

Hoogisolerende en lichtdoorlatende schermconfiguraties

H.F. de Zwart (Wageningen UR), C. Stanghellini (Wageningen UR) en L.P.M. van der Knaap (TNO Bouw)



© 2010 Wageningen, Wageningen UR Glastuinbouw

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Wageningen UR Glastuinbouw

Wageningen UR Glastuinbouw

Adres : Droevendaalsesteeg 1, 6708 PB Wageningen
: Postbus 16, 6700 AA Wageningen
Tel. : 0317 - 48 60 01
Fax : 0317 - 41 80 94
E-mail : glastuinbouw@wur.nl
Internet : www.glastuinbouw.wur.nl

Inhoudsopgave

	Pagina
1 Samenvatting	1
2 Inleiding	2
3 Convectieve warmteoverdracht aan schermen	3
3.1 Lek	4
3.2 Condensatie en verdamping	5
4 Stralingsoverdracht aan schermen	6
5 Analyse van het effect van schermeigenschappen op de warmtedoorgang	8
Relatie tussen k-waardeverlaging en energiebesparing	14
Verlaging contractcapaciteit	15
Conclusie	15
6 Effect van schermeigenschappen op teelt en energie	16
Condensatie op het scherm	18
Conclusie	18
7 Constructieve aspecten van scherminstallaties	19
8 Conclusies	31

1 Samenvatting

Hoogisolerende schersystemen bestaan uit meerdere lagen waarvan tenminste één laag van gealuminiseerd materiaal is gemaakt om de reflectie van de warmtestraling te maximaliseren. Dit is de hoofdconclusie die op grond van de analyse van de fysische processen rond convectieve- en stralingswarmteoverdracht bij schermen een rol spelen. Convectieve warmte-overdracht is de energie-overdracht die plaatsvindt middels de verplaatsing van lucht van de ene naar de andere temperatuur. Stralingsoverdracht is energie-overdracht tussen materie op grond van de emissiecoëfficiënt van die materialen. Stralingsoverdracht is niet gekoppeld aan luchtbeweging en vindt plaats tussen alle oppervlakken in de kas.

Het rapport bespreekt deze processen en samen met dit rapport is een spreadsheet ontwikkeld dat deze processen in een samenhangende berekening doorrekent en de implicatie daarvan op het (statische) warmteverlies van een kas. Dit spreadsheet is op aanvraag verkrijgbaar middels een e-mail naar Feije.deZwart@wur.nl.

De vooronderstelling bij alle berekeningen is dat de kas is voorzien van een ontvochtigingssysteem met buitenlucht aanzuiging. Hierdoor hoeft men zich niet te beperken in het aantal schermuren in verband met de vochtthuishouding.

Bij gebruik van meer dan één energiescherm wordt het mogelijk om differentiatie in de soorten schermen die gebruikt worden aan te brengen. In dat geval wordt er een duidelijke extra energiebesparing gerealiseerd als één van de schermen gealuminiseerd is. Uitgaande van één transparant energiescherm als basis, levert de toevoeging van een extra transparant scherm in een tomatenteelt een energiebesparing van 2.9 m³ aardgas equivalenten per m² per jaar, terwijl de toevoeging van een gealuminiseerd scherm als tweede scherm een energiebesparing van 4.4 m³ a.e. per m² per jaar oplevert.

Zou er nog een derde scherm worden toegevoegd dan zou zo'n scherm 1.2 m³ aardgas equivalenten aan energiebesparing opleveren als het een transparant scherm betreft en 1.8 m³ aardgas equivalenten per m² per jaar als een gealuminiseerd scherm wordt gebruikt.

Bij teelten die gemiddeld warmer worden geteeld is het effect groter en bij teelten die kouder worden geteeld is het kleiner. De besparingseffecten nemen met 7% toe of af per graad dat een teelt gemiddeld warmer of kouder is dan een gemiddelde tomatenteelt.

Bovenop de verlaging van het jaarverbruik komt nog dat een verlaging van de k-waarde van de kas direct doorwerkt in de verkleining van de benodigde contractcapaciteit.

Als vuistregel wordt genoemd dat een schersysteem dat de k-waarde met 1 W/(m² K) kan verbeteren de benodigde contractcapaciteit met 25 m³/(ha uur) naar beneden brengt (uitgaande van een gewenste kasluchttemperatuur van 20 °C bij -10 °C buiten).

Voor de dagperiode is het van belang dat het scherm hoog-transparant is. Een scherm dat veel licht doorlaat kan veel meer uren overdag gebruikt worden omdat de productiederving onder zo'n scherm minder ernstig is.

