

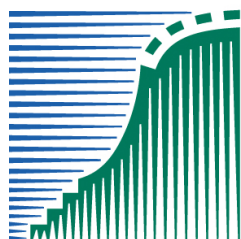
Effecten van materialen die Nabij-Infrarode straling aan het kasdek tegenhouden

Peter van Weel

Mei 2009



Wageningen UR glastuinbouw



**landbouw, natuur en
voedselkwaliteit**



Effecten van materialen die Nabij-Infrarode straling aan het kasdek tegenhouden	1
Samenvatting.....	4
1 Probleemstelling	5
2 Doelstelling	5
2.1 Technische doelstellingen	5
2.2 Energiedoelstellingen.....	5
3 De betekenis van NIR straling in de glastuinbouw	6
3.1 Wat is NIR?.....	6
3.2 Hoeveel NIR komt er op de kas?	8
3.3 Wat bereikt de plant?	11
4 De Energiebalans	14
4.1 Theorie van de wet van behoud van energie.....	14
4.2 Wat betekent dit voor een blad en een gewas?	15
5 Verwerking van stralingsenergie door gewassen in de praktijk	17
5.1 Menselijke waarneming onbetrouwbaar	17
5.2 Metingen vanuit satellieten	17
5.3 Meetapparatuur voor gebruik in kassen	20
5.4 Energiebalans toegepast op meerdere bladlagen	25
6 Veranderingen op verdamping en bladtemperatuur door NIR filtering.....	33
6.1 Wat verandert er aan het kasklimaat?	33
6.2 Wat betekent NIR filtering voor het gewas?.....	33
6.2.1 Bladtemperatuur.....	33
6.2.2 Verdamping.....	34
6.3 Hoe zou de klimaatregeling aangepast moeten worden om maximaal profijt te krijgen van NIR filtering?	35
7 Conclusies	37
8 Literatuur.....	39

Samenvatting

Het aan het kasdek tegenhouden van nabij-infrarode straling (NIR) heeft als doel om overmatige opwarming van de kas en het gewas te voorkomen. Er bestaan diverse coatings die als permanente of tijdelijke laag kunnen worden aangebracht op het kasdek of op een beweegbaar scherm. De vraag is wat het aanbrengen van dit soort filters verandert aan het klimaat in een kas. Op basis van literatuuronderzoek en de theorie van de “wet van behoud van energie” blijkt dat daar geen eenduidig antwoord op te geven valt. Vermindering van de instraling door een NIR filter levert potentieel een vermindering op van de verdamping. Omdat er door de lagere verdamping minder vocht en energie uit de kas afgevoerd dienen te worden kunnen de luchtramen enigszins dichter gehouden worden. Dat heeft een positief effect op de CO₂ concentratie. De luchttemperatuur en de bladtemperatuur zullen echter relatief hoog blijven door een verminderde luchtbeweging en afgenomen verdamping. De belangrijkste factoren die de grootte van de invloed op de planttemperatuur bepalen zijn: de LAI, de luchtbeweging, de planthoogte en de RV. Het hangt daarmee van vele (stuurbare) factoren af hoe groot en op welke plek in het gewas een verandering meetbaar zal zijn. NIR filtering zonder een aangepaste regeling schiet zijn doel dus voorbij. Een aantal van de te behalen voordelen zoals een hogere CO₂ concentratie en lagere kastemperaturen zijn ook haalbaar met andere methoden zoals verneveling in combinatie met een goede raamstandregeling. In dat geval komt er netto meer PAR licht in de kas. Een goede kostenafweging is daarom noodzakelijk.

1 Probleemstelling

Het meer gesloten houden van luchtramen levert belangrijke voordelen op zoals een lager energieverbruik en een hogere CO₂ concentratie. Om dat doel te bereiken zonder of met beperkte inzet van koelapparatuur kan het verlagen van de instraling nuttig zijn. Bij gebruik van een traditioneel zonwerings scherm gaat echter ook een belangrijk deel van het PAR licht verloren, terwijl er wel een voldoende hoge CO₂ concentratie aanwezig is om alle licht te benutten. Door gebruik te maken van een scherm bestaande uit lichtdoorlatende folie waarop een NIR reflecterende coating is aangebracht ontstaat de mogelijkheid om een deel van de warmtestraling te weren met behoud van zoveel mogelijk groeilicht. In tegenstelling tot een krijtscherm kan dit naar behoefte worden ingezet. Ook kan het dienst doen als energiescherm, zolang de vochtdoorlatendheid voldoende is of vocht afvoer op een andere wijze is verzekerd. Boven het scherm kan met behulp van een nevelinstallatie additioneel warmte worden afgevoerd of zelfs verzameld.

2 Doelstelling

2.1 Technische doelstellingen

Haalbaarheidsstudie naar het perspectief van een nieuw NIR-reflecterend scherm en de bijdrage aan de vermindering van de koellast in een (semi-)gesloten kas. Bepaal de bruikbaarheid en de technische specificaties.

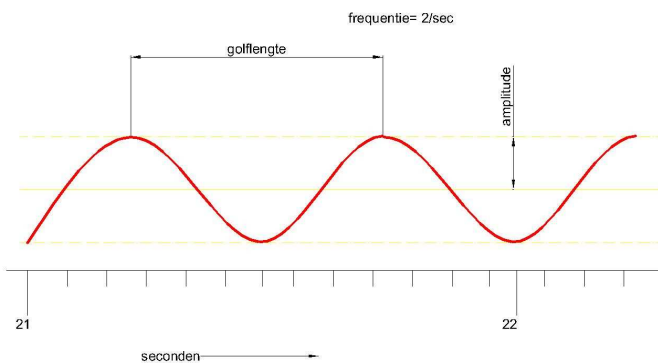
2.2 Energiedoelstellingen

1. Een scherm dat 25% van de NIR straling reflecteert en PAR licht voor 85% doorlaat verlaagt de koellast die benodigd is om de ramen zoveel mogelijk te sluiten met ongeveer 11%. Bij een instraling van 700 W/m² betekent dit een bijdrage van 80 W/m². Daarvoor is geen hulpenergie nodig.
2. Bij die instraling wordt er normaal gesproken volop gelucht waardoor de meeste gedoseerde CO₂ naar buiten verdwijnt. Door de afname van de af te voeren hoeveelheid energie kan wellicht ook de uitstoot van CO₂ worden verminderd.

3 De betekenis van NIR straling in de glastuinbouw

3.1 Wat is NIR?

NIR betekent Near Infrared Radiation en is onderdeel van het spectrum van zonlicht. Licht bestaat uit fotonen, deeltjes met een hoeveelheid energie maar vrijwel zonder massa die zich als een soort watergolven verplaatsen. Deze elektromagnetische golven hebben drie eigenschappen: de afstand tussen twee golven: *de golflengte*, het aantal golven dat per seconde een vast punt passeert: *de frequentie* en de hoogte van de golf: *de amplitude*.



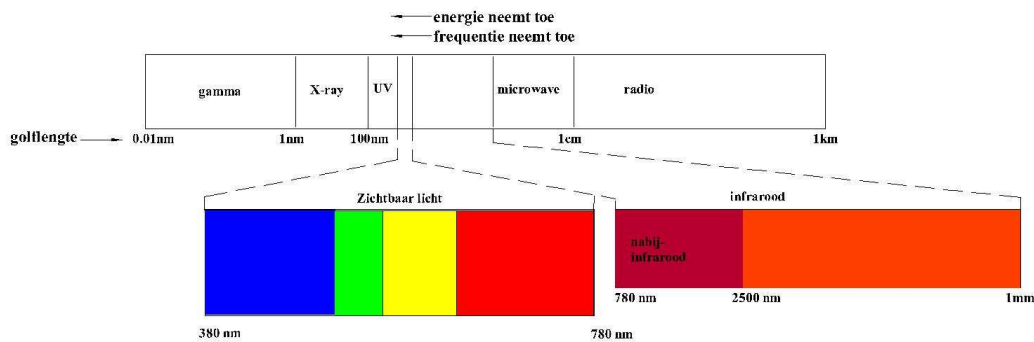
Figuur 1: eigenschappen van een lichtgolf

Elektromagnetische golven verplaatsen zich altijd met dezelfde snelheid door een ruimte. Daarom is er een vast verband tussen de golflengte (λ) en de frequentie (f). Een golf transporteert in feite dus fotonen met een energie-inhoud en deze neemt toe als de golflengte kleiner wordt. Als een foton een oppervlak raakt kunnen er in principe 3 effecten optreden:

1. het wordt gereflecteerd, dus teruggekaatst: er gebeurt niets met de energie.
2. het wordt geabsorbeerd, de energie wordt opgenomen in het materiaal
3. het wordt doorgelaten (transmissie), de energie wordt doorgelaten.

Meestal treedt er een combinatie van deze 3 dingen op. Bijvoorbeeld bij een blad reflecteert een deel, wordt een deel geabsorbeerd waardoor het blad warmer wordt en wordt een deel doorgelaten (naar het volgende blad of de bodem). Het hangt heel erg van de eigenschappen van een object af in welke verhouding dit gebeurt en bovendien is het voor elke golflengte anders.

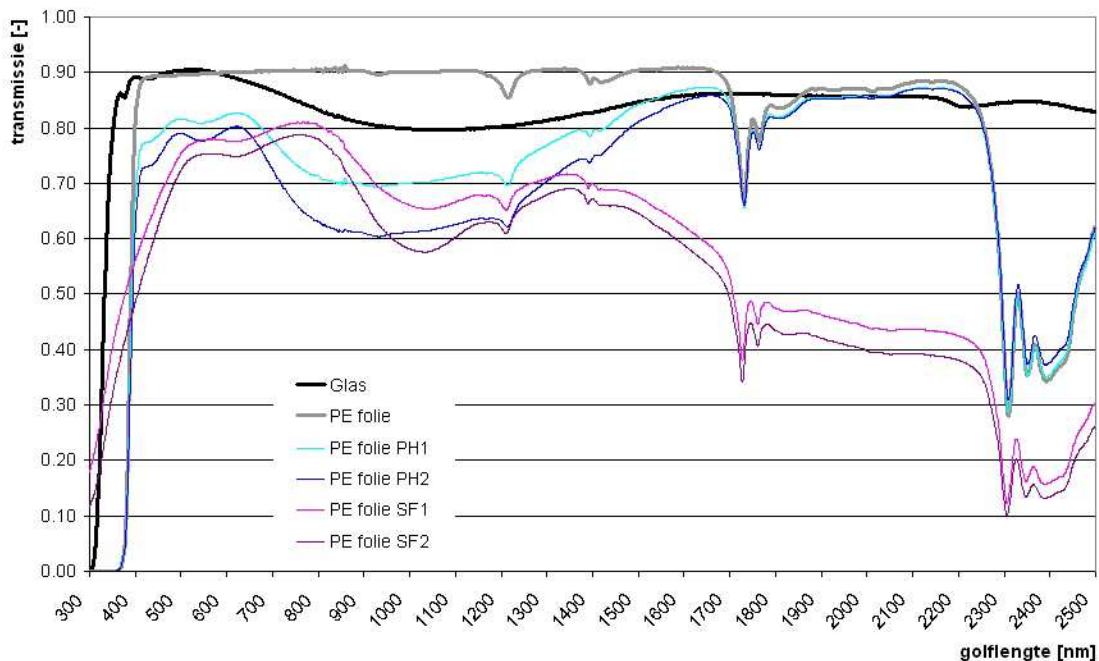
Licht bestaat uit een mengsel van een groot aantal elektromagnetische golven met een breed spectrum aan golflengten. Zonlicht bevat alle golflengten zoals aangegeven in figuur 2.



Figuur 2: De golflengten van zonlicht.

Inzet: zichtbaar licht 380nm-780nm en infrarood 780nm - 1 cm.

Binnen het zichtbare licht bestaat een gebied dat door de plant benut wordt bij de fotosynthese, het zogenaamde Photosynthetic Active Radiation (PAR) gebied van 400-700nm. De infrarode straling bestaat uit fotonen met een golflengte tussen 780nm en 1cm. Het eerste deel daarvan tussen 780 en 2500nm draagt het meeste bij aan de opwarming van het blad en dat noemen we nabij infrarode straling ofwel, NIR. Glas en plastic hebben de eigenschap dat ze de golflengten tussen 400 en 2500nm vrijwel niet absorberen, maar voor het grootste deel doorlaten, dus transparant zijn voor zowel PAR als voor NIR. Wel wordt een klein deel gereflecteerd. Hoe groot dat deel is hangt onder andere af van de zonnestand, hoe lager, hoe meer reflectie.



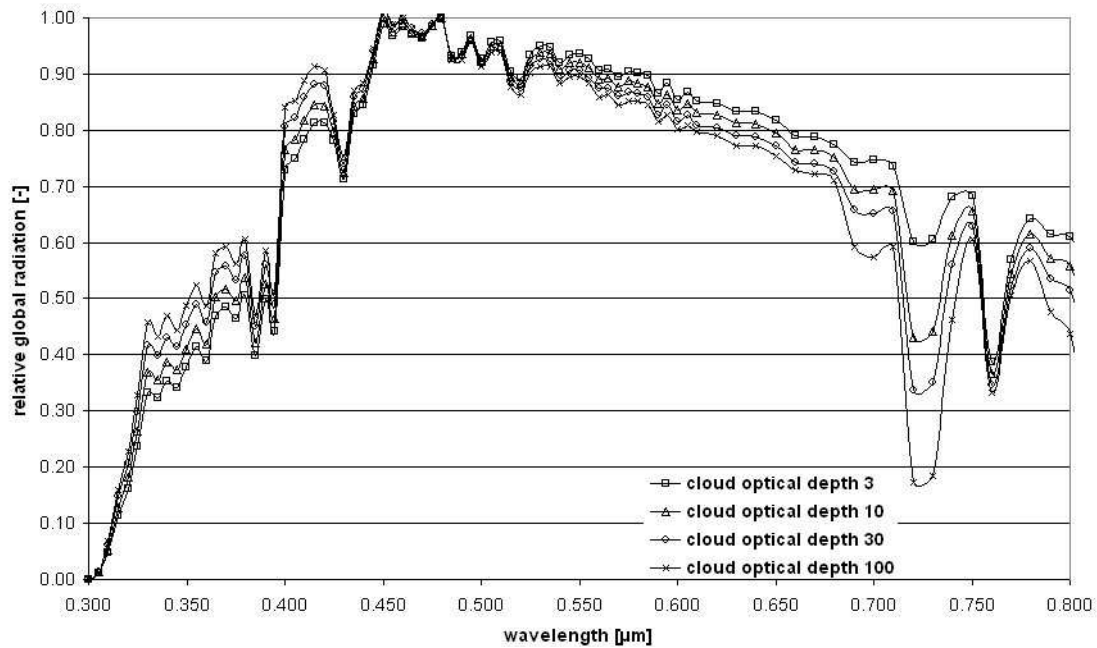
Figuur 3: Spectrale transmissie van tuinbouwglas, PE folie en PE-folie met NIR-reflecterende en NIR-absorberende pigmenten (bron: vd Braak et al, 2005).

