg}/\text{m}^2/\text{s}/\text{kPa}$] = Verdamping [$\text{g}/\text{m}^2/\text{s}$] / VPD [kPa] (Figuur 5: donkerblauwe lijn)



Figuur 5. Van verdampingsenergie (blauw) via verdamping (blauw gestreept) naar huidmondjesopening (donkerblauw). De blauwe doorgetrokken lijn is dezelfde blauwe lijn als in Figuur 4.

4 Stomatasensor bij Anthurium

4.1 Methode anthurium

De metingen aan het gewas Anthurium vonden plaats bij Stolk Brothers te Bergschenhoek. Foto 3 geeft de meetopstelling weer: Naast de klimaatbox, hing er een PT-meter, een Thermoview-camera, er waren PAR-meters en er stonden weeggoten.



Foto 3. Links: Meetopstelling bij Stolk Brothers: klimaatbox, PT-meter en thermoview bij en aan de kaspoort. Rechts: twee weeggoten.

De huidmondjesstand gedurende een dag is gedurende de eerste helft van 2019 zes maal gemeten met Li-6800 fotosynthese-apparatuur. De meetdagen staan vermeld in tabel 3. Er zijn voor Anthurium cv 'Fiesta' twee teeltrondes gevolgd (potmaat 0.8 liter). De eerste teeltronde liep van week 6 tot week 16 en de tweede teeltronde liep van week 17 tot week 27. De plantdichtheid was 19.5 planten/m².

Tabel 3. Overzicht tijdslijn van de proef.

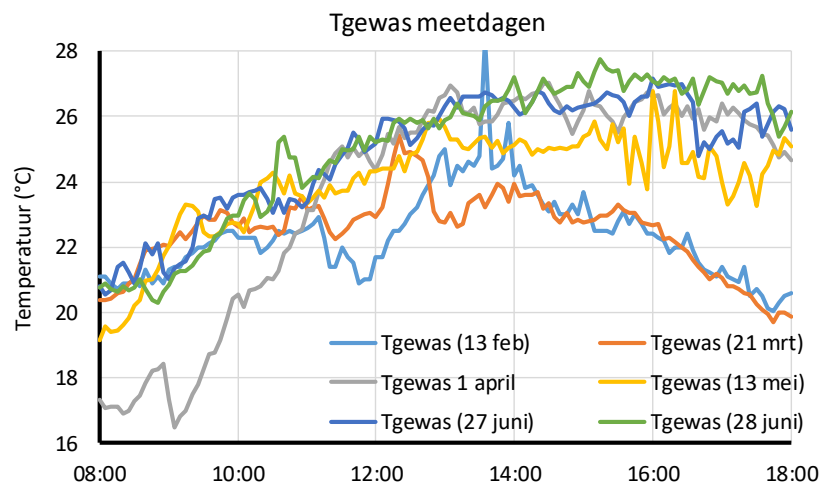
Datum	Handeling
13 februari 2019	meting 1 Li-6800
21 maart 2019	meting 2 Li-6800
1 april 2019	meting 3 Li-6800
13 mei 2019	meting 4 Li-6800, tevens handmatige meting van temperatuur van blad, bloem en scherm. Verneveling rond 12:00 uur uitgezet.
27 juni 2019	meting 5 Li-6800, tevens handmatige meting van temperatuur van blad, bloem en scherm. Verneveling rond 11:00 uitgezet.
28 juni 2019	meting 6 Li-6800, tevens handmatige meting van temperatuur van blad, bloem en scherm. Verneveling tot 17:00 uitgestaan.

In paragraaf 4.2 worden de metingen van de stomatasensor vergeleken met die van de Li-6800. Hiervoor worden eerst de metingen van de Li-6800 toegelicht en vervolgens vergeleken met de stomatasensor. In paragraaf 4.3 worden andere methoden bekeken om kwantitatief of kwalitatief iets te zeggen over de huidmondjesopening. In Bijlage 4 staan een aantal andere (fotosynthese)metingen uitgewerkt, waaronder enige metingen aan 'Aristo'. Deze resultaten staan buiten de hoofdlijn van dit rapport, maar bevatten wel nuttige informatie.

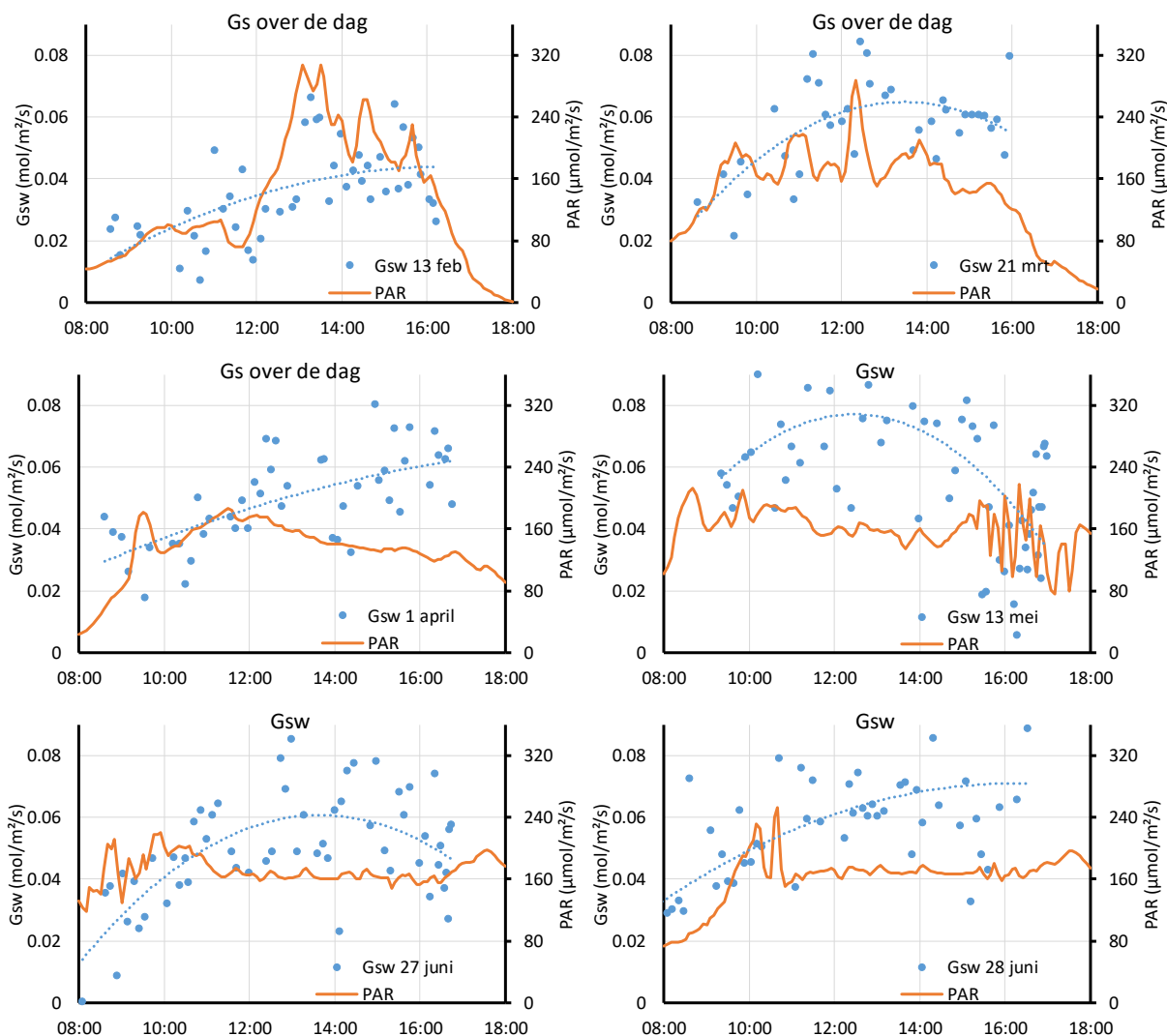
4.2 Resultaten metingen Anthurium

4.2.1 Huidmondjesgedrag en huidmondjesbeperking

Figuur 7 laat het huidmondjesgedrag zien over de dag. Iedere blauwe punt is een afzonderlijk meetblad van een afzonderlijke plant. Per meetdag zijn er gedurende de loop van de dag rond de 50 planten gemeten. De blauwe gestippelde lijn geeft een ruwe trend aan. Te zien is dat er best wat variatie rondom deze lijn zit. De ruwe trend is dat er tussen 8:00 en 10:00 lagere Gs-waarden worden gemeten. In de meeste gevallen valt toename van de Gs samen met een stijging in het lichtniveau (oranje lijnen) en temperatuur (Figuur 6). Qua stijging in lichtniveau is dit het duidelijkst aanwezig op 13 februari 2019. En qua stijging in temperatuur is dit het duidelijkst aanwezig op 1 april en 27&28 juni. Vanaf 13 mei is halverwege de dag of eerder de verneveling uitgezet om huidmondjessluiting te induceren. Dit heeft alleen effect gehad op 13 mei: rond 16:00 is te zien dat een aantal bladeren (al) een lage Gs hebben, terwijl andere nog steeds een 'hoge' Gs hebben. Lokaal was er toen dus sprake van waterstress. Op de twee laatste meetdagen is er in de middag helemaal geen huidmondjessluiting waar te nemen ondanks dat de VPD opliep richting 2 kPa. 'Fiesta' lijkt dus geen of slechts beperkt last te hebben van hoge VPD's. In het verleden lieten metingen aan andere anthuriumcultivars een grotere gevoeligheid voor VPD zien (o.a. Pot *et al.* 2015). Hierbij moet wel worden onthouden dat het effect van enige uren een hoge VPD anders kan zijn dan de hele dag blootgesteld te zijn aan een hoge VPD.

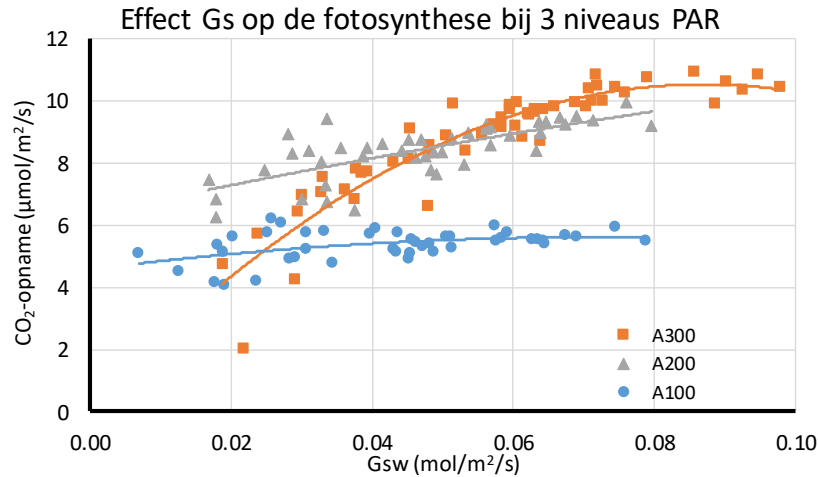


Figuur 6. Gewastemperatuur gedurende de meetdagen. Tussen 8:00 en 10:00 was meestal de temperatuur relatief laag ten opzichte van de rest van de dag.



Figuur 7. Huidmondjesgedrag gemeten met de Li-6800 fotosynthesemeter (blauwe stippen) en PAR (oranje lijn) op de verschillende meetdagen. Iedere blauwe stip is een afzonderlijk meetblad, de blauwe stippellijn geeft een ruwe trend aan. Per meetdag zijn er rond de 50 verschillende bladeren gemeten. De laatste drie meetdagen is de verneveling halverwege de dag uitgezet om huidmondjessluiting te induceren. Dit is behalve op 13 mei niet gelukt ondanks oplopende VPD richting 2 kPa.

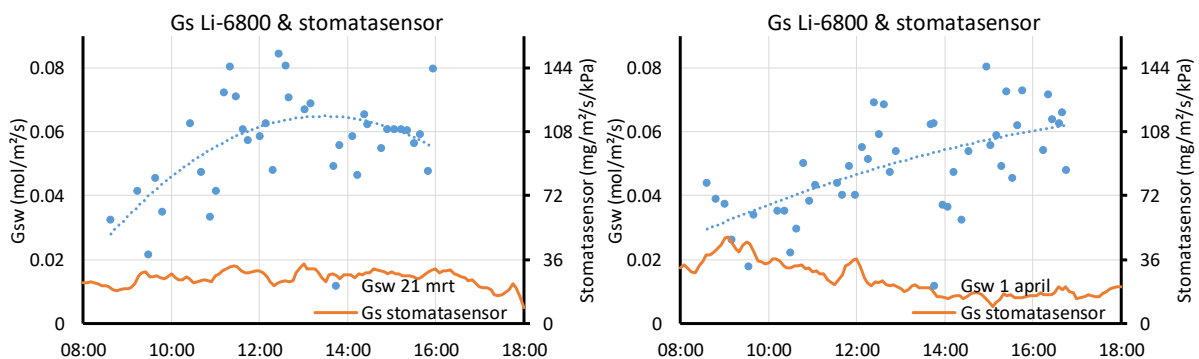
Zoals in de inleiding bij Figuur 2 weergegeven is de mate van fotosynthesebeperking door de huidmondjes afhankelijk van het lichtniveau. In Figuur 8 is te zien dat de Gs tot lage waarden nauwelijks beperkend is bij 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR terwijl er een behoorlijke huidmondjesbeperking is bij 300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR. Deze huidmondjesbeperking is ook afhankelijk van CO_2 . Als het CO_2 -gehalte lager was geweest, dan zou er waarschijnlijk ook bij 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR al een beperking zijn geweest.



Figuur 8. Effect van huidmondjesopening op de fotosynthesesnelheid bij 3 lichtniveaus. Te zien is dat bij een lage Gs de CO₂-opname bij 100 µmol/m²/s PAR niet beperkt wordt, dit is wel het geval bij 200 en 300 µmol/m²/s PAR. NB Er is gemeten bij 600 ppm CO₂. Bij een lager CO₂-gehalte zou het effect van de huidmondjesbeperking groter zijn. Data 28 juni 2019. De gekleurde lijnen geven per lichtniveau een ruwe trend weer.

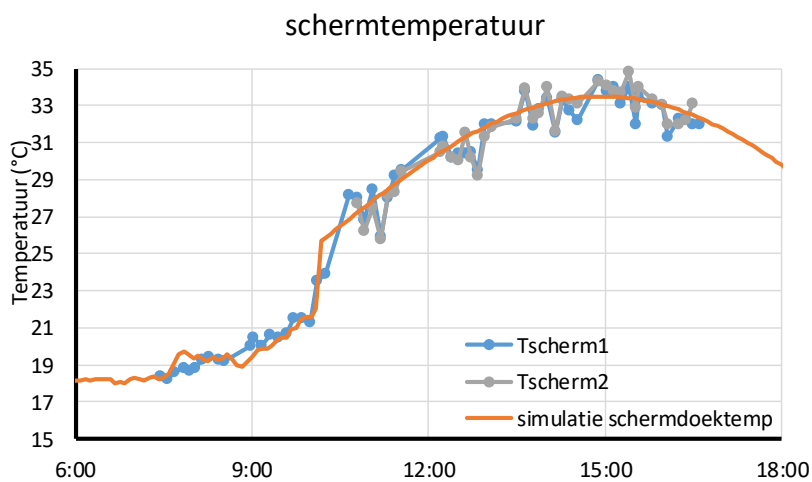
4.2.2 Vergelijk met de stomatasensor

Figuur 9 laat een vergelijking zien tussen de Li-6800 (blauwe punten) en de Stomatasensor (oranje lijn). De linkerass heeft een andere eenheid dan de rechterass, maar deze eenheden zijn in elkaar om te rekenen. Bij een luchtdruk van 100 kPa is de omrekeningsfactor 180. Deze factor is gebruikt om beide verticale assen op dezelfde manier te schalen. In een oogopslag is dus te zien dat de vergelijking geen succes is. Tijdens de derde meetdag op 1 april werd geconstateerd dat het scherm midden op de dag een fors hogere temperatuur had dan T_{gewas} en dat er dus een significante positieve energiestroom (IR-straling) plaats vindt van scherm naar gewas. Dit bleek te moeten worden meegenomen in de energiebalans. De daaropvolgende meetdagen is er daarom per meetplant ook de schermtemperatuur bepaald met een hand-IR-meter.

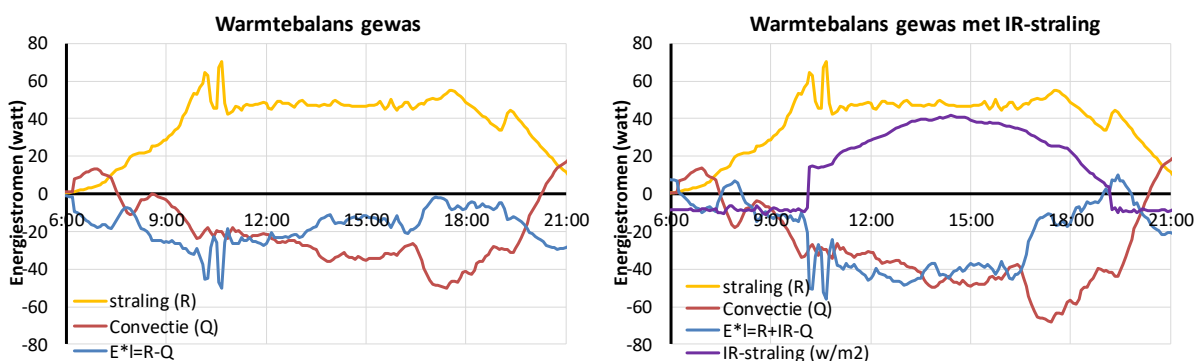


Figuur 9. Vergelijk van de meting van de huidmondjesopening via de Li-6800 (blauwe punten) en de stomatasensor (oranje lijn) op 21 maart en 1 april 2019. Beide methodes kwamen niet overeen. Tijdens de meetdag op 1 april werd geconstateerd dat het scherm een fors hogere temperatuur had dan T_{gewas} en dat er dus een significante positieve energiestroom plaats vindt tussen scherm en gewas. Dit moet worden meegenomen in de energiebalans. NB de linkerass heeft een andere eenheid dan de rechterass. Deze eenheden zijn in elkaar om te rekenen. Bij een luchtdruk van 100 kPa is de omrekeningsfactor 180 en deze is gehanteerd voor de schaling van de verticale assen.

Figuur 10 geeft een voorbeeld van de gemeten schermtemperatuur. Om hiermee verder te kunnen rekenen—de stomatasensor werkt op 5-minutenbasis—is de schermtemperatuur nagebootst met een sinusoïde. Onder een bepaald niveau aan instraling lag het scherm nog open en is aangenomen dat de glastemperatuur gelijk was aan T_{gewas} : Dit verklaart de sprong in temperatuur om $\pm 10:00$ (Figuur 10). Voor 10:00 bleek dat de glastemperatuur zeer dicht bij de glastemperatuur lag. Vervolgens is opnieuw de energiebalans opgesteld inclusief de IR-straling (Figuur 11 rechts, paarse lijn). Te zien is dat de IR-straling een substantiële toevoeging is—rond 14:00 wel 40W/m^2 —en dat hierdoor de verdampingswarmte (blauwe lijn) verdubbeld. Tevens is ook te zien dat rond 8:30 en 19:30 er een (niet correcte) negatieve verdamping wordt berekend. Dit komt waarschijnlijk door een foute inschatting van de schermtemperatuur.