In dit rapport is voorgerekend dat het verhogen van de lichttransmissie van het transparante energiescherm van 80% naar 90%, tot 650 extra schermuren overdag zou kunnen leiden en dat hiermee in een tomatenteelt 1.9 m³ aardgas equivalenten aan warmte per m² per jaar kan worden bespaard.

Ook voor de bepaling van het effect van de lichtdoorlatendheid van het scherm op de wijze waarop zo'n scherm gebruikt zou kunnen worden is een spreadsheet ontwikkeld. Dit houdt rekening met de energiebesparing door het scherm, de kostprijs van energie, de waarde van het product de basistransmissie van de kas en de lichtefficiëntie van het product. Ook dit spreadsheet kan via een e-mail naar Feije.deZwart@wur.nl worden opgevraagd.

Tot slot gaat het rapport uitgebreid in op allerlei constructietechnische zaken rond scherminstallaties. De nieuwste richtlijnen voor de sterkteberekeningen daaraan worden gepresenteerd en het wordt duidelijk gemaakt dat een goed overleg tussen kassenbouwer en scherminstallateur ervoor kan zorgen dat de installaties niet te licht en niet te zwaar worden gebouwd.

2 Inleiding

In de afgelopen 10 jaar is het energiescherm een niet meer weg te denken onderdeel van kassen geworden. Zelfs in de tomatenteelt, waarvan tot niet zo lang geleden werd gezegd dat de teelt er simpelweg niet voor geschikt was, is een scherm inmiddels standaard. Tuinders hebben leren omgaan met de vochtbeheersing onder het scherm en met de zorgvuldigheid die nodig is bij het openen van schermen. Zo wordt in koude perioden de buis alvast wat opgestookt voordat het scherm open loopt, worden niet alle afdelingen tegelijk geopend om de piek in de warmtevraag wat af te vlakken en wordt er steeds meer gebruik gemaakt van extra metingen. Een meetbox in de nok en/of een pyrgeometer (een hemeltemperatuur meter die een maat geeft voor de warmteuitstraling) bereiden de klimaatregelaar voor op wat er gaat gebeuren als het scherm open loopt. En om problemen met vocht voor te blijven worden de schermen niet meer gebruikt als de buitentemperatuur boven een laag gekozen buitentemperatuur blijft.

De schermfabrikanten hebben een heel scala aan materialen ontwikkeld die allemaal het compromis dat je bij gebruik van een scherm moet maken een beetje anders leggen. Tuinders die zich grote zorgen maken over de luchtvochtigheid onder het scherm kiezen een opener doek. Tuinders die veel belang hechten aan licht in de kas op koude dagen kiezen een helder doek dat ook overdag gesloten kan blijven en tuinders die ook wat beschaduwing willen hebben gebruiken doeken waar een bepaald aantal bandjes gealuminiseerd zijn.

De verschillen in de toegepaste schermmaterialen komen tot uiting in verschillen in energiebesparing. Hierbij spelen twee processen een rol, namelijk de beperking van de convectieve warmteoverdracht en de beperking van de stralingswarmteoverdracht die het scherm weet te realiseren. De convectieve warmte-overdracht, dat is warmte die samen met het transport van lucht (en waterdamp) wordt uitgewisseld, wordt beperkt doordat de directe luchtuitwisseling tussen het kascompartiment en de buitenlucht sterk wordt gehinderd. Met iedere luchtdichte scherm laag moet warmte twee keer aan een oppervlak worden uitgewisseld, wat sterk isolerend werkt. Hoofdstuk 0 gaat nader in op deze convectieve warmte-uitwisseling.

De warmte-overdracht ten gevolge van straling wordt bepaald door de temperatuur van de stralende oppervlakken, de transmissiecoëfficiënt en de emissiecoëfficiënt van de oppervlakken. Schermmaterialen verschillen sterk op dit punt. In hoofdstuk 4 wordt deze stralingsoverdracht besproken.

Het gebruik van een bepaald type scherm, of combinatie van schermen komt tot uiting in het energieverbruik, het kasklimaat en de hoeveelheid licht in de kas. Hoofdstuk 5 gaat op deze aspecten in, en laat daarmee het belang van de verschillende eigenschappen zien.

Omdat de eisen aan een scherm overdag verschillen van de eisen die 's nachts aan een scherm gesteld kunnen worden zullen hoog-isolerende schermssystemen uit meerdere lagen moeten bestaan.

Daar waar de meeste aandacht in dit rapport uitgaat naar de isolatiewaarde van schermen gedurende de nacht is hoofdstuk 6 gewijd aan de afweging tussen energiebesparing en lichtverlies. Het hoofdstuk bespreekt een concreet rekeninstrument waarmee de eigenschappen van het scherm doorwerken in adviezen met betrekking tot het gebruik van het scherm, rekening houdend met randvoorwaarden zoals gasprijs en productprijs.

