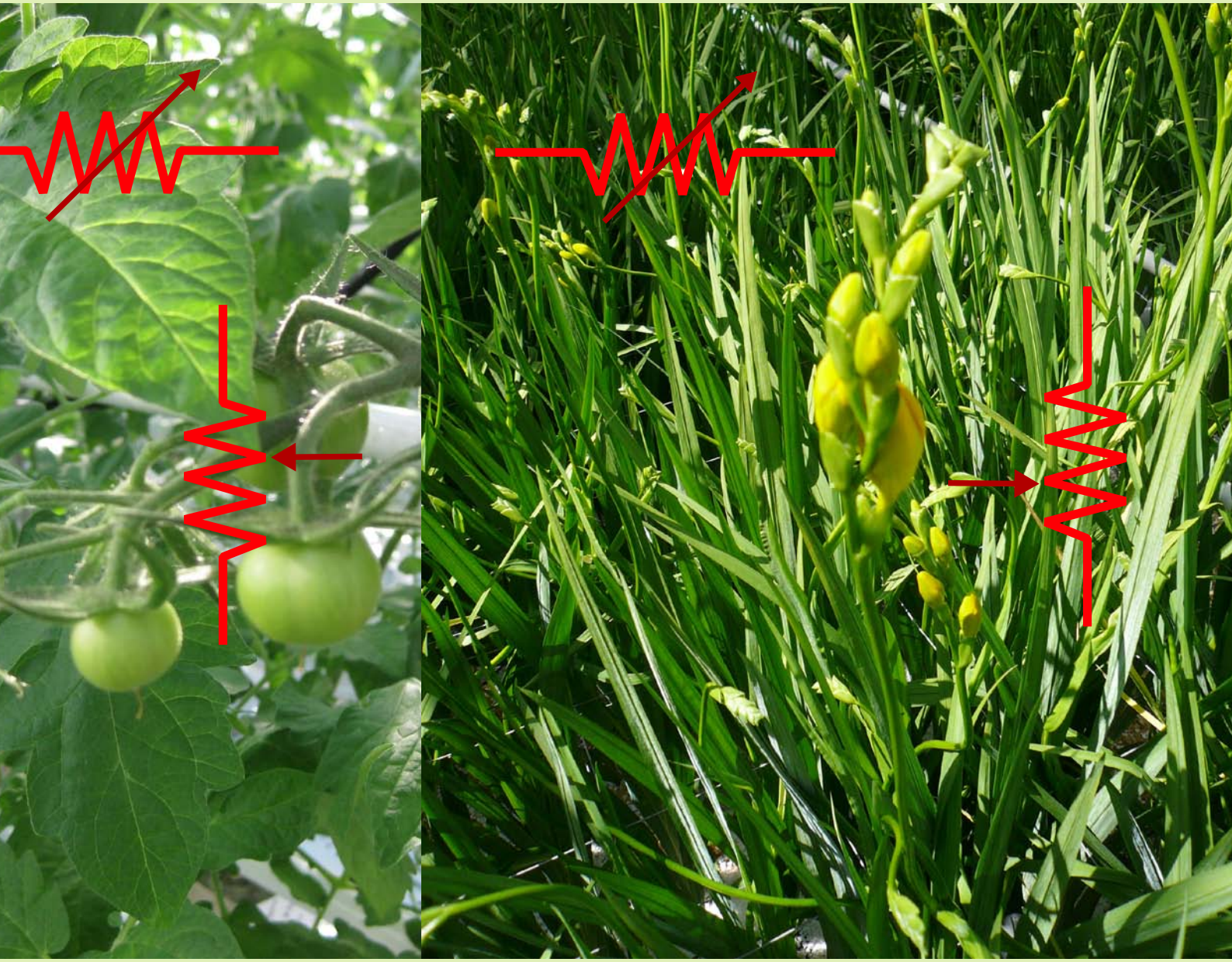
Effecten van grenslaagweerstand op de fotosynthese bij tomaat en Freesia

Theorie aangevuld met Explorer-Kasklimaat simulaties

Ad Schapendonk, Kees Rappoldt en Sander Pot



EcoCurves rapport 23, ISSN 1872-5449 november 2016

Effecten van grenslaagweerstand op de fotosynthese bij tomaat en Freesia

De modelstudie in dit rapport is ondersteund met een consultancy opdracht van het Ministerie van Economische zaken, Landbouw en Innovatie.

Effecten van grenslaagweerstand op de fotosynthese bij tomaat en Freesia

Theorie aangevuld met Explorer-Kasklimaat simulaties

Ad Schapendonk[1], Kees Rappoldt[2], Sander Pot[3]

[1]Photosyntax BV, Englaan 8, 6703 EW Wageningen
E-mail: ad@photosyntax.nl

[2]EcoCurves BV, Kamperfoelieweg 17, 9753 ER Haren
E-mail: kees.rappoldt@ecocurves.nl

[3]Plant Dynamics BV, Kon, Julianastraat 23, 6668 AG Randwijk
E-mail: sander@plant-dynamics.nl

EcoCurves rapport 23, november 2016

REFERAAT

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

In dit rapport worden berekeningen gedaan aan het transport van CO_2 van de lucht in een kas naar de plant. De weerstanden die dit transport bepalen zijn de huidmondjesweerstand, de weerstand van de grenslaag vlakbij het blad. De weerstand an de lucht in en boven het gewas speelt alleen een rol als de lucht in de kas vrijwel stilstaat. De grenslaagweerstand neemt af bij hogere windsnelheden in de kas en speelt bij hoge instraling en windsnelheden beneden $0.5\,\mathrm{m\,s^{-1}}$ een rol, vooral bij gewassen met grote bladeren. Voor tomaat neemt de fotosynthese voor zonbeschenen blad in de zomer met zo'n 10% toe als de windsnelheid toeneemt van 0.1 tot $0.2\,\mathrm{m\,s^{-1}}$. Rekenen we dit effect door voor een heel teeltseizoen dan wordt het gereduceerd tot minder dan 2%.

Trefwoorden: kasteelt, huidmondjes, weerstand, grenslaagweerstand, CO_2 opname

ISSN 1872-5449

© 2016 Photosyntax BV & EcoCurves BV
Englaan 8, 6703 EW Wageningen, Nederland
e–mail: ad@photosyntax.nl

Voorplaat: "Weerstanden in tomaat en freesia"

Photosyntax BV, EcoCurves BV en Plant Dynamics BV zijn niet aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de gegevens en de modelresultaten in dit rapport.