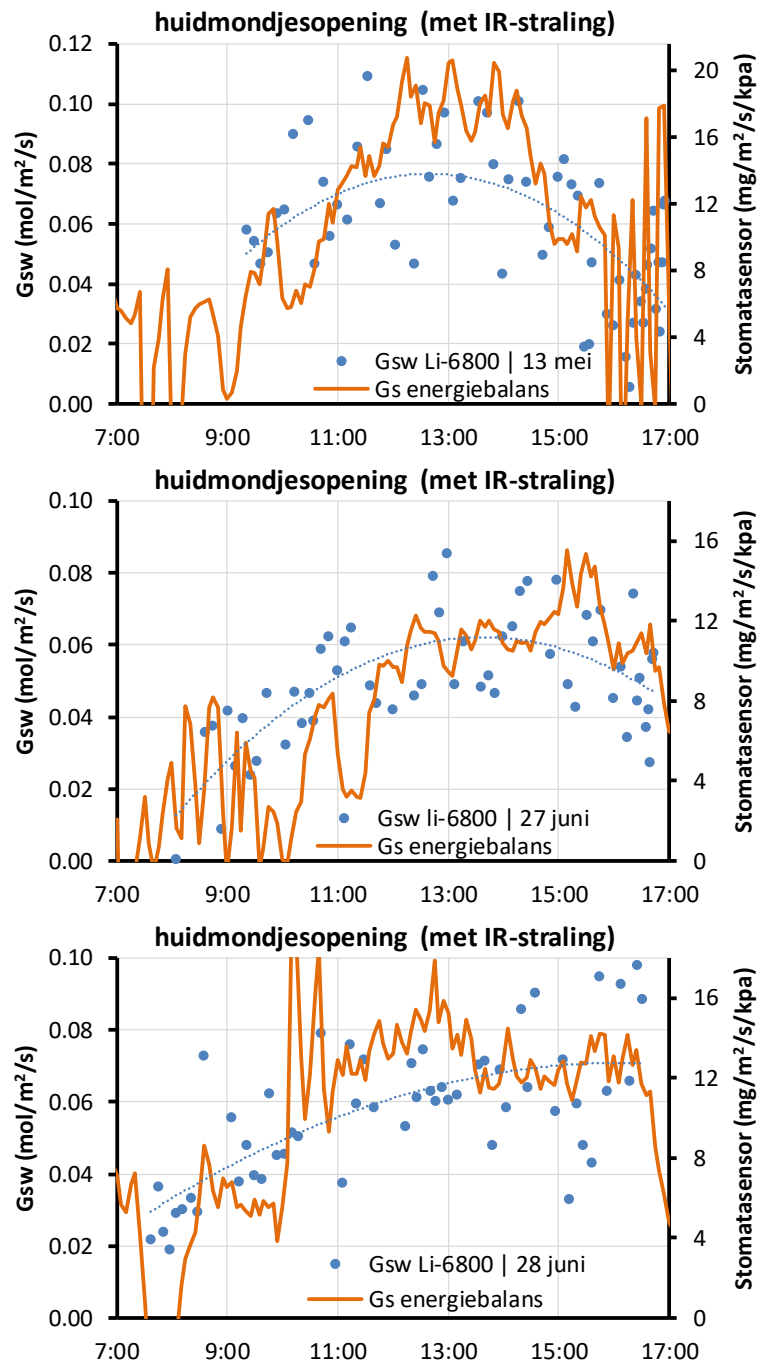


Figuur 10. Meting (blauw en grijs) en nabootsing schermtemperatuur (oranje) voor de berekening van de warmtestraling. Voor 10:00 is de glastemperatuur gemeten omdat het scherm nog open was. De oranje lijn is voor 10:00 gelijk aan de gewastemperatuur gesteld die via de PT-meter gemeten werd (data 28 juni 2019). Het bleek namelijk dat deze voor 10:00 heel dicht bij de glastemperatuur lag.



Figuur 11. Energiebalans Anthurium zonder (links) en met (rechts) IR-straling door warm zonnenscherm (paarse lijn). Te zien is dat op het hoogste punt van de zon (omstreeks 14:00) er rond de 40W/m^2 aan warmtestraling via het scherm plaats vindt. Dit komt in de buurt van de geabsorbeerde straling via daglicht (gele lijn). Het effect van de IR-straling via het scherm is dus erg groot. NB er is ook te zien dat rond 8:30 en 19:30 er een (niet correcte) negatieve verdamping wordt berekend. Dit komt waarschijnlijk door een foute inschatting van de schermtemperatuur.

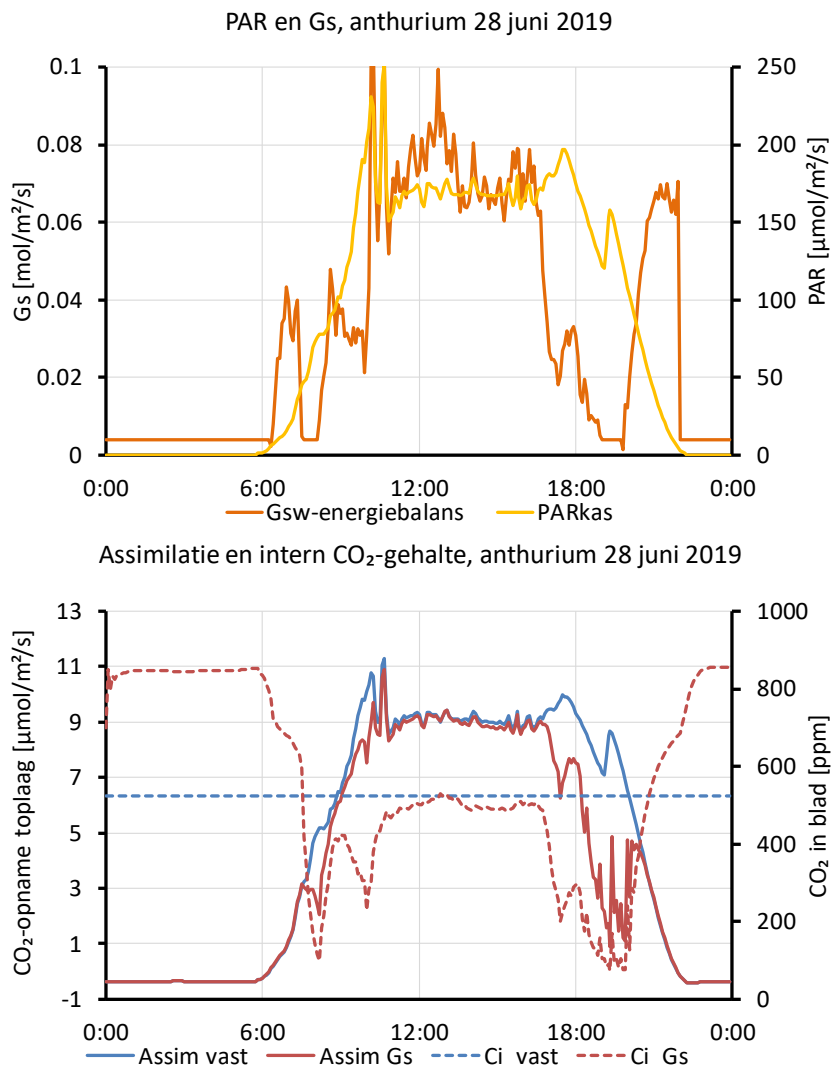
Figuur 12 laat het vergelijk zien van de gemeten Gs-waarden en de berekende waarden via de energiebalans-methode inclusief de IR-straling. In een oogopslag is te zien dat beide methoden dezelfde orde van grootte voor huidmondjesgeleidbaarheid aangeven. Hieruit kan worden geconcludeerd dat de rekenmethode achter de stomatasensor in de basis goed is en dat voor Anthurium IR-straling meegenomen moet worden in de energiebalans. Door een net boven het gewas geplaatste netto stralingsmeter als input te gebruiken, wordt deze energiestroom automatisch meegegemeten.



Figuur 12. Vergelijk van de meting van de huidmondjesopening via de Li-6800 (blauwe punten) en de stomatasensor (oranje lijn) waarbij de warmtestraling in de energiebalans is meegenomen. NB de linkeras heeft een andere eenheid dan de rechteras. Zie hiervoor de opmerking in het bijschrift van Figuur 9.

4.2.3 Rekenvoorbeeld effect huidmondjesbeperking op de fotosynthese bij Anthurium

Figuur 13 laat een rekenvoorbeeld zien van de bladfotosynthese van de topbladeren die wel of niet beperkt worden door de huidmondjesopening (rode ten opzichte van blauwe lijn). De huidmondjesopening is berekend via de energiebalans inclusief IR-straling (oranje lijn, zelfde lijn als in Figuur 12). Vervolgens is de bladfotosynthese berekend bij een vast CO₂-gehalte van 700 ppm in de kas en een vaste omrekeningsfactor van 0.75 naar intern CO₂-gehalte (onder: blauw gestreepte lijn) of bij huidmondjesbeperking (onder: rood gestreepte lijn). De bladfotosynthese was door huidmondjesbeperking 15% lager dan zonder huidmondjesbeperking. Bij 400 ppm is het verlies aan fotosynthese door huidmondjesbeperking zelfs 26%. Dus hoe meer de huidmondjes 'knijpen', hoe belangrijker CO₂-dosering is.

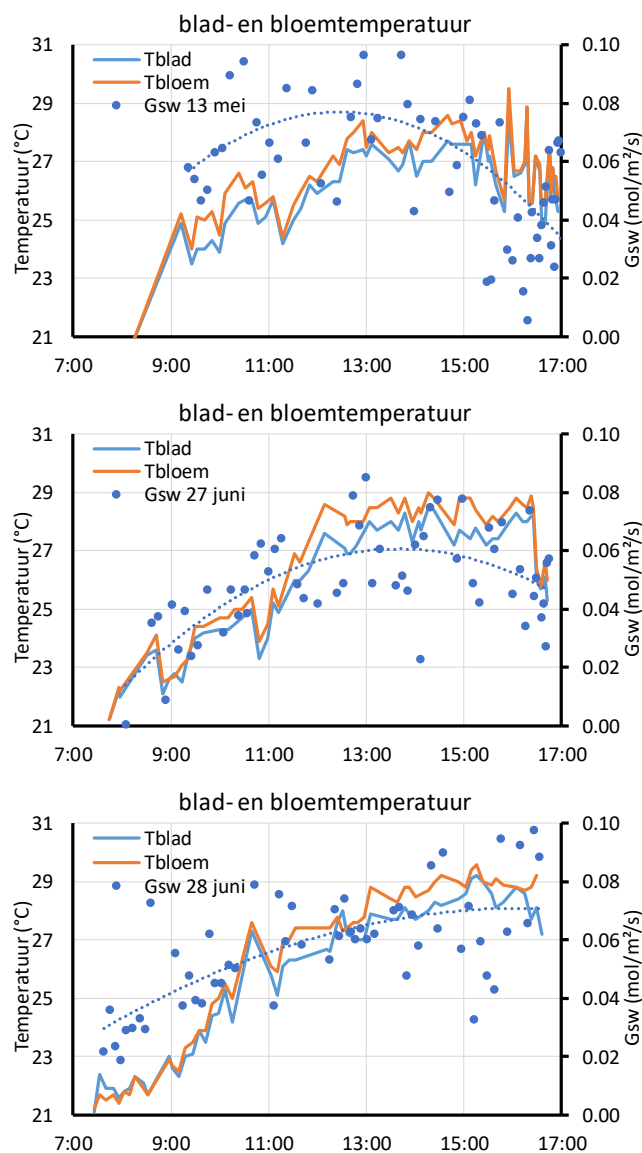


Figuur 13. Geschat effect van huidmondjesopening op de bladfotosynthese bij Anthurium (rode en blauwe lijn). De huidmondjesopening is berekend via de energiebalans inclusief IR-straling (oranje lijn). Vervolgens is de bladfotosynthese berekend bij een vast CO₂-gehalte van 700 ppm in de kas en een vaste omrekeningsfactor van 0.75 naar intern CO₂-gehalte (onder: blauw gestreepte lijn) of bij huidmondjesbeperking (onder: rood gestreepte lijn). De fotosynthese was 15% lager door de huidmondjesbeperking. Bij 400 ppm is het verlies in assimilatie 26%.

4.3 Andere methoden voor inzicht in huidmondjesopening

4.3.1 Blad-bloemtemperatuur met handmeter of thermoview

Tegelijkertijd met het meten van het scherm is de blad- en bloemtemperatuur bepaald (Figuur 14). Hierbij valt op dat waar blad- en bloemtemperatuur op elkaar liggen, dit gepaard gaat met lage Gs van de bladeren (13 mei rond 16:00 en tussen 7:30-9:00 op 27 juni en tussen 7:30-10:30 op 28 juni). Dit is logisch verklaarbaar omdat de bloemen niet of nauwelijks verdampen: Met de Li-6800 zijn enkele bloemen gemeten waarvan de Gs dusdanig laag was dat gesteld kan worden dat bloemen vrijwel niet verdampen. Het ontbreken van een verschil tussen blad- en bloemtemperatuur is dus een kwalitatieve indicatie voor sluiting van de huidmondjes.



Figuur 14. Blad- en bloemtemperatuur in relatie tot gemeten huidmondjesgeleidbaarheid (Gs). Te zien is dat bij gelijke blad-bloemtemperatuur de Gs ook laag is.

Deze meting kan met de thermoview eenvoudig on-line worden uitgevoerd via het plaatsen van 'boxen' in het meetveld van de camera op bloemen en bladeren (zie geel omrande box in

Foto 4 links). Daarom zijn er eind augustus nog enkele dagen 5-minuten opnamen van de thermoviewcamera verzameld. Dit is gedaan door de thermoview vanaf 40cm afstand loodrecht naar beneden te richten (Foto 4). Hierdoor kwam er ongeveer 1.4 plant in beeld. Van deze plant is een blad en bloem geselecteerd en is de temperatuur gevolgd. Deze staan weergegeven in Figuur 15. Ook is het verschil tussen bloem- en bladtemperatuur berekend. 's Nachts is deze nauwelijks verschillend. Wat opnieuw opvalt is dat pas rond 8:30 het verschil tussen bloem- en bladtemperatuur toeneemt en rond 21:00 weer rond de nul is. De dag erna ligt de absolute temperatuur enkele graden lager, maar is er alleen 's ochtends een licht positief verschil. Dit suggereert dat op de eerste dag de huidmondjes goed opengingen, maar dat dit op de tweede dag maar zeer beperkt gebeurde.

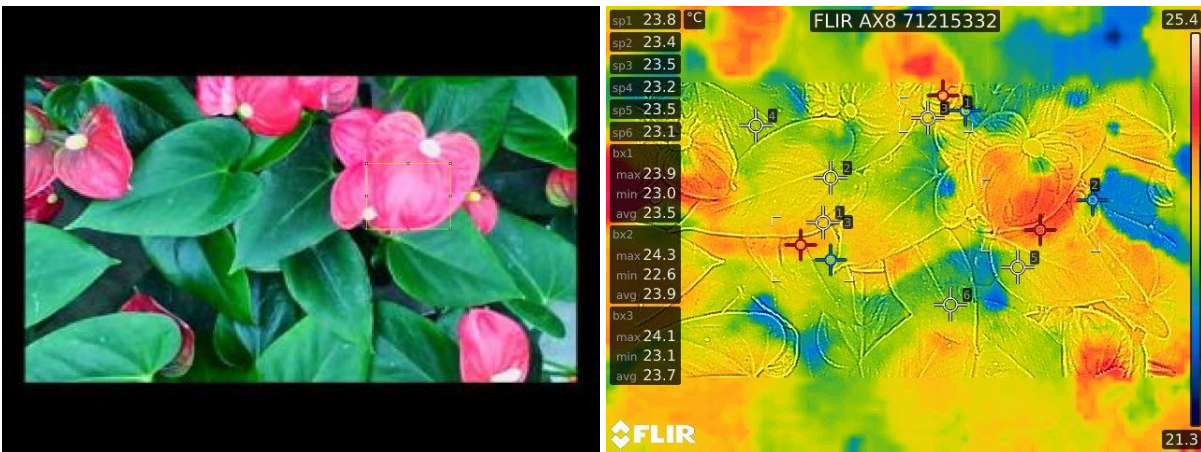
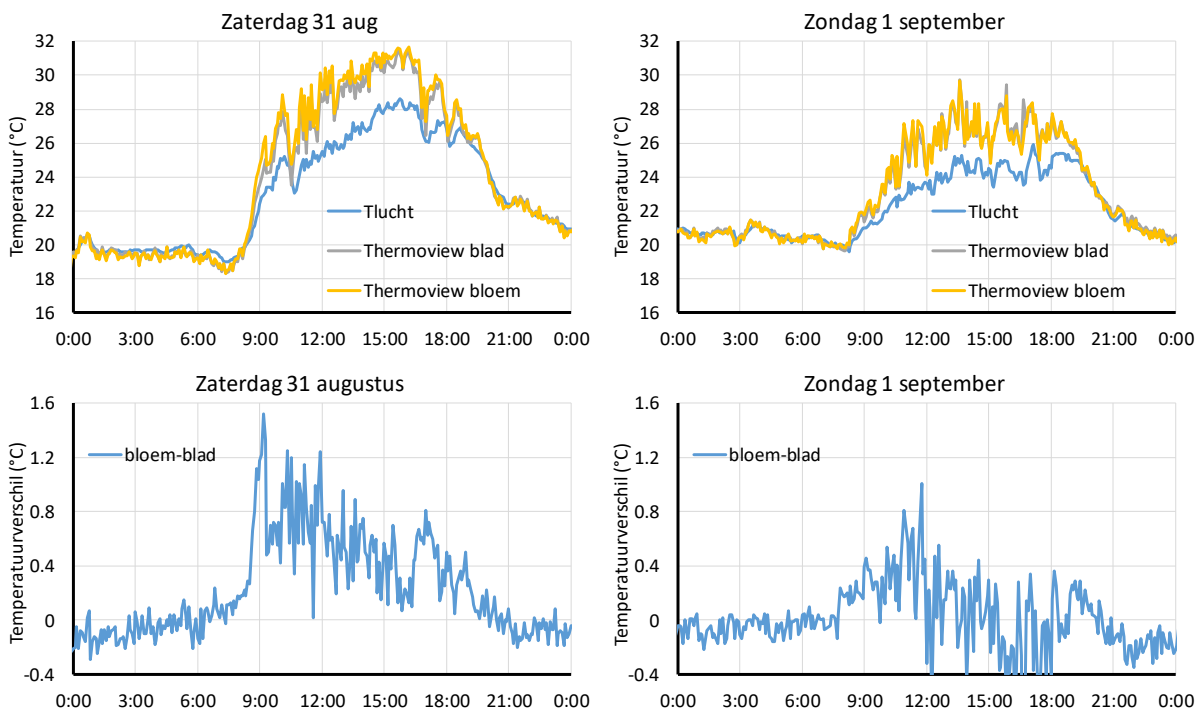


Foto 4. Thermoview 40 cm boven gewas. Het RGB-beeld (links) was ongeveer 20 bij 35 cm en had dus ongeveer 1.4 plant in beeld ($20 \times 35 / 10000 \times 19.5 = 1.4$; data eind augustus).



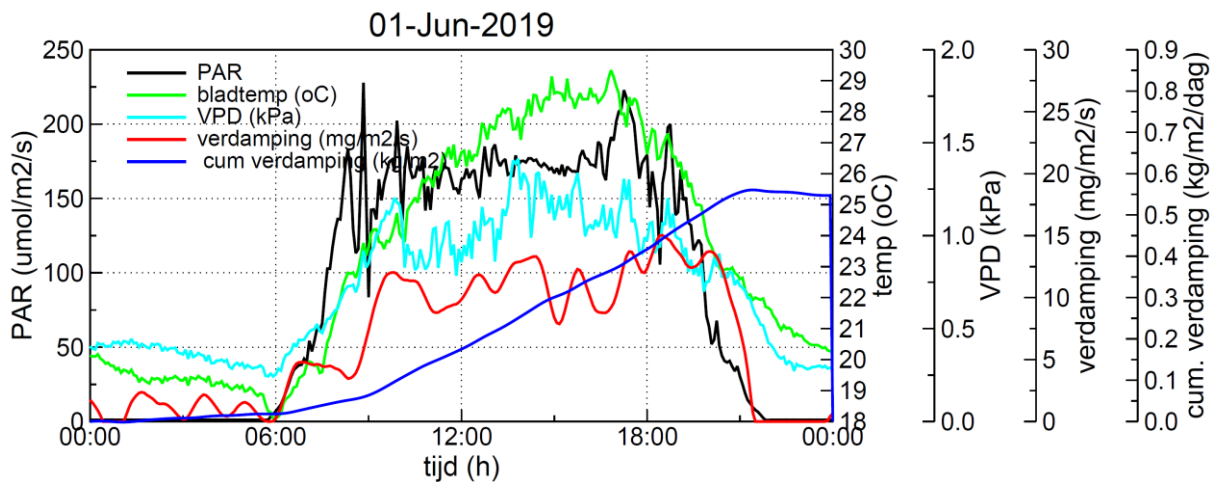
Figuur 15. Bloem- blad- en luchttemperatuur (boven) en de bloem- minus bladtemperatuur (onder) op twee opeenvolgende dagen.

4.3.2 Weeggoot

Een weeggoot kan de verdamping van de planten meten door middel van het gewichtsverlies over de tijd. Dit staat weergegeven in Figuur 16 (rode lijn). Door de verdamping te delen door de VPD kan de Gs worden berekend (niet weergegeven). Opvallend is dat de verdamping traag op gang komt en pas rond 9:00 toeneemt.

