



Laan van Westenenk 501
Postbus 342
7300 AH Apeldoorn

www.tno.nl

T +31 55 549 34 93

F +31 55 541 98 37

info-BenO@tno.nl

TNO-rapport

2008-A-R0326/B

Dampdoorlatende energieschermen – Fase I

Productschap  Tuinbouw



Datum	Maart 2008
Auteur(s)	L. Krosse Y. Tanida C. Bootsveld
Opdrachtgever	Productschap Tuinbouw
Projectnummer	36798
Aantal pagina's	31 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	4

Alle rechten voorbehouden. Niets uit dit rapport mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor onderzoeksopdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2008 TNO

Samenvatting

Energieschermen zijn een belangrijke methode voor tuinders om energie te besparen in het koude seizoen. Een nadeel van energieschermen is de verstoring van de vochtthuishouding. De vochtafvoer wordt geregeld met vochtkieren met als nadeel dat er lokaal complexe damp- en luchtstromingen ontstaan, resulterend in lokale groei- en bloeiverschillen. De 'open bandjes' in het scherm, bedoeld om damp door te laten, laten ook CO₂ door. Toepassing van een folie (energiescherm) die wel waterdamp doorlaat maar nauwelijks CO₂ zou een oplossing kunnen bieden.

In dit onderzoek is de haalbaarheid van dampdoorlatende schermen bepaald. Hierin is, naast de technische haalbaarheid, ook gekeken naar de effecten die zo'n folie zou hebben op de teelt.

Voor een tomatenteelt, zoals die momenteel gangbaar is, zijn een tweetal cases doorgerekend. Een (referentie)teelt met scherm en een teelt zonder scherm. Het gasgebruik van de geschermdte teelt is 41.1 m³/m² en voor de ongeschermdte teelt 48.6 m³/m². Om deze besparing van 18% te bereiken, moeten er circa 2000 schermuren worden gemaakt.

Een vochtdoorlatend scherm levert ten opzichte van de geschermdte situatie een extra energiebesparing op van ca. 1-2 %. De exacte waarde kan pas berekend worden op het moment dat de materiaaleigenschappen, waaronder de massa overdrachtscoëfficiënt van waterdamp door het vochtdoorlatende energiescherm experimenteel zijn bepaald.

Uit het onderzoek is gebleken dat de huidige folies nog niet voldoen aan de gewenste fysische eigenschappen, vooral de lichttransmissie en de H₂O-permeabiliteit. Zolang deze eigenschappen niet worden verbeterd is er nog geen toepassing mogelijk in de glastuinbouw.

De fabrikant moet nog een uitspraak doen over de verwachting dat de benodigde eigenschappen worden behaald.

Wanneer de eigenschappen van de huidige doeken worden verbeterd kunnen dampdoorlatende doeken bijdragen aan een reductie van het energieverbruik. Om de concurrentie met andere technieken aan te kunnen moet aan verhoging van de lichttransmissie van de doeken gewerkt worden.

Inhoudsopgave

	Samenvatting.....	2
1	Inleiding.....	4
1.1	Doelstelling.....	4
2	Programma van eisen.....	5
3	Berekeningen energiebesparing.....	6
3.1	Modelberekeningen.....	6
3.2	Kas en randvoorwaarden.....	7
3.3	De teelt.....	7
3.4	Kasklimaat.....	7
3.5	Resultaten.....	9
3.6	Conclusie.....	15
4	Vocht en CO₂ permeabiliteit.....	16
4.1	Drijvende kracht.....	16
4.2	CO ₂ invloed.....	16
5	Lichtpermeabiliteit (experimenteel).....	18
6	Experimentele opstelling.....	19
7	Conclusie.....	20
7.1	Energiebesparing.....	20
7.2	Mogelijke toepassing in de glastuinbouw.....	20
8	Verantwoording.....	22
	Bijlage(n)	
	A Simulatiemodel KASPRO	
	B Schermeigenschappen (referentiescherm)	
	C Correlaties vochtige lucht	
	D Grootte drijvende kracht voor damptransport door energiescherm	

1 Inleiding

Energieschermen zijn een belangrijke methode voor tuinders om energie te besparen in het koude seizoen. Zowel lichtdoorlatende schermen als ook niet-lichtdoorlatende energieschermen voor afscherming bij belichte teelten, worden gebruikt.

Een nadeel van energieschermen is de verstoring van de vochthuishouding. De vochtafvoer wordt geregeld met vochtkieren met als nadeel dat er lokaal complexe damp- en luchtstromingen ontstaan, resulterend in lokale groei- en bloeiverschillen. De 'open bandjes' in het scherm, bedoeld om damp door te laten, laten ook CO₂ door.

Dit projectvoorstel betreft de toepassing van een folie (energiescherm) die wel waterdamp doorlaat, maar nauwelijks CO₂.

1.1 Doelstelling

Doel van het onderzoek is de haalbaarheid te bepalen van de toepassing van dampdoorlatende materialen als energieschermen in kassen. Naast de technische haalbaarheid moet de mate van mogelijke energiebesparing en de invloed op het kasklimaat duidelijk worden. Het onderzoek moet ook het inzicht opleveren of dampdoorlatende folies geschikter zijn dan standaard folies in foliekassen.

Nevendoelstellingen

De uniformiteit van het gewas zal toenemen als geen vochtkieren meer worden gebruikt. Immers wanneer er kieren in/tussen de schermen zijn ontstaat er een koudeval, wat energetisch nadelig is maar bovendien leidt tot variërende klimaatcondities rond het gewas met alle negatieve gevolgen voor de productie van dien.

De verwachte toepassingstermijn¹ voor het project bedraagt drie tot vijf jaar: Indien de toepassing van dampdoorlatende energieschermen duidelijke voordelen biedt dan is de verwachting dat deze snel kunnen worden toegepast.

¹ De toepassingstermijn is gedefinieerd als het aantal jaren totdat de resultaten van het onderzoek door 30% van de doelgroep toegepast wordt.

2 Programma van eisen

Het programma van eisen is weergegeven in tabel 1. In de kolom 'grootte' is geprobeerd om zoveel mogelijk de actuele waarden van de huidige energieschermen in te vullen. In de kolom 'wens' worden de gewenste waarden weergegeven.

Tabel 1 Programma van eisen

Parameters	grootte	wens	Commentaar
Fysisch			
Waterdamp permeabiliteit		100 %	
CO ₂ permeabiliteit		0%	
Warmte geleiding, lambda			Op dit moment nog niet belangrijk
Stralingstransmissie, tau	0-30%	0%	
Emissiecoeff. Binnenzijde			Op dit moment nog niet belangrijk
Emissiecoeff. Buitenzijde	0.9-0.1	0	
Transmissie PAR (dagtoepassing)	Max. 90%	100%	
Transmissie PAR (nacht toepassing)	Max. 15%	0 %	Verduisteren, afspraken/convenant
Transmissie IR (800 tot ca. 5000), winter		100	Wintersituatie, maximale doorlatendheid
Transmissie IR, zomer		0	Zomersituatie, reflecteren
Duurzaamheid			
levensduur	7-8 jaar	10 jaar	
vervuiling		0%	Nu vaak naar 7-8 jaar vervangen
Milieubelasting/recyclebaarheid			Nu nog geen item
UV-bestendigheid	5 jaar	>15 jaar	
Soepelheid (opvouwbaarheid)			Is afhankelijk van systeem
Economisch			
kostprijs	€1,- tot 1,25/m ² -jaar		Ca. 12 euro per m ² voor simpel doek, incl. installatie
Overig			
Mechanische sterkte, rek bij breuk	±20%		
Mechanische sterkte, treksterkte	±10%		
brandveiligheid			Brandoverslag en brandvoortplanting voorkomen
Chemisch en thermisch inert			Inert bij temperatuur en bestrijdingsmiddelen

3 Berekeningen energiebesparing

Voor een tomatenteelt, zoals die momenteel gangbaar is, zijn een tweetal cases doorgerekend. Een (referentie)teelt met scherm en een teelt zonder scherm. Omdat de referentieteelt is toegespitst op een teelt met scherm en de teelt zonder scherm exact dezelfde klimaatstrategie heeft waar het scherm simpelweg niet gesloten wordt, moeten een paar kleine aanpassingen in de uitgangspunten voor deze teelt verricht worden.

In de volgende paragrafen zal kort beschreven worden hoe het model, de kas en de teelt er uitzien.

3.1 Modelberekeningen

Voor het berekenen van de temperatuur- en vocht-verlopen boven en onder het scherm, is het simulatiemodel KASPRO gebruikt. In Bijlage A is een uitgebreide beschrijving van het model gegeven.

Voor het beantwoorden van de vraagstelling van deze opdracht, zal hier iets verder worden ingegaan op de modellering van het scherm.

Indien het scherm geopend is, of in het geval dat er geen scherm aanwezig is, is er één kascompartiment van de vloer tot aan het kasdek. Wordt er een scherm gesloten, dan wordt de kas in twee compartimenten opgedeeld, één onder het scherm en één boven het scherm, "top" genaamd. Van dit bovencompartiment worden voor ieder rekenstap dynamisch alle grootheden bepaald. Wordt het scherm echter weer geopend, dan wordt dit TOP compartiment weer opgeheven. Dit betekent dat in de datasets, als het scherm ver genoeg geopend is, de temperatuur en RV van het TOP-compartiment gelijk worden aan die van het beneden compartiment.