[This document has been created using the LaTeX typesetting system]

Inhoudsopgave

Lijst figuren **6**

Lijst tabellen **6**

1 Inleiding **7**
1.1 CO_2 uit de kas, in het blad . . . 7
1.2 Weerstanden . . . 7
1.3 Transport door concentratieverschil . . . 9
1.4 Grenslaagweerstand . . . 9
1.5 Huidmondjesweerstand . . . 10
1.6 Misverstand . . . 11

2 Berekeningen **13**
2.1 De grenslaagweerstand . . . 13
2.1.1 Geleidbaarheid . . . 13
2.2 Vergelijking tussen Freesia en tomaat . . . 14
2.2.1 Rol van de grenslaagweerstand . . . 14
2.2.2 Fotosynthese . . . 15

3 Gevolgen voor de opbrengst **17**
3.1 Een virtuele kas . . . 17
3.2 Gesimuleerde weerstanden . . . 18
3.3 Gesimuleerde opbrengsten . . . 19

4 Conclusie **21**

Referenties **23**

Appendix A Weerstand en geleidbaarheid **25**

Lijst van figuren

1.1 Schema huidmondje 7
1.2 De grenslaag en de stomataire weerstand van een blad 8
1.3 De grenslaagweerstand 9
1.4 Verband tussen huidmondjesweerstand en bladverdamping 11
1.5 Water stroomt uit een emmer 12

2.1 Fotosynthese als functie van de luchtbeweging bij hoge instraling . . 16

3.1 Gesimuleerde weerstanden voor CO_2 transport 18
3.2 Gesimuleerd effect van de windsnelheid in de kas op de opbrengst . . 19

Lijst van tabellen

2.1 Berekende grenslaagweerstanden 14
2.2 Geleidbaarheid en huidmondjesweerstand tomaat 14
2.3 Geleidbaarheid en huidmondjesweerstand Freesia 15
2.4 Toename fotosynthese bij meer luchtbeweging 16

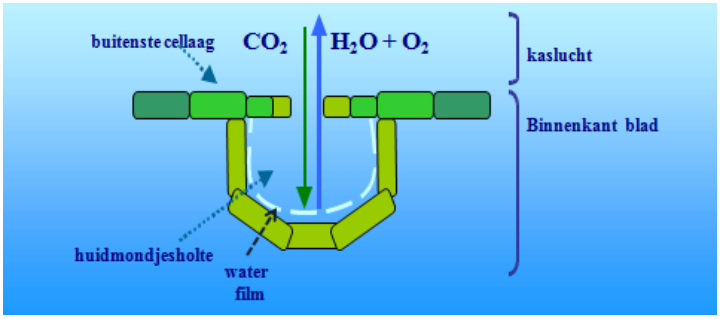
Hoofdstuk 1

Inleiding

1.1 CO_2 uit de kas, in het blad

In het fotosyntheseproces worden CO_2 en water in het blad omgezet in suikers en zuurstof. De energie die daarvoor nodig is, wordt geleverd door zonlicht en assimilatielampen. De CO_2 komt het blad binnen via de huidmondjes. Dit zijn openingen in het blad waardoor water kan verdampen en de CO_2 naar binnen kan gaan. De fotosynthese vindt plaats in de bladgroenkorrels, die de CO_2 onttrekken aan de huidmondjesholten in het blad (Figuur 1.1).

De benodigde CO_2 wordt aangeleverd uit de buitenlucht via ventilatie of door kunstmatige CO_2 dosering in de kas. In het laatste geval komt de CO_2 direct beschikbaar in de buurt van de plant maar de CO_2 uit de buitenlucht moet via luchtbeweging naar het blad getransporteerd worden.



Figuur 1.1. Schematische dwarsdoorsnede door een huidmondje. De waterfilm langs de cellen van de holte zorgt voor luchtvochtigheid van 100% in de holte.

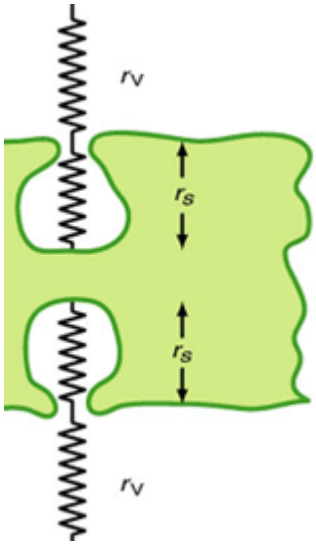
1.2 Weerstanden

Onderweg van de buitenlucht naar de bladgroenkorrels, kunnen we verschillende weerstanden onderscheiden. Dit zijn:

1. Kasweerstand (transport van CO_2 van buiten naar de lucht boven het gewas)
2. Gewasweerstand (de lucht tussen de bladeren van het gewas)

3. Grenslaagweerstand van de bladeren
4. Huidmondjesweerstand
5. Weerstand van bladholte naar bladgroenkorrel (mesophyll weerstand; deze weerstand is niet te beïnvloeden en daar wordt in deze studie niet verder op in gegaan)

We kunnen het probleem allereerst vereenvoudigen door te stellen dat de weerstand van buiten de kas naar binnen, geen rol speelt. Er is geen noemenswaardig verschil tussen de buiten- en binnenconcentraties. De kans dat de CO_2 concentratie in de kas meer dan 40 ppm onder de omgevingsconcentratie zakt is namelijk alleen aanwezig in dichte kassen met relatief veel licht. In die gevallen is het economisch altijd beter om CO_2 te doseren vanwege de geringe lekverliezen en vanwege de hoge winst die de extra CO_2 dan oplevert. Dit betekent dat ventileren met als doelstelling CO_2 binnen te halen geen optie is.



Figuur 1.2. De grenslaag en de stomataire weerstand van een blad. De symbolen r_V en r_s zijn hier de weerstanden voor waterdamp.

De volgende weerstand die we aantreffen is de gewasweerstand (de lucht tussen de bladeren van het gewas). Wanneer de CO_2 gedoseerd wordt via doseringsslangen onder in het gewas, is die weerstand klein. De CO_2 wordt door luchtwervelingen, die veroorzaakt worden door convectief en geforceerd transport, heel snel naar boven over het hele gewasprofiel verdeeld. Maar ook wanneer er geen CO_2 wordt gedoseerd, en de grenslaag direct boven het gewas bevindt, is de menging vrijwel altijd snel en volledig, zoals aangetoond in het onderzoek van Peter van Weel en Bram Vanthoor. Er zijn nauwelijks CO_2 gradiënten tussen de kaslucht en de lucht in de toplaag van het gewas.

Uitzonderingen zijn gewassen zoals roos met een dik ingebogen bladpakket waar pockets van stilstaande lucht kunnen ontstaan. Bij tomaat en Freesia is de kans op dat soort afgesloten lucht pockets niet aanwezig.

We kunnen dus stellen dat de enige weerstanden, die er bij het transport van CO_2 toe doen en waar we invloed op kunnen uitoefenen, de grenslaagweerstand R_{b,CO_2} van het blad en de huidmondjesweerstand R_{s,CO_2} zijn. Deze twee weerstan-

© 2016 Photosyntax en EcoCurves

den staan in serie, dat wil zeggen dat eerst de grenslaagweerstand moet worden overwonnen en vervolgens de huidmondjesweerstand.

Wanneer het blad aan twee zijden huidmondjes heeft (zoals bijna alle monocotylen dus ook Freesia), heeft kan de situatie worden geschetst als in Figuur 1.2. Tomaat heeft ook aan beide zijden huidmondjes maar de dichtheid is aan de onderzijde 2 tot 3 keer zo hoog als aan de bovenzijde. In Figuur 1.2 zijn de symbolen r_V en r_s de weerstanden voor waterdamp (H_2O). Vergelijkbaar met een stroom circuit, kan vervolgens worden beredeneerd dat de grootste weerstand de stroom limiteert. Dat betekent dat de reguleringsmogelijkheid van de huidmondjes groter wordt als de grenslaagweerstand afneemt.