Het voordeel van deze methode is dat de verdamping direct wordt gemeten in plaats van berekend vanuit de energiebalans. Het concrete nadeel is dat de weegschaal regelmatig nagelopen moet worden om bijvoorbeeld planten te wisselen om verschillen in watergift met planten naast de weegschaal te voorkomen. Tevens is de weeggoot een obstakel wanneer planten met de heftruck verplaatst worden. Bij potplanten op teelttafels speelt dit laatste niet.

De stabiliteit van de load-cells in de weegunit is ook een aandachtspunt. Op de dag van watergift via het eb-en vloed systeem traden er gedurende enige uren oscillaties op in het meetsignaal. Tevens ligt de verdamping rond de 2-5 gram/m² per 5 minuten. Deze daling in gewicht moet zuiver (minimalisatie van ruis) kunnen worden vastgesteld.



Figuur 16. Berekende verdamping via de weeggoot. Ook hier valt op dat verdamping pas rond 9:00 uur op gang komt.

4.4 Conclusies stomatasensor bij Anthurium

Deze paragraaf geeft puntsgewijs de conclusies weer:

- Vergelijking van de stomatasensor met de Li-6800 geeft bij Anthurium goede resultaten mits de IR-straling wordt meegenomen in de energiebalans. Dit vraagt om een netto stralingsmeter. Toetsing van deze methode valt aan te bevelen.
- Voor anthurium zijn twee andere opties mogelijk ter beoordeling van de huidmondjesopening:
 - Zuivere weegschaal: De verdamping van Anthurium 'Fiesta' ligt in orde van grootte van 2-4 g/m² per 5 min overdag. Dit moet zuiver gemeten kunnen worden. Mogelijke nadelen zijn dat de weeggoet een obstakel vormt voor de heftruck die de planten transporteert. Dit probleem speelt niet bij teelt op tafels. Tevens moeten in een eb-vloedsysteem regelmatig planten gewisseld worden om verschil in watergift met ernaast staande planten te voorkomen.
 - Warmtebeeldcamera (thermoview) inclusief software om 'live' verschil te maken tussen blad- en bloemtemperatuur: Hoe dichter bij elkaar, hoe meer huidmondjes 'knijpen'
- Voor de huidmondjes van Anthurium 'Fiesta' zijn enige uren een VPD tot 1.8 kPa niet problematisch. 'Aristo' was veel gevoeliger (Bijlage 4). Er lijkt dus genetische variatie te zijn in de reactie van de huidmondjes op de VPD met alle gevolgen van dien voor de fotosynthese. Dit zal moeten resulteren in een verschil in productiviteit. 'Aristo' staat inderdaad bekend als een langzame groeier.

5 Stomatasensor bij Paprika

5.1 Methode paprika

De metingen aan het gewas Paprika 'Mavera' vonden plaats bij Delphy Improvement Centre te Bleiswijk in compartiment 10.5. Dit compartiment was onderdeel van het project "Jaarrond paprika met LED" dat liep in het teeltseizoen september 2018 tot september 2019. In dit project hebben er ook nog andere fotosynthesemetingen (licht- en CO₂-respons) plaats gevonden. Deze zijn in de rapportage van "Jaarrond paprika met LED" opgenomen. Foto 5 geeft de meetopstelling weer: Naast de klimaatbox, hing er een PT-meter, een Thermoview-camera, en PAR-meters. Tevens was er een drainmeter.



Foto 5. Links: Meetopstelling bij Delphy Improvement Centre: klimaatbox, PT-meter, PAR-meter en thermoview (2*). Rechts: Li-6800 draagbare fotosynthesemeter.

De huidmondjesstand (G_s) gedurende een dag is gedurende de eerste helft van 2019 zesmaal gemeten met Li-6800 fotosynthese-apparatuur. De meetdagen staan vermeld in tabel 4. In de volgende paragrafen staan eerst de resultaten van de metingen met de Li-6800, vervolgens wordt dit vergeleken met de stomatasensor. Een vergelijking van de G_s via de Jarvis-methode is opgenomen in Bijlage III.

Tabel 4. Overzicht tijdslijn van de proef.

Datum	Handeling
M1, 30 januari '19	meting 1 Li-6800
M2, 14 februari '19	meting 2 Li-6800
M3, 19&20 maart '19	meting 3 Li-6800: twee middagen metingen aan stomata, in ochtenden metingen voor project 'Jaarrond paprika met LED'
M4, 15 mei '19	meting 4 Li-6800, tevens handmatige meting van temperatuur van blad, en glas. Verneveling rond 12:00 uur uitgezet. Glas gecoat per april
M5, 21 juni '19	meting 5 Li-6800, tevens handmatige meting van temperatuur van blad, en glas. Verneveling rond 11:00 uur uitgezet.
M6, 27 augustus '19	kop eruit per 29 juli. Meting aan bladeren op zijscheuten van rond de 20 cm. meting 6 Li-6800, hele dag verneveling uit.

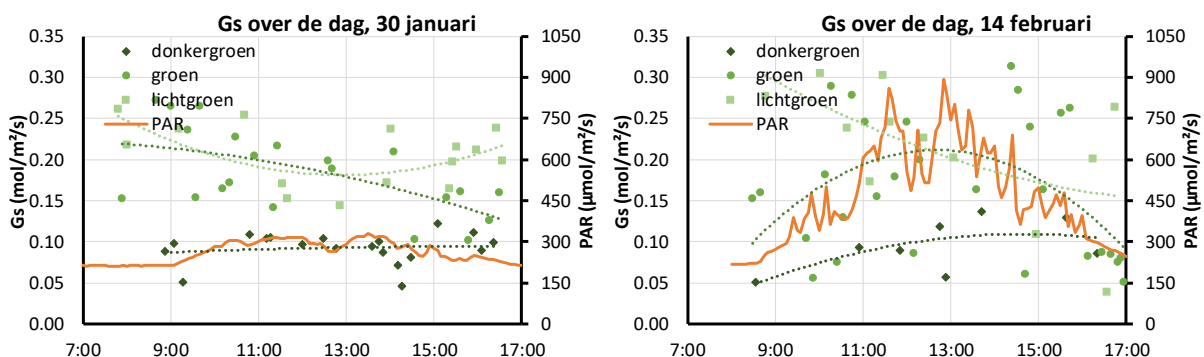
5.2 Resultaten metingen paprika

5.2.1 Huidmondjesgedrag en huidmondjesbeperking

Op de meetdagen 30 januari en 14 februari 2019 bleek dat bladleeftijd een grote rol speelde in de hoogte van de gemeten huidmondjesgeleidbaarheid (G_s) door de Li-6800 fotosynthesemeter. De volgroeide bladeren (~10cm breed en donkergroen) hadden een voor een vruchtgroentegewas relatief lage G_s van rond de $0.1 \text{ mol/m}^2/\text{s}$. De groene en lichtgroene bladeren in de top van het gewas (respectievelijk ~7cm en ~5 cm breed hadden een G_s die ruwweg twee keer zo hoog lag (Figuur 17). Foto 6 geeft een indruk van de kop van de paprikaplant waar te zien is dat het grootste deel van de kop bestaat uit de donkergroene volgroeide bladeren. Dit is belangrijk voor de vergelijking met de stomatasensor die gebaseerd is op een gemiddelde temperatuur van de bladeren. De berekende waarde van de stomatasensor zal dus het dichtst bij die van de volgroeide bladeren moeten liggen.

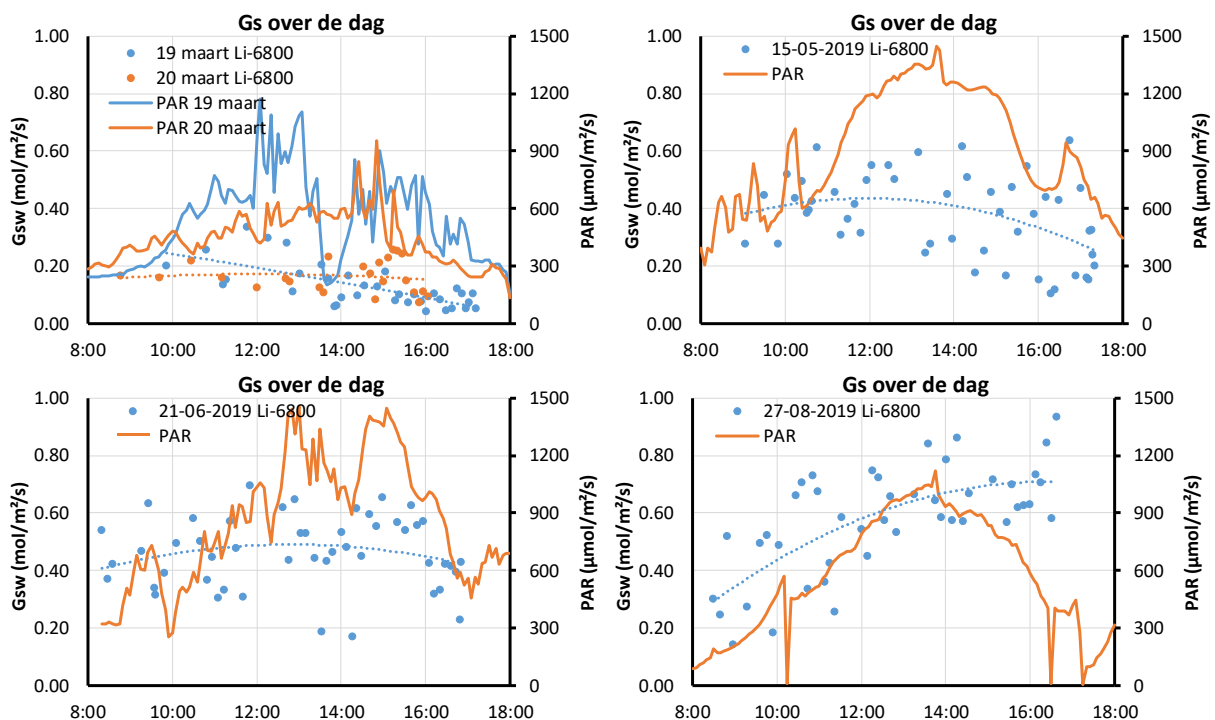


Foto 6. Kop van de paprikaplant (foto 30 januari 2019). Te zien is dat de volgroeide bladeren (~10 cm breed) donkergroen zijn. Bladeren van ~7 cm breed zijn groen. De jonge blaadjes tot ~5 cm zijn lichtgroen. Voor het overgrote deel bestaat de kop uit de donkergroene bladeren. NB de paarsige kleur komt door de LED-belichting.



Figuur 17. Huidmondjesgedrag (groene stippen) en PAR (oranje lijn) op de eerste twee meetdagen (data 30 januari 14 februari 2019). De verschillende kleuren stippen geven een indicatie van de bladleeftijd (bladgrootte, zie bijschrift bij Foto 6). Dit onderscheid in bladkleur was in maart niet meer zichtbaar. Iedere stip is een afzonderlijk meetblad, de stippellijnen geven een ruwe trend aan. Per meetdag zijn er rond de 50 verschillende bladeren gemeten.

Dit onderscheid in bladkleur van de topbladeren was op de meetdagen van 19&20 maart 2019 volledig verdwenen. Op die dagen is gemeten aan volgroeide topbladeren. Op beide dagen werden er in de ochtend nog wat hogere waarden gemeten van 0.2-0.3 mol/m²/s, maar naarmate de middag vorderde, werden de gemeten waarden steeds lager (Figuur 18). Op 15 mei ligt de Gs in absolute zin fors hoger dan in januari-maart. Rond 16:00 worden er ook lage waarden gemeten. Dit valt samen met een VPD van rond de 2.5 kPa—de vernevelinstallatie was die dag rond 12:00 uitgezet. Tegelijkertijd zijn er ook bladeren die nog een hoge Gs hebben en dus nog geen waterstress ervaren. Op 21 juni en 27 augustus is de vernevelinstallatie ook uitgezet. Maar op die dagen werd er niets van huidmondjessluiting waargenomen. Wat zeker op de laatste drie meetdagen opvalt is de relatief grote spreiding in gemeten Gs rondom de ruwe trend die met een stippellijn is aangegeven. Beelden van de thermoviewcamera geven ook een heterogeen beeld in gewastemperatuur (Foto 7). Dit komt overeen met de gemeten variatie in Gs tussen bladeren met de Li-6800, want bij een lagere Gs en een gelijke instraling, moet Tblad hoger zijn. Figuur 19 geeft de gewastemperaturen weer op de verschillende meetdagen. Hierbij valt op dat de gewastemperatuur op 14 februari en 19 maart hoger ligt dan op 15 mei en 21 juni terwijl de instraling wel veel lager was (Figuur 17&18). Dit laat zien dat het gewas in de zomermaanden beter in staat was zich te koelen dan in de wintermaanden.



Figuur 18. Huidmondjesgedrag (stippen) en PAR (lijn) op de laatste vier meetdagen. Iedere stip is een afzonderlijk volgroeid topblad, de stippellijn geeft een ruwe trend aan. Per meetdag zijn er rond de 50 verschillende bladeren gemeten. De laatste drie meetdagen is de verneveling halverwege de dag uitgezet om huidmondjessluiting te induceren. Dit is deels gelukt op 15 mei (VPD rond 2.5 kPa), maar mislukt op 21 juni en 27 augustus ondanks oplopende VPD voorbij de 2 kPa. De meetdatum staat vermeld in de legenda van de figuren.

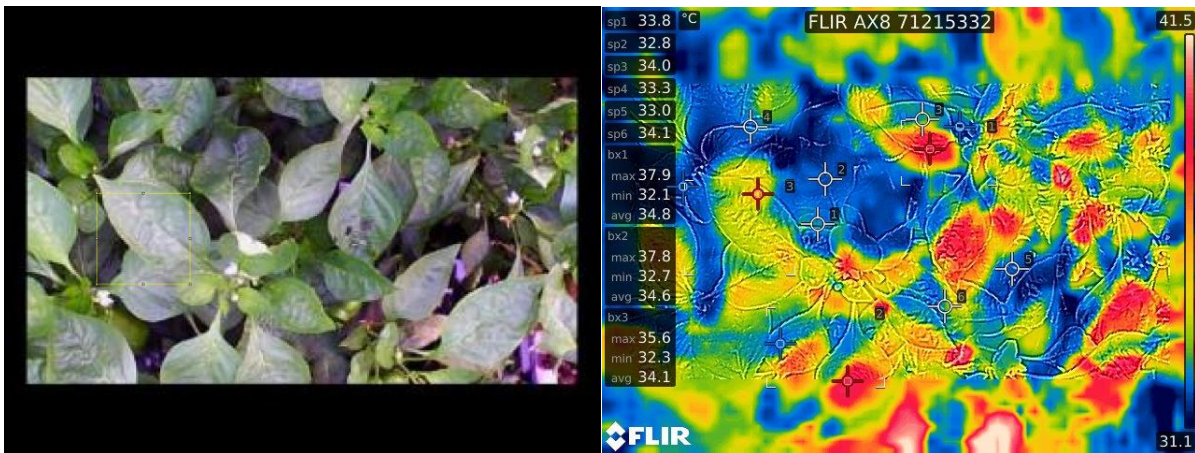
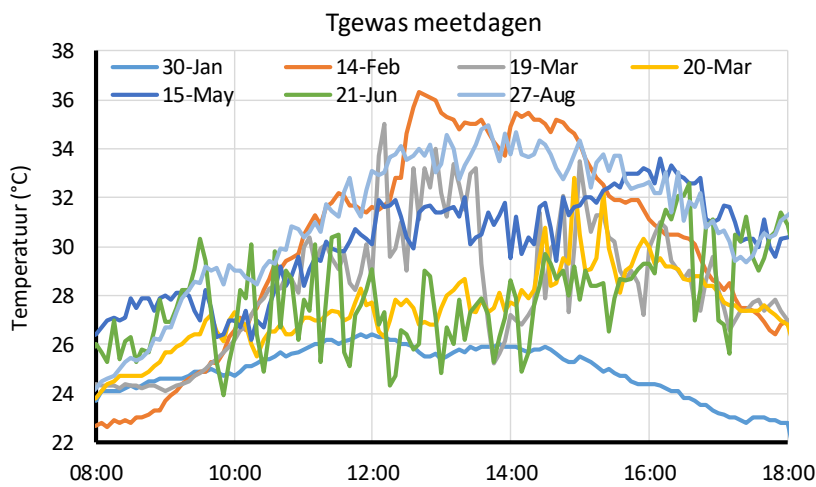
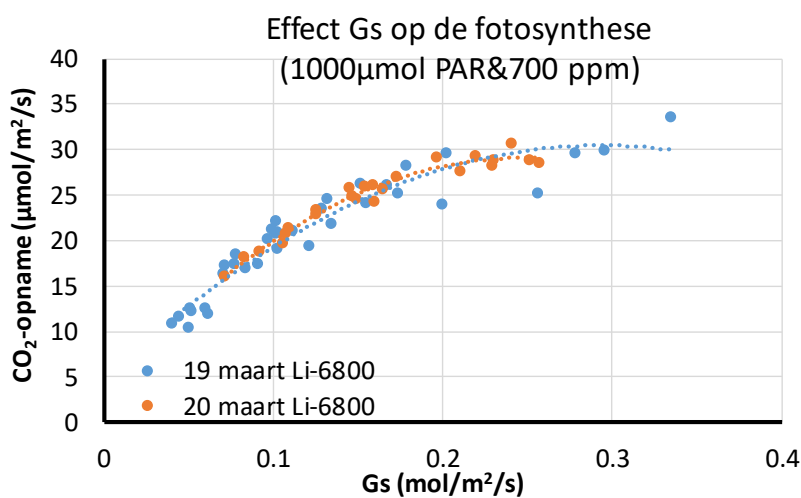


Foto 7. Beeld thermoview op 27 augustus 13:45 (hoogste zonnestand). Opvallend is de heterogene temperatuur te zien aan de kleurverschillen in het rechterbeeld, ondanks dat er sprake was van een diffuuscoating op het glas.



Figuur 19. Tgewas gedurende de meetdagen. Opvallend is dat de gewastemperatuur midden op de dag op 14 februari en 19 maart hoger ligt dan op 15 mei en 21 juni ondanks de lagere instraling eerder in het seizoen.

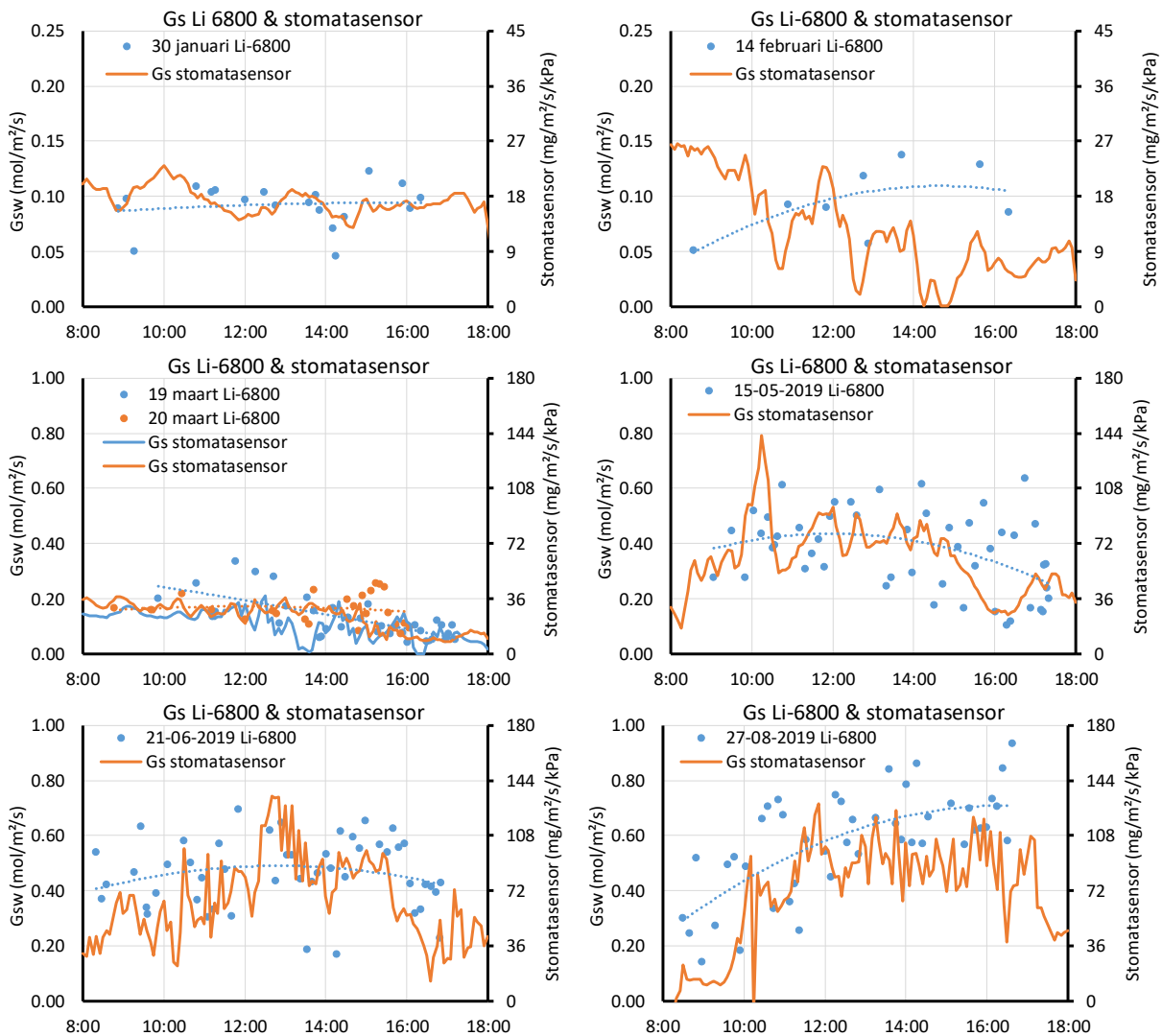


Figuur 20. Beperking van huidmondjesopening op de fotosynthese. Er is gemeten bij 1000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR en 700 ppm CO_2 . Bij een lager CO_2 -gehalte zou het effect van de huidmondjesbeperking groter zijn. Data 19&20 maart 2019. De stippellijnen geven een ruwe trend weer.