Als het scherm gesloten is, zijn er drie redenen om het gedeeltelijk of geheel te openen.

1. De temperatuur in het benedencompartiment neemt door het sluiten teveel toe ten opzichte van het gewenste setpoint. Dan wordt er een temperatuurkier van 2% ingesteld.
2. Het wordt in het benedencompartiment te vochtig. Dan wordt er een kier van 0.3% ingesteld en 6 minuten gewacht. Is de trend van het vochniveau nog stijgende, dan wordt een volgende stap van 0.3% genomen. Dit gaat door tot een maximale vochtkier is bereikt van 4%. Zodra de vocht-trend dalende is, dan wordt het scherm weer gesloten (in één keer weer dicht).
3. Er is zoveel licht en/of de buitentemperatuur is zo hoog dat langer schermen t.b.v. energiebesparing geen nut meer heeft.

Indien er een kier is ingesteld, wordt door het model een flow (f_{AirTop}) door de kier berekend. Daarnaast is er ook altijd sprake van enige flow door het kasdek (f_{Vent}).

Deze zal vrijwel nooit 0 worden omdat de kas lekluchtverliezen kent, die weer afhankelijk zijn van de windsnelheid. Daarnaast kunnen de ramen worden geopend waardoor de ventilatie sterk kan toenemen.

3.2 Kas en randvoorwaarden

Bij de standaardteelt is uitgegaan van een kas van 4 ha met een goothoogte van 5 meter. De traliemaat is 8 meter (2 kappen van 4 meter) en de pootafstand is 4.5 meter. De luchtramen zijn 2 ruits (2.25 meter lang) en 1.32 meter hoog. Voor de productie van warmte en CO₂ wordt alleen gebruik gemaakt van een ketel. Aangenomen is dat er ten behoeve van CO₂-productie geen warmte wordt vernietigd.

Voor de straling, buitentemperatuur en overige van belang zijnde buitenklimaatfactoren, wordt in de modelberekeningen gebruik gemaakt van het SELJaar, dat representatieve klimaatgegevens voor Nederland bevat.

3.3 De teelt

Het verwarmingssysteem is een standaard systeem voor de intensieve glasgroenteteelt en bestaat uit vijf 51 mm buizen per kap in het ondernet en half zo veel 28 mm buizen in het secundaire verwarmingsnet. De bovenbuizen fungeren als condensornet, maar ook als secundair verwarmingsnet wanneer een groot verwarmingsvermogen noodzakelijk is. De buistemperaturen zijn begrensd op 70 °C voor zowel het onder- als het bovennet. Het secundaire net wordt pas ingeschakeld voor verwarming als het ondernet een buistemperatuur van 60 °C heeft bereikt. De kas is uitgerust met een rookgasverdeelsysteem voor de CO₂-dosering waarmee maximaal 180 kg CO₂ per ha per uur kan worden toegediend. De ketel heeft een verwarmingscapaciteit¹ van 110 W m⁻² (125 m³ ha⁻¹ uur⁻¹) en er is een warmteopslag buffer met een waterinhoud van 120 m³ ha⁻¹. Indien de buffer vol is, wordt de CO₂-dosering gestopt. Het gewas wordt gepland op 8 december en geruimd op 25 november.

3.4 Kasklimaat

In onderstaande tabel worden de temperatuursetpoints weergegeven. Er wordt met 2 of 3 dagdelen gewerkt. Er wordt met een opstookhelling van 1°C per uur gewerkt.

Tabel 2 Temperatuursetpoints

datum	Setpointtemperatuur		
8/12	20	–	18
15/01	17	20	16
01/11	17	–	–
25/11	5	–	–
datum	temperatuur bereikt op		
8/12	bij zonsopkomst	–	1 uur na zon onder
15/01	1 uur na zon op	5 uur na zonop	1 uur na zon onder
01/11	dag en nacht	–	–
25/11	dag en nacht	–	–

¹ Voor de teelt zonder scherm is dit verhoogd naar 180 W/m²

Van de teeltstart (8 december) staat de ventilatielijn 2 °C boven de stooklijn. Er wordt daardoor weinig warmte afgelucht, zodat op heldere dagen hogere etmaaltemperaturen kunnen worden behaald. Op 15 januari wordt dit terug gebracht tot 1.5 °C en vanaf 15 maart is dit nog 1 °C, wat tot het eind van de teelt zo blijft gehandhaafd. Deze temperaturen zijn dag en nacht gelijk. Op licht kan er tussen de 100 en 300 W/m² globale straling 1 (van teeltstart tot 1 februari) of 2 °C (de rest van het jaar) lichtverhoging op de setpointtemperatuur verwarmen worden gezet.

Er wordt beperkt gebruik gemaakt van een minimum buistemperatuur. In de periode vanaf de start van de teelt tot 1 juni is de minimum buistemperatuur van 1.5 uur voor zonsopgang tot 2 uur na zonsopgang ingesteld op 45 °C en vervolgens de rest van de dag op 38 °C. Na 1 juni wordt respectievelijk 42 °C en 35 °C ingesteld. Tussen de 120 en 150 W/m² globale straling wordt deze buistemperatuur afgebouwd.

De vochtregeling geschiedt met de luchtramen; er wordt pas bijgestookt indien de ruimtetemperatuur door deze ventilatie onder de setpointtemperatuur verwarmen komt. Er wordt ingegrepen op de luchtvochtigheid wanneer de kaslucht een RV van meer dan 90 % bereikt. De versterkingsfactor op de luchtramen in de winter 1% raamstand per % vochtoverschrijding. Naar de zomer wordt dit langzaam verhoogd naar 5% per % vochtoverschrijding.

Het setpoint voor de CO₂-concentratie in de kas is jaarrond 1000 ppm. De CO₂ wordt gedoseerd met een maximale hoeveelheid van 180 kg/ha/uur tussen zonsopkomst en zonsondergang. De resterende ruimte in de buffer wordt over de rest van de CO₂-doseerperiode verdeeld. Er wordt in principe van zonsopkomst tot zonsondergang CO₂ gedoseerd. In de zomerdag wordt er 2 uur later begonnen en 2 uur eerder gestopt om de buffercapaciteit beter te benutten.

Er wordt een transparant beweegbaar scherm type SLS 10 ultra plus gebruikt (voor eigenschappen van dit schermmateriaal, zie Bijlage 2) tussen 15 oktober en 1 mei. Vanaf het eind van de oude teelt (10 november) tot 1 januari, wordt het scherm pas geopend bij een stralingsniveau van boven de 100 W/m². Daarna bij een niveau van 50 W/m². Komt de straling weer onder deze niveaus, dan wordt het scherm weer gesloten. Als tweede voorwaarde is er de buitentemperatuur. Vanaf 10 november gaat het scherm pas dicht bij een buitentemperatuur lager dan 9 °C. Vanaf 15 januari bij een buitentemperatuur van 7 °C, vanaf 15 februari 5 °C, 5 maart 4 °C en na 1 mei wordt het scherm tot 15 oktober uitgeschakeld. Vanaf 15 oktober mag het scherm pas weer dicht bij een buitentemperatuur van lager dan 5 °C. In de laatste 2 weken van de teelt is dit 8 °C.

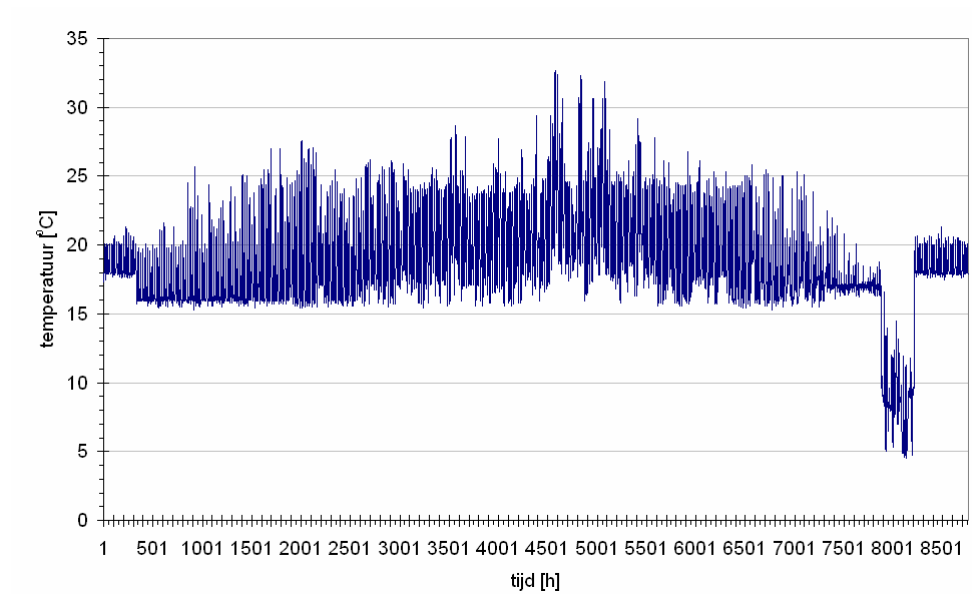
Voor de teelt zonder scherm, wordt het scherm jaarrond pas gesloten bij een buitentemperatuur van beneden de -20 °C. Hierdoor wordt het scherm nooit gesloten omdat het in het SEL-jaar nooit -20 °C wordt, maar heeft de kas wel dezelfde eigenschappen door installatie van een scherm daalt de transmissie van de kas. Wordt het scherm weggelaten dan verbeterd de transmissie van de kas en wordt het vergelijken van de twee teelten lastiger.