Voor een standaard kas met glazen dek wordt ongeveer 88% doorgelaten in het PAR gebied en 80% in het NIR gebied (figuur 3). Dat licht komt voornamelijk op de planten terecht. Een deel daarvan wordt door het bladerdek gereflecteerd en verdwijnt deels weer naar buiten, maar ook naar naastgelegen planten of constructiedelen. Een groter deel van het binnenkomende licht wordt door het blad geabsorbeerd, of naar de

eronder gelegen bladeren of de grond doorgelaten (transmissie). Bij absorptie van het foton wordt de energie-inhoud van het foton omgezet in fotosynthese of warmte. De hoeveelheid transmissie is afhankelijk van de bladdikte en de absorptie-eigenschappen van het blad. Hoeveel straling er uiteindelijk nog op de bodem terecht komt, is afhankelijk van de absorptie eigenschappen en het aantal bladlagen waar het licht doorheen moet. Bovendien wordt daar nog de energie aan toegevoegd die via reflectie of door ongehinderde doorgang de bodem bereikt. Hoewel de aandacht hier nu specifiek op het nabij infrarode deel wordt gericht moet bedacht worden dat dezelfde redenering ook geldt voor alle andere golflengten van het doorgelaten zonlicht, dus ook voor het zichtbare licht, of het PAR licht. Specifiek ten aanzien van PAR fotonen geldt dat slechts een klein deel van de energie (10%) in het blad wordt verbruikt door fotosynthese. Verreweg het grootste deel van PAR fotonen wordt echter net als de infrarode fotonen in warmte omgezet en dankzij de hoge energie-inhoud van de fotonen in het PAR gebied veroorzaakt dat een niet onaanzienlijk deel van de totale opwarming van het blad. De fotonen in het NIR gebied die door het blad geabsorbeerd worden dragen niet bij aan de fotosynthese maar alleen aan een verdere temperatuurverhoging van het blad. Stel dat die temperatuurverhoging ongewenst is. Dan zal vermindering van het aantal fotonen uit het NIR deel dat het blad weet te bereiken de beste weg zijn om minder warmte naar het blad te brengen. Dat geldt zeker niet voor de situaties waarin de kas verwarmd moet worden om een zekere bladtemperatuur te handhaven, maar mogelijk wel in situaties met teveel instraling. In dat geval zou het tegenhouden van NIR straling aan het kasdek mogelijk kunnen leiden tot lagere bladtemperaturen. Maar is dat ook zo? Om daar een antwoord op te vinden is het noodzakelijk meer te weten over hoe een bladtemperatuur tot stand komt en hoe deze eventueel kan worden beïnvloed.

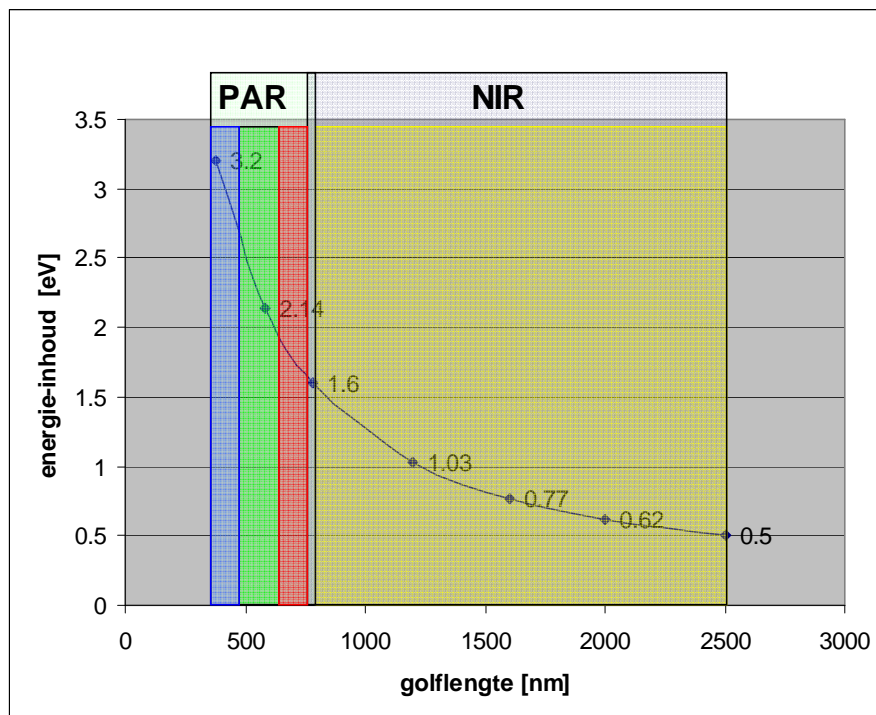
3.2 Hoeveel NIR komt er op de kas?

De verdeling van het aantal fotonen dat in de verschillende golflengten de oppervlakte van de aarde bereikt is afhankelijk van de zonnestand en de hoeveelheid en de soort bewolking. In het bijzonder het water, zuurstof en CO₂ in de atmosfeer absorberen of reflecteren specifieke golflengten, ook in het NIR gebied. Voor dagen met bewolking ziet de verdeling er voor PAR ongeveer uit als in figuur 4.



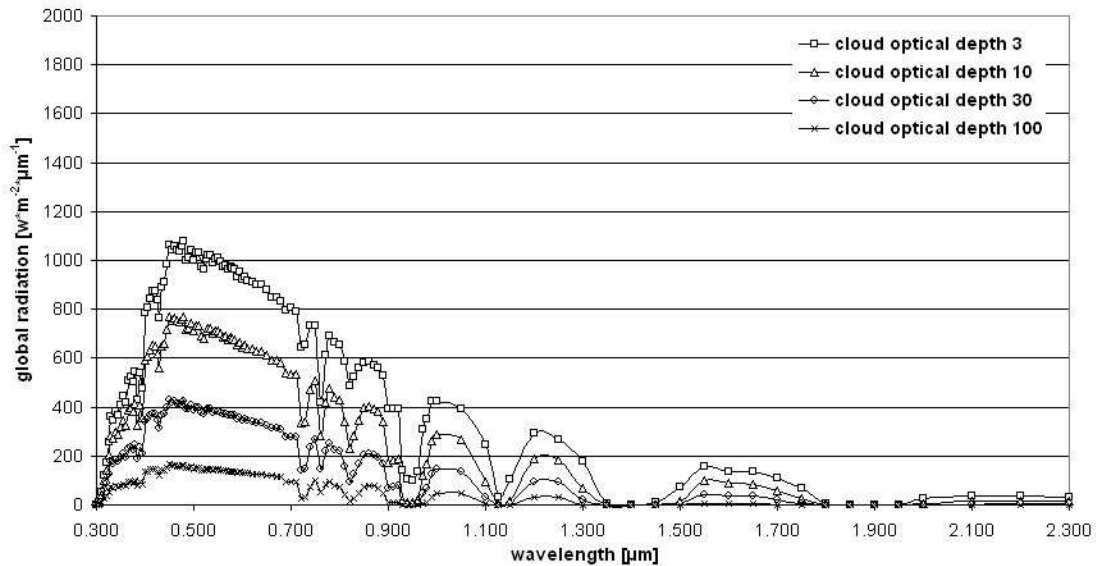
Figuur 4: Relatieve verdeling van de globale straling in het PAR gebied met verschillende bewolgingsgraden (cloud optical depth 10 = licht bewolkt, 30 = bewolkt, 100= sterk bewolkt) [bron: vd Braak et al 2005]

De fotonen die het aardoppervlak bereiken vertegenwoordigen een bepaalde energie-inhoud die afhankelijk is van de golflengte. In figuur 5 is te zien dat licht in het zichtbare PAR gebied meer energie bevat dan het NIR licht. Blauw licht is energierijker dan rood licht en NIR rondom 1000 nm bevat twee keer zoveel energie als NIR rondom 2000 nm.



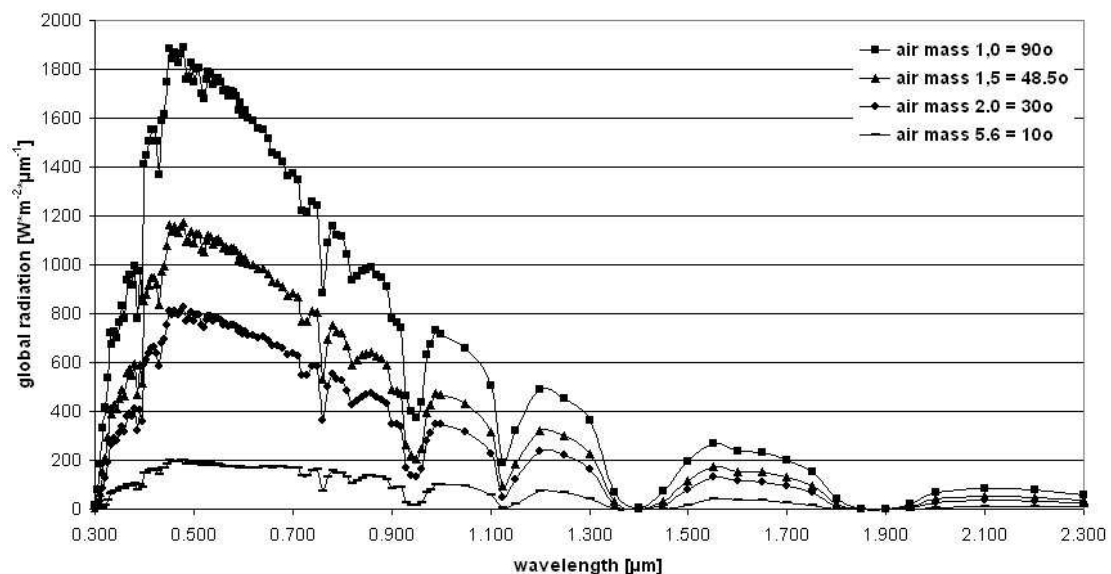
Figuur 5: De energie-inhoud van fotonen in het PAR en het NIR gebied.

De totale hoeveelheid energie die per golflengte de aarde bereikt bestaat uit het aantal fotonen maal de energie-inhoud per foton. In figuur 6 is voor verschillende bewolgingsgraden weergegeven hoe de energieverdeling er voor het PAR+NIR gebied globaal uit ziet bij verschillende maten van bewolking. Daarin valt op dat sommige golflengten nauwelijks nog aanwezig zijn, vooral geabsorbeerd of gereflecteerd door water in de atmosfeer.



Figuur 6: Energie-inhoud van de globale straling als functie van de golflengte met verschillende bewolgingsgraden (cloud optical depth 10 = licht bewolkt, 30 = bewolkt, 100= sterk bewolkt)[bron: PT/LNV rapport 505]

Voor een onbewolkte dag ziet dit plaatje er in principe niet veel anders uit, maar de zonnestand heeft wel grote invloed op de totale hoeveelheid energie die het aardoppervlak bereikt.

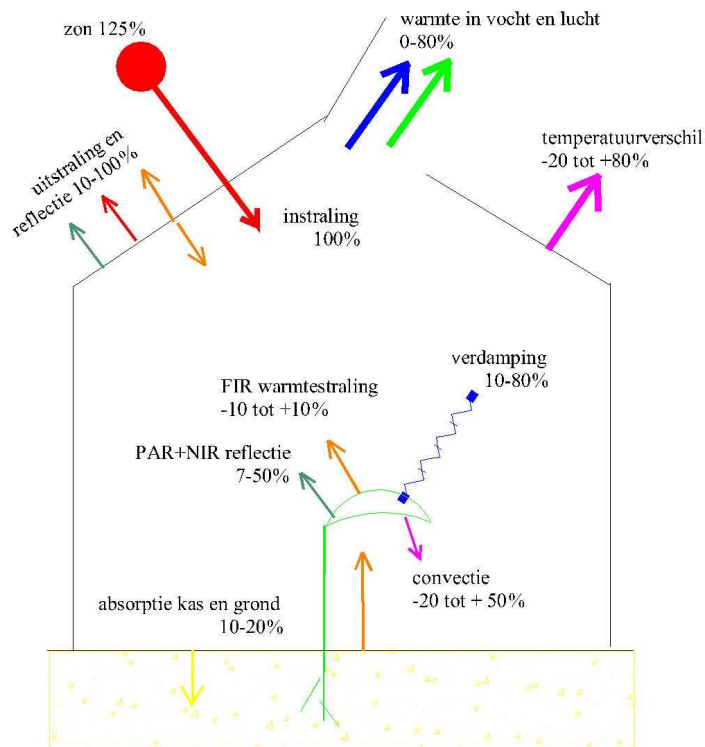


Figuur 7: Energie inhoud van de globale straling als functie van de golflengte zonder bewolking bij verschillende zonnestanden tijdens het seizoen (air mass 1.5 komt overeen met een heldere zomerdag in Nederland, air mass 5.6 komt overeen met een heldere winterdag in Nederland)

Dit zijn dus de hoeveelheden energie die het kasdek bereiken. Omdat glas vrijwel transparant is voor alle golflengten, met uitzondering van de langgolelige infrarode straling tussen 5.000 en 50.000 nm, zal dit ook de verdeling in de kas zijn. Deze straling wordt in de kas deels gereflecteerd door de bovenste bladeren en de zichtbare bodem. Het overige deel wordt geabsorbeerd door alles wat zich in de kas bevindt en omgezet in temperatuurstijging, verdamping en langgolelige infrarode straling. In de grafieken valt op dat de verhouding energie-inhoud PAR en NIR in het zonlicht dat het kasdek bereikt niet constant is. Bij lagere zonnehoeken en bij minder bewolking vertegenwoordigt het NIR deel een groter percentage van de totale energie-inhoud. Variërend tussen een verhouding PAR/NIR van ongeveer 50%-50% tot 60%-40%.

3.3 Wat bereikt de plant?

Voor een goede klimaatregeling en het beoordelen van het effect op het gewas van filters die het NIR spectrum absorberen of reflecteren is het noodzakelijk te weten welk deel van de lichtenergie waar terechtkomt in de kas en waar deze achterblijft. Zowel PAR als NIR dragen bij aan een opwarming van het blad maar daarbij moet wel worden bedacht dat de bladtemperatuur uiteindelijk een resultante is van hoe de energie wordt toegevoerd en gelijktijdig afgevoerd. Planten voeren de hoeveelheden stralingsenergie vooral af door convectie en verdamping van water. Is het nu zo dat vermindering van de stralingsom door een NIR filter leidt tot een verandering van de plantreactie als gevolg van minder verdamping of een lagere bladtemperatuur? De wet van behoud van energie hier nu verder “de energiebalans” genoemd vertelt ons dat energie niet verloren kan gaan noch uit het niets kan ontstaan. Vrij vertaald betekent dit dat de hoeveelheid energie die op een plant terechtkomt gelijk is aan de energie die daar op enige wijze weer bij vrij komt. Het huidmondje speelt een enorm belangrijke rol in het bepalen in welke vorm de stralingsenergie van de zon of van een lamp of verwarmingsbuis weer afgegeven wordt aan de omgeving. Het onderstaande schema helpt ons om de verschillende vormen waarin die energie weer vrijkomt te herkennen. Daarin zijn zowel de interne als de externe energiestromen van de kas aangegeven.



Figuur 16: Globale energiestromen in en buiten een kas.

Globaal spelen binnen in de kas de volgende stromen een rol: verdamping, convectie, straling, reflectie en groei. De bijdrage van de verschillende componenten is als volgt.