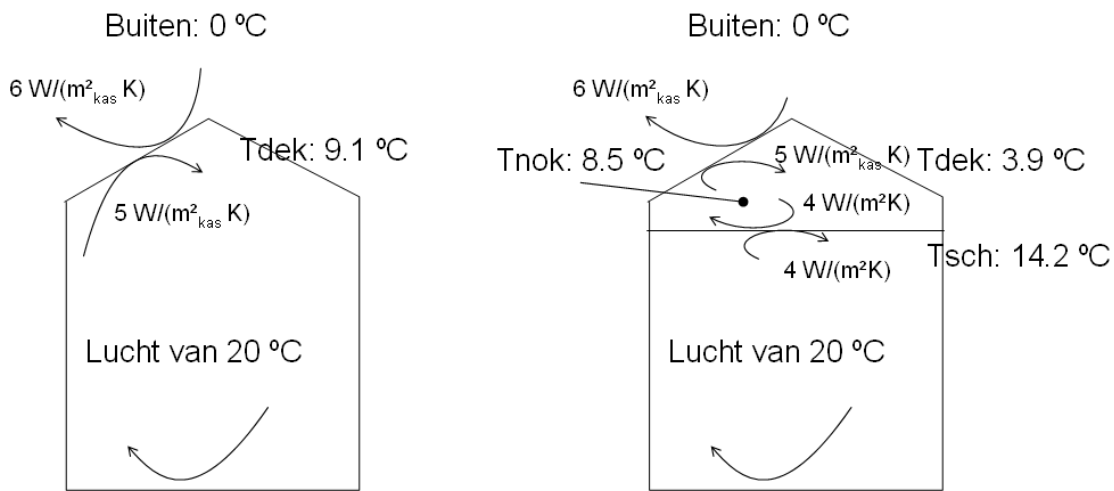
In hoofdstuk 7 worden de bouwtechnische aspecten van scherminstallaties belicht. Het gaat daarbij onder ander over de afspraken die kassenbouwers en scherminstallateurs op initiatief van AVAG maakten over detaillering van de scherminstallaties en de onderwerpen waarmee in de berekening van de kasconstructie rekening moet worden gehouden. De wijze waarop rekening moet worden gehouden met de krachten uit scherminstallaties op de kasconstructie is beschreven in ISSO 88. De tuinder zal overigens zelf de belangrijkste uitgangspunten voor de berekening moeten aanleveren met een nauwkeurige beschrijving van het gewenste gebruik van de scherminstallaties. De voorbeelden in hoofdstuk 7 kunnen hem daarbij helpen.

In hoofdstuk 8 worden tenslotte de belangrijkste conclusies uit dit rapport besproken.

3 Convectieve warmteoverdracht aan schermen

Wanneer twee lucht-compartimenten een verschillende temperatuur hebben zullen deze warmte gaan uitwisselen, zeker wanneer het warme compartiment onder het koude compartiment zit. Koude lucht zal dan naar beneden zakken en de warme lucht zal naar boven stijgen en dit proces zal doorgaan tot het temperatuurverschil niet meer bestaat. Als het onderste compartiment verwarmd wordt en de bovenste warmte verliest kunnen de twee temperaturen niet gelijk worden en gaat dit proces dus eindeloos door (Figuur 1, links).

Wanneer hier een scheidend oppervlak tussenin aangebracht wordt, wordt de luchtstroming onderbroken en ontstaan er twee luchtstromingen (Figuur 1, rechts). De eerste stroming verwarmt de onderkant van het oppervlak en doordat dit oppervlak daardoor in temperatuur stijgt, wordt aan de bovenkant de tweede stroming geïnduceerd.



Figuur 1. Effect van een extra scheidende laag op de warmte-overdracht via convectie vanuit de kaslucht naar buiten.

De pijlen symboliseren de convectiestromen die voor de warmteoverdracht zorgen. In de linker figuur, zonder scherm wordt er 54.5 W/m^2 warmte via convectie uitgewisseld terwijl dit in de rechter situatie slechts 23.2 W/m^2 is.

De getallen in Figuur 1 hebben betrekking op een evenwichtssituatie en de gekozen warmte-overdrachtscoëfficiënten (6 , 5 en $4 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$) zijn reële waarden voor kassituaties. In de linker figuur wordt er $(20-9.1) \times 5 = 54.5 \text{ W/m}^2$ aan warmte via convectie verloren. Het is te zien dat in de evenwichtssituatie het dek een temperatuur krijgt zodanig dat de warmtestroom van de lucht naar het dek gelijk is aan die van het dek naar buiten. $(9.1-0) \times 6$ is namelijk 54.6 W/m^2 .