In sectie 1.4 wordt uitgelegd wat het verband is tussen de diffusie van H_2O en de diffusie van CO_2.

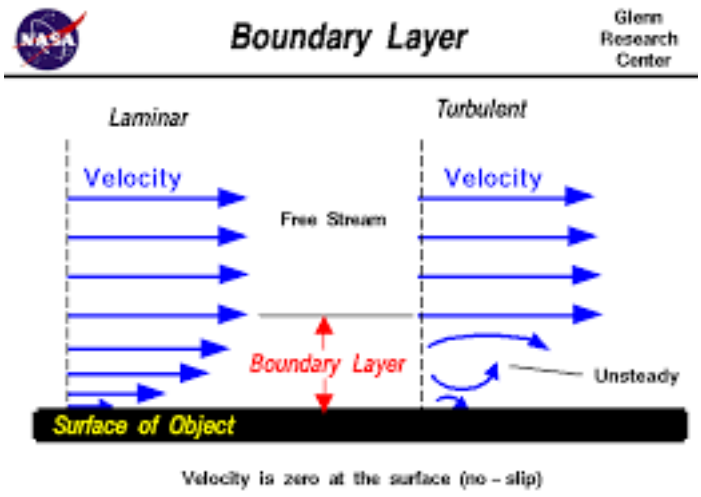
1.3 Transport door concentratieverschil

In een blad dat belicht wordt bewegen CO_2 en H_2O in tegengestelde richting (Figuur 1.1). CO_2 wordt het blad in geduwd, omdat in het blad de CO_2 concentratie lager is dan buiten het blad, doordat bladgroenkorrels CO_2 uit de holten in het blad opnemen (fotosynthese).

H_2O daarentegen wordt het blad "uitgeduwd" omdat in het blad 100% RV heerst en bovendien de bladtemperatuur vaak hoger is dan de omgevingstemperatuur, wat de dampspanning van de waterdamp binnen in het blad nog eens extra verhoogt. Per molecuul CO_2 dat naar binnen gaat, gaan 80 tot 200 moleculen H_2O naar buiten.

1.4 Grenslaagweerstand

De grenslaag is een laagje lucht dat elk blad omhult, waar de luchtbeweging trager is dan in de omgevingslucht (zie Figuur 1.3). De grenslaagweerstand ontstaat doordat er een dun laagje lucht aan het blad gekleefd blijft, door de viscositeit



Figuur 1.3. De grenslaagweerstand ontstaat doordat de lucht vlak bij het blad wordt afgeremd.

© 2016 Photosyntax en EcoCurves

van lucht. In dit laagje moet de CO_2 door diffusie naar de huidmondjes worden getransporteerd. Diffusie is een traag proces, veel trager dan transporten via vrije convectie van lucht. Een dunne grenslaag betekent dat de weglengte voor de diffusie kleiner is, waardoor de weerstand voor het transport van CO_2 van de kaslucht naar de huidmondjes afneemt.

De grenslaag kan dunner worden gemaakt door een snellere luchtbeweging langs het blad. Tegengesteld daaraan werkt de grootte van het blad. Een groter blad heeft een dikkere grenslaag waar de CO_2 doorheen moet diffunderen.

De grenslaagweerstand R_{b,CO_2} voor CO_2 is hoger dan die van H_2O , omdat CO_2 een hoger molecuulgewicht heeft dan water, daardoor beweegt het langzamer. De vertraging is ongeveer een factor 1.37. Voor de huidmondjes is de vertraging van CO_2 ten opzichte van H_2O een factor 1.6.

Met de LiCor-6400, de fotosynthesemeter die we gebruiken, kan de grenslaagweerstand R_{b,H_2O} voor H_2O worden gemeten. De grenslaagweerstand R_{b,CO_2} voor CO_2 is moeilijk experimenteel vast te stellen maar kan eenvoudig uit de gemeten R_{b,H_2O} waarde worden afgeleid. De omrekening van H_2O naar CO_2 is:

$$R_{\text{totaal,CO}_2} = 1.37 \times R_{\text{b,H}_2\text{O}} \; + \; 1.6 \times R_{\text{s,H}_2\text{O}}$$

De grenslaagweerstand voor waterdamp R_{b,H_2O} kan ook worden berekend (Goudriaan (1977, hoofdstuk 3.2), Goudriaan & van Laar (1994, hoofdstuk 7.2)) op basis van de bladgrootte en de windsnelheid langs het blad. De resultaten zijn in Tabel 2.1 weergegeven.

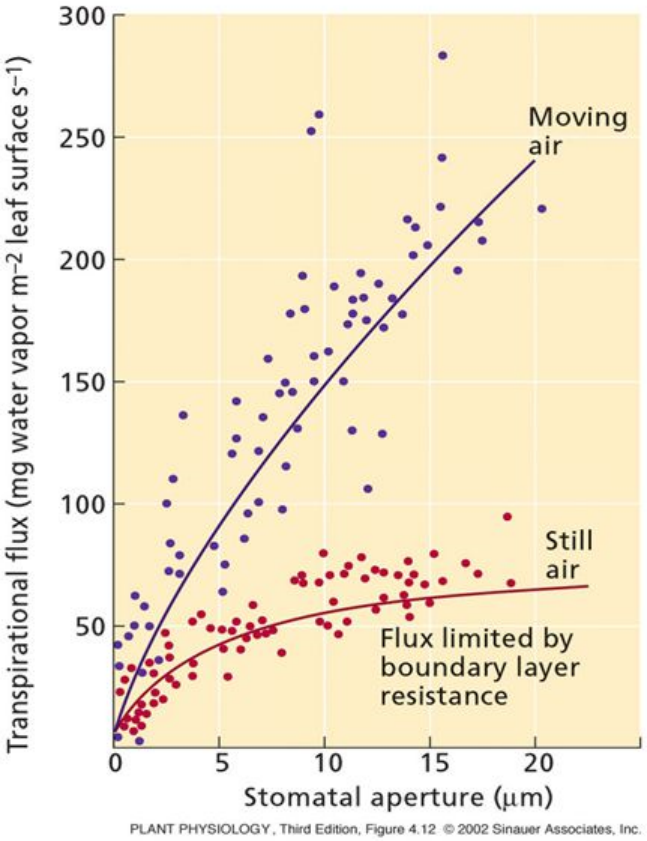
1.5 Huidmondjesweerstand

De huidmondjesweerstand R_{s,CO_2} wordt door de plant geregeld. De weerstand wordt lager bij meer licht (huidmondjes gaan open) maar hij neemt daarentegen toe als gevolg van een lagere RV en een hogere bladtemperatuur (sluiting huidmondjes). Als vuistregel geldt dat de huidmondjesweerstand ongeveer 5 tot 20 keer zo hoog is als de grenslaagweerstand.

Als de huidmondjes een lagere weerstand zouden hebben dan de grenslaagweerstand zou het transport van CO_2 , en daarmee de fotosynthese, vooral bepaald worden door de grenslaagweerstand en dus door toevallige factoren zoals de windsnelheid. Dat zou erg ongewenst zijn omdat de plant dan de verdamping en CO_2 opname niet meer via de huidmondjes kan regelen. De grenslaagweerstand kan *niet* door de plant gereguleerd kan worden en de huidmondjes weerstand *wel*.