Wanneer het vochniveau (van het ondercompartiment) boven het setpoint komt, wordt het scherm op een vochtkier van maximaal 4% getrokken. In de gevel is een beweegbaar gevelscherm geplaatst, dat gelijktijdig met het horizontale scherm geopend en gesloten wordt.

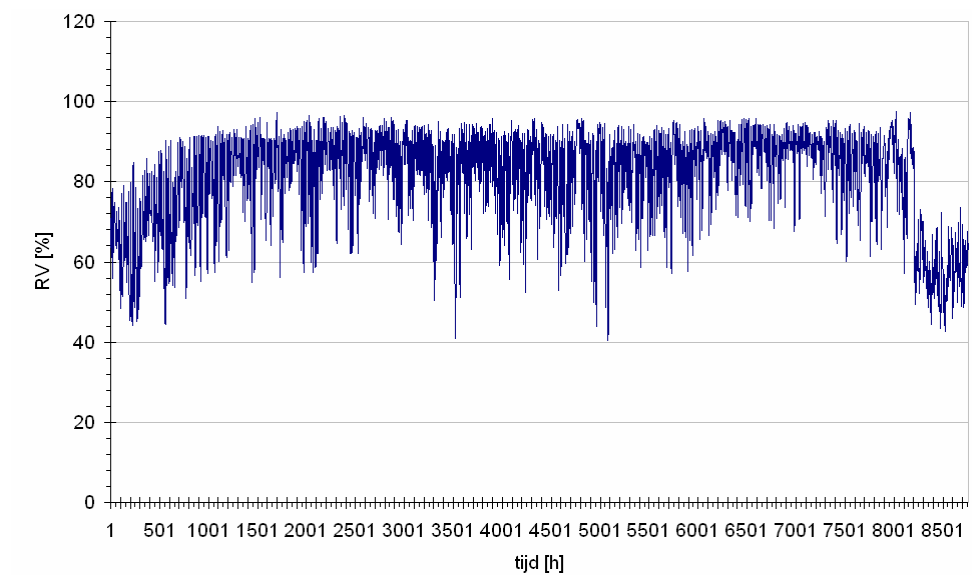
Er wordt in de standaardteelt geen temperatuurintegratie toegepast. Verder wordt er ook geen gebruik gemaakt van minimum raamstanden.

3.5 Resultaten

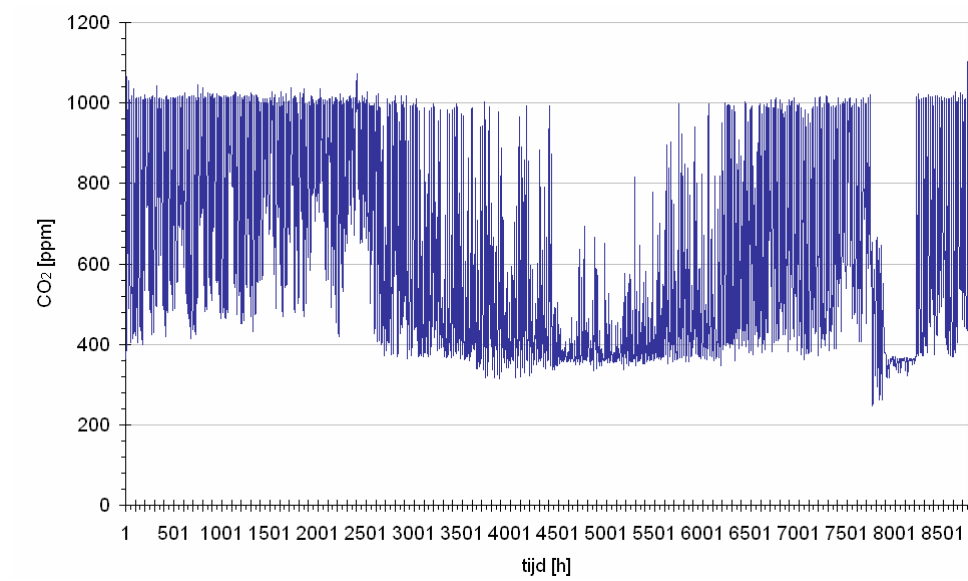
In figuur 1 en 2 zijn het verloop van de temperatuur en de relatieve vochtigheid in een kas zonder energiescherm, jaarrond uitgezet.



Figuur 1 Temperatuurverloop in de kas (zonder energiescherm)

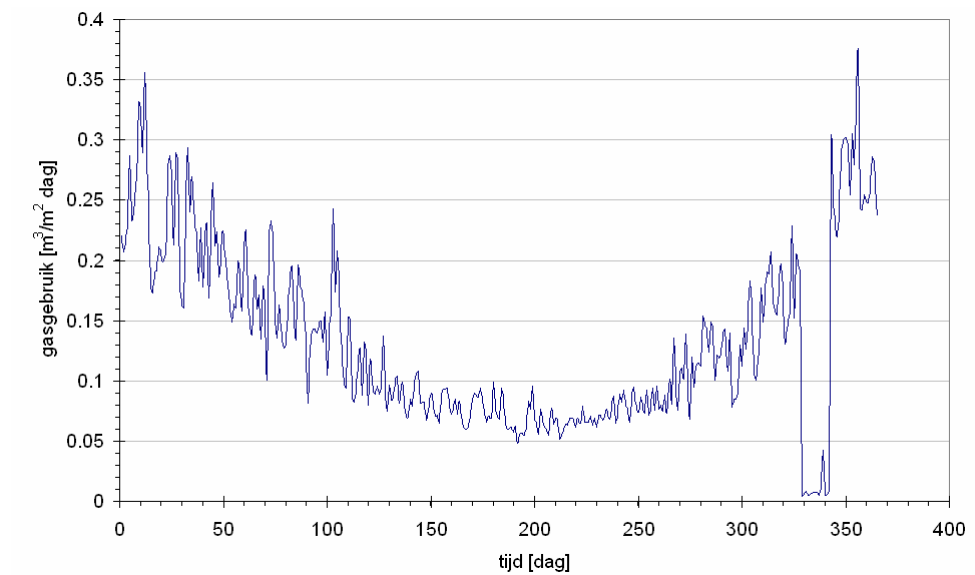


Figuur 2 RV-verloop in de kas (zonder energiescherm)



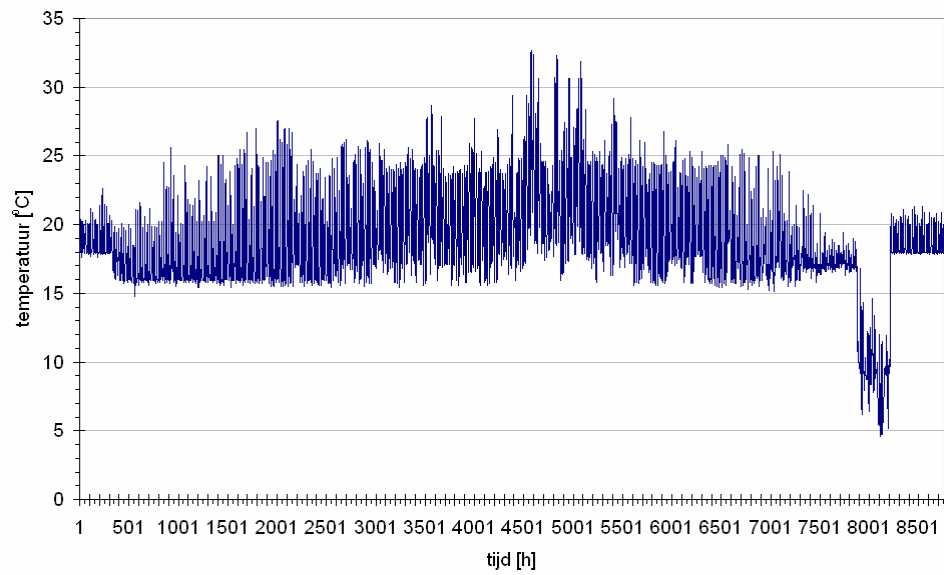
Figuur 3 CO₂ concentratie in de kas (zonder energiescherm)

In figuur 3 is de CO₂ concentratie in de kas weergegeven als geen energiescherm wordt toegepast.