In de rechtergrafiek zijn alle convectieve warmtestromen (dus van lucht naar scherm, van scherm naar nok, van nok naar dek en van dek naar buiten) een stuk kleiner, namelijk 23.2 W/m^2 .

Indien het warmtetransport alleen uit convectieve warmte-uitwisseling zou bestaan en een scherm 100% luchtdicht zou zijn, betekent het linker plaatje dat de kas een k-waarde zou hebben van $54.5/20 = 2.7 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ en zou de kas met 1 luchtdicht scherm een k-waarde van $23.2/20 = 1.16 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ hebben.

De overall warmte-overdracht in plaatjes, zoals in Figuur 1 geschetst, kan gemakkelijk direct uit de verschillende k-waarden worden berekend. Bij een serie-schakeling van geleidbaarheden (een k-waarde is een geleidbaarheid) geldt namelijk dat de overall geleidbaarheid de reciproke is van de som van de reciproken van de in serie geplaatste geleidingen. Dus bijvoorbeeld, bij een serie van 4 geleidbaarheden geldt:

$$k_{\text{totaal}} = 1 / (1/k_1 + 1/k_2 + 1/k_3 + 1/k_4)$$

In het voorbeeld van Figuur 1 is de warmtedoorgang van de linker figuur dus $1/(1/6+1/5) = 2.7 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$. Dit komt overeen met de warmtedoorgang die op grond van de warmteuitwisseling aan één van de oppervlakken werd uitgerekend.

De warmtedoorgang in de rechter figuur is $1/(1/6+1/5 + 1/4+1/4) = 1.15 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ en ook dit klopt met de eerder berekende warmtedoorgang.

De k-waarden van kassen zoals wij die kennen, zijn aanzienlijk groter en dat komt doordat er nog drie andere processen een rol spelen. Dit zijn (a) lek, (b) straling en (c) verdamping en condensatie. Het onderdeel straling komt uitgebreid in het volgende hoofdstuk ter sprake maar lek en condensatie en verdamping vallen fysisch gesproken onder het hoofdstuk convectie.

3.1 Lek

Moderne kasdekken hebben een lek die varieert tussen de 1 tot $5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ uur})$, afhankelijk van de windsnelheid en de kwaliteit van het kasdek.

De lek door dichte, maar geweven schermdoeken (zoals LS 10 plus) hangt af van het temperatuurverschil over het scherm en bedraagt ongeveer $0.1 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ K uur})$ voor een nieuw schermdoek. Voor een regelmatig gebruikt, en dus praktisch schermdoek bedraagt de luchtuitwisseling echter al gauw drie keer zo veel¹, dus $0.3 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ K uur})$.

Bij een temperatuurverschil van $10 \text{ }^\circ\text{C}$ over het scherm, wat bij een kas heel gebruikelijk is, vindt er dus een luchtuitwisseling plaats over het scherm van 3 m^3 per m^2 per uur. Een luchtuitwisseling van 3 m^3 per m^2 per uur geeft een voelbaar warmteverlies van $1 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. $3 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ uur})$ is namelijk $8.3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ per m^2/s en met een soortelijke warmte van lucht van $1200 \text{ J}/(\text{m}^3 \text{ K})$ betekent dit $1 \text{ J}/(\text{m}^2 \text{ s K}) = 1 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

Als we aannemen dat het lekverlies naar de buitenlucht bij gesloten ramen en bij weinig wind 2 m^3 per m^2 per uur bedraagt, dan is de geleiding via lek door het dek ongeveer $0.7 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Dus,

toevoeging van het effect van lek aan aan de overall k-waarde in het linker plaatje van Figuur 1 betekent gewoon een verhoging met 0.7 , waardoor de convectieve k-waarde oploopt van 2.7 naar $3.4 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

Voor het rechter plaatje wordt het een iets ingewikkelder formule omdat er een combinatie van serie en parallel geleidingen optreedt. Voor dat geval volgt de overall convectieve k-waarde uit.

$$k_{\text{totaal}} = \frac{1}{\frac{1}{1/(1/6+1/5) + 0.7} + \frac{1}{1/(1/4+1/4) + 1}} = 1.6 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$$

dit stuk betreft het dek
dit stuk betreft het scherm

warmtegeleiding dek
geleiding door lek
warmtegeleiding scherm
geleiding door lek

Bovenstaande formule laat zien dat het toevoegen van luchtuitwisseling dóór het scherm, of langs het scherm via kieren en andere imperfecte afdichtingen, een duidelijk effect heeft op de convectieve warmteoverdracht. In een kas zonder scherm wordt de k-waarde voor $0.7 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ bepaald door de lek en bij een kas met 1 scherm is de lek verantwoordelijk voor $0.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

¹ A.F. Miguel, 1998, Transport phenomena through porous screens and openings; from theory to greenhouse practice, PhD thesis, Wageningen University and Research

3.2 Condensatie en verdamping

Behalve voelbare warmte-overdracht kan er ook latente warmte-overdracht (condensatie) naar het scherm plaatsvinden. Een belangrijk kenmerk van deze latente warmte-overdracht is dat het een discontinue proces is. Zolang de schermtemperatuur boven het dauwpunt van de kaslucht ligt, vindt er geen condensatie plaats. Zo zal er bij een kaslucht van 20 °C en 75% RV pas condensatie gaan optreden als de oppervlaktetemperatuur onder de 15.4 °C zakt.