De plant probeert met een complexe huidmondjesregeling de verdamping zoveel mogelijk te verlagen en tegelijkertijd de CO_2 opname zo hoog mogelijk te maken (zie ook Figuur 1.4). Het is duidelijk dat dit conflicterende belangen zijn. Bij een hoge lichtintensiteit zal de bladtemperatuur toenemen waardoor de waterdampspanning in het blad hoger wordt en de verdamping toeneemt. Een logische reactie zou dus zijn om de huidmondjes te sluiten. De geleidbaarheid van de huidmondjes moet echter tegelijkertijd toenemen bij hoge lichtintensiteiten om aan de toename van de vraag naar CO_2 te voldoen. Afhankelijk van de soort zal de ene plant besluiten dat water sparen een betere strategie is en de andere plant casht liever het voordeel van de hoge lichtintensiteit en neemt het waterverlies op de koop toe.

© 2016 Photosyntax en EcoCurves



Figuur 1.4. Verband tussen huidmondjesweerstand en bladverdamping bij stilstaande lucht (hoge grenslaagweerstand) en bewegende lucht (lage grenslaagweerstand).

Bij de optimistische water-verspillende soorten kan de weerstand van de huidmondjes bij hoog licht zover afnemen dat de grenslaagweerstand van toenemende invloed wordt. De uitwisseling tussen de omgeving en de grenslaag van het blad is dan te traag geworden. Dit kan worden voorkomen door de luchtbeweging op te voeren waardoor de grenslaag meer verstoord wordt. In het algemeen kun je stellen dat de noodzaak hiervoor groter is naarmate de bladeren meer licht ontvangen. Meestal is dit bovenin het gewas, waar de luchtbeweging toch al het grootst is vanwege de constructie. Met ventilatoren kan de top van het gewas ook relatief makkelijk bereikt worden, als de grenslaagweerstand limiterend wordt.

1.6 Misverstand

Ten onrechte wordt soms verondersteld dat meer luchtbeweging langs het blad, de opname van CO_2 direct zou bevorderen. Het idee daarbij is dat een molecuul makkelijker wordt opgenomen als er meer moleculen per tijdseenheid langskomen. Dat misverstand willen we met onderstaand voorbeeld uit de weg ruimen. Het is daarbij belangrijk om je steeds te realiseren dat het transport van CO_2 over de grenslaag en door de huidmondjes naar het binnenste van het blad, uitsluitend wordt bepaald door de grootte van de weerstanden en de concentratieverschillen tussen CO_2 in kaslucht en CO_2 in het blad. Dit is niet het geval. Het is te vergelijken met de stroomsnelheid van water door gaten in een emmer. De stroomsnelheid door

© 2016 Photosyntax en EcoCurves

Figuur 1.5. Het roeren van water in de emmer zal niet leiden tot een grotere uitstroom.

de gaten wordt bepaald door de hoogte van het water in de emmer, vermenigvuldigd met de zwaartekracht (de gradiënt) en de grootte van het gat (de weerstand). Door het water in de emmer te roeren en dus meer moleculen langs het gat te laten stromen, neemt de snelheid van de waterstroom door het gat niet toe.

Op dezelfde manier neemt ook de opname van CO_2 in een blad niet toe door de luchtsnelheid langs het blad op te voeren. Alleen wanneer de grenslaagweerstand in de buurt komt van de huidmondjesweerstand heeft de luchtbeweging effect maar alleen via het dunner maken van de grenslaagweerstand.

© 2016 Photosyntax en EcoCurves

Hoofdstuk 2

Berekeningen

2.1 De grenslaagweerstand

In Tabel 2.1 is de grenslaagweerstand R_{b,CO_2} voor CO_2 berekend bij oplopende luchtsnelheden tot $2\,m\,s^{-1}$. In de huidige kassen variëren de luchtsnelheden tussen 0.05 en $0.25\,m\,s^{-1}$. Bij zeer lage windsnelheden (kleiner dan $0.10\,m\,s^{-1}$) worden de effecten verstoord omdat het aandeel van convectief transport van lucht een relatief grote rol gaat spelen. Convectief transport van lucht ontstaat als gevolg van opwarming van bladeren en kasconstructie. Vrije convectie in een volle kas is enorm variabel en niet nauwkeurig te bepalen. Daarom hebben we een snelheid van $0.10\,m\,s^{-1}$als ondergrens voor de berekeningen gekozen.

Omdat de dikte van de grenslaag, en daarmee ook de grootte van de grenslaagweerstand, mede wordt bepaald door de bladgrootte zijn de berekeningen voor oplopende bladgroottes verricht.

Uit Tabel 2.1 blijkt dat de grenslaagweerstand *afneemt met de windsnelheid*, het sterkst bij windsnelheden tot $0.5\,m\,s^{-1}$. Daarna gaat de afname minder snel.

De weerstand *neemt toe met de bladgrootte*. Vanwege de smallere bladeren is de grenslaagweerstand bij Freesia dus veel kleiner dan bij tomaat. Dit betekent een gemakkelijker uitwisseling van CO_2 en H_2O tussen blad en omgeving. En bij lage windsnelheid zal de weerstand van de grenslaag bij Freesia minder snel een rol gaan spelen dan bij tomaat.

2.1.1 Geleidbaarheid

Tot nu toe hebben we over weerstanden gesproken omdat we daarmee een vergelijking kunnen maken met een elektrisch circuit waarin de stroom I wordt bepaald door de spanning V gedeeld door de weerstand R volgens $I = V/R$.

Weerstanden voor CO_2 transport worden niet in Ohm uitgedrukt maar in $s\,m^{-1}$. Die eenheid kan worden gezien als het omgekeerde van een snelheid: het aantal seconden dat nodig is voor een verplaatsing over 1 meter. In de literatuur en in rapporten over fotosynthese wordt ook vaak gewerkt met geleidbaarheden. De reden is dat met instrumenten zoals de LiCor-6400, geleidbaarheden voor H_2O worden gemeten en dat weerstanden daaruit moeten worden berekend.

Een geleidbaarheid is in principe niets anders dan een omgekeerde weerstand die dus

zou kunnen worden uitgedrukt in $\mathrm{m\,s^{-1}}$. In een gemeten geleidbaarheid zit echter ook een constante in $\mathrm{mol\,m^{-3}}$ verborgen en de eenheid wordt dan $\mathrm{mol\,m^{-2}\,s^{-1}}$. Een nadere toelichting hierop is te vinden in Appendix A.

2.2 Vergelijking tussen Freesia en tomaat

2.2.1 Rol van de grenslaagweerstand

In Tabel 2.2 en Tabel 2.3 zijn de gemiddelden weergegeven voor huidmondjesgeleidbaarheid $G_{\mathrm{s,H_2O}}$ voor H_2O , zoals die zijn gemeten met de LiCor6400, onder praktijkomstandigheden, en de daaruit afgeleide huidmondjesweerstand $R_{s,\mathrm{CO_2}}$ voor CO_2 .

De getallen zijn gemiddelden voor een groot aantal waarnemingen, gemeten onder verschillende omstandigheden. Bij tomaat zijn de waarden gemiddeld voor tomatenbladeren op verschillende hoogtes in het gewas en voor Freesia voor bladeren in verschillende maanden.