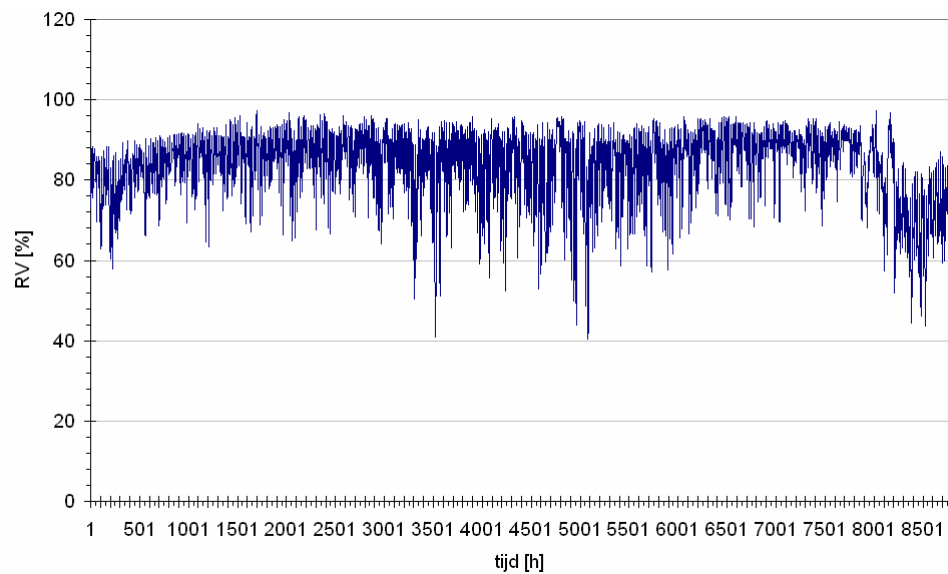


Figuur 4 Gasgebruik per dag (zonder energiescherm)

In figuur 5 en 6 zijn de dezelfde parameters uitgezet maar dan voor een kas met een energiescherm met boven beschreven schermstrategie.

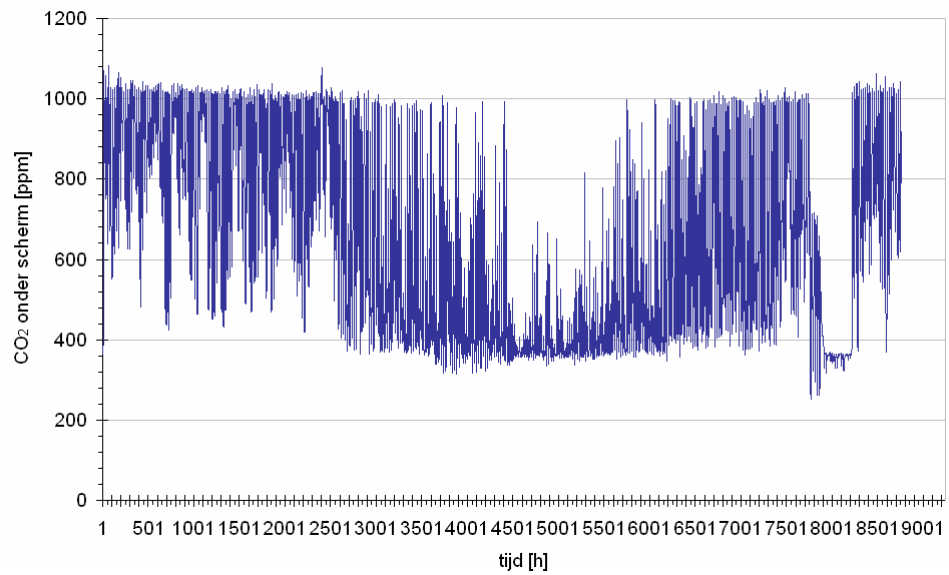


Figuur 5 Temperatuurverloop in de kas (met energiescherm)

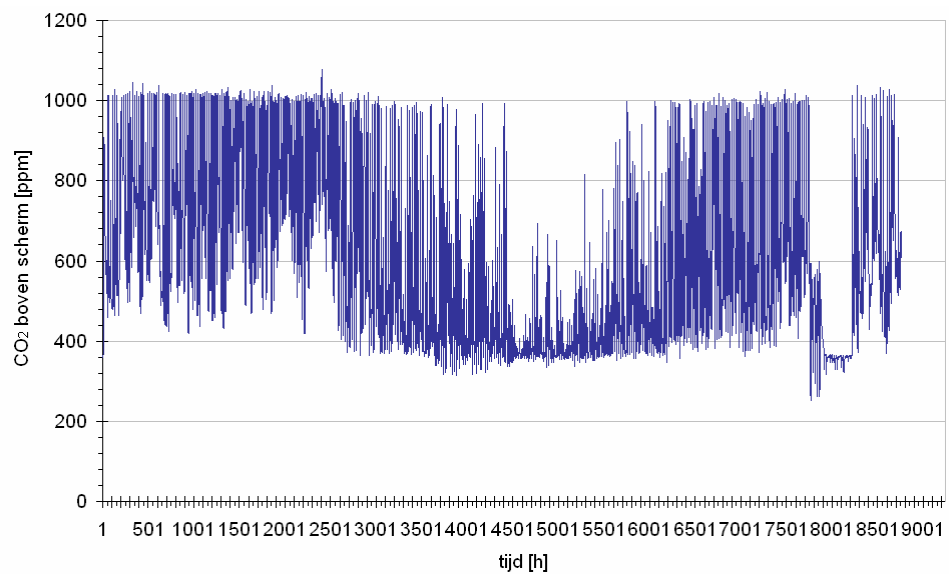


Figuur 6 RV-Verloop in de kas (met energiescherm)

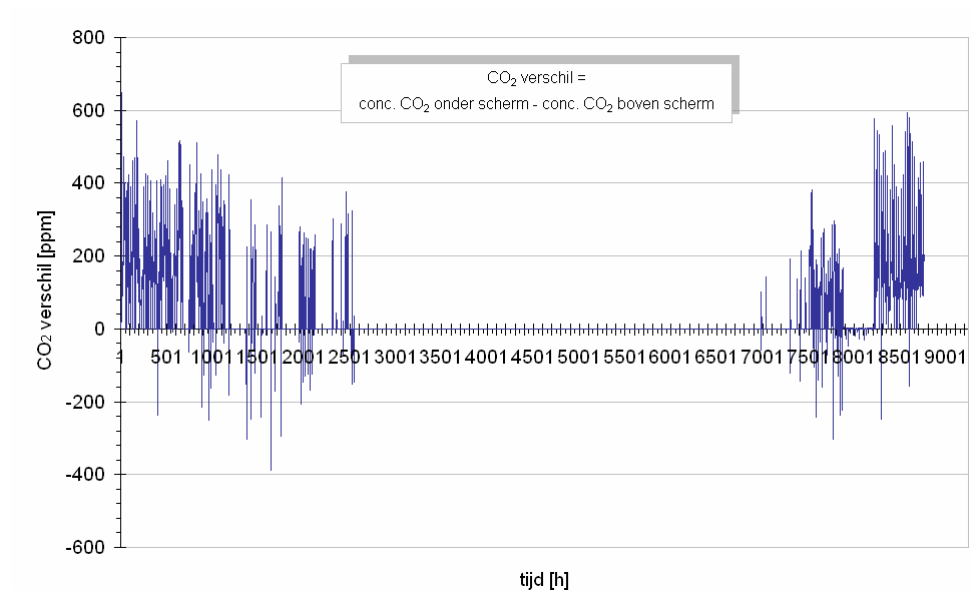
In figuren 7, 8 en 9 zijn achtereenvolgens de CO₂ concentratie onder het energiescherm, boven het energiescherm en het verschil tussen deze twee waarden weergegeven.



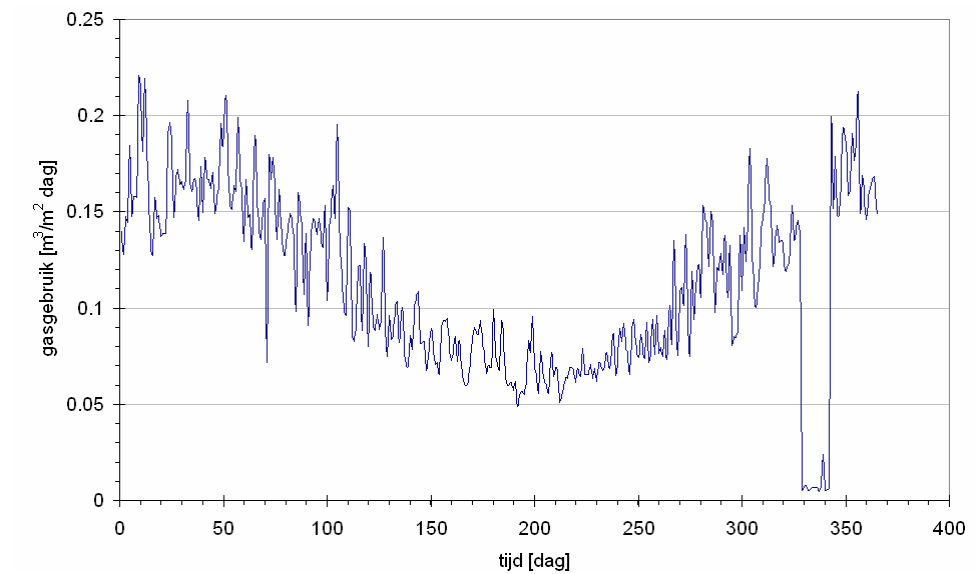
Figuur 7 CO₂ concentratie onder het energiescherm