Komt de temperatuur van een oppervlak daar onder dan ontstaat er condens. De kasdektemperatuur ligt meestal onder de dauwpuntstemperatuur zodat daar praktisch altijd vocht op condenseert. Schermoppervlakken zijn altijd warmer dan het kasdek, maar blijven vaak onder het dauwpunt zodat ook daar condensatie op zal treden.

De hoeveelheid condens per m² per seconde (dus de energietoevoer naar het scherm) is evenredig met het verschil tussen de temperatuur van het scherm en het dauwpunt van de lucht.

Hoe kouder het oppervlak wordt, hoe sneller het vocht op het scherm condenseert.

Bij veel condensatie zal de luchtvochtigheid in de kas echter dalen, wat een verlaging van het dauwpunt betekent en dus de condensatiesnelheid weer vermindert.

Door deze terugkoppeling is de hoeveelheid vocht die daadwerkelijk op het scherm condenseert beperkt, alhoewel druppelvorming en de daarbij behorende druij vanuit tuinbouwkundig oogpunt heel vervelend kan zijn.

De vochtdoorlatende eigenschappen van schermen hebben dus niet zozeer een effect op het energieverbruik van een kas, maar hebben veeleer teelttechnische implicaties. In hoofdstuk 5 wordt hier verder op ingegaan.

4 Stralingsoverdracht aan schermen

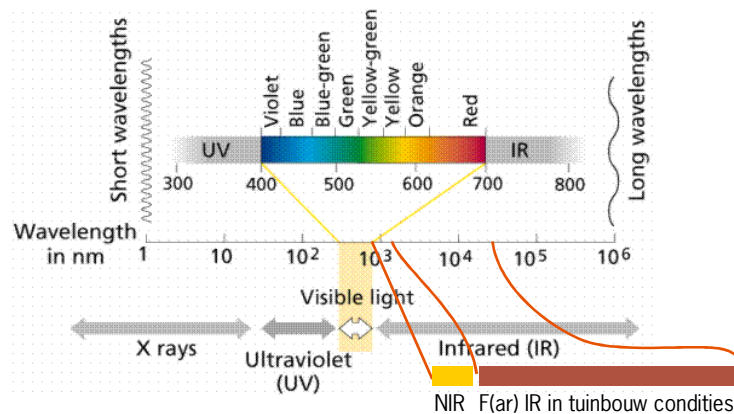
Het vorige hoofdstuk behandelde de warmte-overdracht tussen lucht en oppervlakken met een andere temperatuur of lucht-lucht uitwisseling. Er is echter nog een belangrijke vorm van energieoverdracht en dat is stralingsuitwisseling. Praktisch gesproken vindt stralingsuitwisseling in de kas alleen tussen oppervlakken plaats¹. Luchttemperaturen doen hierin dus niet ter zake.

Het enige stralingsuitwisselingsproces waarbij slechts 1 oppervlak een rol speelt is het stralingsverlies naar de atmosfeer. Goed beschouwd is de atmosfeer geen oppervlak maar wel een enorm hoge opeenstapeling van gasmoleculen die zich samen gedragen alsof er een koud oppervlak boven de kas hangt. Aan dit virtuele oppervlak wordt een temperatuur toegekend die de 'hemeltemperatuur' wordt genoemd. Er zijn sensoren die de hemeltemperatuur meten (pyrgeometers). Feitelijk meten deze instrumenten het energieverlies naar de atmosfeer en kennen daar vervolgens een temperatuur aan toe. Onder Nederlandse omstandigheden ligt de hemeltemperatuur bij een bewolkte hemel ongeveer 2 °C onder de luchttemperatuur en bij een heldere hemel is de hemeltemperatuur ongeveer 20 °C lager.

Voor stralingsuitwisseling geldt dat ieder oppervlak energie uitwisselt met een ander oppervlak dat 'in zijn blikveld' ligt. Zo zullen de onderste bladeren van het gewas vooral energie uitwisselen met het vloeroppervlak, met boven gelegen bladeren, maar ook een beetje met het scherm en/of het dek. Als het scherm dicht is, kan stralingsuitwisseling met het kasdek plaatsvinden alleen als het gebruikte scherm in meer of mindere mate 'doorzichtig' is voor warmtestraling.