Om de verhouding tussen huidmondjesweerstand $R_{s,\mathrm{CO_2}}$ en grenslaagweerstand $R_{b,\mathrm{CO_2}}$ te kunnen bepalen hebben we de bladbreedte van Freesia geschat op 4 cm. Omdat tomaat een samengesteld blad heeft, wordt voor de bepaling van de grens-

Tabel 2.1. Grenslaagweerstanden $R_{b,\mathrm{CO_2}}$ in $\mathrm{s\,m^{-1}}$ berekend met (Goudriaan & van Laar, 1994, vergelijking 7.3) en een verhouding van 1.37 tussen $R_{b,\mathrm{CO_2}}$ en $R_{\mathrm{b,H_2O}}$.

windsnelheid ($\mathrm{m\,s^{-1}}$)	Bladgrootte (cm)								
	2	4	6	8	10	15	20	25	30
0.1	61	87	106	123	137	168	194	217	237
0.2	43	61	75	87	97	119	137	153	168
0.3	35	50	61	71	79	97	112	125	137
0.4	31	43	53	61	69	84	97	108	119
0.5	27	39	47	55	61	75	87	97	106
0.6	25	35	43	50	56	69	79	88	97
0.7	23	33	40	46	52	63	73	82	90
0.8	22	31	38	43	48	59	69	77	84
0.9	20	29	35	41	46	56	65	72	79
1.0	19	27	34	39	43	53	61	69	75
1.5	16	22	27	32	35	43	50	56	61
2.0	14	19	24	27	31	38	43	48	53

Tabel 2.2. Berekening van de huidmondjesweerstand $R_{s,\mathrm{CO_2}}$ uit de gemeten huidmondjes geleidbaarheid $G_{\mathrm{s,H_2O}}$ voor tomaat.

Tomaat	$G_{\mathrm{s,H_2O}}$ $\mathrm{mol\,m^{-2}\,s^{-1}}$	$R_{s,\mathrm{CO_2}}$ $\mathrm{s\,m^{-1}}$
kop	0.37	182.5
midden	0.30	225.1
onder	0.10	675.2

© 2016 Photosyntax en EcoCurves

laagweerstand niet de breedte van het totaal blad maar dat van de gedeelde blaadjes genomen. Die is ongeveer 10 cm.

Wanneer we dan voor tomaat bij een windsnelheid van $0.5\,\mathrm{m\,s^{-1}}$de grenslaagweerstand uit Tabel 2.1 ($61\,\mathrm{s\,m^{-1}}$) vergelijken met de huidmondjesweerstand uit Tabel 2.2, kunnen we constateren dat de grenslaagweerstand ongeveer 3 maal lager is dan de huidmondjesweerstand aan de kop. Verdubbelen we de windsnelheid tot $1\,\mathrm{m\,s^{-1}}$dan wordt $R_{b,\mathrm{CO_2}}$ $43\,\mathrm{s\,m^{-1}}$, ongeveer 4,5 maal lager dan $R_{s,\mathrm{CO_2}}$. Dit zal enige verhoging van de fotosynthese tot gevolg hebben maar tegelijkertijd is een windsnelheid van $1\,\mathrm{m\,s^{-1}}$erg hoog.

Voor de onderste bladeren is de huidmondjesweerstand meer dan 10 maal de grenslaagweerstand. Extra luchtbeweging heeft daar geen zin. Bovendien is de fotosynthese laag waardoor het effect van de huidmondjesweerstand op de fotosynthese erg klein is.

Voor Freesia, (Soleil en Ambiance) geldt bij een windsnelheid van $0.5\,\mathrm{m\,s^{-1}}$, gemiddeld over de seizoenen een gemiddelde grenslaagweerstand van $R_{b,\mathrm{CO_2}}$ ($39\,\mathrm{s\,m^{-1}}$) (Tabel 2.1),dat is ongeveer 5 maal lager dan $R_{s,\mathrm{CO_2}}$ uit Tabel 2.3. Meer luchtbeweging om $R_{b,\mathrm{CO_2}}$ verder te verlagen heeft bij Freesia dus geen zin.

2.2.2 Fotosynthese

We kunnen nu berekenen wat het effect is van een toename van de luchtbeweging op de fotosynthese bij een bepaalde CO_2 concentratie in de kaslucht. In Tabel 2.4 is dat voor Freesia en tomaat uitgevoerd bij een CO_2 concentratie van 400 ppm en lichtverzadiging. Boven $0.6\,\mathrm{m\,s^{-1}}$is de toename van de fotosynthese minder dan 2% bij een toename van de windsnelheid met $0.1\,\mathrm{m\,s^{-1}}$.

We zien dat voor beide gewassen de grootste winst wordt behaalt tot een windsnelheid van $0.5\,\mathrm{m\,s^{-1}}$. Onderin het gewas speelt de windsnelheid (en de grenslaagweerstand) nauwelijks een rol omdat de huidmondjesweerstand daar hoog is en het transport van CO_2 bijna geheel bepaalt. In Figuur 2.1 is het effect van de windsnelheid op de fotosynthese nog eens grafisch weergegeven.

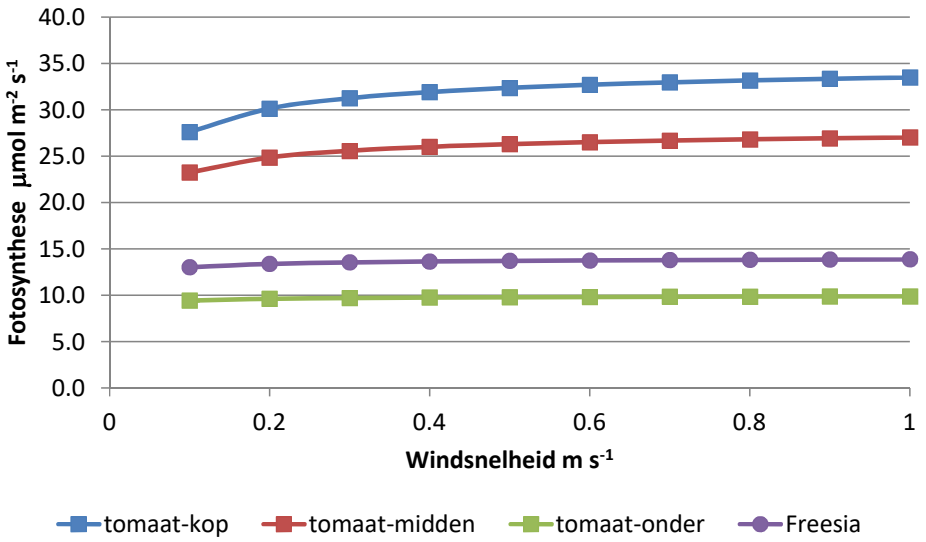
Tabel 2.3. Berekening van de huidmondjesweerstand $R_{s,\mathrm{CO_2}}$ uit de gemeten huidmondjes geleidbaarheid $G_{\mathrm{s,H_2O}}$ voor fresia.

Freesia	$G_{\mathrm{s,H_2O}}$ $\mathrm{mol\,m^{-2}\,s^{-1}}$	$R_{s,\mathrm{CO_2}}$ $\mathrm{s\,m^{-1}}$
augustus	0.20	335.1
november	0.22	301.4
februari	0.23	295.5
gemiddeld	0.22	310.7

© 2016 Photosyntax en EcoCurves

Tabel 2.4. Toename fotosynthese bij meer luchtbeweging berekend voor tomaat en fresia voor hoge instraling.