Figuur 8 CO₂ concentratie boven het energiescherm

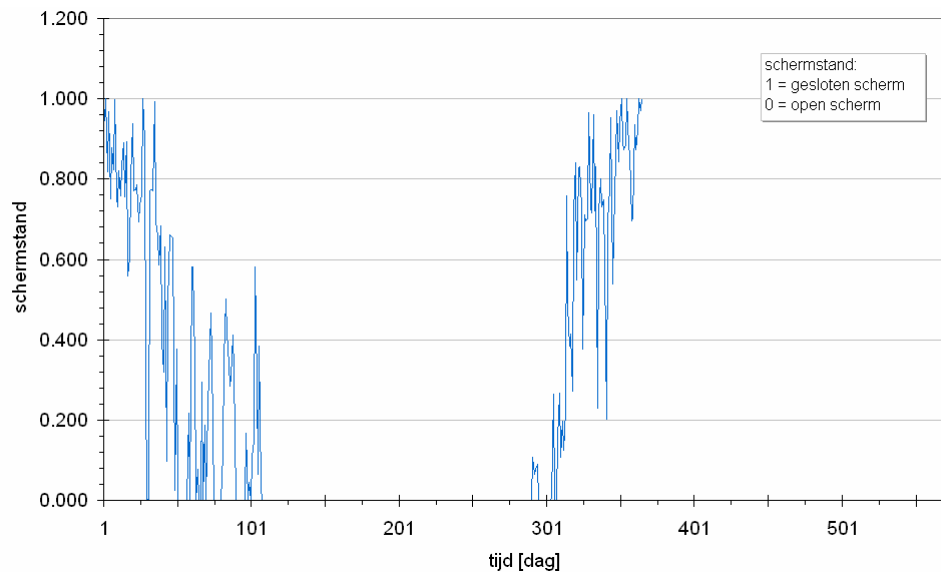


Figuur 9 Vershil in CO₂ concentratie over het energiescherm
(CO₂ concentratie onder scherm – CO₂ concentratie boven scherm)



Figuur 10 Gasgebruik (bij gebruik energiescherm)

In figuur 11 is de gemiddelde schermstand per dag weergegeven.



Figuur 11 Daggemiddelde kiergrootte scherm

In tabel 3 is samengevat gedurende hoeveel uur per jaar de maximaal toegestane RV van 90% onder het scherm wordt overschreden. Dit worden de overschrijdingsuren genoemd.

Tabel 3 Aantal overschrijdingsuren bij gebruik conventioneel energiescherm (RV>90%)

Schermstand	Aantal overschrijdingsuren
Volledig gesloten scherm	0
Volledig open scherm	1975
Deels gesloten scherm	147
<i>Totaal aantal overschrijdingsuren</i>	<i>2122</i>

De extra besparing van een waterdampdoorlatend energiescherm ten opzichte van een niet waterdampdoorlatend energiescherm ontstaat tijdens de uren dat het scherm verder dicht kan blijven. Dit geldt met name op de momenten dat nu een extra grote kier wordt getrokken om het vocht af te voeren. Dit gebeurt gedurende maximaal 147 uur.

3.6 Conclusie

Het gasgebruik van de geschermdte teelt is $41.1 \text{ m}^3/\text{m}^2$ en voor de ongeschermdte teelt $48.6 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Om deze besparing van 18% te bereiken, moeten er circa 2000 schermuren worden gemaakt. Een vochtdoorlatend scherm levert een extra energiebesparing op van ca. 1-2 %. De exacte waarde kan pas berekend worden op het moment dat de materiaaleigenschappen, waaronder de massa overdrachtscoëfficiënt van waterdamp door het vochtdoorlatende energiescherm experimenteel zijn bepaald.

Ook voor een vochtdoorlatend energiescherm zal de schermstrategie een belangrijke parameter zijn voor de bepaling van de totale energiebesparing.

Telers zullen dan wel weer gaan kiezen voor lagere maximale RV-waardes (lagere RV-setpoints) om mogelijk nadelige effecten van te hoge vochtconcentraties te voorkomen.

De meeste telers vinden naast de energiebesparing belangrijk dat ze waarschijnlijk eenvoudiger hoge CO_2 concentraties kunnen handhaven onder het scherm, dit is vooral belangrijk bij hoge lichtintensiteiten. Op dit moment kan van dit effect alleen een grove inschatting worden gemaakt omdat ook hiervoor eerst de materiaaleigenschappen van het vochtdoorlatende energiescherm experimenteel bepaald moeten worden om de permeabiliteit voor CO_2 te kunnen berekenen.

4 Vocht en CO₂ permeabiliteit

De permeabiliteit van het nieuwe foliemateriaal voor CO₂ en water wordt in deze fase niet experimenteel bepaald. Het huidige materiaal wordt nog verder geoptimaliseerd. De exacte energiebesparing en overige prestaties kunnen dus nog niet worden gekwantificeerd.

4.1 Drijvende kracht

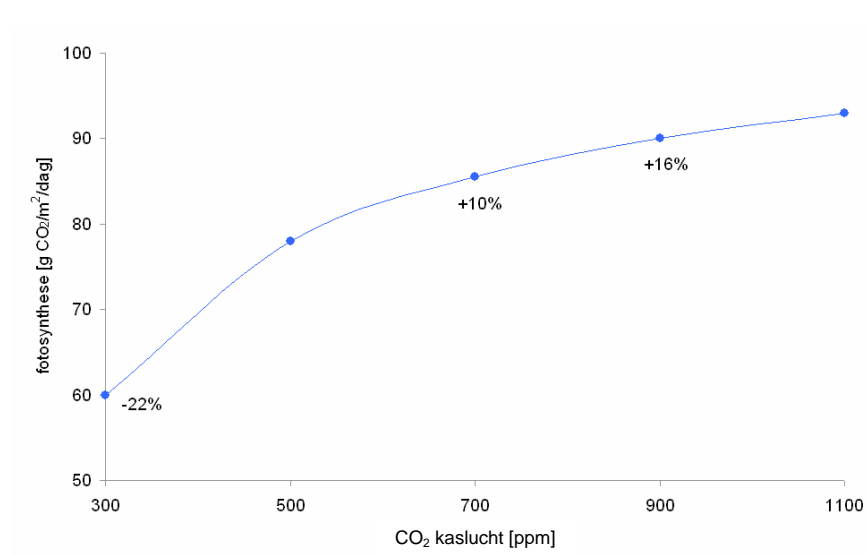
De grootte van de drijvende kracht voor het transport van vocht door het folie wordt bepaald door enerzijds het partiële waterdampspanningsverschil boven en onder het membraan en anderzijds door de permeabiliteit van de folie voor waterdamp. In bijlage D is dit verder uitgewerkt.

4.2 CO₂ invloed

De fabrikant van de folie verwacht dat het materiaal naast een goede vochtdoorlatendheid, slecht permeabel is voor CO₂. Mede hierdoor zijn hogere CO₂ concentraties in bestaande kassen (i.e. niet gesloten kassen) mogelijk. Er zitten geen kieren in het scherm waardoor CO₂ kan ontsnappen. Hogere CO₂ concentraties kunnen worden gehandhaafd.

Uit de literatuur¹ blijkt dat de fotosynthese stijgt met 30 tot 50% als de CO₂ concentratie van 350 tot 1000 ppm toeneemt (zie figuur 2). Daardoor zijn meer assimilaten beschikbaar, o.a. voor de vruchtgroei. Bij tomaat neemt als gevolg daarvan de productie met 17 tot 20 % toe. Voor paprika ligt de verwachting van productietoename zelfs nog hoger.

¹ Onder glas, Constant hoge CO₂-concentratie zorgt voor hogere productie, nr. 12, Dec. 2005, pp. 12-13

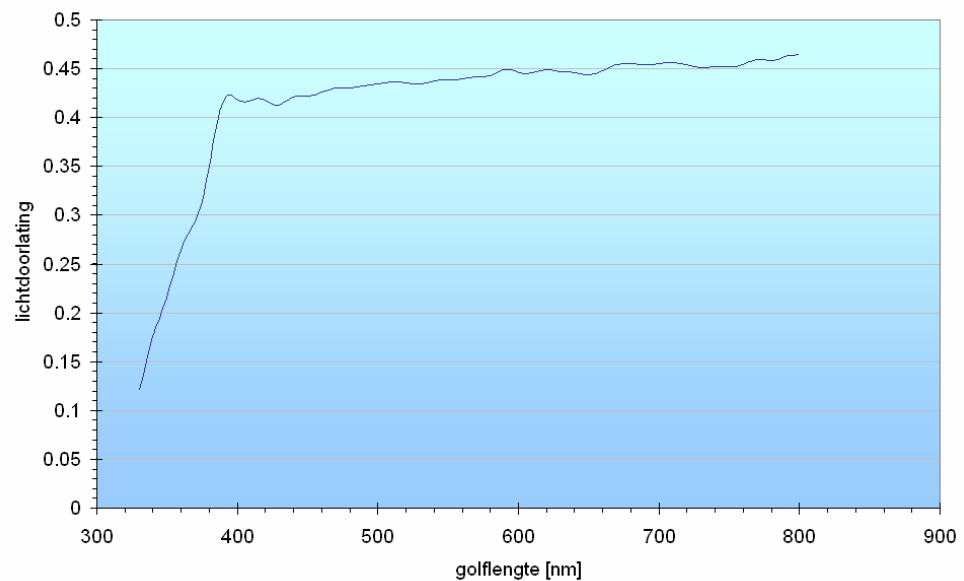


Figuur 12 Dagelijkse fotosynthese van een tomaten gewas bij veel licht (mooie dag in juni) en 20 °C.
[Bron: Model INTKAM, Plant Research International Wageningen]

5 Lichtpermeabiliteit (experimenteel)

Er zijn een aantal indicatieve metingen uitgevoerd om te achterhalen in welke richting het huidige Folie materiaal verder ontwikkeld moet worden om tot een succesvolle toepassing als energiescherm te kunnen komen.