- De grootste afvoerstroom is gewoonlijk de verdamping, voor een vol verdampend tomatengewas is deze bijdrage al 80%.
- De tweede belangrijke afvoerstroom is convectie. Daarbij speelt de bladtemperatuur een belangrijke rol. Ligt die boven de ruimtetemperatuur dan zal er dankzij het grote bladoppervlak relatief veel warmte naar de omgeving afvloeien, eventueel nog verder vergroot door extra luchtbeweging. Bij een sterk verdampend gewas ligt de bladtemperatuur echter meestal iets onder de ruimtetemperatuur en neemt het blad zelfs warmte op uit de omringende kaslucht.
- De stralingsoverdracht bestaat uit twee componenten, de directe reflectie van zonlicht door het blad en de afgifte van warmtestraling naar de omgeving. Bij veel licht is de omgeving meestal warm en levert de warmtestraling maar een kleine bijdrage. Hoe groot de reflectie is moet voorlopig als onbekend worden verondersteld omdat dit afhankelijk is van het soort blad en de bladstand. De schattingen over welk percentage gereflecteerd wordt lopen uiteen tussen 7% en 50%. Vooralsnog wordt in de rekenmodellen van 7% uitgegaan (defaultwaarde voor verschillende gewassen volgens Marcelis et al 1998 *Scientia Horticulturae* 74_1998.83–111).
- Een deel van de energie wordt opgeslagen in de kas en de kasgrond. De hoeveelheid is mede afhankelijk van de afdekking van de grond tegen verdamping en het al of niet reflecterend zijn van die afdekking. Juist in het geval van de NIR huishouding speelt de grond mogelijk een grote rol. PAR wordt immers grotendeels geabsorbeerd door het gewas.

- Op de totale energieomzetting speelt de groei een beperkte rol, omdat het aandeel klein is (ongeveer 5%).

4 De Energiebalans

4.1 Theorie van de wet van behoud van energie

De energiebalans (Voogt en van Weel, 2008 en Schmidt, 2008) blijkt een goed middel te zijn om inzicht te krijgen in de manier waarop een blad of een bladlaag de toegevoerde energie van de zon omzet.

De basis vergelijking voor de energie balans is:

$$R_n = lE + Q + G \quad \text{[Formule 1]}$$

Waarbij R_n is de door het gewas geabsorbeerde straling, lE de latente warmteoverdracht (verdamping), l de verdampingswarmte voor water en E de evapotranspiratie (totale verdamping inclusief de grond), Q de voelbare warmteoverdracht (convectie op basis van temperatuurverschil) en G de warmteoverdracht via langgolvlige warmtestraling naar de bodem en de kasomhulling. De convectieve warmteoverdracht Q kan worden berekend met de formule:

$$Q = h (T_k - T_g) \quad \text{[Formule 2]}$$

Daarin is h de effectieve warmteoverdrachtcoëfficiënt tussen gewas en omgeving in $W/m^2 \cdot K$, T_k de temperatuur van de kaslucht en T_g de temperatuur van het gewas.

Deze laatste kan met een infrarood camera worden gemeten.

De coëfficiënt h is strikt genomen een buitengewoon complexe en ook dynamische factor die van vele zaken afhankelijk is waaronder de luchtsnelheid rondom en tussen de planten, het aanwezige bladoppervlak, verschillen in temperatuur tussen verschillende bladlagen, enz.

In de praktijk blijkt echter dat voor een wat groter volume gewas/lucht deze h voor de bovenste bladlaag gemiddeld een redelijk constante waarde heeft.

De langgolvlige straling G is afhankelijk van het temperatuurverschil tussen blad en het kasdek of de grond. Bij veel instraling is dit temperatuurverschil meestal erg klein. In de nacht bij een koude hemel kan dit verschil wel groot zijn, maar dan sluiten we vaak een schermdoek en bovendien is er dan erg weinig energietoevoer naar het blad zodat de verdamping altijd al erg laag is en de huidmondjes vrijwel dicht staan. Een eventueel temperatuurverschil tussen het gewas en de bodem zal in de nacht wel grote invloed hebben. Overdag kunnen we de factor G verwaarlozen als grote invloedsfactor op de verdamping.

Op basis daarvan kan de verdamping E gevonden worden met de volgende formule:

$$E = \frac{R_n - h(T_k - T_g)}{l} \quad \text{[Formule 3]}$$

Daarmee is de basis gelegd voor een model van de huidmondjesgeleiding afgeleid van de energiebalans die o.a. is bepaald uit de gemeten bladtemperaturen. Volgens de eerste wet van Fick is het damptransport door diffusie te berekenen met de formule:

$$E = D_w * dW_x / dx \quad \text{[Formule 4]}$$

Waarin D_w = de diffusie coëfficiënt, dW_x = het concentratie verschil (voor en achter het huidmondje), dx = de transportafstand.

Omdat de tuinbouw gewend is te rekenen in dampdruk heeft het zin om deze formule om te bouwen tot een formule voor massatransport op basis van drukverschillen. Dat geeft het volgende resultaat:

$$E = g_{tr} (\chi_{eff} - \chi_a) \quad \text{[Formule 5]}$$

Het verschil tussen, χ_{eff} de dampdruk van het blad en χ_a de dampdruk van de kaslucht noemen we het dampdrukverschil ofwel VPD_{gewas} (Vapour Pressure Difference), niet te verwarren met vochtdeficit, want dat is de hoeveelheid vocht in grammen die kaslucht bij een bepaalde temperatuur nog zou kunnen opnemen.

Combinatie van de formules 3 en 5 levert dan de volgende formule voor de huidmondjes geleiding g_{tr} op:

$$g_{tr} = \frac{R_n - h(T_k - T_g)}{l * VPD_{gewas}} \quad \text{[Formule 6]}$$

4.2 Wat betekent dit voor een blad en een gewas?

Wat betekenen deze formules nu in de praktijk en specifiek voor de invloed van de NIR straling op bladtemperatuur of verdamping?

1. De potentiële verdamping is volledig afhankelijk van de hoeveelheid energie die netto door het blad geabsorbeerd wordt [formule 1]. De werkelijke verdamping is vervolgens afhankelijk van de stand van het huidmondje en het heersende dampdrukverschil over het huidmondje [formule 5].
2. De netto geabsorbeerde energie is mede afhankelijk van het temperatuurverschil tussen kaslucht en blad. Dat temperatuurverschil wordt voornamelijk bepaald door de verdamping en de lichtsnelheid rondom het blad. Een sterk verdampend gewas is kouder dan de omgeving en zal netto extra warmte absorberen bovenop de instraling. Een slecht verdampend gewas kan meerdere graden warmer zijn dan zijn omgeving. Maar dankzij het hele grote bladoppervlak ($LAI=3$ geeft 6 m^2 oppervlak dat warmte uitwisselt omdat beide zijden van het blad meetellen) en mogelijke luchtbeweging wordt een groot deel van de instraling afgevoerd via convectie [formule 3].
3. Bij lagere instraling zal daarom netto de som van verdamping en convectie lager zijn en wel in gelijke mate als de afname in geabsorbeerde instraling. Bij

een ideaal NIR filter verandert er niets aan de hoeveelheid geabsorbeerde PAR straling. Het hangt dus heel sterk van de hoeveelheid absorptie van NIR straling door het blad af hoeveel de som van verdamping en convectie zal verminderen.

4. Het totaal van verdamping en convectie kan dus in principe naar beneden. Maar de plant is daar niet aan gehouden. Immers, als er voldoende water beschikbaar is zal de plant misschien juist geneigd zijn om de huidmondjes verder open te zetten waardoor de verdamping als gevolg van het natte bol effect toeneemt en de bladtemperatuur dus daalt ten opzichte van de kasttemperatuur en de convectie stroom naar het blad toe toeneemt. Op die manier kan de kasttemperatuur dalen (de kas wordt gekoeld door het gewas). De plant kan (minder) inkomende straling uitwisselen tegen (meer) convectie. Het is dus helemaal niet gezegd dat de verdamping afneemt als gevolg van de NIR filtering, en zeker niet dat dit evenredig zou moeten zijn. Maar in het geval besloten wordt om de ramen dicht te houden zal de convectie juist afnemen door verminderde luchtbeweging. Het hangt vervolgens van de stand van de huidmondjes af of zich dit vertaalt in een toegenomen verdamping of een hogere bladtemperatuur. Zolang we de stand van het huidmondje niet kennen zal een inschatting van het netto effect van NIR-filtering daarom moeilijk zijn. Omdat deze energiesom afneemt, zal de bladtemperatuur een andere waarde kunnen krijgen. Uit formule 3 kan wel worden afgeleid wat de nieuwe planttemperatuur zal zijn als we de kasttemperatuur zouden kennen. Nu blijkt in de praktijk (Kempkes, 2008) dat de kasluchttemperatuur onder invloed van schermen nauwelijks verandert. Dat komt omdat er door de regeling van de raamstand meestal een streefwaarde wordt gerealiseerd. In dat geval zal bij een NIR filter minder energie afgevoerd te hoeven worden wat zich vertaalt in een iets kleinere opening van de luchtramen. Formule 3 kan ook als volgt worden geschreven:

$$T_g = T_k + \left(\frac{E * l}{h} - \frac{R_n}{h} \right)$$

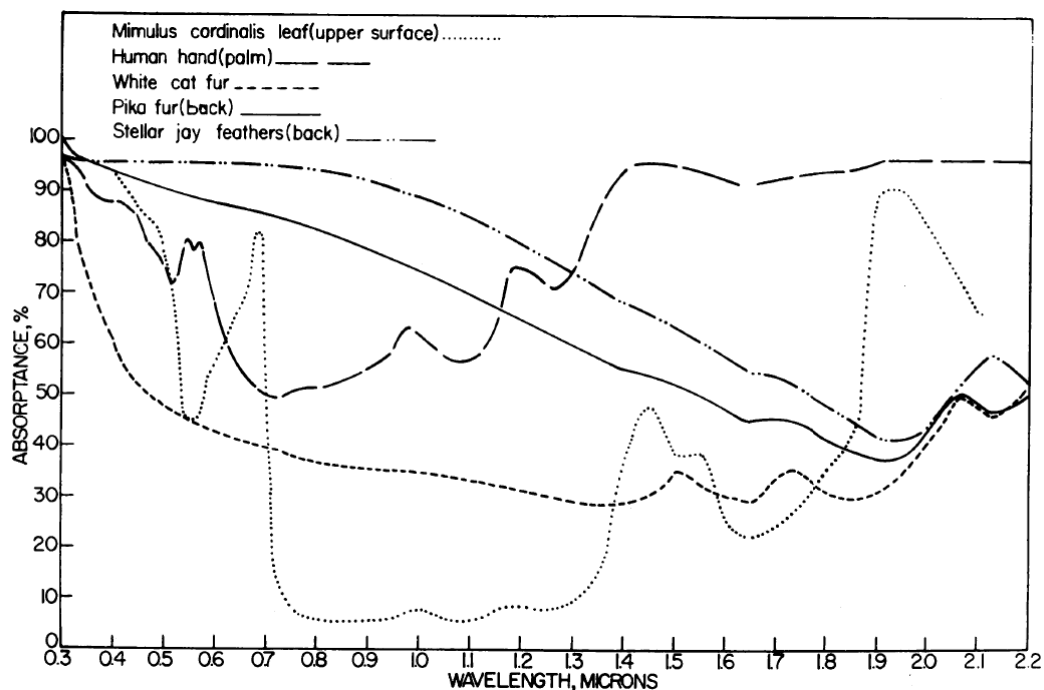
Neemt de geabsorbeerde straling met bijvoorbeeld 15% af zoals in het eerder uitgewerkte voorbeeld dan zal dat leiden tot een gewastemperatuur die dichterbij de kasluchttemperatuur ligt, omdat in de nieuwe situatie geldt:

$$T_g = T_k + 0,85 * \left(\frac{E * l}{h} - \frac{R_n}{h} \right)$$

5 Verwerking van stralingsenergie door gewassen in de praktijk

5.1 Menselijke waarneming onbetrouwbaar

Om een indruk te krijgen van de netto toegevoerde energie op een gewas moeten we eerst weten hoeveel straling er direct wordt gereflecteerd. Dat zal voor iedere golflengte anders zijn en daarom is het effect op de totale hoeveelheid energie die wordt afgekaatst mede daarvan afhankelijk. Omdat een deel van de straling wordt doorgelaten, ook hier voor elke golflengte weer een ander deel, is het van belang om ook die component te weten. Daarbij moet niet naar een enkel blad maar naar een geheel gewas, inclusief zichtbare kasgrond gekeken worden. De menselijke waarneming met zintuigen volstaat niet om de effecten van zonlicht op de plant te beoordelen. Daarvan geeft de onderstaande grafiek waarin de geabsorbeerde straling in het PAR en NIR spectrum is weergegeven een duidelijk beeld. De menselijke huid absorbeert veel meer straling in het NIR gebied dan een plant.



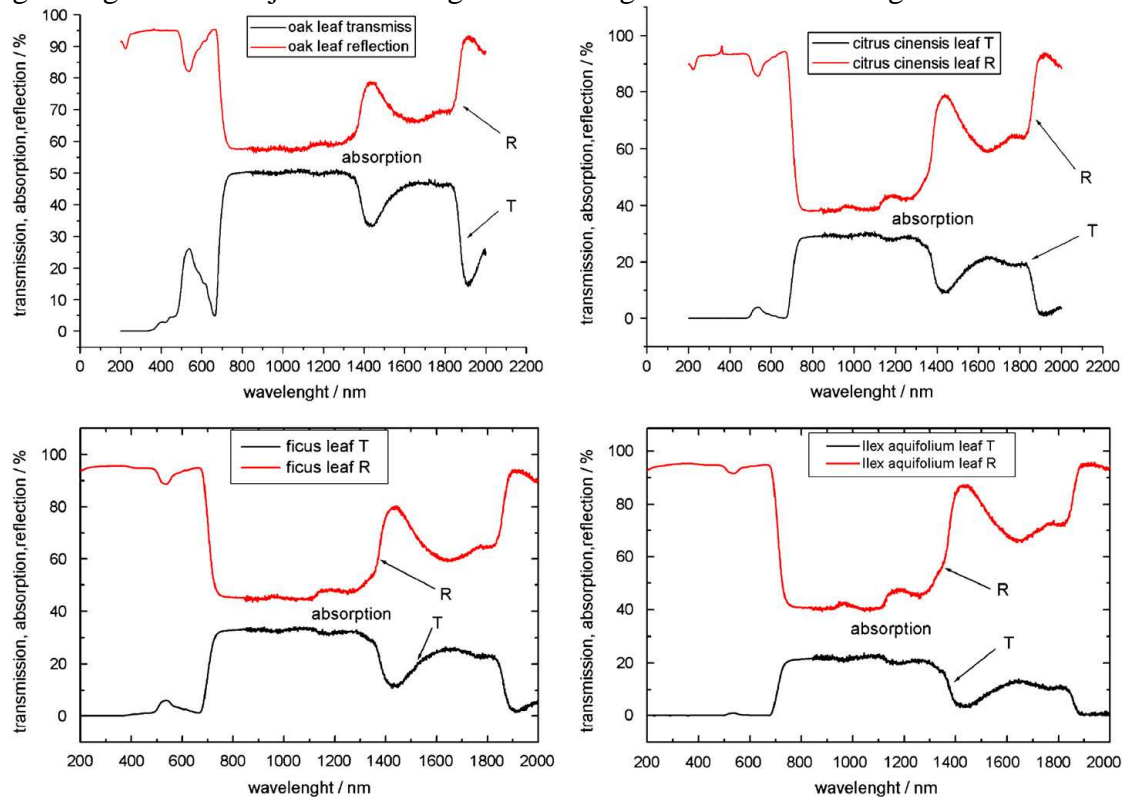
Figuur 8: Percentage absorptie van zonlicht tussen 300-2200 nm voor mens (— — —), dier en plant (.....). (Gates, 1968)

5.2 Metingen vanuit satellieten

Als we de reactie van planten op NIR willen bestuderen zullen we dus specifiekere metingen moeten maken. Het is zelfs zo dat de absorptie per soort plant anders is en ook afhankelijk van het ontwikkelingsstadium van een plant.