	Toename fotosynthese (%)			
Toename luchtbeweging	**tomaat** kop	midden	onder	**Freesia**
0.1 – 0.2	9.10	6.97	2.01	2.83
0.2 – 0.3	3.70	2.89	0.87	1.22
0.3 – 0.4	2.12	1.67	0.51	0.72
0.4 – 0.5	1.42	1.12	0.35	0.49
0.5 – 0.6	1.03	0.82	0.26	0.36
0.6 – 0.7	0.79	0.63	0.20	0.28
0.7 – 0.8	0.64	0.51	0.16	0.22
0.8 – 0.9	0.52	0.42	0.13	0.18
0.9 – 1.0	0.44	0.35	0.11	0.16



Figuur 2.1. Fotosynthese als functie van de luchtbeweging bij hoge instraling.

© 2016 Photosyntax en EcoCurves

Hoofdstuk 3

Gevolgen voor de opbrengst

In het vorige hoofdstuk hebben we gezien dat er bij veel licht een effect is van de windsnelheid op de fotosynthese door een afname van de grenslaagweerstand (Figuur 2.1). Dat effect is bij geringe windsnelheden het grootst. De berekeningen zijn gemaakt voor een enkel blad bij hoog licht. Dat is natuurlijk geen representatieve situatie. De hoge lichtniveau's midden op de dag in de zomer zijn lang niet altijd aanwezig en lang niet alle bladeren zijn eraan blootgesteld. Het is dan ook de vraag hoeveel er van het berekende effect overblijft als we het doorrekenen over een heel teeltseizoen.

Om daar een idee van te krijgen zijn in dit hoofdstuk voor tomaat opbrengsteffecten voor een heel groeiseizoen berekend. De berekeningen zijn gedaan aan het ras Komeett in het teeltseizoen 2010–2011. Voor een nadere toelichting op de proefomstandigheden verwijzen wij naar de analyse van deze proef in Rappoldt & Schapendonk (2012).

3.1 Een virtuele kas

De in Hoofdstuk 2 beschreven resultaten voor de huidmondjes- en de grenslaagweerstand maken ook deel uit van het Explorer Kasklimaat model voor tomaat. Dat model is een virtuele kas. Fotosynthese, groei en ontwikkeling van planten en vruchten worden gesimuleerd afhankelijk van licht, warmtestraling, CO_2 gehalte, temperatuur en vochtgehalte. Deze factoren vormen samen het kasklimaat waar de planten in leven en dit kasklimaat wordt op zijn beurt gesimuleerd in afhankelijkheid van buitenweer, raamstand, buistemperatuur, lampen, schermen en gewasverdamping.

Net zoals in een echte kas zorgt een eveneens virtuele klimaatcomputer ervoor dat het kasklimaat in de buurt van opgegeven setpoints blijft, door middel van het aansturen van de verwarming, de schermen en de ramen.

Op deze wijze wordt in tijdstappen van 5 minuten een hele teelt gesimuleerd, met bijbehorende oogsten en ingrepen zoals het vormen van extra takken of het toppen van de plant aan het eind van de teelt. Het resultaat is een opbrengst met een daarbij bijbehorend energiegebuik.

Één van de mogelijkheden die de virtuele kas biedt is het verkennen van een effect op de opbrengst. Zo'n effect van bijvoorbeeld een ander scherm, andere lampen of (in dit geval) de luchtbeweging op de gewasopbrengst wordt dan ingeschat op basis van verschillende simulaties van een heel groeiseizoen. De simulaties zijn

allemaal hetzelfde op één enkele factor na, de waarde voor de onderzochte factor, in dit geval de windsnelheid. Die wordt dus opgelegd bij de berekeningen en is dan onafhankelijk van ventilatie ten behoeve van het controleren van de RV. Op die manier wordt gekeken hoe groot het effect dan uiteindelijk is. Als het er nog steeds interessant uitziet kan worden overwogen om een proef te doen, "de proef op de som te nemen".

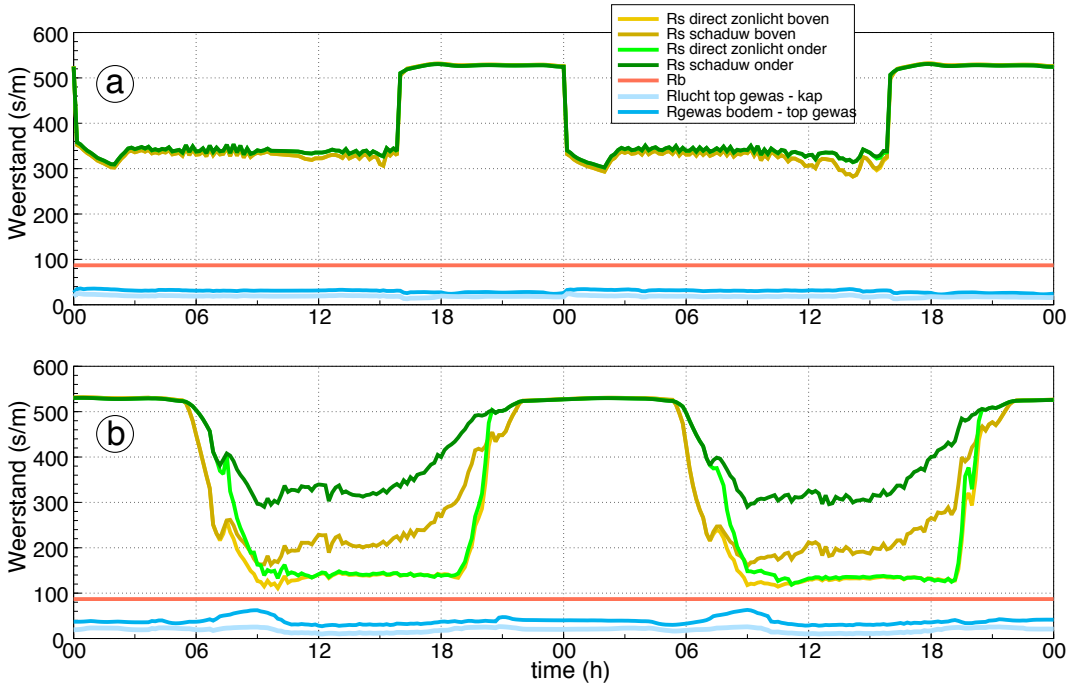
3.2 Gesimuleerde weerstanden

Allereerst bekijken we wat resultaten voor één enkele simulatie, uitgevoerd voor tomatengewas bij windsnelheid van $0.20\,\mathrm{m\,s^{-1}}$(overal in de kas gelijk) en voor een bladgrootte van 10 cm, dezelfde waarde als in sectie 2.2.1. De grafieken in Figuur 3.1 laten weerstanden zien berekend voor 16 en 17 december 2010 (Figuur 3.1a), en voor 2 en 3 juni 2011 (Figuur 3.1b).