Figuur 20 geeft de relatie van de Gs met de fotosynthese weer. Te zien is dat er bij 1000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR en 700 ppm CO_2 de Gs hoger dan 0.2 $\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ moet zijn om de fotosynthese niet te beperken. Bij een lagere lichtintensiteit mag de Gs wel lager zijn. Bij een lager CO_2 -gehalte moet de Gs juist hoger zijn om niet beperkend te zijn voor de fotosynthese.

5.2.2 *Vergelijking met de stomatasensor*

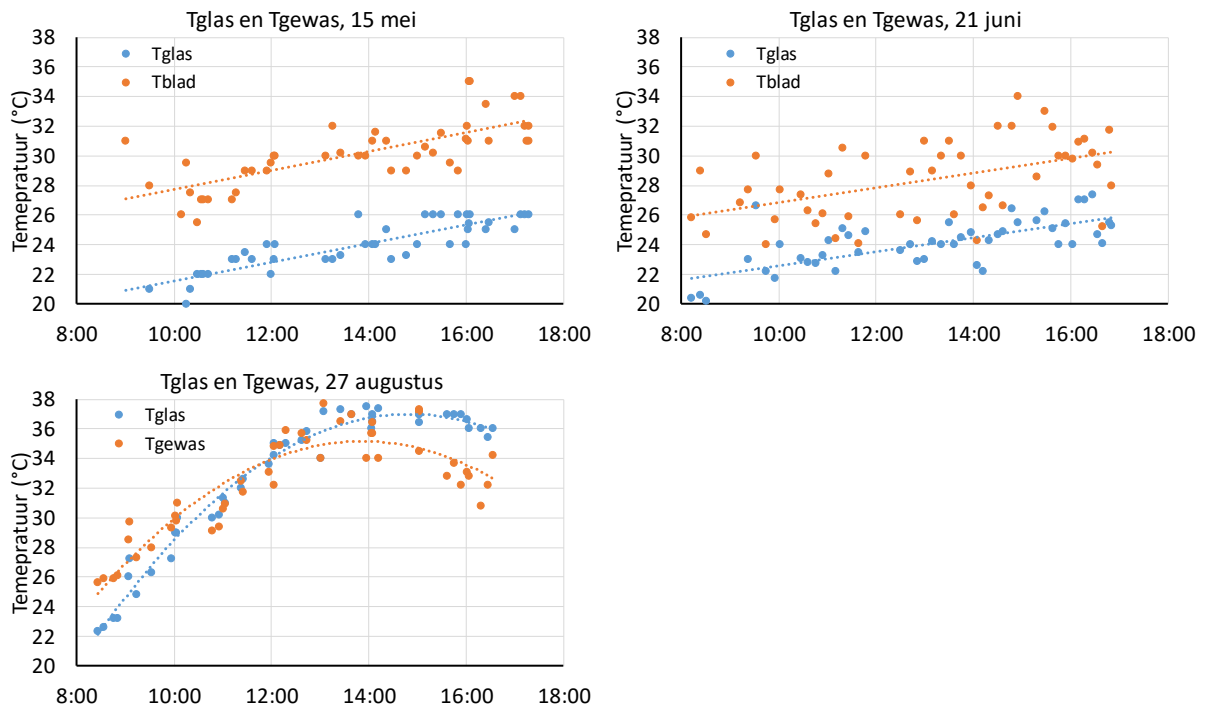
Figuur 21 geeft voor 4 dagen een vergelijking tussen de gemeten waarden van de Li-6800 en de berekende waarden van de stomatasensor. Op zes van de zeven weergegeven dagen geven beide methoden eenzelfde orde van grootte aan en ook het patroon over de dag is ruwweg gelijk. Hieruit kan dus worden geconcludeerd dat de stomatasensor in de basis betrouwbaar is. Op 14 februari geeft de stomatasensor een sluitingsreactie aan die niet werd gemeten door de Li-6800. Er waren die meetdag twee complicerende factoren: (1) bladleeftijd en grote verschillen in Gs (Figuur 17) en (2) door een laagstaande zon was er aan de zuidkant van het kascompartiment tijdelijk een hoge instraling en een hoge bladtemperatuur (Figuur 19) terwijl de metingen met de Li-6800 min of meer in de schaduw aan de noordkant van het compartiment plaats vonden. De gebruikte sensoren moeten dus meten op een representatieve plaats in de kas.



Figuur 21. Vergelijk van de meting van de huidmondjesopening via de Li-6800 (blauwe punten) en de stomatasensor (oranje lijn). NB de linker- en rechteras heeft een andere eenheid dan de rechteras. Zie hiervoor opmerking in het bijschrift van Figuur 10. Op 30 januari en 14 februari 2019 staan alleen de datapunten van de volgroeide bladeren weergegeven. Op 14 februari waren er twee complicerende factoren: (1) bladleeftijd en grote verschillen in Gs en (2) door een laagstaande zon was er aan de zuidkant tijdelijk een hoge instraling en een hoge bladtemperatuur (Figuur 19) terwijl de metingen met de Li-6800 min of meer in de schaduw aan de noordkant van het compartiment plaats vonden.

De berekening van de stomatasensor bij paprika draaide—net als bij Anthurium—op inkomende straling, lucht- en gewastemperatuur en VPD (zie uitleg bij de Figuren 3-5). In- en uitgaande warmtestraling (IR-straling) is dus niet meegenomen. Overdag lijkt deze aanpak gerechtvaardigd gezien de resultaten in Figuur 21. Op de meetdagen 4-6 (15 mei tot 27 augustus 2019) is—net als bij Anthurium—ook de glastemperatuur gemeten met een handmeter. Deze bleek steeds parallel te lopen met de gewastemperatuur (Figuur 22). Parallel lopende lijnen houdt in dat—in tegenstelling tot Anthurium—er een constante afvoer van energie is via IR-straling. Dan is er wel invloed op de absolute hoogte van de berekende Gs maar niet op het patroon over de dag. Op 27 augustus lagen de waarden van de Tglas en Tgewas zo dicht bij elkaar dat er dan ook nauwelijks sprake is van netto warmteoverdracht

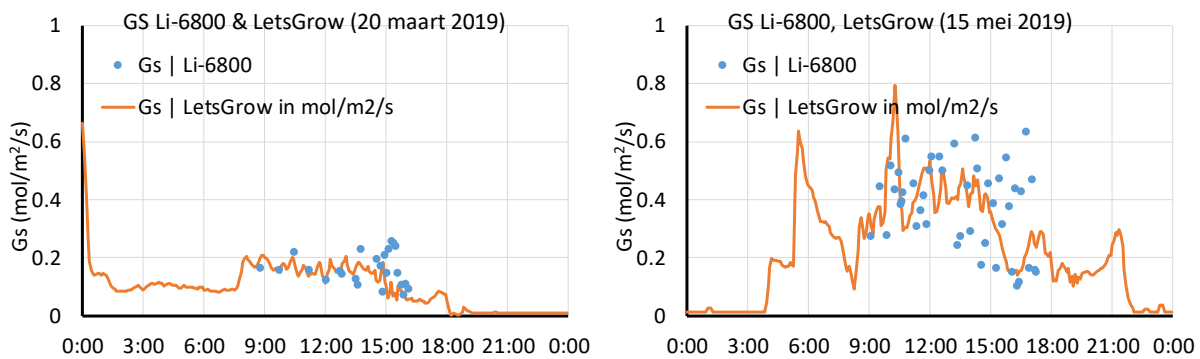
tussen gewas en glas. Als laatste kan ook nog genoemd worden dat ondanks dat een 6 graden lagere glastemperatuur ruwweg 40W aan koeling geeft, dit op een instraling van ruim 500W slechts beperkt van invloed is. Er is dus minder noodzaak om deze energiestroom op te nemen in de berekening van de energiebalans dan bij Anthurium, waar er maximaal rond de 50W aan instraling wordt toegelaten en de invloed van IR-straling rond de 40W ligt. Wel zal deze energiestroom aan de randen van de lichtperiode invloed kunnen hebben of op momenten dat het scherm open gaat.



Figuur 22. Handmatig gemeten temperatuur van glas en gewas op de laatste drie meetdagen. Te zien is dat Tglas en Tgewas gedurende de gemeten uren parallel loopt. Dit houdt in dat de afvoer van energie via IR-straling van gewas naar glas over de gemeten uren constant is. Er is dan minder noodzaak om dit mee te nemen in de berekening van de energiebalans.

Figuur 23 geeft de uitkomsten weer van de stomatasensor over 24 uur. Hier blijkt dat er aan de randen van de lichtperiode er een onrealistisch hoge Gs wordt berekend. Op 20 maart (licht aan om 0:00) komt dit doordat Tlucht enkele graden hoger is dan Tgewas. Dit geeft samen met een lage VPD een hoge berekende Gs. Mogelijk speelt dan uitstraling een rol: de aangevoerde (convectie)energie verdwijnt dan (grotendeels) via uitstraling in plaats van verdamping. Het energiescherm lag toen wel dicht maar het verduisteringsscherm was nog wel open en was 0:15 uur dicht. Op 15 mei waren beide schermen dicht, dus zal de uitstraling nauwelijks een rol spelen. Een andere mogelijkheid is een te hoog ingeschatte convectieve warmte-overdracht op die momenten. Tevens moet dan in acht genomen worden dat kleine verschillen/afwijkingen in gemeten waarden dan ook een groter effect hebben: als bijvoorbeeld de VPD op die momenten 10% wordt onder- of overschat, heeft dit rekenkundig een veel groter effect dan later op de dag. Theoretisch is ook voor paprika een netto stralingsmeter beter dan het gebruik van een PAR-meter. Echter praktisch gezien wordt er maar beperkt gebruik

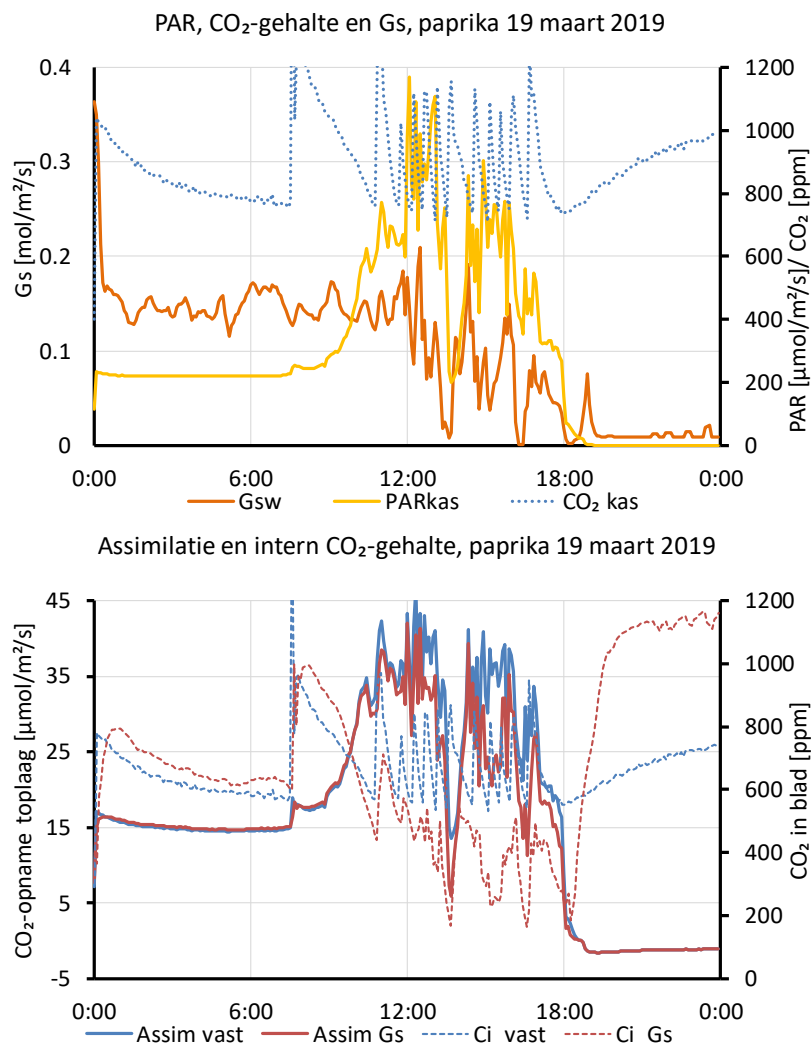
gemaakt van zo'n meter. Ook hebben de randen van de dag niet of nauwelijks invloed als er verder gerekend zou worden aan gewasfotosynthese op basis van deze berekeningen.



Figuur 23. Verloop van de berekende Gs over 24 uur (oranje lijn) en Gs (blauwe stippen) gemeten door de Li-6800 fotosynthesemeter op 20 maart 2019 (lampen aan om 0:00) en 15 mei (lampen aan om 4:00). Aan de randen van de lichtperiode (inclusief bijbelichting) wordt een hoge Gs berekend. De afwijkende berekende Gs komt mogelijk door het ontbreken van IR-straling of vanwege een te hoog ingeschatte convectieve warmte-overdracht op die momenten.

5.2.3 Rekenvoorbeeld effect huidmondjesbeperking op de fotosynthese bij paprika

Figuur 24 laat een rekenvoorbeeld zien van de bladfotosynthese van de topbladeren die wel of niet beperkt worden door de huidmondjesopening (rode ten opzichte van blauwe lijn). De huidmondjesopening is de berekende waarde van de stomatasensor (oranje lijn, zelfde lijn als in Figuur 21). Vervolgens is de bladfotosynthese berekend bij het gemeten CO₂-gehalte in de kas (boven: blauw gestippelde lijn) en een vaste omrekeningsfactor van 0.75 naar intern CO₂-gehalte wat gebruikelijk is zonder G_s-beperking (onder: blauw gestreepte lijn), of bij huidmondjesbeperking (onder: rood gestreepte lijn). De bladfotosynthese was door huidmondjesbeperking (rode lijn) 10% lager dan zonder huidmondjesbeperking (blauwe lijn). Bij 400 ppm is het verlies aan fotosynthese door huidmondjesbeperking zelfs 26%. Hoe lager het CO₂-gehalte in de kas, hoe sterker dus de huidmondjesbeperking doorwerkt in de fotosynthese.



Figuur 24. Berekend effect van huidmondjesopening op de bladfotosynthese van de toplaag bij paprika (rode ten opzichte van blauwe lijn). De weergegeven huidmondjesopening is afkomstig van de stomatasensor (oranje lijn, zelfde als in Figuur 21). Vervolgens is de bladfotosynthese berekend bij het gemeten CO₂-gehalte van in de kas (boven: blauwe stippellijn) en een vaste omrekeningsfactor van 0.75 naar intern CO₂-gehalte (onder: blauw gestreepte lijn) of bij huidmondjesbeperking (onder: rood gestreepte lijn). De fotosynthese was 10% lager door de huidmondjesbeperking. Bij 400 ppm is het verlies zelfs 26%.

5.3 Conclusies stomatasensor bij paprika

In onderstaand overzicht worden de conclusies voor paprika puntsgewijs weergegeven:

- Vergelijking van de stomatasensor met de Li-6800 geeft bij paprika goede resultaten zonder dat IR-straling als component van de energiebalans wordt meegenomen. De orde van grootte van huidmondjesopening over de verschillende meetdagen is gelijk tussen beide methoden tussen de gecheckte periode tussen 8:00-17:00.
 - Zonder moeizame parametrisatie, dus lage kosten.
- Soms is de uitkomst van de berekening aan de randen van de dag niet logisch. Mogelijk heeft dit te maken met het ontbreken van de IR-straling in de berekening van de energiebalans. Op die momenten kan mogelijk ook de convectieve warmteoverdracht foutief zijn geschat. Theoretisch is een netto stralingsmeter beter dan een PAR-meter (net als bij Anthurium).
 - Deze randen van de dag hebben niet of nauwelijks invloed als er verder gerekend zou worden met deze Gs om de gewasfotosynthese te bepalen.
- Paprika 'Mavera' heeft in de zomer een veel grotere huidmondjesopening dan vooraf ingeschat.
 - Het is niet gelukt om huidmondjessluiting te induceren door VPD te laten oplopen, omdat het gewas zelf de RV op peil hield (VPD rond 2 kPa).
 - Uiteindelijk was er in maart meer plantstress (hogere bladtemperaturen) en huidmondjesbeperking dan in de latere maanden ondanks een veel hogere instraling later in het seizoen. Inzicht in het huidmondjesgedrag kan beslissingsondersteunend werken voor de bepaling van het moment van coaten/krijten in het voorjaar.
- De thermoview brengt hot en cold spots in beeld. Dit verklaart de gemeten variatie in Gs tussen de bladeren met de Li-6800. Zeker in maart/april is het zichtbaar maken van hotspots (locaties waar als eerste waterstress zal optreden) van belang omdat er dan meestal nog niet gecoat is. Tevens kan de thermoview informatie opleveren aangaande de vruchttemperatuur en aanjager zijn om maatregelen te nemen om deze temperatuur te beperken (gebruik coating of scherm).

6 Conclusies en evaluatie

6.1 Algemene conclusies

De hoofddoelstelling van dit onderzoek was de ontwikkeling van een robuuste, betrouwbare en betaalbare methode om de huidmondjesgeleidbaarheid (G_s) in een kassituatie vast te stellen. Het is gebleken dat de stomatasensor (gebaseerd op de energiebalans) dit kan bieden. Deze aanpak werkt voor een laag verdampend gewas als Anthurium en voor een middelmatig (winter) tot hoog (zomer) verdampend gewas als paprika.

Wel zijn er de volgende aandachtspunten:

- Voor anthurium heeft de IR-straling een zodanige impact, dat deze opgenomen moet zijn in de berekening van de energiebalans. Dit zou eenvoudig verholpen moeten kunnen worden met het gebruik van een netto stralingsmeter. Dit zal nog wel in de praktijk moeten worden getoetst.
- Bij paprika heeft de IR-straling overdag hooguit een constante invloed en heeft in relatieve zin veel minder impact. Mogelijk biedt het opnemen van de IR-straling in de energiebalans aan de randen van de dag wel een verbetering op de berekening van de G_s .

De berekeningen van de stomatasensor maar ook van welk ander model dan ook, leunen zwaar op de sensoren die in de kas beschikbaar zijn. De betrouwbaarheid van de sensoren en de representativiteit van de meetplaats voor het gewas als geheel worden dan steeds belangrijker. Sensoren vereisen altijd zorg en onderhoud. De PAR-sensor en de planttemperatuur-meter moeten naast de klimaatbox (temperatuur, RV en CO_2) standaard zijn. Voor de energiebalans is de netto stralingsmeter waarschijnlijk beter. Om effecten van slagschaduw te minimaliseren moeten de PAR-meter en de nettostralingsmeter minimaal in tweevoud aanwezig zijn of geplaatst zijn op een bewegende arm. Voor een juiste opstelling van de energiebalans moet deze mix van sensoren bij voorkeur meten in hetzelfde meetvlak: het moet niet zo zijn dat de PAR-sensor in de schaduw staat terwijl de PT-meter onbeschaduwde planten meet. Theoretisch biedt ook de Thermoview een verbetering ten opzichte van de planttemperatuurmeter, doordat de hotspots zichtbaar worden waar de waterstress als eerste optreedt. Tevens kan er gedacht worden aan een koppeling met slimme software die 'waarneemt' wat gewas is of vloer.