Voor wat betreft de doorzichtigheid van materialen kunnen we niet uitgaan van de doorzichtigheid zoals wij die waarnemen. Glas en folie zijn beide doorzichtig voor zichtbaar licht, maar voor de warmtestraling waarover het in dit hoofdstuk gaat, is folie meestal wel behoorlijk doorzichtig, maar glas bijna niet. Voor folie geldt daarbij ook nog dat als er door condensatie een waterfilm op het folie ontstaat de doorzichtigheid verloren gaat.

In onderstaande figuur wordt het verschil tussen PAR licht (het zichtbaar licht), het Nabij Infra Rood (NIR) en het ver infrarood (FIR) getoond. Warmte-uitwisseling tussen oppervlakken op temperaturen die in kassen voorkomen manifesteren zich in het golflengtebereik van 6000 tot 30000 nm terwijl het zichtbare licht golflengten tussen 400 en 700 nm betreft.



Figuur 2. Soorten straling en de daarbij behorende golflengten

¹ Lucht is ook materie die energie via straling uitzendt, maar omdat lucht zo ijel is valt de energie-uitwisseling die hiermee gemoeid is heel ver buiten de praktische relevantie

Warmteoverdracht door straling wordt uiteraard bepaald door het temperatuurverschil tussen de verschillende oppervlakken, maar ook door de emissiecoëfficiënt. Als twee oppervlakken emissiecoëfficiënt 1 (zulke oppervlakken worden zwarte stralers genoemd) hebben dan is de overdracht tussen het ene en het andere oppervlak gelijk aan

$$P_{\text{straling}} = 5.67 \cdot 10^{-8} \times (T_1^4 - T_2^4) \quad [\text{W/m}^2]$$

Het getal $5.67 \cdot 10^{-8}$ is de constante van Stefan Boltzman en de temperaturen T_1 en T_2 moeten in Kelvin worden uitgedrukt.

Als voor T_1 293 K wordt ingevuld (20 °C) en voor T_2 283 K (10 °C) dan is de stralingsoverdracht 54 W/m². In dit temperatuurgebied en bij niet al te grote temperatuurverschillen zou je dus kunnen stellen dat stralingsoverdracht een overdrachtscoëfficiënt heeft van 5.4 W/(m² K). Uit de grootte van dit getal blijkt dus dat straling een minstens even belangrijke rol in de warmte-overdracht in kassen speelt als convectieve warmte overdracht.

Behalve door temperatuurverschil wordt de stralingsoverdracht ook bepaald door de emissiecoëfficiënt, een eigenschap van het oppervlak, uitgedrukt in een getal tussen 0 en 1. Is de emissiecoëfficiënt klein, dan betekent dit dat stralingsenergie moeilijk wordt afgestaan, maar ook moeilijk wordt opgenomen. De formule voor de berekening van de warmte-overdracht tussen oppervlakken waarvan tenminste één een emissiecoëfficiënt kleiner dan 1 heeft luidt¹:

$$P_{\text{straling}} = \frac{5.67 \cdot 10^{-8} \times (T_1^4 - T_2^4)}{(1/\epsilon_1) + (1/\epsilon_2) - 1} \quad [\text{W/m}^2]$$

Om te analyseren hoe groot de invloed van de emissiecoëfficiënt is vergelijken we de stralingsuitwisseling tussen het kasdek en twee soorten schermen. In het ene geval veronderstellen we dat het scherm een emissiecoëfficiënt heeft van 0.85 (bijvoorbeeld een transparant energiescherm met een dun laagje condens er op) en in het andere geval veronderstellen we een gealuminiseerd scherm met een emissiecoëfficiënt van 0.35 (de genoemde getallen zijn reële waarden voor huidige schermssystemen). In beide gevallen wordt de emissiecoëfficiënt van het kasdek op 0.85 gesteld (eveneens een reële waarde). Als het kasdek 0 °C is en het scherm 10 °C dan is de warmte-overdracht in het ene geval 36 W/m² en in het andere geval 16 W/m². Het verlagen van de emissie-coëfficiënt geeft dus in dit geval meer dan een halvering van het energieverlies door straling.