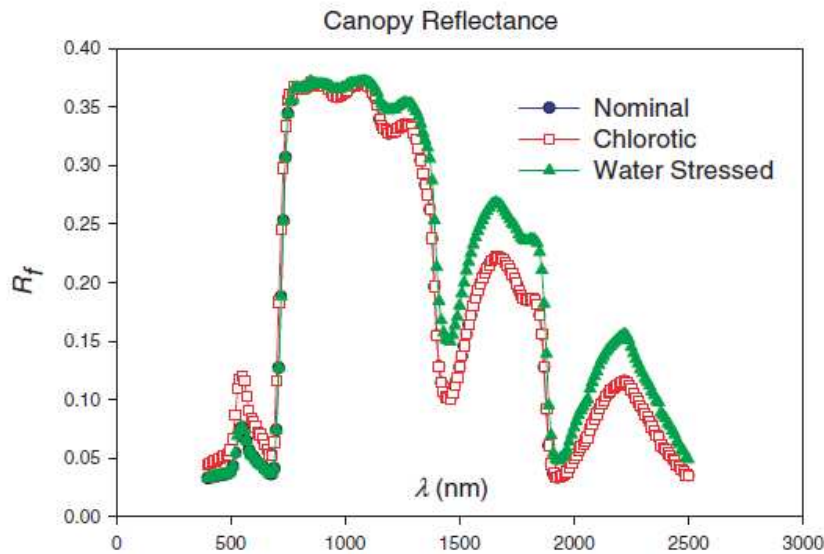
In figuur 9 zijn de mate van reflectie en transmissie weergegeven (Henrion 2008) voor 4 soorten bomen die vanuit de ruimte, dus zonder een kas erboven, zijn gefotografeerd. De ruimte tussen de rode en de zwarte lijn is de hoeveelheid straling die geabsorbeerd wordt. Daarin valt op dat er verschillen zijn tussen soorten. De tropische planten citrus en hulst reflecteren meer NIR licht in de lagere golflengten (780-1300) dan de eik. De laatste is duidelijk meer aangepast aan gematigde

klimaatzones. Verder valt op dat de absorptie in het NIR gebied vooral groot is rondom twee specifieke golflengten namelijk 1450nm en 1900 nm. Die twee banden zijn niet toevallig, het zijn de banden waar NIR in water geabsorbeerd wordt. Met andere woorden niet alle NIR golflengten worden evenveel geabsorbeerd, de meeste golflengten worden juist voor het grootste deel gereflecteerd of doorgelaten.



Figuur 9: Transmissie [T], absorptie en reflectie [R] voor oak (eik), citrus, ficus en ilex (hulst). $R+T+absorptie = 100\%$ (Henrion, W. en H. Tributsch. Optical solar energy adaptations and radiative temperature control of green leaves and tree barks. 2008, figuur 5)

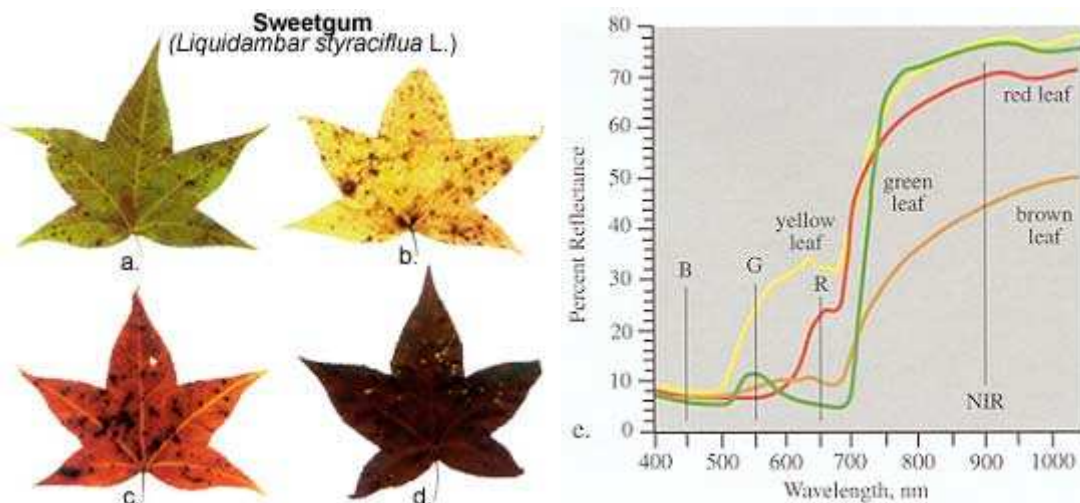
In figuur 9 valt op dat de reflectie voor PAR voor alle gewassen ongeveer 10% bedraagt, behalve in het groene gebied. De reflectie van NIR varieert afhankelijk van de golflengte tussen 10 en 60%, gemiddeld 35%. De absorptie van PAR is nagenoeg voor elke golflengte hoog. Voor NIR geldt een genuanceerder beeld. Alleen in de hogere golflengten van het NIR gebied wordt relatief veel straling geabsorbeerd, in het gebied tussen 800-1350 nm wordt er slechts 10-20% geabsorbeerd. De bijdrage aan opwarming van het blad is van NIR dus minder groot dan van PAR. Figuur 10 is eenzelfde grafiek voor planten met en zonder stress. De verhoudingen tussen PAR en NIR reflectie zijn daarin niet wezenlijk anders.



Figuur 10: Typisch reflectieverloop voor een gewas. (Ganapol, 2004)

Globaal kan uit deze grafiek worden opgemaakt dat gemiddeld 10% van het PAR licht wordt gereflecteerd en 25% van het NIR licht. Omdat de NIR absorptie vooral geconcentreerd is rondom de waterbanden 1450nm en 1900nm zou een NIR filter dat alleen die gebieden uitfiltert voor de plantopwarming relatief het meeste betekenen.

Niet alleen het soort gewas, maar ook de leeftijd of kleur van het blad speelt een grote rol in de mate van reflectie. Dat blijkt onder meer uit figuur 11.

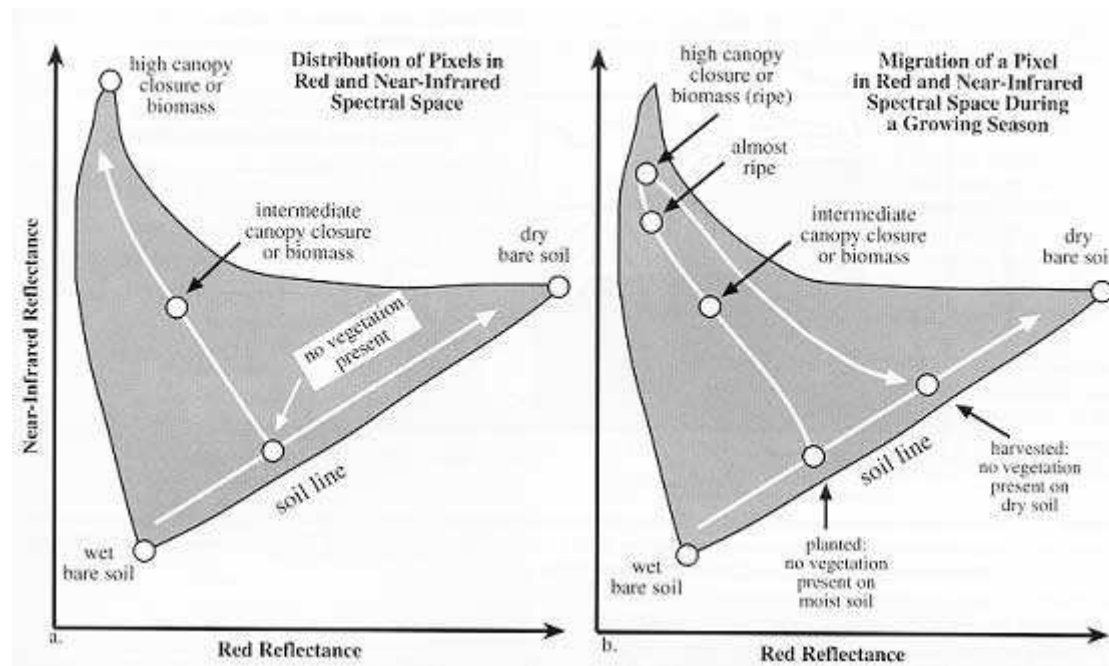


Figuur 11: reflectie van een blad van een Amberboom (Sweetgum)

a) gezond groen blad. b-c) verouderend blad van de boom. d) blad van de grond.
(Jensen, John R. *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*. Prentice-Hall, New Jersey.)

Hoewel hier alleen de reflectie in het eerste deel van het NIR gebied zichtbaar is, mag worden geconcludeerd dat de reflectie toeneemt naarmate het blad actiever is. Maar er is meer aan de hand, de reflectie in het rode PAR gebied neemt juist af naarmate het blad actiever is. De absorptie verschuift dus bij minder actief wordend blad van het

rode PAR gebied naar het NIR gebied. Dat fenomeen is ook onderzocht voor de ontwikkelingsstadia van allerlei buitengewassen en daaruit kwam het volgende plaatje.



Figuur 12:

a) Verhouding tussen de reflectie van zonlicht gemeten boven een gewas in het rode PAR gebied en het NIR gebied voor alle ontwikkelingsstadia van buitengewassen, incl. kale natte of droge grond.

b) In de rechter figuur is de verschuiving aangegeven in afhankelijkheid van het ontwikkelingsstadium van het gewas.

(Jensen, John R. *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*. Prentice-Hall, New Jersey.)

Uit deze figuur blijkt duidelijk de aanpassing van de reflectie in het verloop van de teelt. Een jong open gewas reflecteert relatief weinig NIR omdat in feite de reflectie eigenschappen van de ondergrond overheersen. En die eigenschappen zijn heel erg afhankelijk van de vochtigheidsgraad van de grond of van de NIR reflecterende eigenschappen van afdekmaterialen. Maar zelfs op het moment dat het gewas volledig de bodem bedekt is er nog geen maximale reflectie, dat komt pas op een later moment. Planten vormen dus samen met de ondergrond een soort spiegel die in de loop van de tijd van karakter verandert. Planten kunnen bovendien hun NIR reflectie (ook tijdelijk) aanpassen. Uit de literatuur en praktijkervaringen is bekend dat planten meerdere mogelijkheden hebben om dat te doen zoals de hoek van het blad ten opzichte van de zon aanpassen, omkrullen van een deel van het blad bij alstroemeria, glanslagen, enz.

5.3 Meetapparatuur voor gebruik in kassen

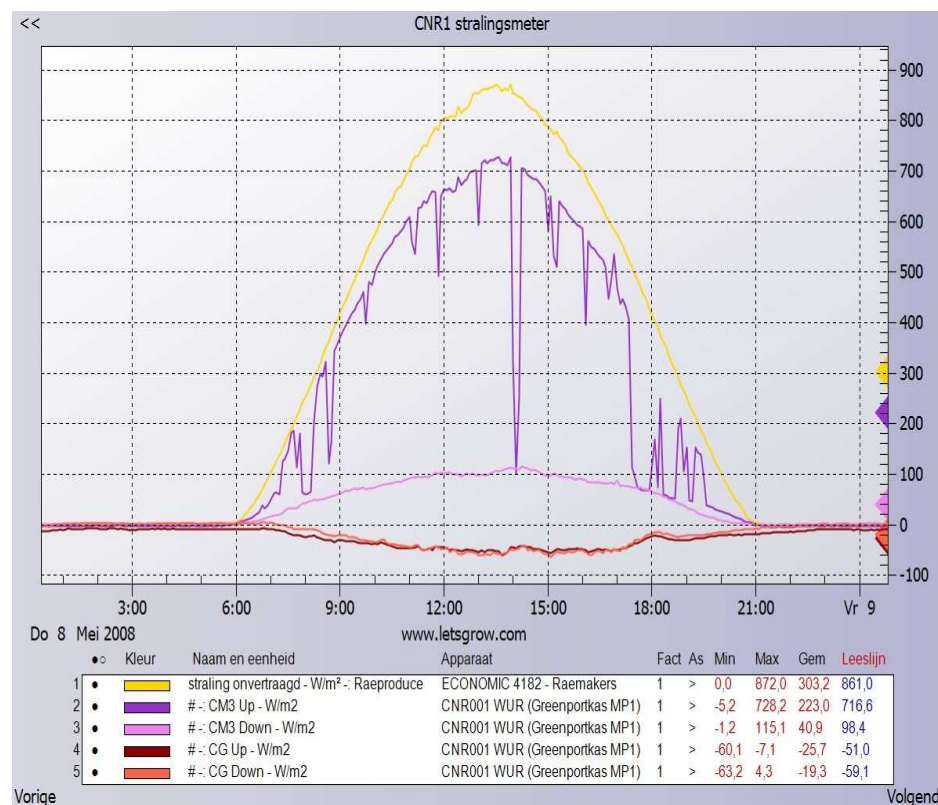
Voor een beter begrip van de invloed van NIR lijkt het dus noodzakelijk om de werkelijke absorptie te meten. Dat is echter niet eenvoudig onder praktijkomstandigheden. Wel kunnen we de reflectie relatief eenvoudig meten. In het geval van tomaat is dat gebeurd met een Kipp netto stralingsmeter type CNR1 die is voorzien van 4 sensoren. Twee daarvan kijken naar boven en meten boven het gewas de straling in de gebieden 305-2600 nm (PAR+NIR) en het gebied 5000-50.000 nm, ook wel FIR genoemd (langgolvlige of warmtestraling). Twee andere sensoren kijken naar beneden en meten in dezelfde golflengtegebieden de fotonen die uitgezonden worden door de planten en de bodem. De gedachte achter het meten van de

reflectie in het langgolfige gebied is dat alle straling die door de objecten in de kas worden geabsorbeerd omgezet worden in andere vormen van energie zoals verdamping, opwarming van het object en het uitzenden van warmtestraling.



Figuur 13: netto stralingsmeter met 4 sensoren, 2 voor PAR+NIR (CM3) en 2 voor FIR (CG).

Als we verdamping, bladtemperatuur en uitstraling in het langgolfige gebied weten hebben we in feite de absorptie bepaald. De metingen geven het volgende beeld te zien voor tomaat, waarbij bedacht moet worden dat bij dit gewas nog relatief veel bodem “gezien” wordt.