Allereerst is de lichtdoorlatendheid van het **niet** geoptimaliseerde folie materiaal bepaald. Voor toepassing in de glastuinbouw blijkt dit nog verre van optimaal te zijn (zie figuur 13).



Figuur 13 Lichtdoorlatendheid¹ van het oorspronkelijk folie materiaal (PAR 0.436, licht 0.440).

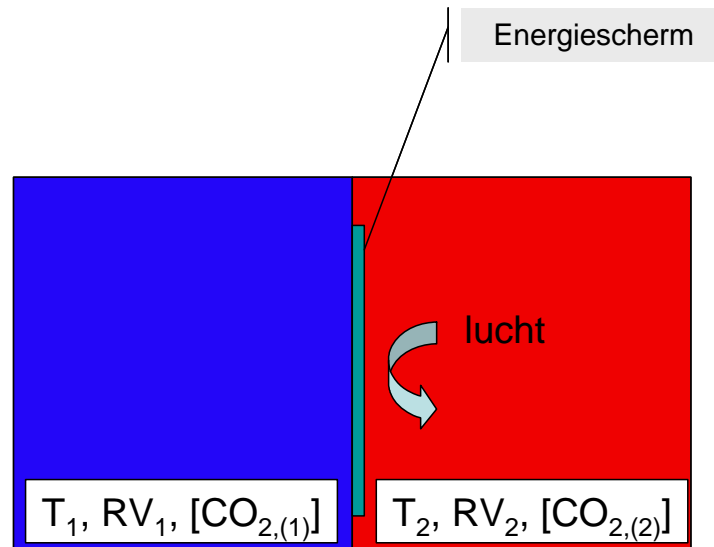
Verder blijkt het folie materiaal nauwelijks UV licht (<380 nm) door te laten.

De lichtdoorlatendheid van het folie materiaal kan o.a. vergroot worden door het scherm anders te produceren (weven). Een nieuw monster wordt gemaakt.

¹ Resultaten spectrale meting volgens tuinbouwnorm EN410 D65. Meting met geïntegreerd licht AM1.

6 Experimentele opstelling

Om de haalbaarheid van het folie materiaal als dampdoorlatend energiescherm experimenteel vast te kunnen stellen is een experimentele opstelling noodzakelijk. Het ontwerp van de opstelling is schematisch weergegeven in figuur 14.



Figuur 14 Schematische weergave experimentele opstelling

Het scherm is gespannen tussen twee calorimeterboxen. In beide boxen kunnen de temperatuur, luchtvochtigheid en CO_2 concentratie worden ingesteld: in de boxen is verwarming, koeling, bevochtiging en ontvochtiging aanwezig. In een van de boxen is ook een ventilator geplaatst om een luchtbeweging langs het scherm te simuleren. Met behulp van sensoren aan beide kanten van het scherm kan het vocht, CO_2 en thermische transport door het scherm worden bepaald.

De lichtdoorlatendheid kan in een aparte opstelling vastgesteld worden, conform de relevante normen.

7 Conclusie

In tabel 4 staan de gewenste eigenschappen voor energiescherm samengevat ten opzichte van de huidige waarden van het nog niet geoptimaliseerde foliemateriaal. Uiteraard zijn meer eigenschappen belangrijk voor een succesvolle toepassing van folie als dampdoorlatend energiescherm, maar als de gewenste waarden op het gebied van licht, CO₂ en vocht niet worden benaderd dan is de toepassing niet haalbaar.

Tabel 4 Parameters dampdoorlatend energiescherm

Parameter	Gewenste waarde	Huidige waarde ¹
Transmissie PAR	90 %	ca. 45 %
CO ₂ permeabiliteit	0 %	ca. 5 %
H ₂ O permeabiliteit	300 g/h·m ²	ca. 50 g/dag·m ²

In hoeverre de gewenste eigenschappen van het dampdoorlatende energiescherm ook daadwerkelijk haalbaar zijn, is nog niet duidelijk. De fabrikant van het Folie materiaal zal hier nog een verwachting over uitspreken, waarna het nog gevalideerd moet worden in de eerder beschreven experimentele opstelling.

7.1 Energiebesparing

Het gasgebruik van de geschermdte teelt is 41.1 m³/m² en voor de ongeschermdte teelt 48.6 m³/m². Om deze besparing van 18% te bereiken, moeten er circa 2000 schermuren worden gemaakt. Een vochtdoorlatend scherm levert een extra energiebesparing op van ca. 1-2 %. De exacte waarde kan pas berekend worden op het moment dat de materiaaleigenschappen, waaronder de massa overdrachtscoëfficiënt van waterdamp door het vochtdoorlatende energiescherm experimenteel zijn bepaald.

Ook voor een vochtdoorlatend energiescherm zal de schermstrategie een belangrijke parameter zijn voor de bepaling van de totale energiebesparing. Telers zullen dan wel weer gaan kiezen voor lagere maximale RV-waardes (lagere RV-setpoints) om mogelijk nadelige effecten van te hoge vochtconcentraties te voorkomen.

De meeste telers vinden naast de energiebesparing belangrijk dat ze waarschijnlijk eenvoudiger hoge CO₂ concentraties kunnen handhaven onder het scherm, dit is vooral belangrijk bij hoge lichtintensiteiten. Op dit moment kan van dit effect alleen een grove inschatting worden gemaakt omdat ook hiervoor eerst de materiaaleigenschappen van het vochtdoorlatende energiescherm experimenteel bepaald moeten worden om de permeabiliteit voor CO₂ te kunnen berekenen.

7.2 Mogelijke toepassing in de glastuinbouw

Hoewel de huidige doeken nog niet voldoen aan de vereisten voor de glastuinbouw zijn er voor dergelijke doeken, wanneer de eigenschappen worden verbeterd, wel degelijk

¹ Met huidige waarde wordt bedoeld de waarde van het beschikbare Folie materiaal dat nog niet geoptimaliseerd was voor de toepassing als dampdoorlatend energiescherm in kassen.

mogelijkheden om te worden toegepast in kassen. Het gebruik van dampdoorlatende folie's heeft voor de tuinders verschillende voordelen. Door het lagere energiegebruik zullen de tuinbouwkassen energiezuiniger worden en daarmee een lagere CO₂ uitstoot hebben. Daarnaast leidt zo'n folie tot kostenreductie.

Voor de sector als geheel draagt een dergelijke folie bij aan het verbeteren van het imago. Een dergelijke maatregel sluit aan op andere initiatieven om het energiegebruik van de sector te verminderen.

Om het gebruik van deze folies te stimuleren kan de GLK regeling worden ingezet. Voordat het effect echter geaccepteerd zal worden is het nodig om de voordelen van een nieuwe techniek te demonstreren in bijvoorbeeld een demokas. Hierbij kan naast het vaststellen van de voordelen ook geëxperimenteerd worden met de eventueel vereiste aanpassingen aan de teeltstrategie.

Door de aandacht voor de uitstoot van CO₂ worden op dit moment verschillende technieken ontwikkeld om het fossiel energiegebruik te verminderen. Het is mogelijk om dampdoorlatende folie te gebruiken als aanvulling op bestaande technieken, maar dit geldt niet voor elk ervan. Bijvoorbeeld concepten waarbij de instraling wordt beperkt om zo de benodigde ventilatiebehoefte te verminderen, lijken moeilijk te combineren met het een dergelijk folie. Reden hiervoor is dat dampdoorlatende folie zelf al een hoop licht afvangt. Om het voordeel van een dampdoorlatende folie te vergroten is het van belang dat de lichttransmissie van dergelijke doeken wordt verhoogd.

8 Verantwoording

Naam en adres van de opdrachtgever:
Productschap Tuinbouw

Namen en functies van de projectmedewerkers:
L. Krosse
Y. Tanida
C. Bootsvelde

Ondertekening:

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'L. Krosse', written over a light gray rectangular background.

L. Krosse
Projectleider

Goedgekeurd door:

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'A.A.L. Traversari', written over a light gray rectangular background.

A.A.L. Traversari, MBA
Afdelingshoofd

A Simulatiemodel KASPRO

Het simulatiemodel (KASPRO) is een uit diverse parameters samengesteld model van de eigenschappen van een kas, gewasgegevens, ingestelde setpoints en buitenklimaat, dat de relevante variabelen berekent als functie van tijd. Dit maakt berekening van de energieconsumptie en gewasproductie mogelijk.

De basis van het model wordt gevormd door de energie-, water- en CO₂-balansen van de in beschouwing genomen samenhangende onderdelen van het systeem. Het resulteert in een set van niet lineaire, eerste orde differentiaalvergelijkingen die numeriek worden opgelost.

Het kasklimaatmodel heeft als startpunt de kasklimaatregelaar.

Kaslucht bevat samenhangende componenten waarvan de temperatuur, vochtigheid en CO₂-concentratie als primaire variabelen worden beschouwd. De kasklimaatregelaar vergelijkt deze waarden met setpoints. De setpoints zijn functies van tijd en buitenklimaat en aangenomen wordt dat de teler ze van parameters voorziet.

Op grond van de vergelijkingen zal de regelaar het volgende acties uitvoeren:

- past de stand van de mengklep van de warmwatertoevoer aan, ten einde de temperatuur van de verwarmingbuizen te wijzigen. Meestal wordt de temperatuur van twee afzonderlijke verwarmingssystemen, waarvan één met pijpen dicht bij de grond en één met pijpen in of boven het gewas.
- past de stand van de luchtramen aan voor warmte- en vochtuitwisseling tussen de kas- en buitenlucht.
- start en stopt de CO₂-gift naar de kas.