6.2 Evaluatie en toekomstbeeld

Real time inzicht in huidmondjesopening geeft inzicht in het moment dat huidmondjesopening beperkend wordt voor fotosynthese en groei (assimilatenbalans). Daarnaast geeft het inzicht in de energie- en waterbalans van het gewas, waardoor het indicaties geeft voor het juiste moment van watergift, sluiting van het schermdoek, en aansturing van de vernevelinstallatie.

Zoals in onder andere Figuur 2 is aangegeven, is de minimaal benodigde huidmondjesopening om de fotosynthese niet te beperken afhankelijk van het licht- en CO₂-niveau. Om dus in een dynamische kassituatie een goede kwantitatieve inschatting te kunnen maken of de huidmondjes beperkend zijn voor fotosynthese en groei zou ook de gewasfotosynthese 'live' in de kas berekend moeten worden. Hierbij is voor veel gewassen een goed functionerend huidmondjesmodel onmisbaar. Op het moment van afronding van dit rapport wordt de gewasfotosynthese alleen bij tomaat 'live' in de kas berekend (HORTISENSE®, eigendom van Hortilux, 2018 en ontwikkeld in samenwerking met Plant Lighting). De verwachting is dat deze ontwikkeling zich zal doorzetten en uitbreiden naar andere gewassen. Dit maakt het mogelijk dat er in de nabije toekomst steeds meer gehandeld wordt op basis van feiten. Zo wordt "data driven growing" mogelijk.

7 Aan de slag

In dit hoofdstuk worden praktische tips gegeven aan telers die met de stomatasensor aan de slag willen.

Waarom stomatasensor?

- Inzicht in momenten van beperking in fotosynthese (dus groei) door knijpende huidmondjes.
- Meer inzicht in het juiste moment van watergeven.
- De plant beschermen tegen uitstraling; energiebesparing als bonus.
- Stress voorkomen.

Welke sensoren zijn nodig?

- PAR-sensoren in de kas (minimaal 2 om effect van slagschaduw te minimaliseren of plaatsing op bewegende arm)
- Waarschijnlijk is de netto stralingsmeter in de kas hiervoor beter dan een PAR-meter en noodzakelijk voor een gewas zoals anthurium; ook weer 2 om effect van slagschaduw te minimaliseren of plaatsing op een bewegende arm)
- Klimaatbox: luchttemperatuur en RV
 - 20 cm onder de kop bij hoog opgaande gewassen zoals paprika
 - 20 cm boven de plant bij lage gewassen zoals anthurium
- Planttemperatuurmeter (zie tabel 2 voor plaatsing)
- Thermoview is een nuttige aanvulling omdat door het weergeven van de hotspots zichtbaar wordt waar de waterstress als eerste optreedt.
- Drainmeter: Watergift minus drain geeft inzicht in dagelijkse verdamping. Dit is een gemakkelijk hulpmiddel om de stomatasensor dagelijks te ijken: Dit doet de software in LetsGrow automatisch.

Wat is er nog meer nodig?

- Verbinding van klimaatcomputer met LetsGrow (LetsGrow account)
- Abonnement 'module stomatasensor'

Hoe sensoren opstellen?

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. Nogmaals: de betrouwbaarheid van de berekening hangt af van de betrouwbaarheid en representativiteit van de meetpositie van de sensoren. Alleen als de teler bereid is hier aandacht aan te besteden, is toepassing zinvol.

Referenties

- Arve, L. E., Torre, S., Olsen, J. E., Tanino, K. K., 2011. Stomatal responses to drought stress and air humidity. In *Abiotic stress in plants-Mechanisms and adaptations*. IntechOpen. pp.267-280
- Ball, J. T., Woodrow, I. E., Berry, J. A., 1987. A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosyn (Doctoral dissertation, thesis under different environmental condition [M j. Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers).
- Barbour, M. M., Buckley, T. N., 2007. The stomatal response to evaporative demand persists at night in *Ricinus communis* plants with high nocturnal conductance. *Plant, Cell & Environment*, 30, pp.711-721.
- Bontsema, J., Hemming, J., Stanghellini, C., de Visser, P.H.B., Van Henten, E.J., Budding, J., Rieswijk, T., Nieboer, S., 2007. On-line monitoring van transpiratie en fotosyntheseactiviteit (No. 451). Wageningen UR, Glastuinbouw.
- Buckley, T.N., Mott, K.A., Farquhar, G.D., 2003. A hydromechanical and biochemical model of stomatal conductance. *Plant, Cell & Environment*, 26, pp.1767-1785.
- Buckley, T.N., 2017. Modeling stomatal conductance. *Plant physiology*, 174 pp.572–582.
- Buckley, T.N., Mott, K.A., 2013. Modelling stomatal conductance in response to environmental factors. *Plant, Cell & Environment*, 36, pp.1691-1699.
- Damour, G., Simonneau, T., Cochard, H., Urban, L. 2010. An overview of models of stomatal conductance at the leaf level. *Plant, Cell & Environment*, 33, pp.1419-1438.
- De Gelder, A., 2015. Verdamping balans tussen noodzaak en overmaat: Kennisinventarisatie en analyses van vocht gerelateerde fenomenen in lopende projecten (No. 1383). Wageningen UR Glastuinbouw.
- Geelen, P.A.M., Voogt, J.O., van Weel, P.A., 2015. De basisprincipes van Het Nieuwe Telen. LTO Glaskracht Nederland.
- Gutschick, V.P., 2016. Leaf energy balance: basics, and modeling from leaves to canopies. In *Canopy photosynthesis: From basics to applications* (pp. 23-58). Springer, Dordrecht.
- Jarvis, P.G., 1976. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*, 273, pp.593-610.
- Leuning, R., 1995. A critical appraisal of a combined stomatal-photosynthesis model for C3 plants. *Plant, Cell & Environment*, 18, pp.339-355.
- Lawson, T., Blatt, M.R., 2014. Stomatal size, speed, and responsiveness impact on photosynthesis and water use efficiency. *Plant physiology*, 164, pp.1556-1570.
- Lawson, T., Violet-Chabrand, S., 2019. Speedy stomata, photosynthesis and plant water use efficiency. *New Phytologist*, 221, pp.93-98.
- McAdam, S.A., Brodribb, T.J., 2015. The evolution of mechanisms driving the stomatal response to vapor pressure deficit. *Plant Physiology*, 167, pp.833-843.
- McAdam, S.A., Brodribb, T.J., 2016. Linking turgor with ABA biosynthesis: implications for stomatal responses to vapor pressure deficit across land plants. *Plant Physiology*, 171, pp.2008-2016.

- McAdam, S.A., Brodribb, T.J., 2018. Mesophyll cells are the main site of abscisic acid biosynthesis in water-stressed leaves. *Plant Physiology*, 177, pp.911-917.
- McAdam, S.A., Susmilch, F.C., Brodribb, T.J., 2016. Stomatal responses to vapour pressure deficit are regulated by high speed gene expression in angiosperms. *Plant, Cell & Environment*, 39, pp.485-491.
- Medlyn, B.E., Duursma, R.A., Eamus, D., Ellsworth, D.S., Prentice, I.C., Barton, C.V., Crous, K.Y., De Angelis, P., Freeman, M., Wingate, L., 2011. Reconciling the optimal and empirical approaches to modelling stomatal conductance. *Global Change Biology*, 17, pp.2134-2144.
- Mott, K.A., Peak, D., 2013. Testing a vapour-phase model of stomatal responses to humidity. *Plant, Cell & Environment*, 36, pp.936-944.
- Merilo, E., Yarmolinsky, D., Jalakas, P., Parik, H., Tulva, I., Rasulov, B., Kilk, K., Kollist, H., 2018. Stomatal VPD response: there is more to the story than ABA. *Plant Physiology*, 176, pp.851-864.
- Nobel, P.S., 2010. *Physicochemical and Environmental Plant Physiology*. Amsterdam, Academic Press (2009), pp. 582.
- Pantin, F., Blatt, M.R., 2018. Stomatal response to humidity: blurring the boundary between active and passive movement. *Plant physiology*, 176, pp.485-488.
- Pirasteh-Anosheh, H., Saed-Moucheshi, A., Pakniyat, H., Pessarakli, M., 2016. Stomatal responses to drought stress. *Water Stress and Crop Plants*, pp.24-40.
- Pot CS, De Vreede SJM, Trouwborst G, Hogewoning SW. 2015. Activeren van de fotosynthese door sturing op huidmondjesopening. *Plant Dynamics B.V. & Plant Lighting B.V., Randwijk*. 53p.
- Rodriguez-Dominguez, C.M., Buckley, T.N., Egea, G., de Cires, A., Hernandez-Santana, V., Martorell, S., Diaz-Espejo, A., 2016. Most stomatal closure in woody species under moderate drought can be explained by stomatal responses to leaf turgor. *Plant, Cell & Environment*, 39, pp.2014-2026.
- Stanghellini, C., Oosfer, B., Heuvelink, E., 2019. *Greenhouse horticulture: technology for optimal crop production*. Wageningen Academic Publishers.
- Susmilch, F.C., Brodribb, T.J., McAdam, S.A., 2017. What are the evolutionary origins of stomatal responses to abscisic acid in land plants? *Journal of integrative plant biology*, 59, pp.240-260.
- Susmilch, F.C., McAdam, S.A., 2017. Surviving a dry future: abscisic acid (ABA)-mediated plant mechanisms for conserving water under low humidity. *Plants*, 6, 54.
- Sack, L., John, G.P., Buckley, T.N., 2018. ABA accumulation in dehydrating leaves is associated with decline in cell volume, not turgor pressure. *Plant physiology*, 176, pp.489-495.
- Taiz, L., Zeiger, E., 2010. *Plant physiology fifth edition*. Sunderland, Massachusetts, USA: Sinauer Associates inc., publishers.
- Trouwborst, G., Pot, S.C., Schapendonk, A.H.C.M., en Fanourakis, D., (2010). Huidmondjes in ontwikkeling: Invloed van omgevingsfactoren op de huidmondjesanatomie van bladeren, een literatuurstudie. *Plant Dynamics BV*, 29p.

- Van Beveren, P.J.M., Bontsema, J., Van Straten, G., Van Henten, E.J., 2015. Minimal heating and cooling in a modern rose greenhouse. *Applied energy*, 137, pp.97-109.
- van Telgen, H.J., Voogt, J.O., Warmenhoven, M.G., van Weel, P.A., 2009. Huidmondjesopening: onderzoek naar het meetbaar maken van de huidmondjesopening met als doel om de klimaatregeling mede daarop te baseren (No. 266). Wageningen UR Glastuinbouw.
- Zhang, F.P., Susmilch, F., Nichols, D.S., Cardoso, A.A., Brodribb, T.J., McAdam, S.A., 2018. Leaves, not roots or floral tissue, are the main site of rapid, external pressure-induced ABA biosynthesis in angiosperms. *Journal of Experimental Botany*, 69, pp.1261-1267.

Bijlage 1. Literatuurstudie huidmondjesmodellen

B1.1 Inleiding

Het doel van deze literatuurstudie is een inventarisatie en analyse van verschillende methoden om de huidmondjesgeleidbaarheid (G_s) voor middelmatig en laag verdampende gewassen in de kas vast te stellen. Tevens wordt een analyse van geschiktheid/robuustheid van die methoden voor toepassing in de glastuinbouw gegeven.

Er zijn al verschillende Nederlandstalige onderzoeksrapporten geweest die ingaan op de werking van huidmondjes:

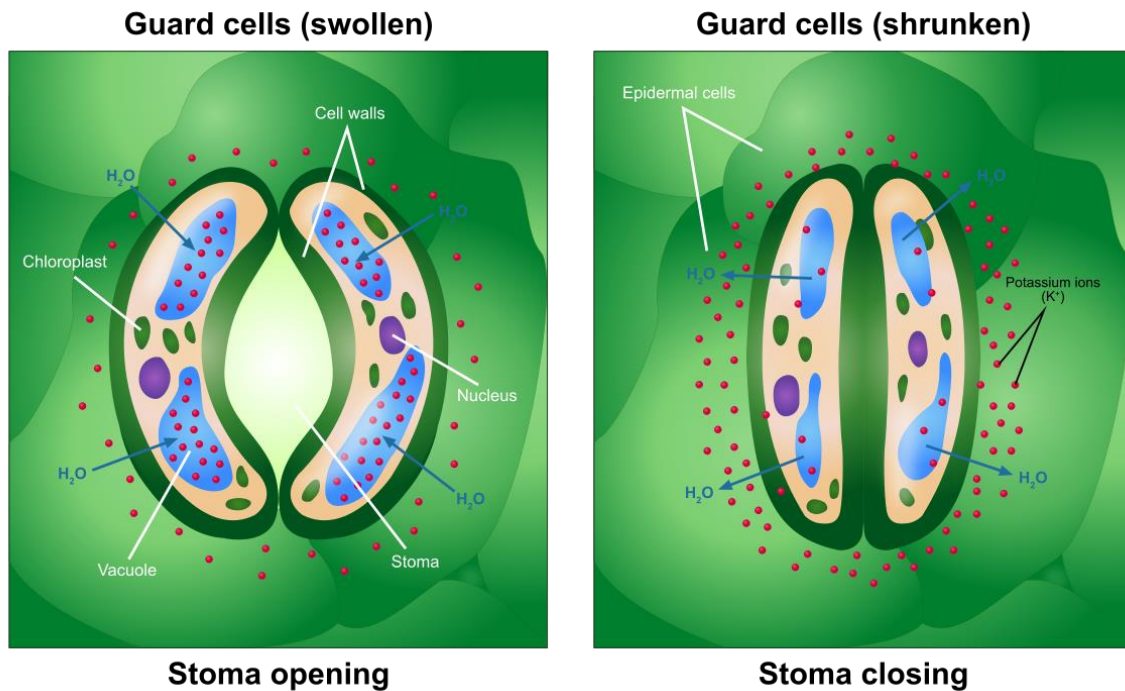
- Telgen *et al.* (2009) Huidmondjesopening: onderzoek naar het meetbaar maken van de huidmondjesopening met als doel om de klimaatregeling mede daarop te baseren
- Trouwborst *et al.* (2010) Huidmondjes in ontwikkeling: invloed van omgevingsfactoren op de huidmondjesanatomie van bladeren, een literatuurstudie
- De Gelder (2016) Verdamping: Balans tussen noodzaak en overmaat
- Geelen *et al.* (2015). De basisprincipes van Het Nieuwe Telen

Enige overlap met bovengenoemde rapporten is onvermijdelijk.

B1.2 Werking van een huidmondje

Huidmondjes (stomata) bestaan uit twee sluitcellen. Opname en verlies van water in de sluitcellen verandert de turgordruk en volume van de cellen. Dit reguleert opening en sluiting (Figuur 25). Taiz & Zeiger (2010) stellen dat de sluitcellen functioneren als multisensorische hydraulische kleppen, omgevingsfactoren zoals lichtintensiteit en lichtkwaliteit, temperatuur, RV en intern CO_2 -gehalte worden direct of indirect waargenomen door de sluitcellen, en de signalen worden geïntegreerd in een goed gedefinieerde response van de stomata. Kortgezegd gaat de porie open doordat de sluitcellen ionen opnemen en intern metabolische veranderingen ondergaat (ionen-opname en biosynthese organische moleculen) waardoor de osmotische druk groter wordt (=osmotische potentiaal negatiever wordt). Door het negatiever worden van de osmotische potentiaal, wordt ook de waterpotentiaal negatiever¹. De trekkende kracht voor waterimport wordt dus groter, hierdoor komt meer water in de sluitcellen. Door toename van water stijgt de turgordruk en de cellen worden uit elkaar geduwd.

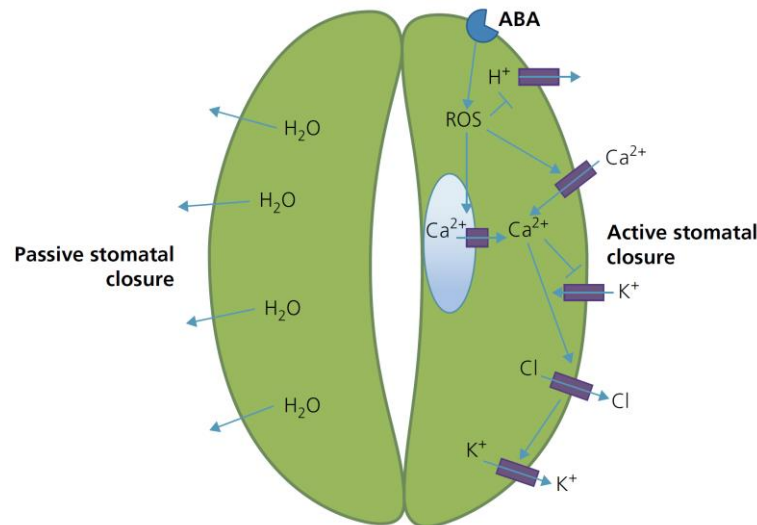
¹ NB Waterpotentiaal is een maat voor de potentiële energie in water en wordt weergegeven met de Griekse letter Ψ (Psi) en wordt uitgedrukt in een drukeenheid: MPa. Water beweegt van een hogere naar een lagere waterpotentiaal. Voor watertransport in planten (transpiratie) moet $\Psi_{\text{bodem}} > \Psi_{\text{wortel}} > \Psi_{\text{stengel}} > \Psi_{\text{blad}} > \Psi_{\text{atmosfeer}}$ zijn. Ψ_{bodem} is kleiner of gelijk aan 0 dus de andere potentialen zijn steeds negatievere getallen onder nul, in de plant daalt de waterpotentiaal qua orde/grootte tot ongeveer -1/-2 MPa. In de lucht is deze in de buurt van de -100 MPa (Taiz & Zeiger 2010, Nobel 2009).



Figuur 25. Opening en sluiting van huidmondjes. Gezwollen huidmondjes zorgen voor een opening. Gekrompen huidmondjes zorgen voor sluiting van de porie. Bron: wikipedia <https://en.wikipedia.org/wiki/Stoma>

Sluiting van huidmondjes kan op een actieve en passieve manier gebeuren (Figuur 26):

- Hydro-passief: Sluitcellen kunnen turgor verliezen door direct waterverlies vanwege verdamping naar de atmosfeer. Taiz & Zeiger (2010) merken op dat dit sluitingsmechanisme waarschijnlijk vooral opereert in lucht met lage luchtvochtigheid wanneer direct waterverlies vanuit de sluitcellen sneller gaat dan de aanvoer van water vanuit naastliggende cellen.
- Hydro-actief: sluiting van de stomata wanneer het hele blad of de wortels gedehydrateerd raken en hangt af van metabolische processen in de sluitcellen: een reductie in opgeloste stoffen (minder negatieve osmotische potentiaal) resulteert in waterverlies en afname van turgor wat sluiting geeft. Dit is dus het omgekeerde van het hydraulische mechanisme voor opening. Bij deze sluitingsreactie speelt het hormoon ABA een centrale rol.



Figuur 26. *Hydro-passieve* (links) en *Hydro-actieve* (rechts) sluiting van de huidmondjes. De *hydro-passieve* sluiting wordt veroorzaakt door direct waterverlies uit de sluitcellen. De *hydro-actieve* sluiting wordt veroorzaakt door actief ionen uit de cel te pompen waardoor de osmotische potentiaal minder negatief wordt en waterverlies optreedt (bron: Arve et al. 2011/Pirasteh et al. 2016).

B1.3 Huidmondjes en VPD

In 2016 schreef De Gelder een interessant stukje aangaande luchtvochtigheid en huidmondjes (De Gelder, 2016). Hij bespreekt daar de observatie dat bij een lage RV (of hoge VPD) de huidmondjes sluiten, en gaat in op het mogelijke regelmechanisme: is het een direct effect van de VPD zelf op de sluiting van huidmondjes of is er een indirecte werking. Hij concludeert: "Het BWB-model [Ball, Woodrow&Berry-model, GT] en de toepassingen daarvan in veel onderzoeken is volgens mij een belangrijk ijkpunt voor het hanteren van de stelling dat de luchtvochtigheid de huidmondjes stuurt. De manier waarop huidmondjes reageren op luchtvochtigheid blijft echter onbeantwoord".