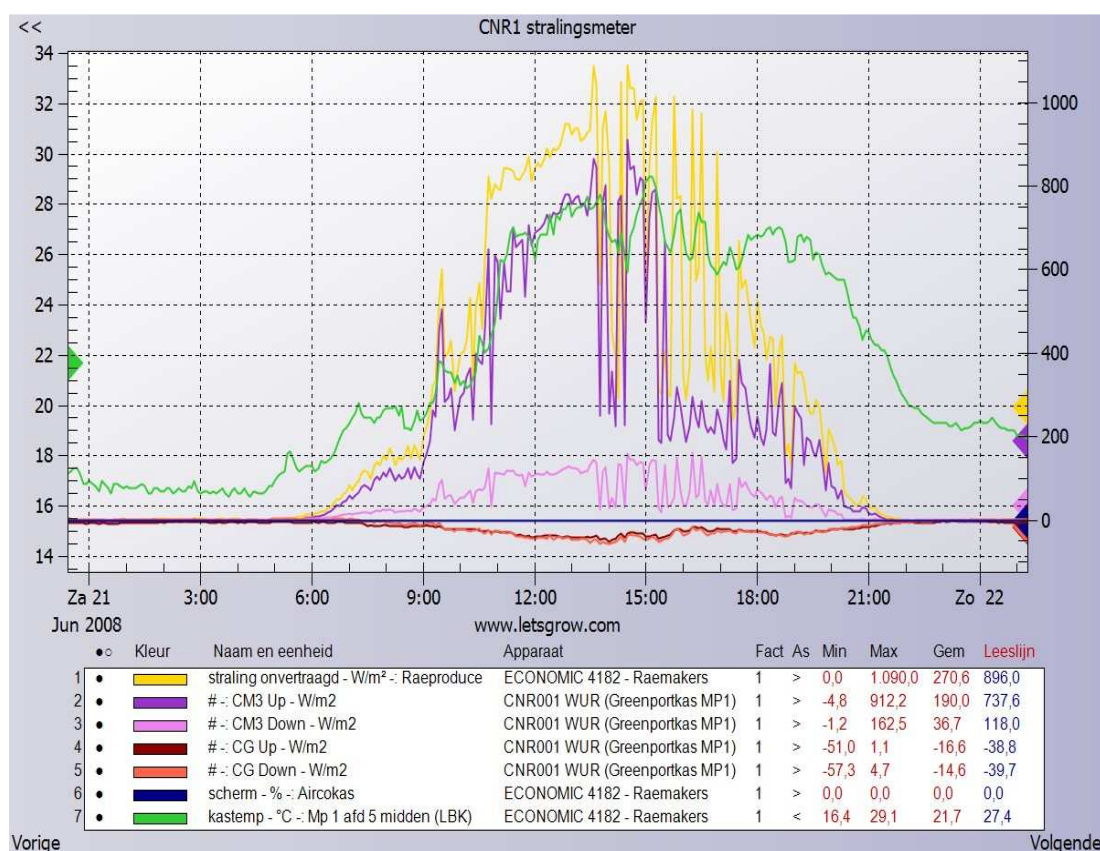


Figuur 14: Stralingsverloop van een heldere dag voor tomaat gemeten met een Kipp netto stralingsmeter CNR1. CM3 is de netto straling in het gebied 305-2600 nm (PAR+NIR). CG is de netto straling in het gebied van 5.000-50.000 nm (langgolfige warmtestraling). . “Up” is

wat van de zon komt, “down” van het gewas en de bodem.”Straling onvertraagd” is buiten gemeten.

Afgaande op de metingen op de leeslijn (13.00 uur) komt er 83% van het zonlicht door het kasdek (CM3 Up). Daarvan wordt 14% door gewas en bodem gereflecteerd (CM3 Down). Dit is een dag met directe instraling, dus geen diffuus licht. De rare afwijking in “CM3 up” om 14.00 uur komt doordat er dan een constructiedeel van de kas tussen zon en sensor zit. Voor wat betreft de langgolvlige straling valt op dat er een vast verband lijkt te zitten tussen wat er binnenkomt en wat er uitgaat. Dat is niet zo vreemd, want we zien hier in feite het broeikas effect, het feit dat glas langgolvlige straling reflecteert. Ook is in deze grafiek duidelijk de invloed zichtbaar van de zonnestand en de schaduwgevende delen van een kas op het netto licht dat binnen beschikbaar komt voor de planten.

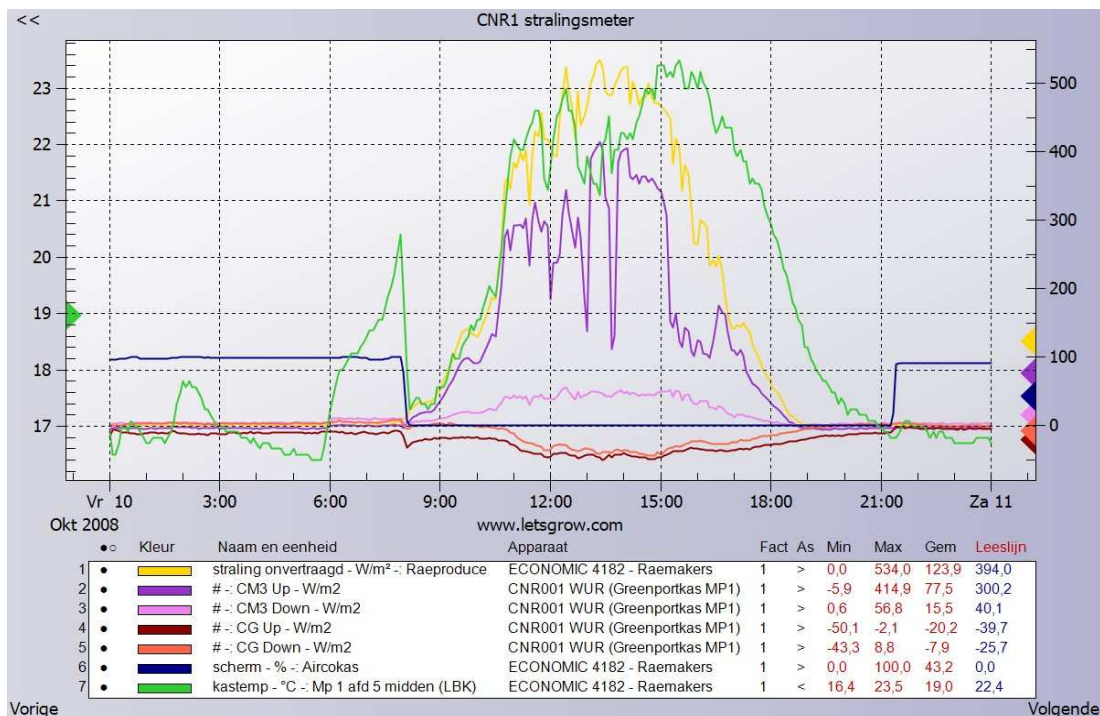
Op een dag met wat meer wisselende straling (wolken, dus diffuus licht) blijft het reflectiebeeld hetzelfde (Figuur 15).



Figuur 15: Stralingsverloop voor een wisselende dag, ochtend direct licht, middag diffuus. Voor verdere gegevens zie figuur 7.

Ook hier is de lichtdoorlating door het kasdek om 13.00 uur 82% en de reflectie PAR+NIR ongeveer 16%.

Ook interessant is de invloed van een energiescherm.



Figuur 16: Stralingsverloop voor een heldere dag en gebruik van een energiescherm.

Duidelijk waarneembaar is dat het gebruik van een scherm de langgolvlige uitstraling (CG Up) sterk reduceert. Dat komt omdat het doek een hogere temperatuur heeft dan het koude kasdek en warmteoverdracht via straling afhankelijk is van het temperatuurverschil tussen twee lichamen. In dit geval is dat temperatuurverschil minimaal. Bij geopend doek kijkt de plant naar een koud(er) kasdek en wordt er wel stralingswarmte overgedragen. Op deze dag is de doorlaat van het kasdek ongeveer 76% en dat is lager dan in mei en juni door de lagere zonnestand. De PAR+NIR reflectie bedraagt 13%.

Wat betekent dat voor het gewas? De situatie bij directe instraling is het meest kritisch. Uitgangspunten: verhouding PAR/NIR energie is 50-50. Reflectie PAR= 10%. Uit figuur 14 blijkt dat er op het moment van de leeslijn 716 W/m² binnenkomt. Er komt dus 358 W/m² PAR of NIR binnen. De PAR reflectie is dan 36 W/m². Volgens de meting was de som van de reflectie (CM3 Down) 98 W/m². Daarmee zou de gereflecteerde NIR dan ongeveer 62 W/m² bedragen. Dat is 17 % van de ingestraalde NIR. Er blijft achter in het gewas: 716-98= 618 W/m², daarvan is 321 W/m² PAR en 297 W/m² NIR. Wat gebeurt er met die achterblijvende NIR straling. Een deel wordt in het gewas geabsorbeerd en omgezet in verdamping en stijging van de bladtemperatuur en een deel wordt geabsorbeerd door de bodem. In de bodem kan die energie worden omgezet in verdamping als die bodem niet is afgedekt en een deel wordt als in een accu opgeslagen, merkbaar als stijging van de bodemtemperatuur. De opslagcapaciteit van een bodem bedraagt gemiddeld 0,5 MJ/m² per graad temperatuurstijging. Temperatuurstijgingen van ongeveer 0,5 °C per uur zijn bij deze instralingen normaal. In dat geval wordt er 0,25 MJ per uur per m² opgeslagen. Dat komt overeen met een capaciteit van 70 W/m². Als de bodem of het gewas warmer worden dan het kasdek zullen ze langgolvlige infrarode straling (FIR) gaan uitzenden. In figuur 14 bedraagt dit 59 W/m² (CG Down). Maar daarvan komt 51 W/m² weer terug van het kasdek (CG Up) als gevolg van reflectie of het "broeikas effect". Netto verdwijnt er dus 8 W/m² langgolvlige straling naar buiten. Resteert dus 618-70-8= 540 W/m² straling die uiteindelijk echt door het gewas geabsorbeerd wordt en omgezet in temperatuurverhoging of verdamping. Wat gebeurt er nu wanneer er een schermdoek met NIR filtering zou worden toegepast? Dan wordt theoretisch 30% van het NIR en 5% van het PAR tegengehouden door het filter. Er komt nog ((0,7*0,5)+(0,95*0,5))*716= 590 W/m² binnen (82,5% van de ongefilterde kas). Daarvan is 250 W/m² NIR en 340 W/m² PAR. Als 10% PAR wordt gereflecteerd, verdwijnt

er 34 W/m^2 door reflectie naar buiten. Van de NIR wordt 17% of 43 W/m^2 eveneens naar buiten gereflecteerd. Resteert $590 - 34 - 43 = 513 \text{ W/m}^2$ die wordt geabsorbeerd door gewas en grond. Als er een evenredige afname van de opwarming van de grond plaatsvindt, zal $(513/618) * 70 = 58 \text{ W/m}^2$ naar de bodem gaan en zal er 6 W/m^2 langgolvlige straling naar buiten verdwijnen. Het gewas moet dan dus $513 - 58 - 6 = 449 \text{ W/m}^2$ verwerken door omzetting in verdamping en bladtemperatuurstijging. Een afname van 17%.

De stralingsbalans ziet er daarmee als volgt uit voor beide situaties:

	Zonder NIR filter		Met NIR filter	
	PAR	NIR	PAR	NIR
Inkomend	358	358	340	250
Gereflecteerd	36	62	34	43
Geabsorbeerd door de bodem	70		58	
Omgezet in FIR	8		6	
Gewas omzetting	540		449	

Tabel 1: Theoretische hoeveelheden energie in W/m^2 die binnen de kas worden omgezet in reflectie, absorptie en transmissie met en zonder gebruik van een NIR reflecterend filter bij een buitenstraling van 860 W/m^2 .

5.4 Energiebalans toegepast op meerdere bladlagen

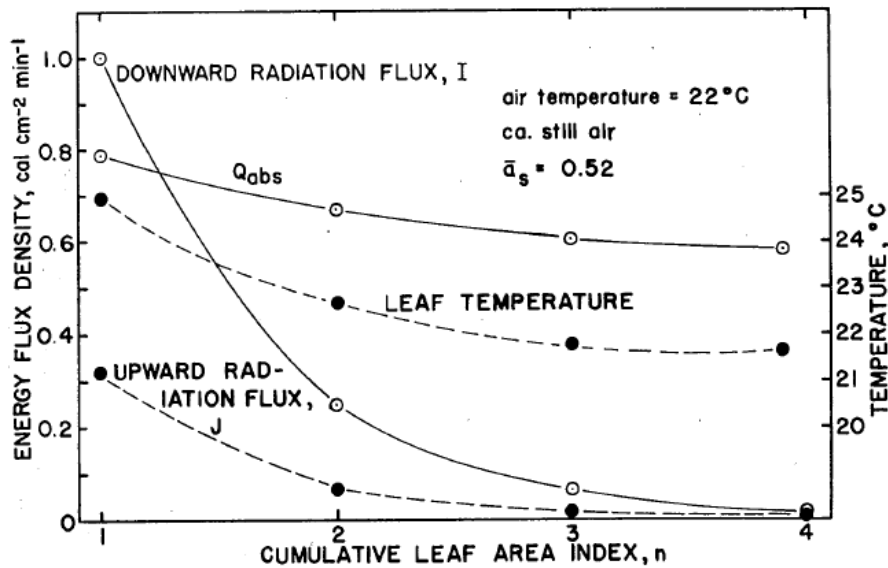
De in hoofdstuk 4 beschreven energiebalans beschouwt het gewas als een enkele bladlaag, wat natuurlijk niet altijd klopt. Bestaat een plant uit meerdere bladlagen, dan zal het spel van doorlating, absorptie en reflectie van de straling voor elke afzonderlijke bladlaag behoorlijk complex zijn. Alderfer (1971) heeft een theoretisch model gebouwd voor de energiebalans binnen een gewas met 4 bladlagen. Een voorbeeld van een dergelijke berekening staat in de tabel.

Layer	Leaf temperature (°C)	Air speed (con sec ⁻¹)	I	J	Q_{abs}	E (gm cm ⁻² m ⁻¹)
$(k = 0.80 \quad s = 0.80 \quad \bar{a}_g = 0.52)$						
1	25.0	10	1.00	.27	.79	1 x 10 ⁻⁴
2	22.7	10	.25	.07	.67	8 x 10 ⁻⁵
3	21.8	10	.06	.02	.60	5 x 10 ⁻⁵
4	21.7	10	.02	.00	.58	2 x 10 ⁻⁵
1	23.5	50	1.00	.27	.79	1 x 10 ⁻⁴
2	22.6	20	.25	.07	.67	8 x 10 ⁻⁵
3	21.8	20	.06	.02	.60	5 x 10 ⁻⁵
4	21.7	20	.02	.00	.58	2 x 10 ⁻⁵
1	23.0	100	1.00	1.7	.79	1 x 10 ⁻²
2	22.4	20	.25	.07	.66	8 x 10 ⁻²
3	21.8	10	.06	.02	.60	5 x 10 ⁻²
4	21.7	10	.02	.00	.58	2 x 10 ⁻²
$(k = 1.00 \quad s = 0.75 \quad \bar{a}_g = 0.59)$						
1	25.6	10	1.00	.23	.82	1 x 10 ⁻⁴
2	22.6	10	.21	.05	.66	8 x 10 ⁻⁵
3	21.7	10	.04	.01	.60	5 x 10 ⁻⁵
4	21.6	10	.01	.00	.58	2 x 10 ⁻⁵
1	23.8	50	1.00	.23	.82	1 x 10 ⁻⁴
2	22.4	20	.21	.05	.66	8 x 10 ⁻⁵
3	21.8	20	.04	.01	.60	5 x 10 ⁻⁵
4	21.7	20	.01	.00	.58	2 x 10 ⁻⁵
1	23.3	100	1.00	.23	.82	1 x 10 ⁻⁴
2	22.3	20	.21	.05	.65	8 x 10 ⁻⁵
3	21.7	10	.04	.01	.60	5 x 10 ⁻⁵
4	21.6	10	.01	.00	.58	2 x 10 ⁻⁵

Tabel 2: Uitkomsten van een modelberekening van de energiebalans voor een plant met 4 bladlagen ($n=1$ bovenste bladlaag) in situaties met verschillende luchtsnelheden en stralingseigenschappen. k = absorptie coëfficiënt blad, s = reflectie coëfficiënt blad, a_g = absorptie coëfficiënt bodem, I = neerwaarts gerichte straling van 300-3000 nm, J = de opwaarts gerichte straling, Q_{abs} = geabsorbeerde straling, E = verdamping. (Alderfer, 1971)

Wat opvalt, is dat de bladtemperatuur naar beneden afneemt en de verhouding tussen de geabsorbeerde straling bovenin en onderin de plant nagenoeg gelijk blijft bij verschillende luchtsnelheden. Ook is goed te zien dat de temperatuur van het bovenste blad lager wordt naarmate er meer luchtbeweging is. In dit geval komt dat omdat de omringende kaslucht 22 °C is. Uit de hoeveelheid geabsorbeerde straling valt af te lezen dat een lagere bladtemperatuur op zich niets zegt over de som aan ontvangen energie want die is in alle gevallen nagenoeg gelijk.