Naast het kasklimaat, stuurt de regelaar de apparaten aan die van belang zijn voor de warmtevoorziening (ketel, warmtepomp, WKK en opslagtank) en de CO₂-productie van de ketel. De regelactiviteiten hebben direct of indirect invloed op het brandstofverbruik. Dit is duidelijk het geval bij verhoging van de buistemperatuur, hoewel de brandstof om in de warmtebehoefte te voorzien, al uren eerder opgewekt kan worden en tijdelijk worden opgeslagen in een warmteopslagtank.

Geopende ramen hebben een effect op de energieconsumptie wanneer de regelactiviteiten worden uitgevoerd op grond van het setpoint luchtvochtigheid gedurende perioden van energievraag. De CO₂-gift veroorzaakt een brandstofverbruik indien CO₂ wordt verkregen uit uitlaatgassen van de ketel of de WK-installatie tijdens perioden zonder energievraag.

Omdat het warmtedistributiesysteem in kassen gewoonlijk bestaat uit een warm-water-circuit van pijpen met een groot thermisch vermogen met typische afkoelingseigenschappen, wordt extra aandacht besteed aan de beschrijving van het dynamisch gedrag (De Zwart, 1996). De tank voor korte termijn warmteopslag met zijn grote thermische vermogen is gemodelleerd met een uitgebreid gelaagd model overeenkomstig de uitgangspunten gepresenteerd door Yoo en Pak (1993). Naast de kasklimaatregelaar zijn de kasluchtomstandigheden ook afhankelijk van de warmte, vocht en CO₂-uitwisseling tussen de kaslucht en zijn directe omgeving. Om deze interacties te beschrijven onderscheidt het model samenhangende componenten voor het gewas, de bodem en het kasdek.

De grond onder de kas vertegenwoordigt een grote warmteopslagcapaciteit met een sterk dempend effect op fluctuaties van de kasluchttemperatuur. Om een goede afspiegeling van dit effect te verkrijgen is de grond onderverdeeld in 7 lagen.

Het kasdek vormt een belangrijke belemmering voor warmteverlies naar de buitenlucht. Indien de temperatuur van het dek echter onder het dauwpunt van de kaslucht komt, veroorzaakt het dekoppervlak ontvochtiging van de kas.

De buitenomstandigheden dienen als omgevingsfactoren voor het model. De buitenluchttemperatuur en de hemeltemperatuur beïnvloeden de warmteverliezen door convectie en straling bij het kasdek en daardoor de temperatuur van het dek. De buitentemperatuur, vochtigheid en CO₂-concentratie hebben een directe invloed op de primaire toestandsvariabelen via luchtuitwisseling door geopende ramen of kieren. De windsnelheid is een belangrijke indirecte weerconditie omdat deze invloed heeft op de convectieve warmte-uitwisseling aan het dek en in belangrijke mate de lucht-uitwisseling door de ramen bepaalt.

Een belangrijk weergegeven is de globale straling. Directe en diffuse straling wordt geabsorbeerd, gereflecteerd en doorgelaten door het dek, het gewas en de grondoppervlakte. Bovendien is straling op gewashoogte belangrijk voor de fotosynthese. Voor de berekening van de warmte-, vocht- en CO₂-stromen tussen de samenhangende componenten, zijn de relaties voor de warmtestroming ontleend aan een aantal auteurs. De warmtestraling is berekend met gebruikmaking van relaties gebaseerd op de wet van Stefan-Boltzmann, en bevat "view factoren", absorptie en emissie. Interceptie van de straling door het gewas is behandeld in overeenstemming met Goudriaan (1988). De transmissie van licht door het dek is berekend middels een methode beschreven door Bot (1983). De convectieve warmte-uitwisseling aan de binnen en buitenkant van het dek is beschreven in de relaties eveneens gepresenteerd door Bot. De ventilatiestromen, in tuinbouwkundige context is gebaseerd op natuurlijke ventilatie, en is berekend op basis van de theorie gepresenteerd door De Jong (1990). De gewasverdamping, een belangrijk onderdeel van het model, is afgeleid van het werk van Stanghellini (1987). De convectieve warmteoverdracht van verwarmingsbuizen en convectieve warmte uitwisseling van de bodem is eveneens beschreven door Bot. De warmtegeleiding in de grond is benaderd vanuit de algemene warmtegeleidingstheorie.

Ten gevolge van de complexiteit en de niet lineairiteit van het model, is de integratie van differentiaal vergelijkingen uitgevoerd in numerieke voorwaartse integratie. De stapgrootte is zodanig gekozen dat de temperatuurverandering van de toestandsvariabelen minder is dan 0.1 °C. Dat betekent dat het tijdsduur per integratiestap vaak niet meer dan 15 sec bedraagt. Wanneer het buitenklimaat en de klimaatregelaar activiteiten stabiel zijn, neemt de stapgrootte toe tot 2 minuten, hetgeen overeen komt met de meefrequentie van de klimaatregelaar.

Vergelijking van de resultaten van het model met metingen in een semi-praktijk kas (4 afdelingen van 200 m² elk) toonden een zeer goede overeenkomst. Absolute verschillen tussen model en metingen voor de luchttemperatuur voor gemiddelde 10 minuten waarden bedroegen minder dan 0.5 °C in 90% van de tijd. De warmteconsumptie werd gesimuleerd met een nauwkeurigheid van 95% en de regelactiviteiten m.b.t. ramen open/dicht controle en de CO₂-gift toonden een goede gelijkenis. (de Zwart, 1996). De beschrijving van het buitenklimaat gaat uit van typisch Nederlandse weersomstandigheden. Deze dataset is weergegeven in het SEL-jaar (Breuer en Van de Braak, 1989).

Aan het KASPRO simulatie model is een module toegevoegd zodat de invloed van de warmteterugwinning op het klimaat en het energiegebruik berekend kan worden.

Literatuur

- Breuer, J.J.G. en N.J. van de Braak, 1989 Reference Year for Dutch Greenhouses, Acta Horticulturae 248, 1989
- Bot, G.P.A., 1983. Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model. Ph. D. dissertation Agricultural University Wageningen, The Netherlands.
- Goudriaan, J., 1988. The bare bones of leaf-angle distribution in radiation models for canopy photosynthesis and energy exchange. Agricultural and forest meteorology, 43:155-169.
- Jong, T., de, 1990. Natural ventilation of large multi-span greenhouses. Ph. D. Thesis Agricultural University Wageningen, The Netherlands.
- Stanghellini, C, 1987. Transpiration of greenhouse crops. An aid to climate management. Ph. D. dissertation, Landbouwniversiteit, Wageningen.
- Yoo H. en E. Pak, 1993. Theoretical model of the charging process for stratified thermal storage tanks. Solar Energy, 51(1993)6 pp. 513-519.
- Zwart H.F., de, 1996. Analyzing energy-saving options in greenhouse cultivation using a simulation model. IMAG-DLO rapport 96-05, 236 blz.

B Schermeigenschappen (referentiescherm)

Schermbeschrijving uit: ..\MaterialProperties\SLS10UltraPlus.dat

Merknaam: SLS 10 Ultra plus

dragertype: polyester

--- Optische eigenschappen ---

De fractie transparant materiaal van het schermdoek (frTransp): 1.00

transmissie loodrecht licht transparant deel (trVISLoodrTransp): 0.88

transmissie diffuus licht transparant deel (trVISdifTransp): 0.81

transmissie transparant deel voor FIR (trIRTransp): 0.47

De absorptie van zichtbaar licht (absVis): 0.04

De transmissiecoëfficiënt voor loodrecht licht: 0.88

De transmissiecoëfficiënt voor diffuus zichtbaar licht: 0.81

De reflectie van zichtbaar licht (de restterm): 0.15

De condens afhankelijke emissiecoëfficiënt van het doek aan de bovenzijde is 0.38 (droog) en 1.00 (nat)

De condens afhankelijke emissiecoëfficiënt van het doek aan de onderzijde is 0.38 (droog) en 1.00 (nat)

De condens afhankelijke transmissiecoëfficiënt van het doek voor IR is 0.47 (droog) en 0.00 (nat)

--- Stromings eigenschappen ---

Kp is: 2.48e-011

Y is: 5.00e-002

Dscr is: 2.50e-004

C Correlaties vochtige lucht

Voor de berekening van de grootte van de drijvende kracht (en het opstellen van enthalpie balansen) moeten relatieve vochtigheden om worden gerekend naar partiële waterdampdrukken.

parameter	symbool	eenheid	ondergrens	bovengrens
temperatuur	TD	oC	-40	100
dauwpunt	DP	oC	-40	80
natteboltemperatuur	TN	oC	-40	90
relatieve vochtigheid	RV	%	0.001	100
vochtgehalte	X	g/kg droge lucht	0.1	600
dampdruk	PD	kPa	0.02	45
dichtheid	RO	kg/m ³	0.125	1.5
enthalpie	H	kJ/kg droge lucht	-35	7000

De berekeningen van de toestandsgrootheden zijn gebaseerd op de onderstaande relaties:

De verzadigingsdampspanning PD van water is gebaseerd op relaties opgesteld door de International Formulation Committee (IFC-1967: 6-th International Conference on the properties of water and steam) en welke te vinden zijn in de IFC stoomtabel. Verder wordt gebruik gemaakt van formules opgesteld door TNO in opdracht van de Nederlandse Technische Vereniging voor Verwarming en Ventilatie (TVVL).