Voor praktische toepassingen is het de vraag of het precieze proces bekend moet zijn—op het proces zelf wordt in het de volgende paragraaf ingegaan—feit blijft dat stomata van een heel aantal planten een sluitingsreactie vertonen wanneer de VPD verhoogd wordt door een verlaging van de luchtvochtigheid. Tegelijkertijd kan gesteld worden dat sluitende huidmondjes de VPD verhogen doordat bij vermindering in verdamping de bladtemperatuur toeneemt (gelijke instraling). In een kassituatie wordt tevens de aanvoer van vocht verlaagd waardoor de RV van de kas daalt en daardoor de VPD toeneemt. Een getallenvoorbeeld maakt dit duidelijk (Tabel 5):

- In een hypothetische situatie is T_{blad} en lucht beide 22°C met 80% RV.
- Door vochtafvoer uit de kas daalt de RV met 10%, hierdoor stijgt de VPD fors en ook de transpiratie, in eerste instantie zal de bladtemperatuur dus afnemen door de verhoogde transpiratie.
- De stijging van de VPD en/of transpiratie induceert huidmondjessluiting waardoor transpiratie vermindert en bladtemperatuur met een graad stijgt (=aanname). Hierdoor neemt de VPD verder toe.

- Door verlaging van de transpiratie neemt ook het vochtgehalte in de kas af van 70% naar 65% (=aanname) waardoor de VPD nog verder stijgt.

Dit voorbeeld maakt dus duidelijk dat VPD-geïnduceerde sluiting van de huidmondjes een zichzelf versterkend proces in gang zet waardoor de VPD nog verder stijgt.

Tabel 5. Getallenvoorbeeld van effect van verlaging van RV en huidmondjesopening op VPD. De straling blijft gelijk. In dit voorbeeld is de convectieve warmteoverdracht een rem op de stijging in bladtemperatuur. De berekende transpiratie is een vermenigvuldiging van de VPD maal de huidmondjesopening.

Situatie	RV	T _{lucht}	T _{blad}	VPD (kPa)	huidmondjesopening	transpiratie
start	80	22	22	0.53	0.2	0.11
daling RV, stijging transpiratie	70	22	22	0.80	0.2	0.16
daling G _s & transpiratie, stijging T _{blad} en VPD	70	22	23	0.96	0.1	0.10
verdere stijging VPD door verlaagde transpiratie en daardoor daling RV in kas.	65	22	23	1.10	0.1	0.11

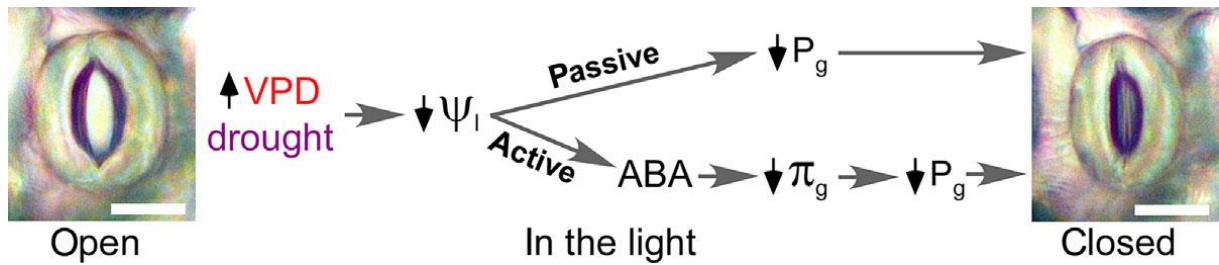
Overigens moet worden opgemerkt dat wiskundig gezien de huidmondjesgeleidbaarheid per definitie een directe relatie houdt met de VPD omdat simpelweg de geleidbaarheid zo is gedefinieerd: $G_s = \text{Verdamping} / \text{VPD}$ (Pantin & Blatt, 2018) of anders: $\text{Verdamping} = \text{VPD} * G_s$ ($\text{VPD} = \text{VP}_{\text{blad}} - \text{VP}_{\text{lucht}}$; $\text{VP} = \text{dampdruk}$). Alleen in kassituaties zal VP_{lucht} beïnvloed kunnen worden door de plant. Gesteld dat er bij een plant een bepaalde maximale transpiratie mogelijk is, dan volgt hieruit dat G_s omgekeerd evenredig afneemt bij toenemende VPD. In het geval dat de maximale transpiratie is bereikt, is dus afname van de G_s bij toenemende VPD zelfs een wetmatigheid. Zie ook in hoofdstuk 2 het kopje 'het gebruik van de wet van Ohm en de VPD'.

B1.4 Wetenschappelijke literatuur rondom huidmondjes en VPD

Intussen is er in de periode 2016-2018 alweer een stroom nieuwe wetenschappelijke artikelen verschenen waarin wordt nagegaan waarom huidmondjes sluiten bij een verhoging van de VPD (o.a. McAdam & Brodribb, 2015, 2016, 2018; McAdam *et al.* 2016; Susmilch *et al.* 2017; Susmilch & McAdam 2017; Merilo *et al.* 2018; Pantin & Blatt, 2018).

McAdam & Brodribb (2015) betogen dat bij eenvoudigere vaatplanten zoals varens en sommige naaktzadigen (gymnosperms o.a. coniferen), VPD-geïnduceerde sluiting van stomata een passieve respons is op verminderde turgor zonder detecteerbare ABA-synthese. In tegenstelling hiermee bleek in bedektzadigen (angiosperms) blad-ABA de sluitingsreactie van stomata in respons op een VPD-verhoging aan te sturen (McAdam & Brodribb 2015, McAdam *et al.* 2016). De VPD-geïnduceerde blad-ABA-synthese is een reactie op een subtiele reductie van blad turgor en resulteert in een sluiting van stomata in 10-20 minuten (McAdam

et al. 2016; Sussmilch et al., 2017). De keten van reacties van beide vormen wordt weergegeven in Figuur 27.



Figuur 27. Model van de werking van de passieve en de actieve sluiting van stomata. Een toename in VPD of een periode van droogte veroorzaakt een afname van de blad-waterpotentialiaal (Ψ_{leaf} , NB de waterpotentialiaal wordt negatiever, zie noot 1) en triggert sluiting van de stomata via één van de twee routes. Bij de passieve route worden de stomata direct aangestuurd door vochtverlies van het blad: een afname in waterpotentialiaal en zo een afname van turgor (P_g) in de sluitcellen en vervolgens sluiting van de huidmondjes. Bij de actieve metabolische sluiting triggert de afname in waterpotentialiaal een toename in ABA via ABA-synthese. De ABA-signaalroute activeert ionkanalen in de sluitcellen. Door de afname van ionen neemt de osmotische druk (π_g) af waardoor de turgor (P_g) in de sluitcellen afneemt en de huidmondjes sluiten. Bron: Sussmilch et al. 2017.

ABA-hypothesen en aanvullingen

In de loop van de tijd zijn er diverse hypothesen opgesteld naar de oorsprong van het ABA dat huidmondjes doet sluiten.

McAdam et al. 2016 noemen in hun introductie enkele hypothesen:

- De ABA-flux hypothese: een verandering in flux van ABA naar de sluitcellen reguleert de sluitingsrespons op VPD. Deze hypothese is gebaseerd op de idee dat ABA wordt aangemaakt in de wortels en via het xyleem in de bladeren terecht komt: Gedurende een toename in VPD, is er een toenemende ABA-flux via de toegenomen transpiratie. Dit leidt tot een verhoogde concentratie ABA in de sluitcellen waardoor deze sluiten.
- Een alternatief op bovenstaande is dat door een verhoogde VPD gebonden ABA, waarschijnlijk uit de chloroplasten, wordt vrijgegeven en in de sluitcellen terecht komt.
- Recenter onderzoek laat juist zien dat *de novo* biosynthese van ABA in bladeren de bron is waardoor huidmondjes sluiten.

McAdam et al. (2016) laten zien dat de expressie van het gen NCED (nodig voor ABA-biosynthese) snel genoeg gaat om de respons van de stomata op minutenschaal te verklaren. Het snelle mechanisme waardoor NCED-expressie wordt ge-upreguleerd door turgorreductie gedurende de VPD-verhoging bleef echter onbekend. Volgens Buckley (2017) is er een opkomende wetenschappelijke consensus dat een belangrijk, en mogelijks zelfs groot deel van de stomatal responses op atmosferische en bodemdroogte wordt gedreven door 'de novo' synthese van ABA in bladeren in respons op veranderingen in turgordruk van cellen ergens in het blad.

Merilo et al. (2018) tonen aan dat toch ook de passieve hydraulische sluiting een rol speelt bij bedektzadigen (angiosperms). Hun belangrijkste bevindingen zijn:

- ABA-niveau bepaalt de steady state stomataire geleidbaarheid (G_s)

- Het OST1-gen (Open Stomata 1-gen dat zorgt voor de aanmaak van OST1-eiwit kinase) is cruciaal voor de luchtvochtigheidsgerelateerde regulatie van G_s
- ABA-biosynthese in sluitcellen en floeem-companion cellen is functioneel redundant

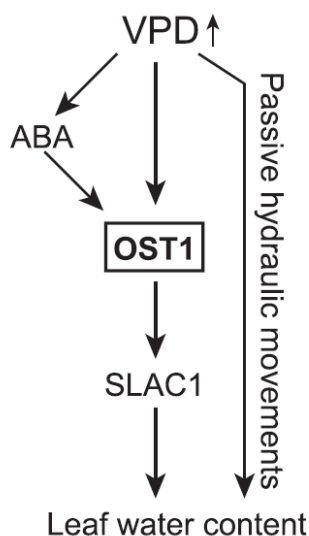
OST1 is een centraal enzym in de regulering van stomata. Het activeert de anion-kanalen die zorgen voor anion efflux en daaropvolgende sluiting van de stomata. Dit enzym reageert op ABA maar ook op omgevingsfactoren zoals CO_2 , ozon en donkerte (Merilo *et al.* 2018).

Merilo *et al.* (2018) sluiten af met het volgende denkmodel, OST1 blijkt hierin een sleutelrol te vervullen (Figuur 28):

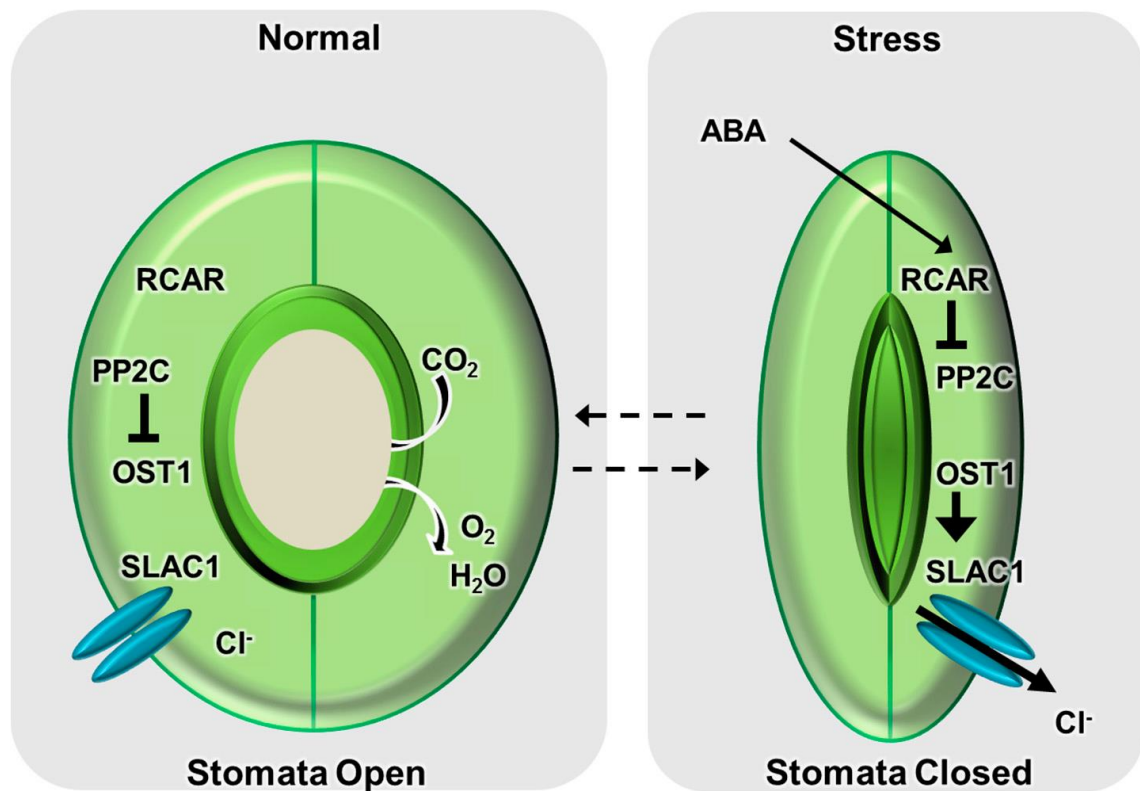
- OST1 werkt afhankelijk van ABA.
- OST1 kan ook onafhankelijk van ABA werken.
- OST1 activeert een anionkanaal waardoor de osmotische druk daalt, vervolgens de turgor en sluiting van de huidmondjes bewerkstelligt.
- Hiernaast is er nog een passieve hydraulische reactie die direct inwerkt op het huidmondje (ook bij angiosperms!).

In toevoeging hierop laat Figuur 29 de ABA-route zien waardoor huidmondjes sluiten.

De vraag die overblijft is wat nu de trigger is waardoor *de novo* blad-ABA-synthese in gang gezet wordt. Met andere woorden: Wat wordt nu precies waargenomen door de plant na een verandering in luchtvochtigheid. MacAdam & Brodribb 2016 en Rodriguez *et al.* (2016) wijzen naar (subtiele) turgorveranderingen. Sack *et al.* (2017) wijzen naar afname in celvolume. Susmilch & McAdam (2017) noemen als potentiële kandidaten om de verandering in plant water status waar te nemen: cel turgor, cel volume (Zhang *et al.* 2018) of de relatie tussen celmembraan en celwand.

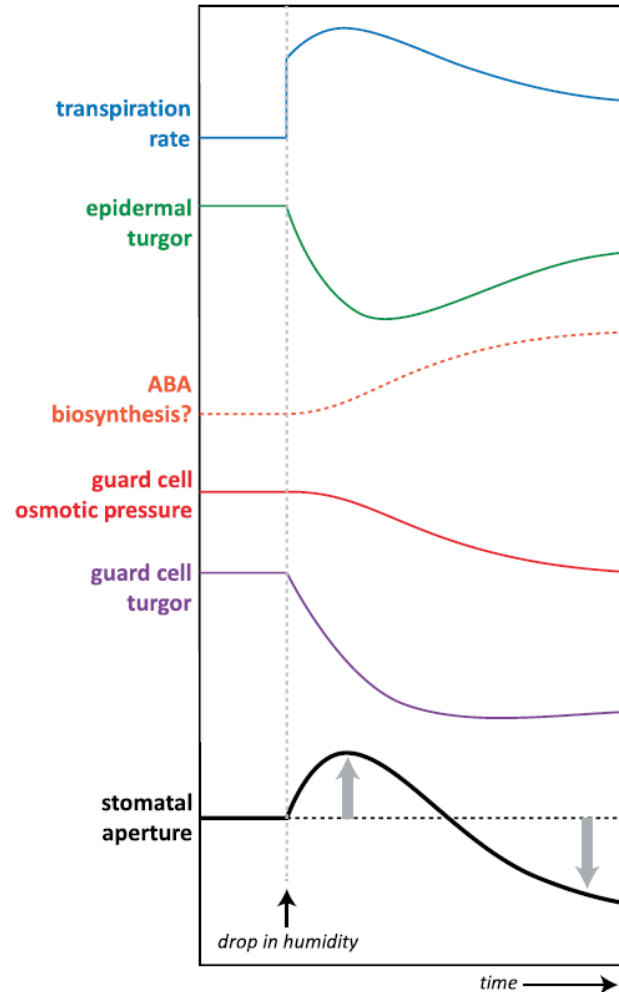


Figuur 28. Denkmodel van VPD-geïnduceerde sluiting van stomata. Het OST1-enzym vervult een sleutelrol. De activatie kan via afhankelijk en onafhankelijk van ABA verlopen. Tevens is er een passieve hydraulische respons op een verlaagde turgor onder een hoge VPD. Bron: Merilo *et al.* 2018.



Figuur 29. Vereenvoudigd model van sluiting van stomata via ABA. Onder normale omstandigheden onderdrukt het enzym PP2C (2C-type proteïne phosphatase) het enzym OST1 (open stomata 1), hierdoor blijft het S-type anion kanaal (SLAC1) min of meer gesloten (basal activity). Onder stress condities zoals droogte neemt de ABA-concentratie in het blad fors toe. Hierdoor reageren de ABA-receptoren RCAR (regulatory component ABA receptor family members in combinatie met PP2C's. De formatie van het RCAR-PP2PC-complex verbreekt het PP2C-OST1-complex. Hierdoor wordt OST1 actief en activeert het SLAC1 kanaal zodat anionen wegstromen, de osmpotische potentiaal daalt, turgor daalt en huidmondje sluit. Bron: Lim et al. 2015.

Buckley (2016) zet uiteen dat bij angiosperms na blootstelling aan drogere lucht het eerste gevolg verlies aan turgor door waterverlies is, die kortstondige opening van de huidmondjes bewerkstelligt vanwege het verlies aan turgor in de omliggende epidermiscellen. Deze cellen hebben namelijk een mechanisch voordeel op sluitcellen: bij gelijke afname in turgor van sluit- en epidermiscellen worden huidmondjes 'open' getrokken. Bij een toename in VPD wordt dan ook een tijdelijke toename in G_s waargenomen (Figuur 30). Buckley geeft aan dat de gevonden resultaten van McAdam *et al.* (2016) zeer goed in de al bestaande hydro-active feedback hypothese vallen. Deze wordt via Figuur 30 toegelicht.



Figuur 30. Mechanisme van huidmondjesrespons in reactie op een verlaging in luchtvochtigheid volgens de hydro-active feedback hypothese: Toegenomen waterverlies induceert in eerste instantie verlaging van epidermis- en sluitcelturgor in gelijke mate, dit veroorzaakt een kortstondige opening van de stomata. De gereduceerde waterstatus veroorzaakt biosynthese van ABA wat vervolgens door efflux van ionen de osmotische druk van de sluitcellen doet afnemen. Dit versterkt turgorverlies dat huidmondjes doet sluiten. Bron: Buckley, 2016.

Mott & Peak (2013) noemen in hun introductie nog enkele plantresponses op een VPD-verhoging. De omvang van huidmondjessluiting varieert tussen planten:

- Anisohydric: In sommige bladeren blijft de transpiratie toenemen bij toenemende VPD, ondanks dat stomata sluiten.
- Isohydric: de sluiting van de stomata is voldoende om de transpiratie op een min of meer gelijk niveau te houden als de VPD toeneemt.
- Feed forward: de afname in G_s is dermate dat de transpiratie afneemt bij een hogere VPD

B1.3 Huidmondjesmodellen

Uit het feit dat huidmondjes op diverse omgevingsfactoren reageren is direct duidelijk dat een huidmondjesmodel een enorme opgave is. Huidmondjes reageren onder andere op:

- Lichtintensiteit
- Lichtkwaliteit
- CO₂
- Luchtvochtigheid & temperatuur (VPD)
- Waterstatus plant (vocht / EC substraat)
- Sink limitatie
- Temperatuur (wordt door Lawson & Blatt, 2014 apart genoemd van VPD).

In de wetenschappelijke literatuur komen drie soorten modellen naar voren (Buckley, 2017):

- a. Empirische modellen (gebaseerd op gemeten data)
- b. Mechanistische modellen (proces-gebaseerd)
- c. Economische modellen (gebaseerd op optimalisatie van CO₂-opname ten opzichte van waterverlies)

Hierbij moet worden opgemerkt dat de empirische en de mechanistische modellen vloeiend in elkaar overlopen: Onder de empirisch vastgestelde relaties liggen mechanismen en omgekeerd ontkomen mechanistische modellen niet aan empirische relaties (Buckley & Mott, 2013). Puur mechanistische modellen zijn vaak wiskundig zeer complex en bewegen zich vaak op celniveau. De empirische modellen spelen zich af op blad- of gewasniveau en zijn meestal wiskundig eenvoudiger. De optimalisatieaanpak gaat uit van de algemene stelling dat planten hun beperkte bronnen zo optimaal mogelijk inzetten: opname van CO₂ gaat altijd gepaard met verlies aan water.