Uitgezet in een grafiek zien de resultaten van een simulatie, dit keer bij langzaam stromende lucht (10 cm/sec), er als volgt uit:



Figuur 17: Energiebalans voor een plant met 4 bladlagen, bij langzaam stromende lucht (10 cm/sec). Verklaring parameters zie tabel 2 (Alferder, 1971)

Dit is een situatie die overeenkomt met kasomstandigheden. Duidelijk is te zien dat de hoeveelheid straling die naar beneden gericht is (I) weliswaar snel afneemt, maar niet resulteert in een even grote afname van de geabsorbeerde straling (Q_{abs}) op de lagere bladlagen. Dat komt omdat de opwaarts gerichte straling (J) bovenin het grootst is door een lage hemeltemperatuur, in dit geval van 0 °C.

Gates (1968) heeft een rekenmodel gemaakt waarmee de bladtemperatuur kan worden berekend in afhankelijkheid van de energietoevoer en de uitwendige omstandigheden van het blad (Figuur 17). Die berekening is eveneens gebaseerd op de energiebalans:

$$Q_{abs} = C + LE + R + M$$

Waarin: C = convectieve warmteoverdracht, LE = energieverlies door verdamping, R = langgolvlige straling, M = metabolische consumptie van het gewas.

Bij hoge instralingen mogen we de laatste twee termen veronachtzamen omdat ze slechts een klein deel van de totale energieflex uitmaken. Dan blijft over:

$$Q_{abs} = C + LE$$

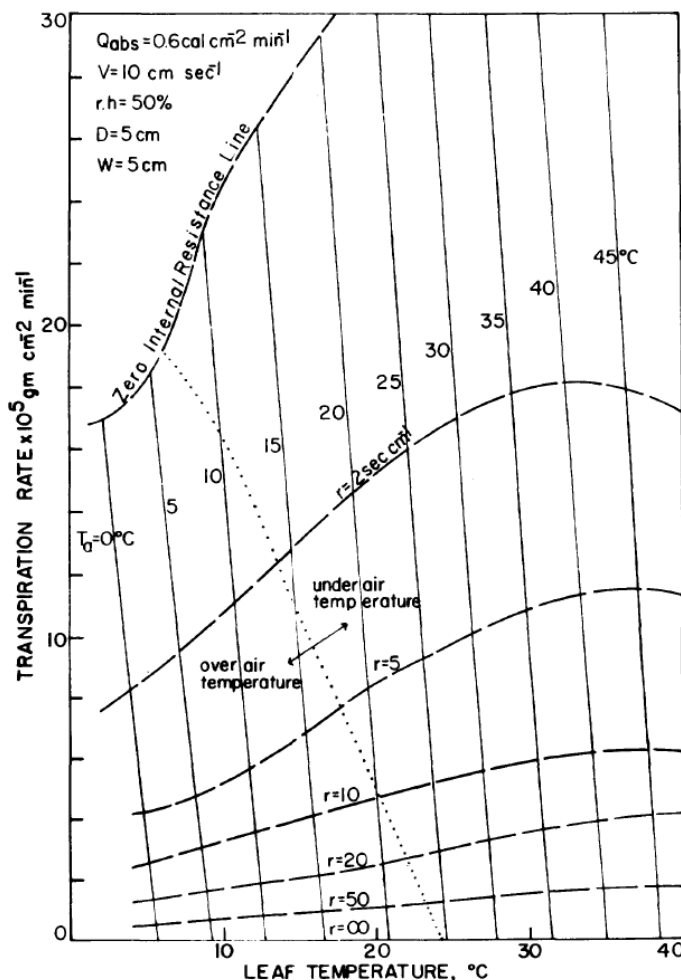
Omdat LE gelijk staat aan (verdamping * de energie-inhoud van een kilo water) hoeven we alleen de verdamping E uit te rekenen. Nadere uitwerking van C en E :

$$C = \frac{k_1 * v * (T_l - T_a)}{D^{0.5}}$$

$$E = \frac{d_i[T_i] - RV * d_a[T_a]}{r_i + k_2 * (D^{0.35} * W^{0.20} / v^{0.55})}$$

Daarin is $d_i(T_i)$ de verzadigde dampdruk voor water in het blad bij de heersende bladtemperatuur, RV van de kaslucht, $d_a(T_a)$ de verzadigde dampdruk van de kaslucht bij kasluchttemperatuur, r_i de inwendige huidmondjes weerstand (1-10 sec/cm voor tuinbouwgewassen), k_1 en k_2 de convectie coëfficiënt tussen blad en kaslucht (Als $W \gg D$ of $W=D > 5$ cm, $k_1=0.01$ en $k_2=0.035$ en als $W \ll D$ of $W=D \ll 5$ cm, $k_1=0.016$ en $k_2=0.026$), D de afmeting in cm van het blad in de richting van de luchtbeweging, W de afmeting in cm van het blad loodrecht op de luchtbeweging en v de luchtsnelheid in cm/sec.

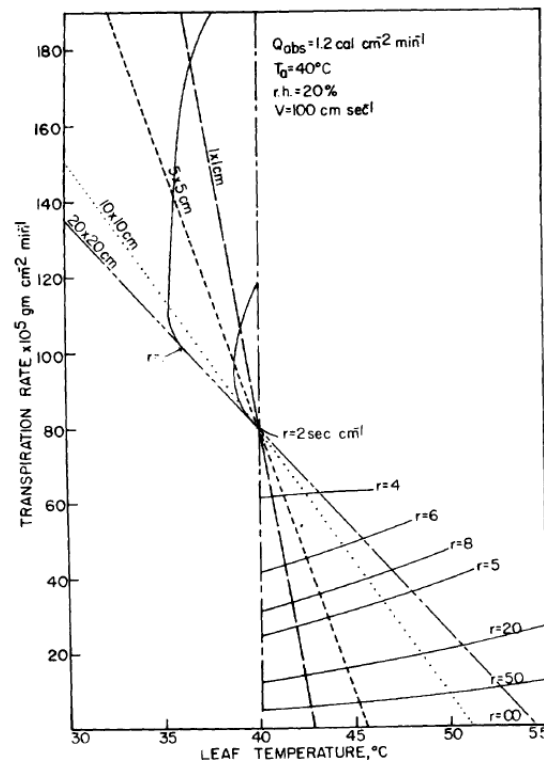
In andere woorden staat hier: zowel de verdamping als de convectieve overdracht zijn afhankelijk van de luchtbeweging en van het temperatuurverschil tussen blad en omgeving. Voor een specifiek gewas komt daar dan de volgende grafiek uit:



Figuur 18: De Verdamping en de temperatuur van een blad van 5x5 cm bij diverse luchttemperaturen en diverse waarden voor de inwendige diffusie weerstand r voor water bij 420 W/m² geabsorbeerde straling, luchtsnelheid v van 10 cm/sec en een RV van 50% . (Gates, 1968)

De verdamping en de bladtemperatuur kunnen worden afgelezen als de luchttemperatuur en de diffusieweerstand bekend zijn. Bijvoorbeeld, $r = 2 \text{ sec/cm}$ en een luchttemperatuur van $25 \text{ }^\circ\text{C}$ levert een verdamping op van $16 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2/\text{min}$ en een bladtemperatuur van $22 \text{ }^\circ\text{C}$. Merk op dat de verdamping heel erg afhankelijk is van de waarde van r en dat is zoveel als de beschikbare hoeveelheid water aan het huidmondje die in feite bestaat uit de dampdruk achter het huidmondje plus de opening van het huidmondje. Dat werkt als volgt: een grote beschikbare hoeveelheid water gecombineerd met een hoge bladtemperatuur levert een hoge dampdruk. Zelfs bij een kleine huidmondjes opening zal dat een hoge verdamping opleveren. Een kleine hoeveelheid beschikbaar water zal de verdamping sterk remmen. De “zero internal resistance” lijn is in feite de situatie waarin zowel de hoeveelheid beschikbaar water als de huidmondjes opening optimaal zijn. Ook is er een omslagpunt te zien, de stippellijn, waarbij de bladtemperatuur precies gelijk is aan de luchttemperatuur. Bijvoorbeeld bij een waarde van r van 2 sec/cm en een luchttemperatuur van $13 \text{ }^\circ\text{C}$ is de bladtemperatuur gelijk aan de luchttemperatuur. Is de luchttemperatuur hoger dan die $13 \text{ }^\circ\text{C}$, dan zal de bladtemperatuur eronder liggen en zal de extra convectie die dan ontstaat de verdamping verhogen. Al met al een bijzonder complex geheel waarbij vooral de waarde van r zich niet direct laat meten. Inmiddels is er wel een rekenmethode (een zogenaamde “soft-sensor”) waarmee de waarde van r berekend kan worden op basis van een gemeten instraling, R_V en resulterende lucht en bladtemperatuur (Voogt en van Weel, 2008). Daarmee kan dan vervolgens de momentane verdamping worden berekend.

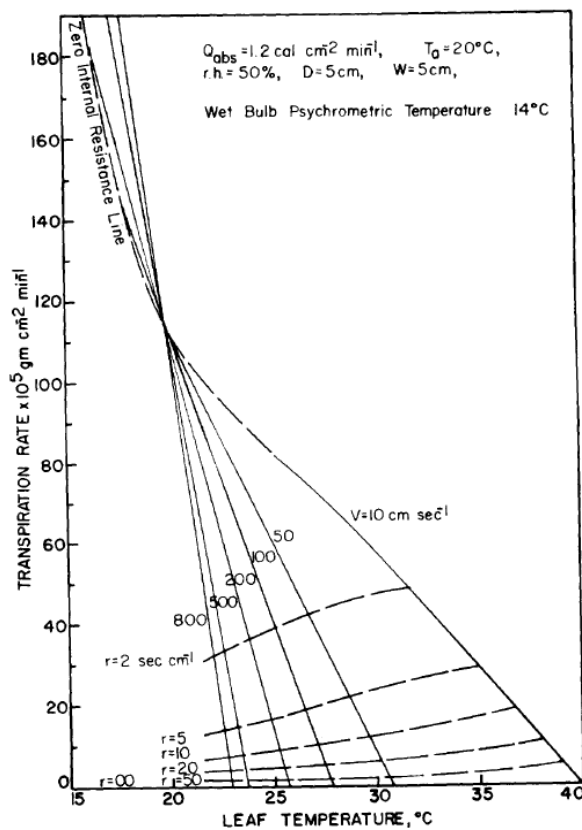
Uit dezelfde berekeningen bleek nog een ander fenomeen, namelijk dat de verandering in bladtemperatuur als gevolg van verdamping ook en vooral afhankelijk is van de bladgrootte. Dat kan worden herkend in figuur 19



Figuur 19: De Verdamping en de temperatuur van blad van uiteenlopende afmetingen bij een luchttemperatuur van 40°C , diverse waarden voor de inwendige diffusie weerstand r voor water bij 840 W/m^2 geabsorbeerde straling, luchtsnelheid v van 100 cm/sec en een RV van 20% . (Gates, 1968)

De bladtemperatuur gaat steeds verder afwijken van de luchttemperatuur naarmate het blad groter wordt. Bij een klein blad veroorzaakt een grote toename van de verdamping maar weinig verandering in bladtemperatuur, bij grotere bladen dus een grote verandering! Dat heeft vooral te maken met het feit dat bij de convectieve warmteoverdracht beide zijden van het blad meedoen en een groter blad dus dubbel telt. Bovendien neemt bij groter blad de luchtweerstand toe. Omdat hier een luchttemperatuur van 40°C is gekozen telt de convectie in dit geval wel erg zwaar mee in de energiebalans.

Eenzelfde beeld geldt voor de invloed van de luchtsnelheid zoals blijkt uit figuur 20.

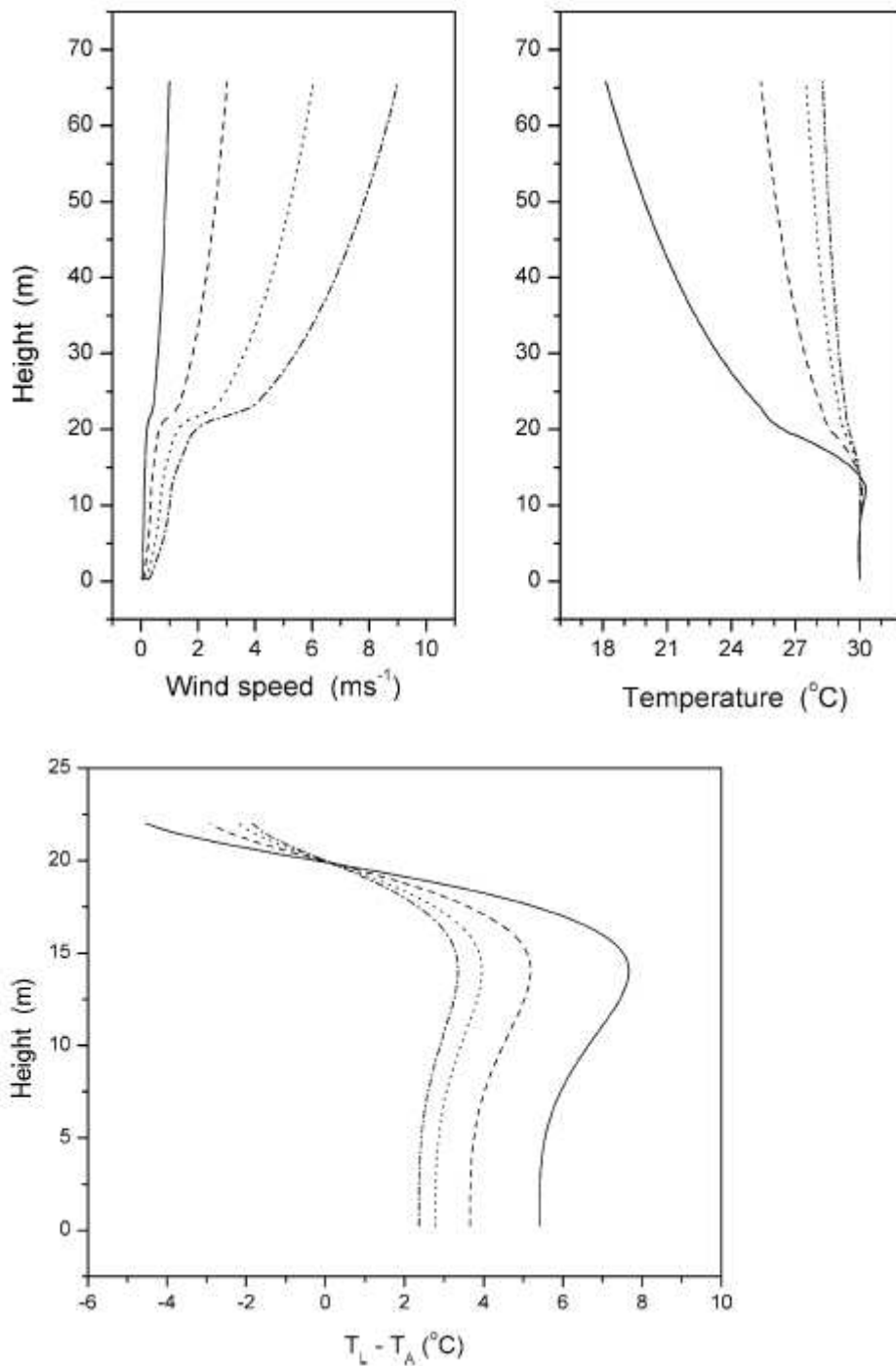


Figuur 20: De Verdamping en de temperatuur van blad van $5 \times 5 \text{ cm}$ bij een luchttemperatuur van 40°C , diverse waarden voor de inwendige diffusie weerstand r voor water bij 840 W/m^2 geabsorbeerde straling en diverse luchtsnelheden v van 10 - 800 cm/sec . en een RV van 50% . (Gates, 1968)