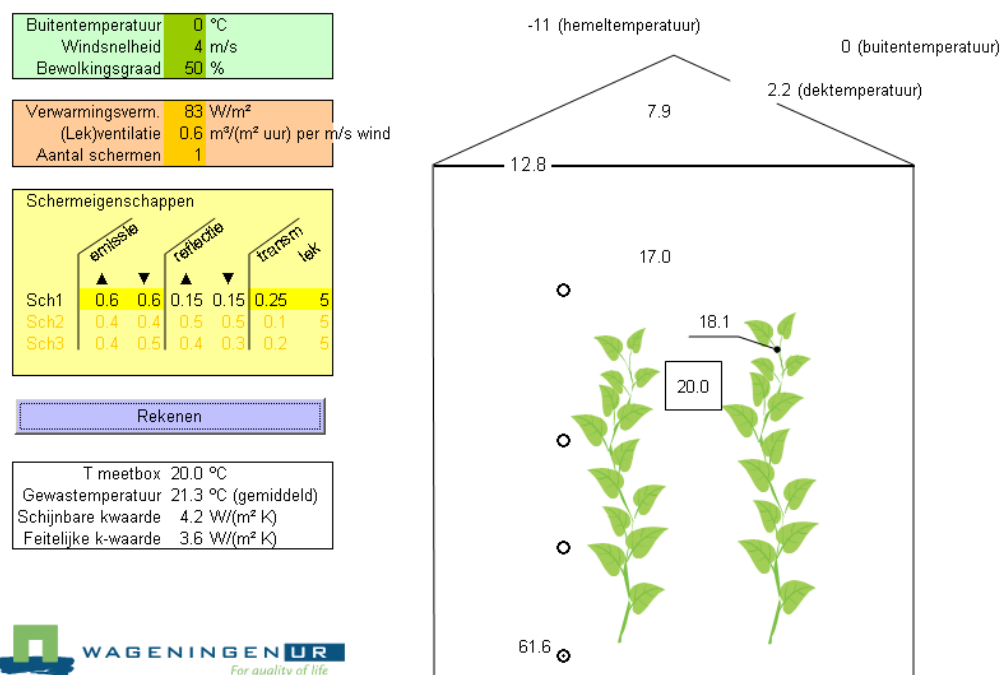
Behalve de emissiecoëfficiënt speelt bij schermen ook de transmissiecoëfficiënt een rol in de energie-uitwisseling. Een droog foliescherm is bijvoorbeeld voor 60% transparant voor infrarode straling. Dit betekent dat het kasdek voor slechts 40% het scherm 'ziet', en voor 60% de oppervlakken die daar onder liggen (gewas, vloer en meestal ook stukjes verwarmingsbuis). Deze oppervlakken zijn aanzienlijk warmer dan het scherm dus heeft naast de emissiecoëfficiënt van een schermmateriaal ook de transmissiecoëfficiënt een grote invloed. De analyse van de invloed hiervan is echter niet meer in simpele voorbeelden zoals hierboven uit te werken omdat bij deze berekeningen veranderende coëfficiënten invloed hebben op alle temperaturen in het kassysteem. Om toch de invloed van schermeigenschappen te kunnen bestuderen is er in het kader van dit project een eenvoudig doch compleet simulatie-instrument ontwikkeld. Met dit instrument kan de gevoeligheid van de overall k-waarde van de kas als functie van de schermeigenschappen worden bestudeerd. Het volgende hoofdstuk toont de resultaten van exercities met dit simulatie-instrument.

¹ H.F. de Zwart, 1996, Analyzing energy-saving options in greenhouse cultivation using a simulation model, PhD thesis, Wageningen University and Research

5 Analyse van het effect van schermeigenschappen op de warmtedoorgang

Figuur 3 toont het interface van het simulatieprogramma waarmee de invloed van scherm-eigenschappen op de overall k-waarde van de kas kan worden berekend. In deze figuur zijn gemiddelde buitenomstandigheden voor een redelijk koude nacht ingevuld en zijn de schermeigenschappen van een gemiddeld transparant, gewezen energiescherm ingevuld¹. Er is uitgegaan van een lek van 5 m³ per m² per uur, waarbij 3 m³ per m² per uur door het scherm lekt en 2 m³ per m² per uur via de nooit hermetische afsluitingen van de schermdoeken op de constructie.

Het model beschrijft uitsluitend nachtelijke situaties omdat er geen invloed van zonlicht is meegenomen. Dit is achterwege gelaten omdat de perspectieven van schermen zich vooral 's nachts moeten laten gelden (65% van het warmteverbruik van een kas vindt 's nachts plaats).



Figuur 3. De model-input en output van het schermeigenschap simulatieprogramma voor het geval er één (transparant) energiescherm in de kas is aangebracht. Hier zijn de scherm eigenschappen dezelfde aangenomen voor de bovenkant (▲), en onderkant (▼) van het schermoppervlak. De figuur toont de temperatuur boven het gewas (hier 17.0 °C), de temperatuur in de kop (hier 18.1 °C), de temperatuur in de meetbox (20 °C) en de gemiddelde buistemperatuur (hier 61.6 °C).