Voor praktische toepassingen zijn de mechanistische modellen op celniveau te complex (Buckley & Mott, 2013). Op bladniveau zijn er modellen voor luchtvochtigheid en temperatuur (Mott & Peak 2013), licht en CO₂ (Buckley, 2003). Optimaliseringsmodellen vereisen een berekening van de gewasfotosynthese zodat de delta fotosynthese gedeeld door de delta transpiratie zo hoog mogelijk kan worden.

De empirische modellen maken een voorspelling van de G_s gegeven een aantal klimatologische omstandigheden zoals lichtintensiteit, luchtvochtigheid en CO₂. Vooraf zijn deze modellen geparametriseerd bij een range van klimaatsomstandigheden. Buiten de gemeten range worden deze modellen onbetrouwbaar. Damour *et al.* 2010 onderscheidt twee klassen empirische modellen:

- a. Multiplicatieve modellen (Jarvis-type)
- b. Modellen gebaseerd op de G_s-fotosynthese relatie (BWB-type = Ball, Woodrow & Berry model, 1987).

Multiplicatieve modellen gaan ervan uit dat de factoren die inwerken op de Gs onafhankelijk van elkaar zijn. Zo heeft het model van Jarvis (1976) de volgende structuur:

$$G_s = f(Q) * f(T) * f(VPD) * f(C_a) * f(\Psi_1)$$

In woorden staat hier: de huidmondjesopening is een functie (f) van licht (Q), temperatuur (T), VPD, CO₂ in de lucht (Ca) en de waterpotentialaal (Ψ_1)

Deze vorm is aantrekkelijk vanwege de modulaire structuur. Functies die voor een bepaalde soort of omstandigheid niet relevant zijn, kunnen weggelaten worden. De multiplicatieve modellen hebben twee belangrijke nadelen: (1) iedere factor werkt onafhankelijk en (2) voor elke nieuwe omgevingsconditie moet een respons-curve gemaakt worden (Damour *et al.* 2010, Buckley *et al.* 2012). Wel wordt opgemerkt dat binnen de parametrisatie-range deze modellen bevredigende resultaten geven.

Bij de BWB-modellen wordt uitgegaan van een positieve relatie tussen Gs en de fotosynthese.

$$G_s = G_0 + a * A_{net} * \frac{H_t}{C_a}$$

Hierbij staat G₀ voor nachtelijke stomatal opening, a is een empirische parameter, A_{net} voor de netto fotosynthese, H_t voor de relatieve vochtigheid en Ca voor de CO₂ rondom het blad.

Leuning (1995) maakte een aantal belangrijke aanpassingen aan het model van BWB (1987) waar kritiek op was (Damour *et al.* 2010):

- VPD in plaats van RV
- Invoeging van het CO₂-compensatiepunt (Γ)
- Stomata reageren niet op Ca maar op Ci

En kwam op de volgende formule:

$$G_s = G_0 + a * \frac{A_{net}}{\left(1 + \frac{VPD}{D_0}\right) * (C_i - \Gamma)}$$

Hierbij zijn a en D₀ empirische parameters.

Damour *et al.* 2010 geven aan dat de BWB- & Leuning modellen beide de respons op bodemwaterstatus missen, maar dat ze een goed compromis vormen tussen gebruikersgemak, verklarende kracht en accuraatheid van voorspelling onder verscheidene experimentele omstandigheden. Buckley *et al.* (2012) merken hiernaast nog op dat Leuning uitgaat van G₀ als constante terwijl dit niet zo is (Barbour & Buckley 2007). Leuning blijft ook uitgaan van een Gs die proportioneel blijft met de netto fotosynthese—dit lijkt logisch onder niet door vocht

gelimiteerde omstandigheden. Er is dus net als bij het BWB-model ook een compleet fotosynthesemodel nodig om tot accurate voorspelling te komen².

Als laatste kan worden opgemerkt dat Medlyn *et al.* 2011 de aanpak van Leuning (1995) combineren met de optimalisatie theorie waarbij de delta fotosynthese gedeeld door de delta transpiratie (dA/dE) zo groot mogelijk is.

Voor praktische toepassing in de kas is de grootste beperking voor deze klasse van modellen dat er een goed werkend fotosynthesemodel aanwezig moet zijn. Op dit moment bestaat dit alleen nog maar voor tomaat (HORTISENSE®, eigendom van Hortilux, 2018). Voor een kassituatie ligt dus de multiplicatieve aanpak meer voor de hand.

B1.4 Berekening van de huidmondjesopening

Bovenstaand beschreven modellen *voorspellen* de huidmondjesopening. De huidmondjesopening kan echter ook *berekend* worden. Hiervoor kan de energiebalans of de gemeten of berekende transpiratie voor worden gebruikt.

Berekening vanuit de Energiebalans

Op detailniveau wordt de energiebalans al decennialang door onderzoekers gebruikt om bijvoorbeeld de bladtemperatuur te berekenen (Using the Li-6400, 1998) of de temperatuur van het groeipunt (zie referenties in De Gelder, 2016). Op grotere schaal maken heel wat computermodellen die gewasgroei modelleren, gebruik van de energiebalans om de bladtemperatuur te *berekenen* op basis van een *voorspelde* Gs. Doordat in hedendaagse kassen steeds vaker de bladtemperatuur gemeten wordt en de (netto) stralingsflux ook gemeten wordt, kan uit diezelfde energiebalans de huidmondjesopening (Gs) worden teruggerekend. Voogt en van Weel (2008) hebben deze aanpak gevolgd en geïntroduceerd in de Nederlandse tuinbouw. De theorie achter dit model wordt weergegeven in Bijlage II van dit rapport en wordt hieronder samengevat.

Netto stralingsflux = voelbare warmte flux + latente warmteflux (transpiratie)

De basisvergelijking voor de energiebalans luidt:

$$R = l * E + Q + G$$

- R is de door het gewas geabsorbeerde straling (radiation) in W/m².
- l*E de latente warmteoverdracht door verdampend water in W/m².
 - l is de verdampingswarmte voor water=2256 kJ/kg.
 - E is de evapotranspiratie (pot- en plantverdamping) in kg/m²/s.

² Doordat A in de formule van Gs voorkomt krijg je een vorm van circulaire berekening. A hangt af van Gs, terwijl Gs van A afhangt. In Gutschik (2016) wordt een algoritme beschreven om hieruit te komen. Damour *et al.* (2010) geven aan dat de drie functies (voor A, gs, Ci) die onderling van elkaar afhankelijk zijn, numeriek opgelost kunnen worden.

- Q is de voelbare warmteoverdracht (convectie op basis van temperatuurverschil) in W/m².
- G is de warmteoverdracht via langgolvlige warmtestraling naar de bodem en het kasdek in W/m². De langgolvlige straling G is afhankelijk van het temperatuurverschil tussen blad en het kasdek of de grond.

Als de transpiratie bekend is kan vervolgens de huidmondjesopening (g_s) worden berekend met de gemodificeerde wet van Ohm:

$$G_T = \frac{E}{(VP_{plant} - VP_{kaslucht})}$$

- E=verdamping in g/m²/s
- VP=dampdruk van plant (berekend uit de planttemperatuur bij 100% RV) en kaslucht (berekend uit de luchttemperatuur en de RV van de kaslucht). Dampdruk wordt gemeten in kPa.
- G_t= totaal geleidingsvermogen in g/m²/s/kPa. NB vaak wordt het geleidingsvermogen ook weergegeven met de eenheid mol/m²/s. De eenheid van het geleidingsvermogen hangt af van hoe de drijvende kracht achter verdamping wordt weergegeven: bijvoorbeeld verschil in dampdruk of mol H₂O/mol lucht. NB G_t is een combinatie van G_s en G_{bw} =geleidingsvermogen van de grenslaag.

Recent is de stomatasensor nog geoptimaliseerd voor het gewas tomaat (Dieleman *et al.* 2016).

Berekening vanuit de transpiratie

De transpiratie kan gemeten worden met een weegoot maar ook worden berekend. Door Bontsema *et al.* (2007, 2011) is de transpiratiemonitor opgesteld. Hierbij wordt de transpiratie berekend uit de vochtbalans van de kas. De afvoer van vocht wordt berekend (som van vochtophoping, condensatie aan het kasdek en de afvoer door ventilatie). Op het moment dat transpiratie bekend is, dan kan de huidmondjesopening via de wet van Ohm geschat worden (net zoals Voogt & van Weel, 2008). NB Bontsema *et al.* werken ook met een transpiratiemodel. Dat model werkt ook met de energiebalans. In dat model wordt de transpiratie berekend via een *voorspelde* G_s via een Jarvis-type berekening (zie bijlage in Bontsema *et al.* 2007).

B1.5 Conclusies literatuuronderzoek

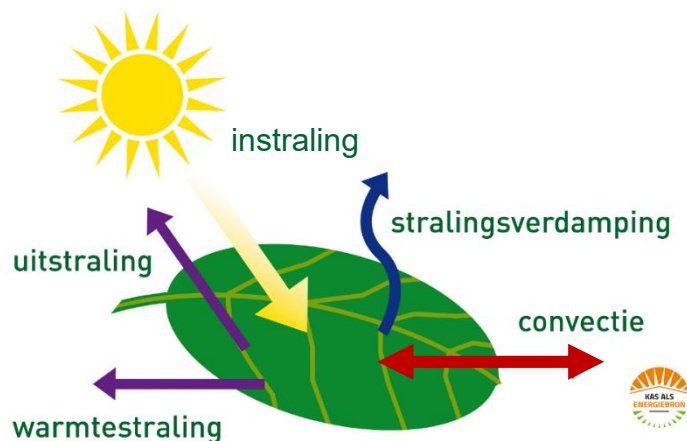
Zoals aangegeven zijn de BWB-modellen momenteel nog niet geschikt voor de praktijk vanwege de aanwezigheid van de fotosynthese in de formules. Dit type modellen kan dus alleen maar toegepast worden als ook de fotosynthese 'live' in de kas wordt berekend. De Jarvis-type modellen (zoals White *et al.* 1999) zijn wel geschikter. Het nadeel is de vermeende onafhankelijke werking van de verschillende factoren waarop huidmondjes reageren. Hiernaast blijft het parametriseren van dit type modellen bewerkelijk.

De mechanistischere aanpakken (Mott & Peak, 2013) waarvoor het meten van de waterpotentiaal en de osmotische potentiaal nodig is, is voorlopig nog geen haalbare kaart.

De aanpak van Voogt & van Weel (2008) is het meest veelbelovend omdat hier de Gs niet *voorspeld* wordt maar actuele toestand *berekend* wordt uit andere wel gemeten zaken. Hierdoor vervalt de parametrisatie. Uiteraard worden in deze berekening ook zaken vereenvoudigd. Hierdoor blijft het van belang om controlemechanismen in te bouwen zoals een dagelijks vergelijk van de berekende en gemeten verdamping zoals gebeurt in LetsGrow (Dieleman *et al.* 2016). Dit kan echter alleen als de cijfers van watergift en drain elke dag beschikbaar zijn.

Bijlage 2. Theorie Energiebalans voor stomatasensor

De stomatasensor is ontwikkeld door Jan Voogt (Hoogendoorn Growth Management). Deze softsensor berekent op basis van de energiebalans van het gewas de huidmondjesopening (Voogt & van Weel, 2008). De theorie achter dit model wordt wat breder omschreven in het rapport 'Effecten van materialen die Nabij-Infrarode straling aan het kasdek tegenhouden' (van Weel 2009). Kort samengevat komt het op het volgende neer: een blad wordt opgewarmd door instraling van de zon of lampen en koelt af door verdamping en warmtestraling. Warmteoverdracht via convectie kan twee richtingen uitgaan afhankelijk van een positief of negatief verschil tussen blad- en luchttemperatuur (Figuur 31).



Figuur 31. Energiebalans van bladeren: Opwarming door instraling van de zon en afkoeling door verdamping en warmtestraling. Convectie kan koelen of verwarmen afhankelijk van een positief of negatief verschil tussen blad- en luchttemperatuur (Bron: wiki.groenkennisnet.nl).

De trend van de stomatasensor volgt bij de hoog verdampende tomaat de logica van de energie/waterbalans behoorlijk goed. Bijvoorbeeld de momenten waarop te laat of te weinig water gegeven wordt, en de momenten waarop dat weer hersteld wordt, komen naar voren in de grafiek (Dieleman *et al.* 2016).

De basisvergelijking voor de energiebalans luidt:

$$R = I \cdot E + Q + G$$

- R is de door het gewas geabsorbeerde straling (radiation) in W/m^2 .
- $I \cdot E$ de latente warmteoverdracht door verdampend water in W/m^2 .
- I is de verdampingswarmte voor water = 2256 kJ/kg .
- E is de evapotranspiratie (pot- en plantverdamping) in $kg/m^2/s$.
- Q is de voelbare warmteoverdracht (convectie op basis van temperatuurverschil) in W/m^2 .
- G is de warmteoverdracht via langgolvlige warmtestraling naar de bodem en het kasdek in W/m^2 . De langgolvlige straling G is afhankelijk van het temperatuurverschil tussen blad en het kasdek of de grond. Deze wordt in de huidige stomatasensor niet meegenomen.

De convectieve warmteoverdracht wordt berekend met de formule:

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

- h is de effectieve warmteoverdrachtcoëfficiënt tussen gewas en omgeving in $\text{W/m}^2/\text{K}$. deze is afhankelijk van de luchtsnelheid rondom de bladeren. In de praktijk blijkt gerekend te kunnen worden met een stabiel getal (Stanghellini *et al.* 2019).
- T_{kas} en T_{gewas} zijn de temperatuur van de kaslucht of gewas (in $^{\circ}\text{C}$ of K).

De overdracht van langgolvlige straling wordt berekend volgens:

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

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

NB in de huidige stomatasensor wordt deze niet meegenomen omdat T_{kasdek} of T_{scherm} niet of nauwelijks in de praktijk worden gemeten.

Als R , Q en G bekend zijn, dan kan E (verdamping) berekend worden door:

$$E = (R - Q - G) / l$$

Vervolgens kan de huidmondjesopening (g_s) worden berekend met de gemodificeerde wet van Ohm:

$$E = G_s * (VP_{\text{plant}} - VP_{\text{kaslucht}})$$

- E =verdamping in $\text{g/m}^2/\text{s}$
- VP =dampdruk van plant (berekend uit de planttemperatuur bij 100% RV) en kaslucht (berekend uit de luchttemperatuur en de RV van de kaslucht). Dampdruk wordt gemeten in kPa.
- G_s = stomataire geleidingsvermogen in $\text{g/m}^2/\text{s}/\text{kPa}$. NB vaak wordt het geleidingsvermogen ook weergegeven met de eenheid $\text{mol/m}^2/\text{s}$ (Tabel 9). De eenheid van het geleidingsvermogen hangt af van hoe de drijvende kracht achter verdamping wordt weergegeven: bijvoorbeeld verschil in dampdruk of $\text{mol H}_2\text{O}/\text{mol}$ lucht.

Een correcte werking van de stomatasensor is dus van meerdere zaken afhankelijk:

- De kortgolvlige straling R in W/m^2 die het blad absorbeert, te berekenen uit de hoeveelheid daglicht en lamplicht in de kas (gemeten door een PAR-meter).
- Temperatuursverschil tussen plant en kaslucht (twee verschillende sensoren).
- Een goede schatting van de warmteoverdrachtscoëfficiënt h .
- RV-meting in de kaslucht: hieruit kan de dampdruk in de kaslucht berekend worden.
- Idealiter moet de temperatuur van het scherm of het kasdek en van de emissiviteit ϵ bekend zijn om de langgolvlige uitstraling te berekenen. Een netto stralingsmeter in de kas zou het verlies via langgolvlige straling direct kunnen meten.

Bijlage 3. Gebruik van Jarvis-model voor paprika

In de literatuurstudie (Bijlage 1) werd geconcludeerd dat de Jarvis-type modellen (zoals White, 1999) een mogelijkheid zijn om de huidmondjesopening te voorspellen. De daar genoemde nadelen zijn de vermeende onafhankelijke werking van de verschillende factoren waarop huidmondjes reageren, en de bewerkelijkheid van het parametriseren van dit type modellen. De methode is vernoemd naar Jarvis die hier in 1976 over heeft gepubliceerd. In deze paragraaf wordt de Jarvis-methode uitgewerkt om de Gs op de meetdagen te voorspellen aan de hand van tuning van de benodigde parameters op 27 augustus. Eerst wordt de methode toegelicht.

De Jarvis-methode is een voorspelling van de Gs op basis van eerder gemeten relaties tussen Gs en bijvoorbeeld PAR, Temperatuur, en/of VPD.

De Gs wordt voorspeld met één of meerdere afzonderlijke functies:

$$G_s\text{-Jarvis} = G_{s\text{max}} * F(\text{PAR}) * F(\text{Temp}) * F(\text{VPD})$$

F(PAR), F(temp) en F(VPD) zijn formules die een fractie (getal tussen 0 en 1) opleveren. Ter gedachtevorming het volgende getallenvoorbeeld:

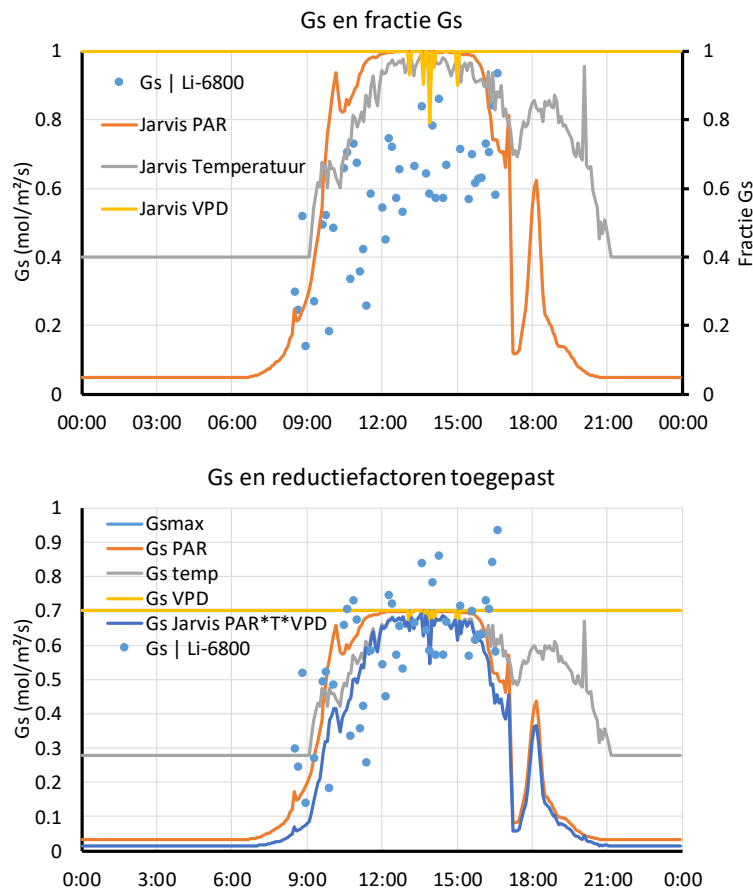
$$G_s\text{-Jarvis} = 700 \text{ mmol/m}^2/\text{s} * 0.85 \text{ (via PAR)} * 0.60 \text{ (via Temp)} * 0.80 \text{ (via VPD)}$$

$$G_s\text{-Jarvis} = 700 \text{ mmol/m}^2/\text{s} * 0.408 = 286 \text{ mmol/m}^2/\text{s}.$$

Dit maakt de theoretische bedenking hierbij ook duidelijk: In de kas is er eigenlijk altijd interactie tussen licht, temperatuur en VPD. Deze afzonderlijke invloeden zijn niet te scheiden. Zoals eerder gezegd is het is een voorspelling in plaats van een berekening. Als er nu bijvoorbeeld droogtestress is, wordt dit met de Jarvis-methode niet gesignaleerd: er is immers geen formule voor ingebouwd die dit meeberekend.

Figuur 32 geeft een inkijkje in de modelopbouw op 27 augustus. In het bovenste figuur is het resultaat van de afzonderlijke formules (Tabel 5) weergegeven. Te zien is dat:

- Er slechts kortstondig reductie via VPD plaats vindt (rond 14:00 uur, gele lijn);
- Voor 9:00 en 21:00 de fractie Gs via temperatuur op het ingestelde minimum van 0.4 zit ($T_{\text{gewas}} < 27^\circ\text{C}$; grijze lijn). Overdag is er tussen 12:00 en 15:00 nauwelijks temperatuursreductie: de fractie Gs is bijna 1.
- Reductie van de Gs via PAR (oranje lijn) vindt het grootste deel van de dag plaats: voor 8:00 en na 20:00 is de fractie Gs bijna 0. Hiertussen stijgt de fractie Gs door toenemend licht snel naar 1 en daalt weer bij afnemend licht.