Naarmate de luchtsnelheid rondom het blad toeneemt, komt de bladtemperatuur dichterbij de luchttemperatuur te liggen, ongeacht de waarde van r . In dit geval komt dat doordat de luchttemperatuur relatief laag is (20°C). De convectieve component wordt groter naarmate de luchtsnelheid toeneemt, maar als de luchttemperatuur relatief laag is zal het blad gekoeld worden en daarmee de

verdamping remmen. Om diezelfde reden keert het bij hogere verdampingen dan $110 \text{ g/cm}^2/\text{min}$ juist om. Dan wordt het blad kouder dan de omgeving en zal convectie het blad juist opwarmen en extra laten verdampen. Het is dus ook niet vreemd dat dit omslagpunt ook ongeveer bij 20°C bladtemperatuur ligt.

Bij bomen kan het effect van de gecombineerde invloed van energietoevoer, luchtsnelheid (wind) en LAI goed zichtbaar worden gemaakt via satelliet waarnemingen. Een voorbeeld daarvan is gegeven door Tunick (2006).

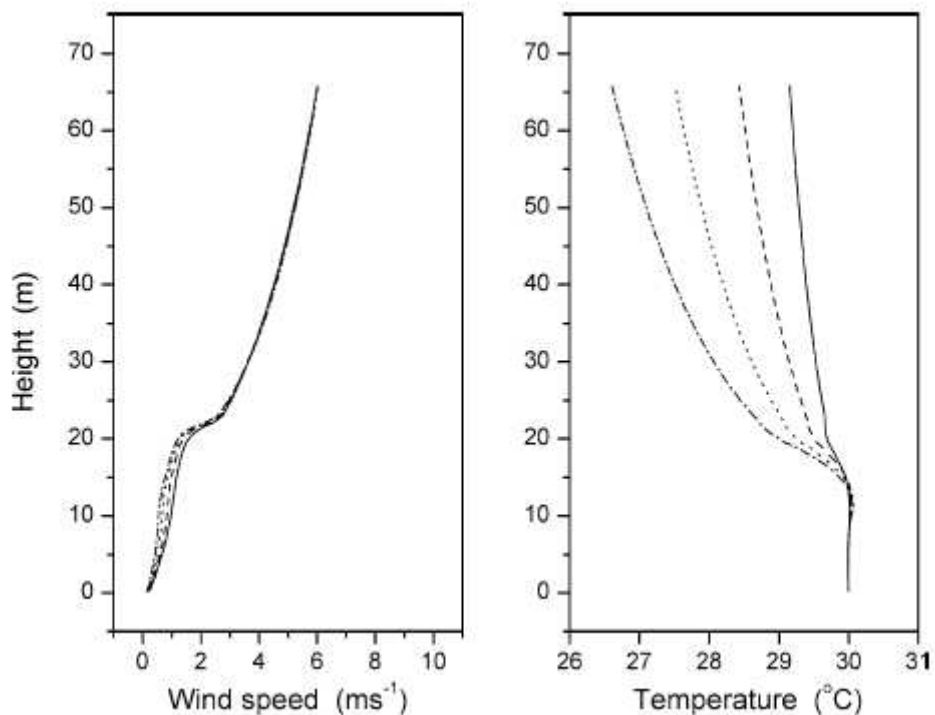


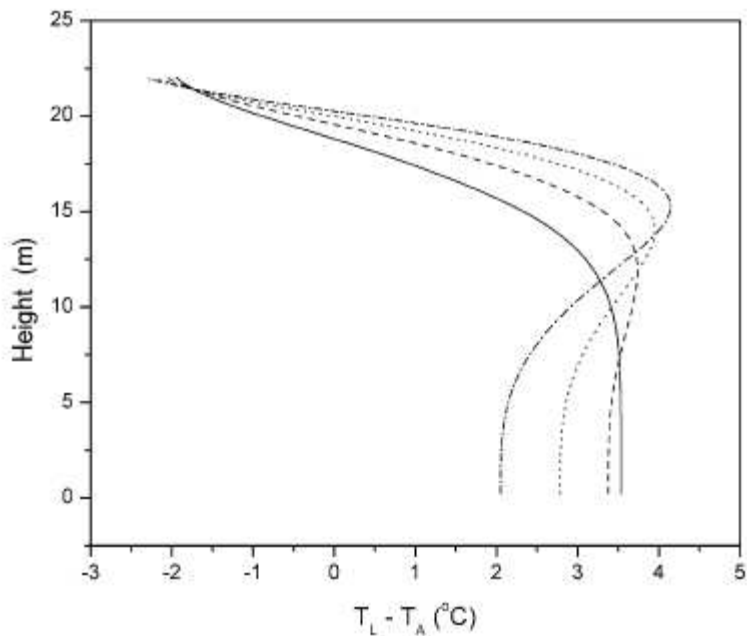
Figuur 21: Klimaatcondities gemeten voor een bos met een gesloten bladerdek in de zone tussen 9 en 22m hoogte bij verschillende windsnelheden. Bovenste grafieken:

windsnelheid en temperatuur op verschillende hoogten. Onderste grafiek: Verschil tussen blad en luchttemperatuur op verschillende hoogten.

(—) 1 m/sec, (- -) 3 m/sec, (. . .) 6 m/sec, (-.-.-) 9 m/sec. bron: A. Tunick, 2006.

Wat opvalt in deze figuur is dat alleen in het bovenste bladerdek voldoende verdamping is om de bladtemperatuur lager te laten zijn dan de luchttemperatuur. Een lage windsnelheid zorgt voor een lagere bladtemperatuur aan de bovenzijde van het bladerdek (de zone die normaal gesproken met de infrarood temperatuurmeter wordt bepaald). Dit is een mooie illustratie van de energiebalans die bepaalt dat bij eenzelfde instraling evenveel energie moet worden afgevoerd. Bij weinig wind zal er in verhouding minder convectieve warmteoverdracht zijn en moet de plant dus wel meer verdampen. De windsnelheid heeft ook invloed op de lager gelegen bladeren. Minder wind zorgt voor een hogere bladtemperatuur. In die zone is er te weinig energietoevoer om de verdamping groot genoeg te maken om het blad lager in temperatuur te laten zijn dan de omgeving. Vergroting van de windsnelheid op die hoogte laat wel het blad meer warmte afstaan door convectie.





Figuur 22: Klimaatcondities gemeten voor een bos met een gesloten bladerdek in de zone tussen 9 en 22m hoogte bij verschillende dichtheden (LAI) van het bladerdek. Bovenste grafieken: windsnelheid en temperatuur op verschillende hoogten. Onderste grafiek: Verschil tussen blad en luchttemperatuur op verschillende hoogten. (—) LAI=2, (- -) LAI=3, (. . .) LAI=4, (- . - .) LAI=5. bron: A. Tunick, 2006.

In deze grafiek valt op dat een hoge LAI leidt tot lagere luchttemperaturen in de hogere regionen van het bladerdek. In die zone wordt netto meer energie geabsorbeerd wat leidt tot meer verdamping. Anderzijds liggen de luchtsnelheden daar lager door het meer gesloten bladpakket, waardoor de bladtemperatuur bij een hoge LAI gemeten op dezelfde hoogte in het gewas hoger ligt dan bij een lage LAI. In de lagere zone ligt de situatie echter precies andersom, daar ligt de bladtemperatuur bij een hogere LAI lager dan bij een kleine LAI, dankzij het feit dat de hoger gelegen bladlagen de energie al voor een flink deel geabsorbeerd hebben.

Samengevat betekenen deze theoretische berekeningen en metingen dat de plantreactie op verminderde instraling voor wat betreft verdamping en bladtemperatuur niet zonder meer te beredeneren zijn zolang de interne vochtweerstand, de luchtbeweging rondom het blad en de bladgrootte onbekend zijn.

6 Veranderingen op verdamping en bladtemperatuur door NIR filtering

6.1 Wat verandert er aan het kasklimaat?

- De som aan verdamping en convectieve warmteoverdracht zal in ongeveer dezelfde mate verminderen als de netto door het kasdek doorgelaten hoeveelheid energie.
- De regeling van de ramen bepaalt vervolgens hoeveel enthalpieverschil er tussen binnen en buiten ontstaat.
- Dat bepaalt vervolgens de verhouding tussen verdamping en convectie. Enerzijds door mogelijk verminderde luchtbeweging, anderzijds door een mogelijk veranderde dampdruk van de kaslucht.
- In principe kunnen al deze zaken echter ook weer worden aangepast door andere instellingen in de klimaatregeling.

6.2 Wat betekent NIR filtering voor het gewas?

6.2.1 Bladtemperatuur

- NIR filtering verlaagt in potentie de bladtemperatuur, maar de verlaging is minder groot dan in eerste instantie verwacht. Dat komt door verminderde luchtbeweging die leidt tot lagere warmteoverdracht via convectie tussen blad en kaslucht, tenzij er extra luchtbeweging wordt gemaakt met ventilatoren. Of door verminderde verdamping. Hoeveel de bladtemperatuur bovenin het gewas verandert valt niet met zekerheid te voorspellen omdat er een aantal bepalende factoren tegelijk veranderen. Wel is zeker dat de bladtemperatuur dichter bij de kasluchttemperatuur komt te liggen. De invloed van NIR-scherming is dus veel minder groot dan in eerste instantie verwacht.

Voor gewassen met een groot aantal bladlagen zal vooral de planttemperatuur onderin het gewas lager worden. Dat wordt nog versterkt wanneer gekozen wordt voor een kleinere stand van de luchtramen waardoor minder warme lucht omlaag gestuwd wordt.

De lagere planttemperatuur onderin zal waarschijnlijk geen voordeel opleveren omdat daardoor de afrijping van vruchten of de snelheid van bloemtak ontwikkeling wordt vertraagd.

Omdat dit soort hoogverdampende gewassen meestal al niet geschermd worden is extra licht toelaten geen optie. Wel kan overwogen worden om de ramen verder te sluiten om op die manier meer CO₂ in de kas te houden en een verticaal werkende ventilator te installeren om de warme lucht omlaag te stuwen. Verneveling kan de rol van NIR filtering deels overnemen.

Het meten van de bladtemperatuur met een infraroodmeter zegt dus vooral bij gewassen met een hoge LAI niet alles over de invloed van het NIR filter omdat deze alleen de bovenste bladlaag meet.

Niet of weinig verdampende delen die zich bovenin de plant bevinden, zoals groeipunten, ontvangen minder NIR straling, maar koelen anderzijds ook slechter af door de verminderde luchtbeweging bovenin de kas. Daarom zal het netto verschil in temperatuur maar klein zijn.

Rozen zijn een uitzondering op de regel dat hoog verdampende gewassen nauwelijks geschermd worden. Hier is men bang voor te hoge dagtemperaturen in verband met bloemkwaliteit zodat er vaak wordt geschermd. Potentieel is hier dus nog wel winst met een NIR scherm te halen door minder PAR licht weg te schermen. In dat geval zal echter de planttemperatuur gaan stijgen ten opzichte van een geschermd teelt omdat er immers meer PAR wordt toegelaten. Voor het verkrijgen van voldoende zware knoppen moet dat gecompenseerd worden door overdag meer CO₂ in de kas te houden en door in de nacht de etmaal temperatuursom voldoende te compenseren door koelen, buitenluchtinblazing of door dakberegening. Wat bij roos maar ook bij andere gewassen zeker nog uitgezocht zou moeten worden is de vraag of een hogere dagsom aan planttemperatuur ook negatief werkt op de kwaliteit van de bloemtak wanneer overdag verneveling zou worden ingezet. De verwachting is dat een optimale combinatie van verdamping, lichtsom en CO₂-som hogere temperatuursommen toelaatbaar maakt. Verneveling zorgt er bij een goede raamstandregeling voor dat in dat geval een hogere CO₂ concentratie kan worden gerealiseerd bij een toelaatbare verdamping. Mogelijk is een NIR filter dan ook niet noodzakelijk. Het feit dat er in een proef met een NIR filter bij roos geen productiewinst werd behaald (Kempkes, 2008) wijst er op dat in dat geval de optimale combinatie van licht, CO₂, planttemperatuur en verdamping niet is gehaald. De wisselende ervaringen bij roos met krijtschermen met NIR filters versterken die veronderstelling.

6.2.2 Verdamping

Bij voldoende beschikbaarheid van water is de verdamping grotendeels afhankelijk van de door de plant geabsorbeerde energie en voor een klein deel van de dampdruk van de lucht. De verdamping neemt daardoor ongeveer evenredig af met de afname in energietoevoer.

Dankzij de lagere verdamping zullen er minder snel structurele problemen ontstaan met de vochtvoorziening zoals bij ongeschermd gewassen bij een lage RV aan het einde van de middag vaak optreedt. Daardoor zal de geleidbaarheid van de huidmondjes langer op peil blijven en dus meer CO₂ opgenomen kunnen worden zolang deze tenminste beschikbaar is. Een goede luchttingsstrategie is dan essentieel. Vernevelen in combinatie met het zeer sterk beperken van de raamopening levert dan extra voordeel.

Kijken we wat nauwkeuriger naar de verdamping dan zijn er per gewas toch wel verschillen. Daarbij kan het beste onderscheid worden gemaakt tussen gewassen met een hoge verdamping (tomaat, komkommer, roos) en gewassen met een lage verdamping (potplanten).