In de grafieken is het verloop de huidmondjesweerstanden op de verschillende hoogtes geel en groen gekleurd en de grenslaagweerstand is oranje. Ook hier zien we dat de grenslaagweerstand aanzienlijk kleiner is dan de huidmondjesweerstand behalve bij veel licht, en dan alleen helemaal aan de kop van het gewas, of voor bladeren onderin die direct zonlicht invangen (dat zijn er niet veel).

De onderste, lichtblauwe curve geeft de weerstand R_{lucht} weer tussen de top van het gewas en de kap. Deze weerstand wordt bepaald door de (turbulente) luchtbeweging en is veel kleiner dan de overige weerstanden. Dat betekent dat er slechts geringe concentratieverschillen zullen optreden in de lucht boven het gewas.

De donkerblauwe curve is de weerstand R_{gewas} tussen de onder- en de bovenkant van het gewas. Deze weerstand bepaald mede het CO_2 transport naar de bovenste

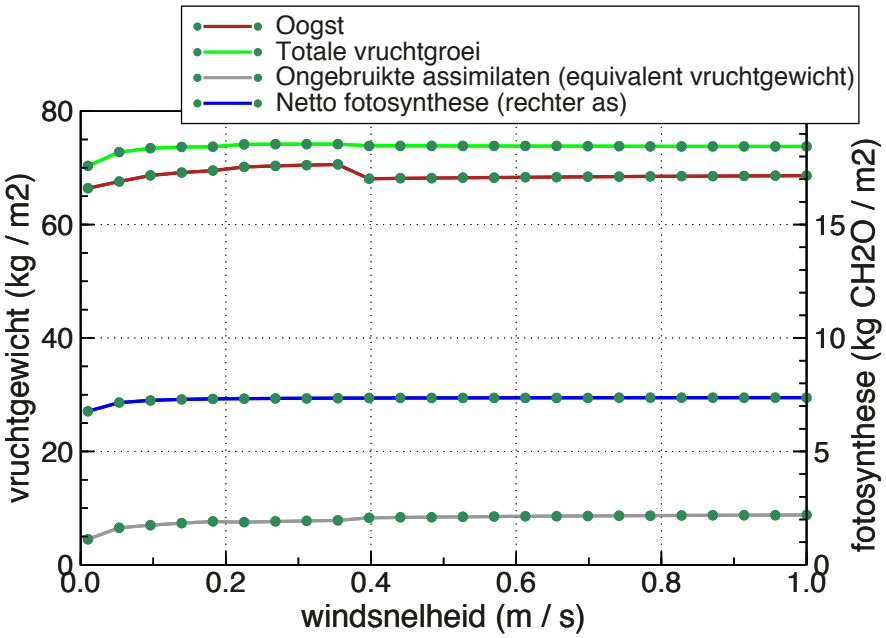


Figuur 3.1. Gesimuleerde weerstanden voor CO_2 transport (a) bij weinig licht op 16 en 17 december 2010 en (b) bij veel licht in op 2 en 3 juni 2011.

© 2016 Photosyntax en EcoCurves

bladeren, als tenminste de CO_2 onder het gewas wordt toegediend. Uit de grafiek voor 2 en 3 juni blijkt dat deze weerstand weliswaar klein is ten opzichte van de som van huidmondjes- en grenslaagweerstand, maar niet altijd verwaarloosbaar. Vooral in de zomer bij veel instraling is een geringe verlaging van de CO_2 concentratie in de top van het gewas niet uit te sluiten bij een windsnelheid van slechts $0.20\,\mathrm{m\,s^{-1}}$.

De schommelingen in de blauwe curves voor R_{lucht} en R_{gewas} worden veroorzaakt door verschillen in de temperatuurverdeling[1]. Voor een kas met ramen, lampen en verwarming zijn dergelijke effecten erg gecompliceerd en niet nauwkeurig bekend. De getoonde schommelingen vertegenwoordigen dan ook slechts een indicatie. Duidelijk is wel dat R_{lucht} en R_{gewas} in het algemeen klein zijn ten opzichte van de som van huidmondjes- en grenslaagweerstand. Daarom worden voor CO_2 alleen deze laatste twee weerstanden in rekening gebracht en is de CO_2 concentratie in de lucht van de virtuele kas overal gelijk.



Figuur 3.2. Gesimuleerd effect van de windsnelheid in de kas op de opbrengst. De beste indicatie voor het effect is de netto fotosynthese, de totale suikerproductie (blauwe curve op de rechter as). Die extra productie vertaalt zich in meer opbrengst maar ook in meer ongebruikte assimilaten door een iets lagere gewastemperatuur bij meer wind.

3.3 Gesimuleerde opbrengsten

Een hogere windsnelheid in de kas leidt tot een lagere grenslaagweerstand, tot een hogere interne CO_2 concentratie en daardoor tot een hogere fotosynthese (zie Tabel 2.4 en Figuur 2.1 voor het directe effect). We verwachten dus ook een hogere

[1] Overdag is het gewas meestal warmer dan de lucht erboven. De lucht heeft dan de neiging op te stijgen en de weerstand naar de kap is kleiner dan zonder temperatuurverschillen. In de ochtend bij oplopende temperaturen kan het ook gebeuren dat het gewas koeler is dan de lucht erboven. Dat veroorzaakt een omgekeerd effect: de transport weerstand is hoger. In de lucht tussen de bladeren (R_{gewas}) kunnen gelijksoortige effecten optreden als de bovenste bladeren afkoelen in de nacht of juist veel licht krijgen en opwarmen.

© 2016 Photosyntax en EcoCurves

opbrengst. Hoeveel hoger is echter niet zonder meer duidelijk, omdat de huidmondjesweerstand gedurende het grootste deel van de tijd de opname domineert. We hebben daarom complete teeltsimulaties gedaan voor een aantal verschillende windsnelheden en het resultaat is te vinden in Figuur 3.2.

Bij een toename van de windsnelheid van 0.1 tot 0.5 $\mathrm{m\,s^{-1}}$, neemt de netto fotosynthese toe met ongeveer 1.5%. Een hogere windsnelheid heeft echter niet alleen invloed op de fotosynthese, maar (bij ongewijzigde setpoints voor het kasklimaat) ook op de verdamping en op temperatuur van het gewas, en daardoor ook op de bladafsplitsing en het aantal bladeren en vruchten dat uiteindelijk geproduceerd wordt. Enkele van deze effecten zijn

- een 1.2% *lagere* bladafsplitsing tengevolge van de lagere gewastemperatuur,
- een 0.6% *hogere* totale vruchtgroei (de groene curve in Figuur 3.2), minder dan de toename van de fotosynthese met 1.5%,
- een 3.2% *hoger* gesimuleerd trosgewicht,
- een 21% *hogere* hoeveelheid ongebruikte assimilaten (de blauwe curve in Figuur 3.2),
- een 12% *hogere* verdamping,
- een 20% *hoger* warmtegebruik.

De genoemde percentages vertegenwoordigen geen nauwkeurige voorspellingen maar wijzen wel in een bepaalde richting. Van een effect van bijna 13% op de fotosynthese van een licht-verzadigd blad in de zomer blijft, voor het hele gewas over een heel groeiseizoen, slechts een paar procent verhoging over. Hiervoor zijn verschillende redenen te noemen. Op de eerste plaats is het effect op lagere bladlagen kleiner dan voor het topblad (2.1). Op de tweede plaats is de lichtintensiteit vrijwel nooit lichtverzadigd. Bij lagere lichtintensiteiten is het effect van de grenslaagweerstand op de fotosynthese kleiner omdat de CO_2 gradiënt kleiner is. De effecten in tabel 2.4 zijn dus maximaal te behalen waarden.