Figuur 32. Opbouw Jarvismodel op basis van het klimaat en de gemeten Gs van 27 augustus 2019.

Tabel 6. Formules en parameters om Gs te voorspellen via de Jarvismethode.

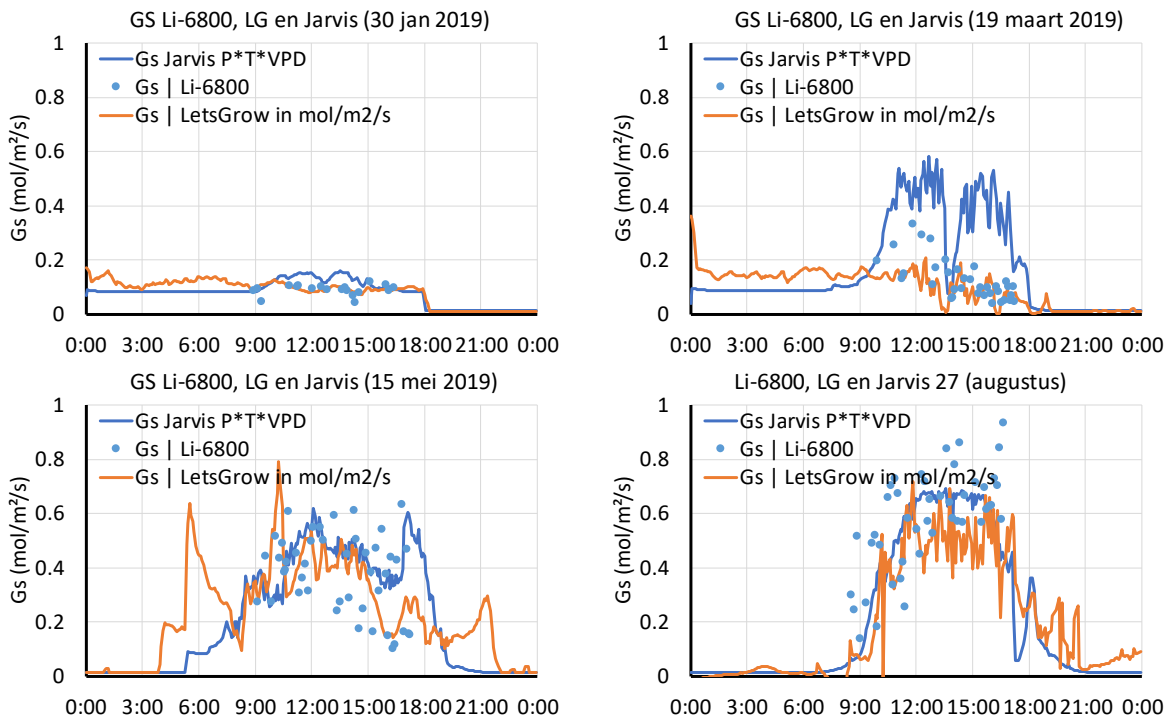
Functie	Vergelijking	bron	parameters paprika
F(PAR)	$1/(1+6.95)e^{(-\text{gamma} \cdot \text{PAR}/\text{LAI})}$	van Beveren <i>et al.</i> 2015	$1/(1+20)e^{(-0.03 \cdot \text{PAR}/3)}$
F(Temp)*	$1-0.023 \cdot (\text{T}_{\text{gewas}}-\text{T}_{\text{basis}})^2$	Stanghellini <i>et al.</i> 2019	$<27^\circ\text{C} = 0.4,$
F(VPD)	$1.1e^{(-0.63\text{VPD})}$	White <i>et al.</i> 1999	$<2 \text{ kPa} = 1.0$ $4e^{(-0.7 \cdot \text{VPD})}$

* Stanghellini merkt op dat gegeven de hoge correlatie tussen luchttemperatuur en VPD, gewoonlijk of F(temp) of F(VPD) voldoet. Beide mee laten tellen kan resulteren in een forse onderschatting van de Gs.

Zoals gezegd is het Jarvis-model getuned op 27 augustus, vervolgens is met deze parameters de Gs op de andere dagen voorspeld. Dit resultaat wordt weergegeven in Figuur 33. Op het oog is het resultaat niet slecht. Drie uitschieters zijn:

- 19 maart geeft een forse overschatting gedurende de hele dag. Door uit te gaan van luchttemperatuur in plaats van planttemperatuur wordt het geheel wel realistischer.
- Middag 15 mei rond 17:00. Toen ging de verneveling weer aan, waardoor de fractie Gs via VPD in een keer steeg van ~0.5 naar 1.0. De vraag is het reëel is dat dit zo snel verloopt.
- Middag 27 augustus rond 17:00: Door een kortstondige daling in PAR, daalt de fractie Gs via PAR tot 0.11. Tezamen met een fractie Gs via temperatuur van 0.7 blijft er dan

kortstondig slechts 0.077 over van G_smax. De vraag is of dit reëel is.



Figuur 33. Vergelijk van de gemeten (Li-6800) en berekende G_s (stomatasensor) met de voorspelde G_s via een Jarvis-model.

Vergelijk energiebalansmethode met de Jarvismethode

In onderstaand overzicht worden puntsgewijze de energiebalansmethode vergeleken met de Jarvismethode:

Methode energiebalans

- Schatting van de huidmondjesgeleidbaarheid is een berekening in plaats van voorspelling!
- Orde/grootte overdag komt overeen met de Li-6800 zonder tijdrovende parametrisatie, dus lage kosten.

Jarvis-type model

- Is wel mogelijk, maar heeft een zeer tijdrovende parametrisatie (duur).
- Parametrisatie moet plaatsvinden op niveau van soort en mogelijk zelfs op niveau van cultivar (Anthurium).
- Per definitie onbetrouwbaar buiten range van parametrisatie.
- Als vochtstress door tekort aan watergift niet in model zit, wordt dit ook nooit voorspeld!

Voor beide modellen is zorgvuldige plaatsing en onderhoud sensoren vereist!

Bijlage 4. Metingen Anthurium

In deze bijlage worden enkele gewasmetingen, verdampingsmetingen en fotosynthesemetingen kort toegelicht

B2.1 Gewasmetingen

Er zijn voor Anthurium cv 'Fiesta' twee teeltrondes gevolgd (potmaat 0.8 liter). De eerste teeltronde liep van week 6 tot week 16 en de tweede teeltronde liep van week 17 tot week 27. De plantdichtheid was 19.5 planten/m².

De stomatasensor neemt ook totale lichtonderschepping en LAI mee in de berekening. Vandaar dat dit tweemaal gemeten is. De LAI bleek toe te nemen van 1.35 naar 2.4 (Tabel 7).

Tabel 7. Blad- en bloemoppervlak (n=3) en bijbehorende lichtonderschepping (n=10). De plantdichtheid was 19.5 planten/m².

datum	bladoppervlak (m ² /m ²)	bloemoppervlak (m ² /m ²)	totaal (m ² /m ²)	lichtonderschepping
18-2-2019	1.16	0.20	1.35	76%
18-4-2019	1.89	0.48	2.37	

B2.2 Verdampingsmetingen

Voor meting van de orde van grootte van de verdamping zijn weeggoten ingezet. Hieruit bleek dat tijdens de eerste teeltronde de verdamping tussen de 400-500 gram/m²/s lag (Tabel 8). Tijdens de tweede teeltronde lag het gemiddelde op 525 g/m²/dag met uitschieters naar 300 en 700 g/m²/dag.

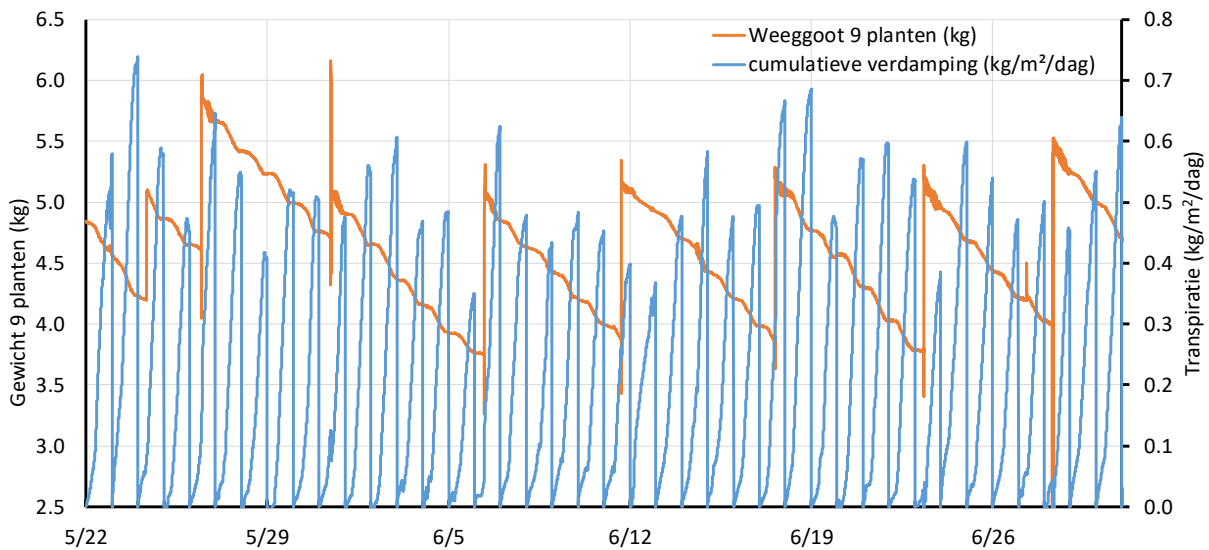
Tabel 8. Berekening verdamping van plant + pot via de weeggoten gedurende de eerste meetronde. Er is telkens gemiddeld tussen 4 dagen. Er stonden 9 planten in de weeggoot.

periode	gewichtsvermindering	verschil per dag	evapotranspiratie per m ² /dag
22-25 februari 2019 pot+ plant	965 g	241 g/dag	522 g/m ² /dag
12-15 maart 2019 pot + plant	820 g	205 g/dag	444 g/m ² /dag
24-28 maart 2019 plant	800 g	200 g/dag	433 g/m ² /dag

Op 21 maart 2019 zijn de potten afgedekt om verschil tussen pot- en plantverdamping te meten. Het bleek dat vier dagen daling in gewicht uitkwam op 820 gram en 4 dagen na 21

maart uitkwam op 800 gram. Hieruit werd geconcludeerd dat de potverdamping aan het einde van een teeltronde (half april), redelijk beperkt is.

Figuur 34 geeft het gewichtsverloop van een weeggoot weer en de dagelijkse cumulatieve verdamping die hieruit berekend kon worden. Te zien is dat er om de 5-6 dagen werd water gegeven. De cumulatieve verdamping lag tussen de 350 en 700 gram/m²/dag en was gemiddeld 525 gram/m²/dag.



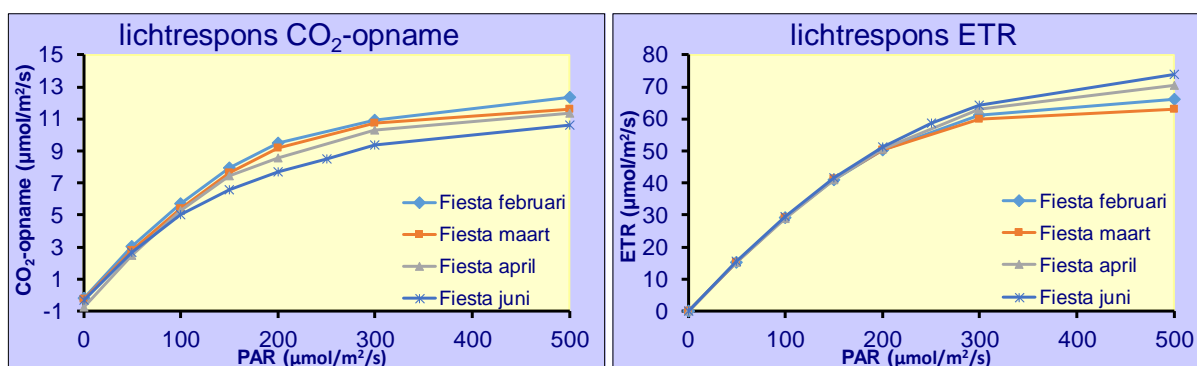
Figuur 34. Verloop van het plantgewicht van de weegschaal en berekende cumulatieve verdamping per dag. Plotselinge toename in gewicht is moment van watergift. De cumulatieve verdamping ligt tussen de 350 en 700 gram/m²/dag en was gemiddeld 525 gram/m²/dag. De potten waren afgedekt, er was dus sprake van plantverdamping. Er stonden 9 planten in de weeggoot



Foto 8. Gebruik van weeggoten (9 planten per weeggoot) en afdekking van de pot voor de bepaling van plantverdamping.

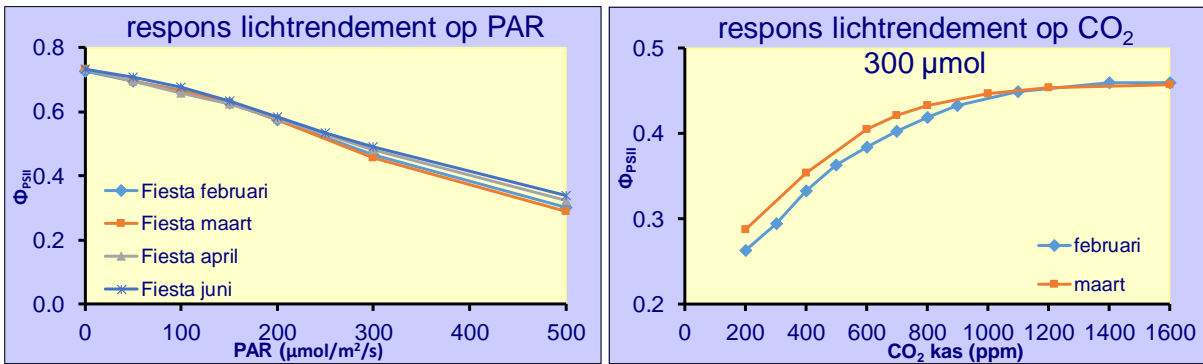
B2.3 Fotosynthese-metingen

Gedurende de dagen dat de huidmondjesopening gemeten werd, zijn ook enkele lichtresponscurves gemeten. Figuur 35 laat zien dat de lichtrespons nauwelijks verschilt tussen de verschillende meetdagen van februari tot juni. De lichtrespons lag in juni wat lager doordat de curve gemeten is bij 600 ppm CO₂ in plaats van bij 700 ppm op de andere dagen. De ETR (de door licht opgewekte energiestroom om suikers te maken en geeft de potentie aan voor CO₂-opname) bij 500 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR was in juni wel iets hoger dan in februari en maart. De capaciteit voor CO₂-opname is dan dus iets hoger. Enerzijds kan dit geduid worden als seizoenseffect, anderzijds zou dit ook verklaard kunnen worden uit de iets hogere temperatuur (27-28°C in april & juni ten opzichte van 23-24°C in februari/maart). Lichtverzadiging treedt op bij 300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR. Erboven moet dan ook geschermd worden. Hierbij moet worden opgemerkt dat de toename in fotosynthese van 200 naar 300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ is wel beperkt terwijl de warmtelast van 200 naar 300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 50% hoger is.



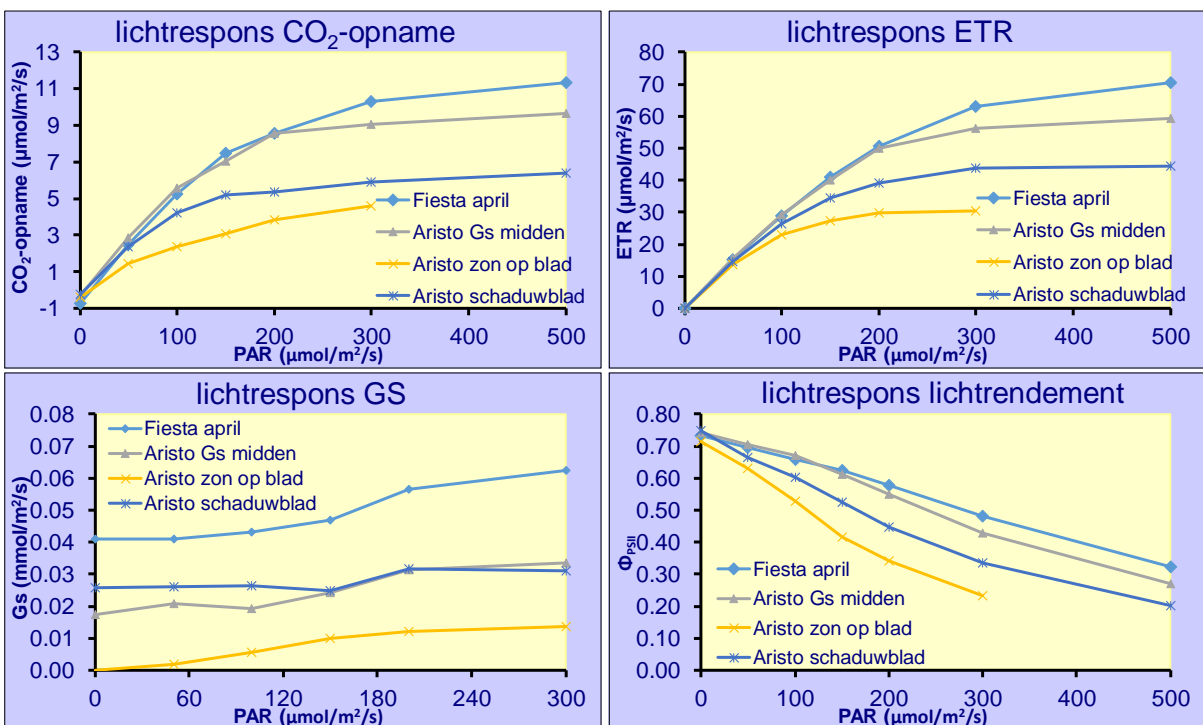
Figuur 35. CO₂-opname (links) en ETR (rechts) bij toenemend lichtniveau gedurende de verschillende maanden. ETR is de door licht opgewekte energiestroom om suikers te maken en geeft de potentie aan. De metingen zijn uitgevoerd bij 700 ppm CO₂, behalve de juni-meting waar 600 ppm is gebruikt.

Het lichtrendement (Figuur 36 links) bereikt pas bij 500 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ de 0.3. Langdurige rendementen van 0.3 of lager moeten vermeden worden vanwege kans op schade aan de fotosynthese-systemen. Figuur 34 (rechts) laat zien dat CO₂ hier ook een grote invloed op heeft. Een hoog lichtniveau in combinatie met een laag CO₂-niveau en/of knijpende huidmondjes zorgen ervoor dat het lichtrendement de grens van 0.3 bij een veel lager lichtniveau bereikt.



Figuur 36. Lichtrendement bij toenemend licht (links; gemeten bij 700 ppm CO₂) en toenemend CO₂ (rechts) gemeten bij 300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR. Langdurig rendementen van onder de 0.3 moeten vermeden worden. De lichtafhankelijkheid laat zien dat kortstondig hoog licht fotosynthetisch gezien geen problemen geeft. Echter dit geldt alleen bij voldoende CO₂. Als het CO₂-gehalte veel lager zou zijn of als huidmondjes sluiten, heeft dit negatieve invloed op het lichtrendement waardoor de grens van 0.3 bij een veel lager lichtniveau wordt bereikt.

In april zijn er ook enkele metingen gedaan aan cultivar 'Aristo'. Figuur 37 laat 'Aristo' zien in relatie tot 'Fiesta'. Te zien is dat de fotosynthese boven de 200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ niet meer toeneemt. De huidmondjesopening van 'Aristo' lag op ongeveer de helft van 'Fiesta' (30 in plaats van 60 mmol/m²/s). 'Aristo' zal dus veel sneller huidmondjesbeperking hebben en dus last hebben van lichtstress. Dit wordt geïllustreerd door een meting van 'Aristo' waarbij de zon direct op het blad scheen. Dit blad (gele lijn) had heel lage opening (10 mmol/m²/s). Bij zeer beperkte huidmondjesopening wordt de gevarenszone van $\Phi_{PSII} < 0.3$ heel snel bereikt (gele lijn rechtsonder).



Figuur 37. CO₂-opname (linksboven), ETR (rechtsonder) en Gs (linksonder) en lichtrendement Φ_{PSII} (rechtsonder) bij toenemend lichtniveau. CO₂-gehalte was 700 ppm. Bij lagere gehalten zou het rendement ook lager hebben gelegen.