Gewassen met een hoge verdamping: Was in de situatie zonder NIR-filter de verdamping hoog, zoals bij komkommer, dan was het blad kouder dan

de omgeving en neemt warmte op uit die omgeving. Dat is extra toevoer van energie, resulterend in extra verdamping. Als de plant die verdamping niet langdurig kon volhouden, zoals vaak het geval is in ongeschermd kassen aan het einde van de middag, dan zullen de huidmondjes gaan knijpen en zal de bladtemperatuur op die momenten enigszins gestegen zijn. Neemt in die situatie de toegevoerde zonne-energie af, dan daalt de verdamping zodanig dat de wortels weer kans krijgen om de watervoorraad op peil te brengen. De huidmondjes kunnen dan weer wat verder open en de verdamping kan dan weer iets toenemen waardoor de bladtemperatuur weer daalt. Was er wel voldoende water beschikbaar voor verdamping, dan zal deze in gelijke mate afnemen met de verminderde energietoevoer. Daarmee neemt het temperatuurverschil met de omgeving af en zal de extra verdamping veroorzaakt door temperatuurverschil tussen blad en omgeving ook afnemen. De verlaging van de verdamping zal dus groter zijn dan alleen op basis van de afgenomen instraling verwacht. De RV in de kas wordt door de afgenomen verdamping overdag lager zoals ook vastgesteld door Kempkes (2008). Dat verlaagt de dampdruk in de kas waardoor de verdamping weer iets toeneemt, maar de totale afname van de verdamping is toch groter dan mag worden verwacht op basis van de afgenomen instraling.

Gewassen met een lage verdamping: Bij laag verdampende gewassen is in de situatie zonder NIR filter het blad warmer dan de kaslucht. Dan verdwijnt een flink deel van de geabsorbeerde zonnestraling door convectie naar de omgeving, resulterend in een lagere verdamping dan verwacht mocht worden op basis van de instraling. Wordt in dit geval een NIR filter toegepast, dan zakt de hoeveelheid geabsorbeerde zonnestraling, resulterend in een lagere bladtemperatuur. Omdat het blad altijd nog warmer zal zijn dan de kaslucht zal het nog steeds energie uitwisselen met de kaslucht via convectie. De afname van de verdamping is in dit geval erg onzeker, maar in ieder geval kleiner dan de afname van de instraling. Voor gewassen met een beperkt aantal bladlagen en een structureel kleine verdamping, door de aanwezigheid van relatief weinig huidmondjes, betekent dit dat NIR filtering tot minder verdampingsstress zal leiden. Daardoor hoeft er minder PAR licht weggeschermd te worden. In combinatie met de juiste RV en CO₂ zal dit kunnen leiden tot extra groei. Overigens kan ditzelfde doel ook behaald worden door de inzet van verneveling.

6.3 Hoe zou de klimaatregeling aangepast moeten worden om maximaal profijt te krijgen van NIR filtering?

In principe is dan de opgave om de sommen aan temperatuur, CO₂, en verdamping zo goed mogelijk af te stemmen op de ontvangen lichtsom en de stand van het gewas. Ervan uitgaand dat de lichtsom een gegeven is, de beschikbare CO₂ te laag, de temperatuursom en de verdamping overdag te hoog, dan zal het duidelijk zijn dat een optimale regeling niet eenvoudig is, tenzij je alle factoren onafhankelijk van elkaar zou kunnen regelen. Daarvoor worden de kosten echter veel te hoog. Dus moeten we ons concentreren op datgene wat het meeste oplevert en dat is meestal het maximaliseren van de fotosynthese door de CO₂ zo hoog mogelijk te houden en de

huidmondjes maximaal open. Dat betekent dat een beheersing van de temperatuur minder voorrang krijgt. Omdat veel ontwikkelingsprocessen toch vooral afhankelijk zijn van een temperatuursom over een etmaal of zelfs over een langere integratieperiode, kunnen we de nacht gebruiken om die temperatuursom te besturen. Omdat er 's nachts geen instraling is kost het veelal weinig energie om in de nacht de temperatuursom te verlagen, zeker wanneer we daar relatief veel uren voor gebruiken. Wel is het van belang om overdag de verdamping als gevolg van te hoge kasttemperaturen te temperen omdat watergebrek de huidmondjes doet sluiten en verhoging van de CO₂ concentratie dan geen zin heeft. Een NIR filter helpt in dat verband omdat de verdamping daarmee al getemperd wordt. Maar omdat meestal zo strikt aan een beheersing van de temperatuur overdag wordt vastgehouden, wordt er toch nog zoveel gelucht dat de CO₂ concentratie van de kaslucht juist bij veel instraling lager wordt. Daarnaast wordt er geregeld op basis van kaslucht temperatuur terwijl de processen in de plant vooral afhankelijk zijn van de temperatuur van de verschillende plantorganen.

Deze schijnbare tegenstelling tussen de verschillende beoefeningen van een plant zijn door de natuur zelf eigenlijk al op een prima wijze opgelost, namelijk met behulp van een huidmondje dat op basis van de aanwezige hoeveelheden, licht, vocht, CO₂ en energie de opname van CO₂ reguleert ten opzichte van de hoeveelheid verdamping. De indruk bestaat dat we dat regelorgaan met onze klimaatregeling vooral bij stressmomenten flink tegenwerken. Uiteraard met als doel om maximale groei of kwaliteit te halen. Maar door het ondersteunen van het regelgedrag bereik je met minder moeite meer effect dan met het werken tegen de natuur in. Strikt genomen is dan de wens van de teler alleen maar om de huidmondjes langer open te houden dan de plant zelf zou doen. Onderzoek heeft geleerd dat de huidmondjes niet zozeer sluiten door een te hoge bladtemperatuur, maar veel meer door een te hoge verdamping, een verdamping die groter is dan de wortels langdurig kunnen aanvoeren. Daarom bestaat een goede regeling uit het temperen van de verdamping zonder dat de bladtemperatuur extreem oploopt. En ook hiervoor wijst de natuur in feite zelf de weg. Verdamping van water voert een enorme hoeveelheid energie af. Als we nu door middel van verneveling extra vocht in de kasruimte laten verdampen, voeren we net als de plant veel energie af om oververhitting te voorkomen. Gelijktijdig hoeft de plant dan minder energie af te voeren door verdamping, dus de kritische grens van verdamping wordt niet meer bereikt. Dat betekent dat de huidmondjes minder zullen sluiten en de CO₂ goed kan worden opgenomen. Als we dan gelijktijdig de warmteafvoer uit de kas niet meer laten verlopen via de afvoer van lucht, maar via de afvoer van waterdamp wordt het mogelijk om de ramen veel verder te sluiten. Minder lucht afvoeren betekent direct minder CO₂ afvoeren. Het is zelfs al aangetoond dat de ramen nagenoeg helemaal dicht kunnen blijven wanneer je energieafvoer via luchtverplaatsing vervangt door energieafvoer via verplaatsing van waterdamp (Schmidt, 2008). Omdat de luchtramen behoorlijk gesloten kunnen blijven moet wel aandacht worden besteed aan de sterk verminderde luchtbeweging bovenin het gewas. Een belangrijk deel van de energieoverdracht van het blad naar zijn omgeving kan namelijk gebaseerd zijn op het hebben van een temperatuurverschil tussen blad en kaslucht. Is er weinig luchtbeweging dan kan die warmteoverdracht sterk teruglopen met als gevolg een oplopende bladtemperatuur. Dat geldt vooral voor gewassen met een relatief lage eigen verdamping zoals veel potplanten, maar bijvoorbeeld ook paprika.

Samengevat wordt het positieve effect van NIR filtering pas behaald wanneer de verminderde energietoevoer wordt gecombineerd met een hogere CO₂ concentratie in de kas, te behalen met een nevelinstallatie, raamstand regeling op basis van energieafvoer via waterdamp en een temperatuurregeling op basis van etmaalsom. Voor gewassen die zelf voldoende kunnen verdampen om geassisteerd met een nevelinstallatie en een goede raamstandregeling de huidmondjes voldoende open te houden heeft NIR filtering geen meerwaarde. De gelijktijdige extra vermindering van PAR licht is zelfs een nadeel.

7 Conclusies

1. Vermindering van de instraling door een NIR filter levert potentieel een vermindering op van de verdamping, verlaging van de bladtemperatuur en verhoging van de CO₂ concentratie in de kas. Maar het hangt van vele (stuurbare) factoren af hoe groot en op welke plek in het gewas een verandering meetbaar zal zijn. NIR filtering zonder een aangepaste regeling schiet zijn doel dus voorbij. De belangrijkste factoren die de grootte van de invloed bepalen zijn: de LAI, de luchtbeweging, de planthoogte en RV.
2. De verdamping zal het meest sterk reageren op de afgenomen energietoevoer omdat verdamping vrijwel volledig afhankelijk is van de netto energie die het blad bereikt.
3. De ruimtetemperatuur zal niet sterk wijzigen omdat deze afhankelijk is van de omgevingstemperatuur en van de hoeveelheid energie die via het luchtraam wordt afgevoerd. Bij verminderde instraling zal er minder verdamping zijn en wordt er dus ook minder warmte via het luchtraam afgevoerd.
4. De verminderde luchtbeweging als gevolg van een kleinere raamstand kan de invloed van NIR-scherming op de planttemperatuur deels teniet doen omdat er minder warmte-uitwisseling met de kaslucht plaatsvindt.
5. Een vermindering in de verdamping zorgt ook voor een minder grote verlaging van de bladtemperatuur. Die twee zijn via de energiebalans aan elkaar gekoppeld omdat een huidmondje een actief regelorgaan is. Omdat de RV in de kas een resultante is van de verdamping en de stand van de ramen is het effect op de huidmondjesopening ongewis. Voor een hoge fotosynthese is echter een huidmondje dat ver open staat gewenst zodat er veel CO₂ kan worden opgenomen. Verneveling in combinatie met een aangepaste raamstandregeling kan ervoor zorgen dat de huidmondjes meer geopend blijven.
6. Verhoging van de CO₂ concentratie is de belangrijkste bewezen factor voor meerproductie. Bij een goede raamstandregeling op basis van energiebalans en verneveling met als doel het zo ver mogelijk knijpen van de ramen wordt het CO₂ verlies via de ramen zoveel mogelijk beperkt. Dit principe wordt met succes toegepast in de Aircokas, waarmee in de praktijk 150 tot 200 ppm hogere CO₂ concentraties worden bereikt op dagen met veel instraling. Het combineren van deze techniek met een NIR-scherming kan potentieel het verlies aan CO₂ via de luchtramen nog verder beperken.
7. Voor gewassen (zoals roos) waarbij nu bewust de lichtsom wordt beperkt om de etmaal temperatuursom te beheersen heeft NIR-filtering alleen zin als door een aangepaste klimaatregeling ook de kastemperatuur wordt verlaagd. Dat zal

gepaard gaan met extra verlies van CO₂. Door de grotere hoeveelheid beschikbaar PAR licht is dit juist ongewenst. Ook in dit geval moet worden gekozen voor een strategie met verneveling omdat daarmee gelijktijdig de kastemperatuur omlaag kan worden gebracht met behoud van zoveel mogelijk CO₂ in de kas.

8. De invloed van NIR-scherming op hoogliggende groeipunten is ongewis, maar waarschijnlijk niet erg groot. Dat komt door de verminderde luchtbeweging bovenin het gewas.
9. Voor de vruchten onderin een hoogopgaand gewas kan de verminderde NIR straling leiden tot een lagere temperatuur en daardoor een te langzame afrijping. De stand van de luchtramen heeft onderin veel minder effect op de grootte van de luchtbeweging. Verticale ventilatoren kunnen dit probleem weer oplossen.
10. Zolang niet bekend is wat een optimale verhouding is tussen de temperaturen (zowel sommen als momentane waarden) van blad, groeipunt en omringende lucht en verdamping, licht en CO₂ valt er geen oordeel te vellen over de vraag of NIR filtering in fysiologische zin nut heeft en hoe een kasklimaat daarop aangepast zou moeten worden.
11. Samenvattend verdient het aanbeveling om eerst goed te definiëren welke fysiologische effecten men nu eigenlijk beoogd met een NIR scherm en vervolgens die doelstellingen proberen te halen door een aan de nieuwe situatie aangepaste regeling van raamstand, luchtbeweging in het gewas, luchtbevochtiging en mogelijk zelfs aangepaste gewasopbouw.

8 Literatuur

- Alferder, R.G. en M.D. Gates. Energy exchange in plant canopies. *Ecology*, Vol 52, No. 5, 855-861 (1971)
- Asner, G.P. en C.A. Wessman. Scaling PAR absorption from the leaf to landscape level in spatially heterogenous ecosystems. *Ecological Modelling* 103, 81-97. (1997)
- Bot, G.P.A. et al. Effects of cover properties, ventilation rate, and crop leaf area on tropical greenhouse climate. *Biosystems Engineering* 99, 553 – 564 (2008)
- vd Braak, N. et. al. Het effect van NIR-filterende kasdek- en schermmaterialen op kasklimaat, energieverbruik en gewasproductie. A&F rapport nr. 505. (2005).
- Chelle, M.. Could plant leaves be treated as Lambertian surfaces in dense crop canopies to estimate light absorption? *Ecological Modelling* 198, 219–228 (2006)
- B.D. Ganapol. *Vegetation Canopy Reflectance Modeling with Turbid Medium Radiative Transfer*. Book: *Computational Methods in Transport*. Springer Berlin (2004)
- Heins R.D. et al. Environmental Conditions under an Experimental Near Infra-Red Reflecting Greenhouse Film. *Proc. IS on Trop. Subtrop. Greenhouses. Acta Hort.* 578, 181-185. ISHS (2002)
- Heins R.D. et al. Plant Responses under an Experimental near Infra-Red Reflecting Greenhouse Film. *Proc. 4th IS on Artif. Light. Acta Hort.* 580, 137-143. ISHS (2002)
- Hemming, S. et al. Filtering Natural Light at the Greenhouse Covering – Better Greenhouse Climate and Higher Production by Filtering out NIR? *Proc. Vth IS on Artificial Lighting. Acta Hort.* 711, 411-416. ISHS (2006)
- Henrion, W. en H. Tributsch. Optical solar energy adaptations and radiative temperature control of green leaves and tree barks. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 93, 98–107. (2009)
- Kempkes, F. et al. Cover Materials Excluding Near Infrared Radiation: Effect on Greenhouse Climate and Plant Processes. *Proc. IW on Greenh. Environ. Control & Crop Prod. in Semi-Arid Regions. Acta Hort.* 797, 477-482. ISHS (2008)
- Kittas, C. et al. Influence of Covering Material and Shading on the Spectral Distribution of Light in Greenhouses. *J. Agric. Engng Res.* 73, 341-351. (1999)
- Schmidt, U. et al. Greenhouse cooling and carbon dioxide fixation by using high pressure fog systems and phytocontrol strategy. *Proc. IW on Greenh. Environ. Control & Crop Prod. In Semi-Arid Regions. Acta Hort* 797, 279-284. ISHS (2008)
- Sethi, V.P. en S.K. Sharma. Survey of cooling technologies for worldwide agricultural greenhouse applications. *Solar Energy* 81, 1447–1459. (2007)

Tunick, A. A radiation and energy budget algorithm for forest canopies. *Meteorol Atmos Phys* 91, 237-246 (2006)

Voogt, J.V.M en P.A. van Weel. Climate control based on stomatal behavior in a semi-closed greenhouse system 'Aircokas'. *Proc. IW on Greenh. Environ. Control & Crop Prod. In Semi-Arid Regions. Acta Hort* 797, 151-156. ISHS (2008)