De verzadigingsdampdruk als functie van de temperatuur:

Voor $0 < T < 300$:

$$PD = PK * \exp \left[\left\{ \frac{1}{TR} * \left(\sum_{k=1}^5 C_k * (1-TR)^k \right) / \left(1 + C_6 * (1-TR)^2 + C_7 * (1-TR) \right) \right\} - \left\{ (1-TR) / (C_8 * (1-TR)^2 + C_9) \right\} \right]$$

waarin:

PD	verzadigingsdruk	kPa	
PK	kritische druk waterdamp	kPa (22120)	
TR	gereduceerde temperatuur	(T/TK) -	
TK	kritische temperatuur waterdamp	K (647.3)	
C1	-7.691234564e0	C6	4.16711732e0
C2	-2.608023696e1	C7	2.097506760e1
C3	-1.681706546e2	C8	1.000000000e9
C4	6.423285504e1	C9	6.000000000e0
C5	1.189646225e2		

De relatieve vochtigheid is de verhouding tussen heersende dampdruk en de verzadigingsdampdruk bij de heersende temperatuur:

$$RV = PD/PS * 100 \%$$

waarin:

RV	relatieve vochtigheid	%
PD	dampdruk	kPa
PS	verzadigingsdampdruk	kPa

Het vochtgehalte is afhankelijk van dampdruk en absolute (barometer) druk volgens de relatie:

$$X = MD/ML * PD/(PB - PD) * 1000 \text{ g/kg}$$

waarin:

X	absolute vochtgehalte	g/kg droge lucht
MD	molaire massa waterdamp	kg/kmol (18.016)
ML	molaire massa droge lucht	kg/kmol (28.964)
D	dampdruk	kPa
PB	omgevingsdruk	kPa

De soortelijke warmte van lucht wordt bepaald aan de hand van de volgende polynoom:

$$CPL = 1.006 + t/2e5 + t^2/7.5e6 \text{ kJ/kg.K}$$

waarin:

t	temperatuur	°C
---	-------------	----

De soortelijke warmte van water bepaald aan de hand van:

$$CPW = 1.8584 + 1.0875e-4*t + 3.083e-7*t^2 \text{ kJ/kg.K}$$

waarin:

t	temperatuur	°C
---	-------------	----

De enthalpie van lucht:

$$H = CPL * t + 2500.8 * X + CPW * X * t \text{ kJ/kg}$$

waarin:

t	temperatuur	°C
X	vochtgehalte	kg/kg
CPL	soortelijke warmte lucht	kJ/kg.K
CPW	soortelijke warmte water	kJ/kg.K

De dichtheid van lucht:

$$RHO = \{PB * MW * (1+x)\} / \{R * T * ((MW/ML) + X)\} \text{ kg/m}^3$$

waarin:

RHO	dichtheid	kg/m ³
PB	omgevingsdruk	kPa

MW	molaire massa van waterdamp (18.016)	kg/kmol
ML	molaire massa lucht (28.964)	kg/kmol
R	molaire gasconstante (8.3144)	kJ/kmol.K
T	temperatuur	K
X	vochtgehalte	kg/kg

De nattebol temperatuur is gedefinieerd als die temperatuur waarbij de enthalpie op de verzadigingslijn exact gelijk is aan de enthalpie van de lucht in de beschouwde toestand. Derhalve is de nattebol-temperatuur direct gekoppeld aan de enthalpie van de lucht.

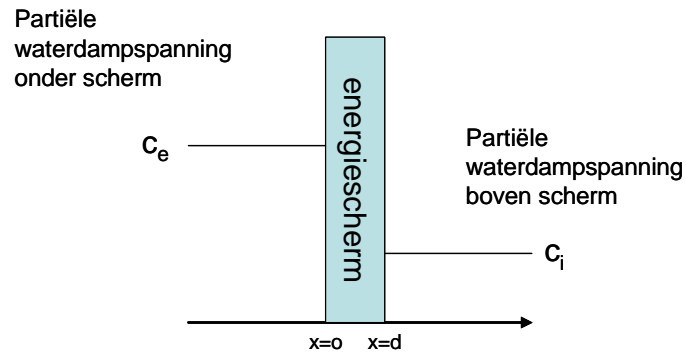
Het Mollier programma voorziet in de mogelijkheid om uit elke willekeurige combinatie van twee onafhankelijke grootheden alle overige parameters te berekenen.

Daarbij zijn enkele combinaties uitgesloten, omdat hiermee niet eenduidig de toestand wordt vastgelegd. Dit betreft de combinaties dauwpunt en dampspanning, dauwpunt en vochtgehalte, enthalpie en nattebol.

Voor een aantal andere combinatie zijn iteraties noodzakelijk om uit de gegeven grootheden de oorspronkelijke grootheden (vaak drogebol en dauwpunts-temperatuur) te bepalen.

D Grootte drijvende kracht voor damptransport door energiescherm

De drijvende kracht voor het transport van waterdamp door het energiescherm wordt enerzijds bepaald door het verschil in de partiële waterdampspanning boven en onder het energiescherm en anderzijds door de diffusiecoëfficiënt door het energiescherm heen (zie figuur D1).



Figuur D1 Drijvende kracht waterdamptransport door energiescherm

De grootte van het waterdamptransport wordt dus gegeven door:

$$j_x = -D \frac{dc}{dx}$$

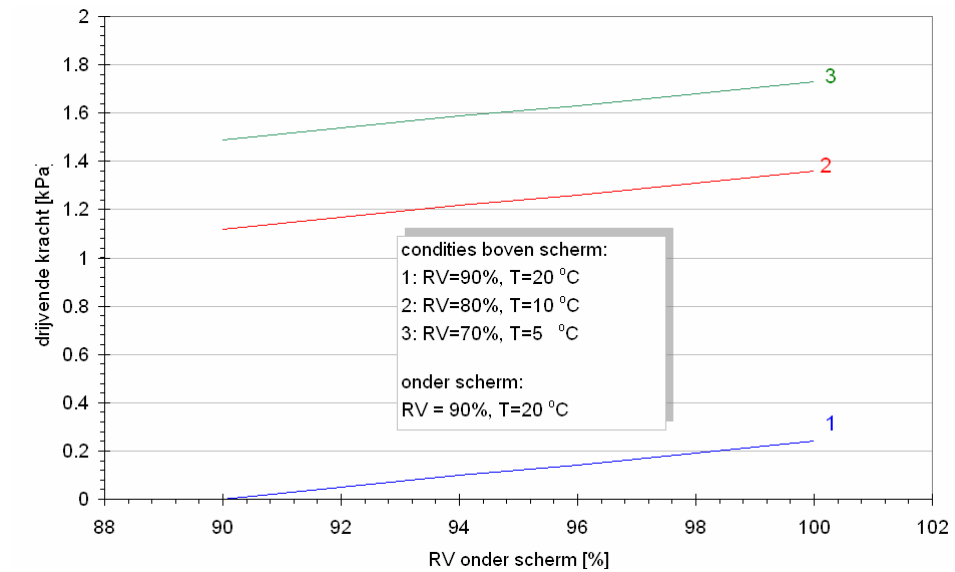
of

$$j_x = D(c_e - c_i) \frac{k}{d} = \underbrace{D \frac{k}{d}}_{\text{permeabiliteit energiescherm}} (c_e - c_i)$$

De partiële waterdampspanning bij een temperatuur van 20 °C en een RV van 85% is 1.99 kPa. De partiële waterdampspanning bij een temperatuur van 10 °C en een RV van 80% komt overeen met 0.98 kPa.

De exacte grootte van de diffusiecoëfficiënt en de energieschermpermeabiliteit moeten nog experimenteel bepaald worden voor een geoptimaliseerde vorm van het folie materiaal.

De grootte van de drijvende kracht voor het damptransport door het vochtdoorlatende energiescherm wordt bepaald door het partiële waterdampdruk verschil boven en onder het scherm. In figuur D2 is de relatieve drijvende kracht voor een aantal condities weergegeven.



Figuur D2 Grootte drijvende kracht damptransport

De absolute grootte van de drijvende kracht kan nog niet gekwantificeerd worden omdat de massaoverdrachtscoëfficiënt door het scherm nog niet bekend is. De massaoverdrachtscoëfficiënt is een materiaaleigenschap die van het geoptimaliseerde materiaal experimenteel bepaald moet worden.

Uitgaande van een maximale ontvochtigingscapaciteit¹ in kassen van 300 g/hr·m² en een ontvochtigingscapaciteit van 50 g/dag·m² van de huidige folie, resulteert in een energieschermp permeabiliteit die een factor 150 te klein is om aan de maximale ontvochtigingsvraag te kunnen voldoen. In de literatuur wordt in sommige gevallen ook uitgegaan van een maximale verdamping van 25 g/hr·m². In dit geval zou de ontvochtigingscapaciteit van de huidige folie ca. een factor 12 te klein zijn.

¹ De maximale ontvochtigingscapaciteit van 300 g/hr·m² is een waarde verkregen van een marktpartij. In de literatuur wordt in sommige gevallen ook uitgegaan van een maximale verdamping van 25 g/hr·m².