De reden dat de gewasverdamping veel meer toeneemt dan de gewasfotosynthese, bij een toename van de windsnelheid van 0.1 tot 0.5 $\mathrm{m\,s^{-1}}$, is dat de verdamping lineair toeneemt met de afname van de grenslaagweerstand, terwijl de interne CO_2 concentratie asymptotisch nadert naar een waarde die maximaal gelijk is aan de CO_2 concentratie in de kas. De toename van de fotosynthese volgt de curve van de verminderde meeropbrengst terwijl de toename in de verdamping doorloopt, totdat in het blad eenzelfde dampdruk heerst als in de kas. Bovendien loopt de verdamping, in tegenstelling tot de fotosynthese voor een deel in de donkerperiode door, waardoor het effect relatief ook groter is.

© 2016 Photosyntax en EcoCurves

Hoofdstuk 4

Conclusie

- Uiteraard moet er geventileerd worden om de luchtvochtigheid en de temperatuur op pijl te houden maar ventileren met als enig doel de fotosynthese te verhogen is zinloos.
- Menging van CO_2 boven en tussen het gewas is, bij Freesia en tomaat, snel en volledig en niet beperkend voor de fotosynthese.
- De weerstanden, die de bladfotosynthese bepalen zijn de grenslaagweerstand van het blad en de huidmondjesweerstand.
- De huidmondjesweerstand is 3 tot 8 x hoger dan de grenslaagweerstand; de huidmondjesweerstand is dus de belangrijkste regulator voor het CO_2 transport naar het fotosynthese apparaat.
- Bij tomaat is de toename van de lichtverzadigde bladfotosynthese 16% wanneer de windsnelheid langs het blad van 10 cm/s naar 50 cm/s toeneemt.
- Bij Freesia is de toename van de lichtverzadigde bladfotosynthese 4% wanneer de windsnelheid langs het blad van 10 cm/s naar 50cm/s toeneemt.
- Een luchtbeweging van 35 cm/s voor Freesia en 50 cm/s voor tomaat, vooral bovenin het gewas, is toereikend om de grenslaagweerstand zodanig te verlagen dat de fotosynthese niet beperkt wordt.
- Van het forse effect op lichtverzadigde bladfotosynthese blijft weinig over als de gewasfotosynthese wordt berekend. Het positieve effect op de productie van een heel gewas, over een heel groeiseizoen, is slechts een paar procent wanneer de windsnelheid overal in de kas van 10 cm/s naar 50 cm/s toeneemt. Een gemiddelde luchtbeweging van 20 cm/s langs de bladeren, overal in het gewas, is vermoedelijk al toereikend voor een maximaal te realiseren fotosynthese. Hier is alleen het CO_2 effect berekend. Eventuele bijkomende effecten van luchtbeweging op gewasgroei zijn niet meegewogen.
- Een grotere windsnelheid in de kas leidt tot een 12% hogere gewasverdamping en tot een hoger warmtegebruik. De consequenties voor de vochthuishouding van het gewas zijn dus een factor 10 groter dan die voor de CO_2 opname.

Referenties

Goudriaan, J., 1977. Crop micrometeorology: a simulation study. Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen. PhD thesis Agricultural University Wageningen.

Goudriaan, J., van Laar, H. H., 1994. Modelling potential crop growth processes. Textbook with exercises. Current Issues in Production Ecology, Volume 2. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

Rappoldt, C., Schapendonk, A., 2012. LED belichting en Het Nieuwe Telen ; scenario analyses tomaat. Technical report, EcoCurves, Haren. EcoCurves rapport 15, ISSN 1872-5449.

Appendices

Appendix A

Weerstand en geleidbaarheid

Transport van CO_2 wordt uitgedrukt in $\mathrm{mol\,m^{-2}\,s^{-1}}$, een hoeveelheid CO_2 per m^2 transport oppervlak en per seconde. Het oppervlak in m^2 staat daarbij loodrecht op de transport richting. Het is het oppervlak *waardoor* het transport plaatsvindt.

Het CO_2 transport is evenredig met een concentratie verschil. Concentraties gaan in mol CO_2 per mol lucht, dus een verschil tussen twee concentraties is ook een getal in mol/mol. Het transport is verder omgekeerd evenredig met de weerstand in $\mathrm{s\,m^{-1}}$. Tenslotte moet er nog een capaciteit in de formule worden opgenomen, het aantal mol in een kubieke meter gas. We krijgen dan een transport vergelijking die er als volgt uit ziet:

$$\text{Transport}\left(\frac{\text{mol}}{\text{m}^2\,\text{s}}\right) = \frac{\text{Capaciteit}\left(\frac{\text{mol}}{\text{m}^3}\right) \times \text{Concentratieverschil}\left(\frac{\text{mol}}{\text{mol}}\right)}{\text{Weerstand}\left(\frac{\text{s}}{\text{m}}\right)}.$$

Inderdaad zijn de eenheden hier links en rechts van het "=" teken hetzelfde. De misschien wat vreemde eenheid van de weerstand ($\mathrm{s\,m^{-1}}$) kan ruwweg worden gezien als het omgekeerde van een snelheid: het aantal seconden dat nodig is voor een verplaatsing over 1 meter.

De capaciteit is hier niets anders dan het aantal molen CO_2 per kubieke meter gas, dat hier als een constante kan worden beschouwd. In het geval van warmtetransport staat op deze plaats in de formules de volumetrische warmtecapaciteit.

In de literatuur en in rapporten over fotosynthese wordt vaak gewerkt met geleidbaarheden. Een geleidbaarheid is niets anders dan een omgekeerde weerstand, die dus kan worden uitgedrukt in $\mathrm{m\,s^{-1}}$. Meestal echter wordt ook de capaciteit bij de geleidbaarheid betrokken zodat de transport vergelijking er dan uit ziet als

$$\text{Transport}\left(\frac{\text{mol}}{\text{m}^2\,\text{s}}\right) = \text{Geleidbaarheid}\left(\frac{\text{mol}}{\text{m}^2\,\text{s}}\right) \times \text{Concentratieverschil}\left(\frac{\text{mol}}{\text{mol}}\right).$$

Hiermee wordt dus de geleidbaarheid gedefinieerd als de verhouding is tussen capaciteit en weerstand

$$\text{Geleidbaarheid}\left(\frac{\text{mol}}{\text{m}^2\,\text{s}}\right) = \frac{\text{Capaciteit}\left(\frac{\text{mol}}{\text{m}^3}\right)}{\text{Weerstand}\left(\frac{\text{s}}{\text{m}}\right)}.$$

Omdat het aandeel CO_2 in de lucht zo klein is worden concentraties (en verschillen in concentraties) meestal uitgedrukt in ppm, dus in miljoensten mol/mol. We zien daarom vaak geleidbaarheden in $\mathrm{mol\,m^{-2}\,s^{-1}}$ en transporten (CO_2 assimilatie !!) in $\mu\mathrm{mol\,m^{-2}\,s^{-1}}$.

photosyntax

EcoCurves

Plant Dynamics