De verwarmingsbuis ligt onderin en heeft een gemiddelde temperatuur van 62°C, waarbij de buis 83 W/m² aan de kaslucht afgeeft. (deze 83 W/m² is een door de gebruiker gekozen waarde en de buistemperatuur, de temperatuur in de meetbox en alle andere temperaturen in de kas zijn een gevolg). Het model houdt geen rekening met gevel- en vloerverliezen.

De temperatuur die bij de meetbox wordt gemeten is 20 °C zodat geconcludeerd zou kunnen worden dat de kas een k-waarde heeft van $83/(20 - 0) = 4.2 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$. Dit getal is in de modeloutput terug te vinden onder het kopje 'Schijnbare k-waarde'. Het is hier schijnbare k-waarde genoemd omdat een deel van de 83 W/m² die aan de kas wordt afgegeven niet gebruikt wordt voor de verwarming van de kas, maar voor gewasverdamping. Het model veronderstelt een (niet op

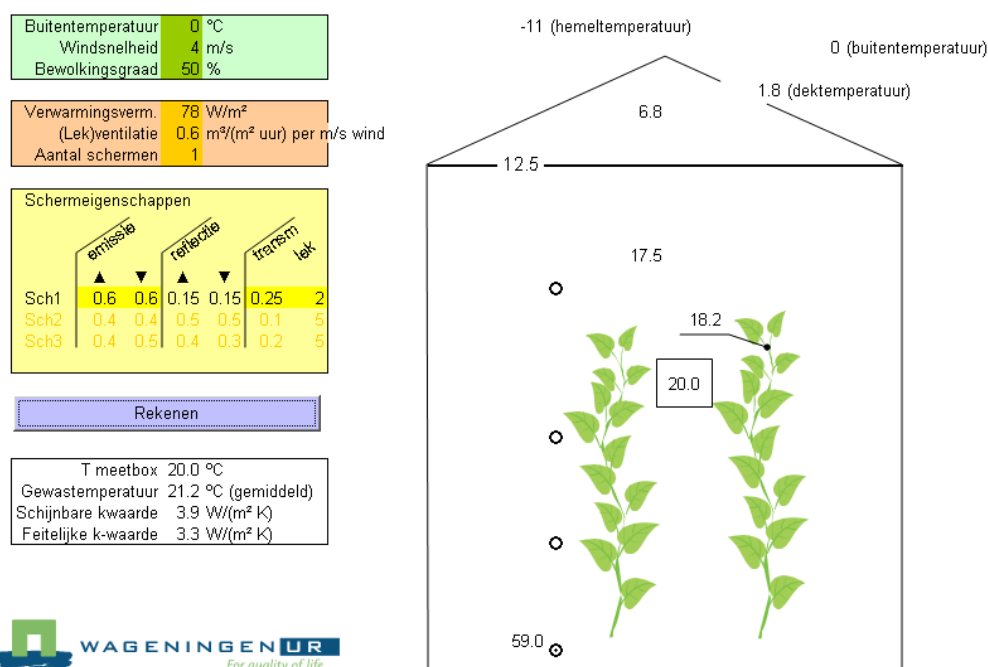
¹ TNO-rapport, U waarde kas met scherm; Meetprotocol voor schermdoeken, in press

gebruikersniveau te variëren) verdamping van 12 W/m² (dat is 17.5 gram per m² per uur). De energievraag voor het op temperatuur houden van de kas is dus 83-12= 71 W/m², zodat de feitelijke k-waarde 71/(20 – 0) = 3.6 W/(m² K) bedraagt.

Overigens zullen tuinders in de praktijk het verschil tussen feitelijke en schijnbare k-waarde niet zo gauw maken en zullen zij ook het gevelverlies, meestal ongemerkt, meenemen. De ‘feitelijke k-waarde’ die in dit model getoond wordt is dus al gauw 20% lager dan de k-waarde die een tuinder zou berekenen wanneer hij zou uitgaan van zijn warmtevraag per nacht gedeeld door het gemiddeld temperatuurverschil tussen binnen en buiten.

Schermeigenschappen zullen weinig invloed op de verdamping hebben (waarover verderop meer) en het is reëel om de gevelverliezen buiten de beschouwing te laten als het gaat om het effect van scherm-eigenschappen. Daarom wordt de analyse van scherm-eigenschappen op k-waarde gebaseerd op de feitelijke k-waarde zoals die door het spreadsheet wordt berekend.

Om de invloed van de lek door het scherm te evalueren worden alle omgevingsfactoren gelijk gehouden als in Fig. 3, maar wordt de lek 2 in plaats van 5 m³/(m² uur)gemaakt.



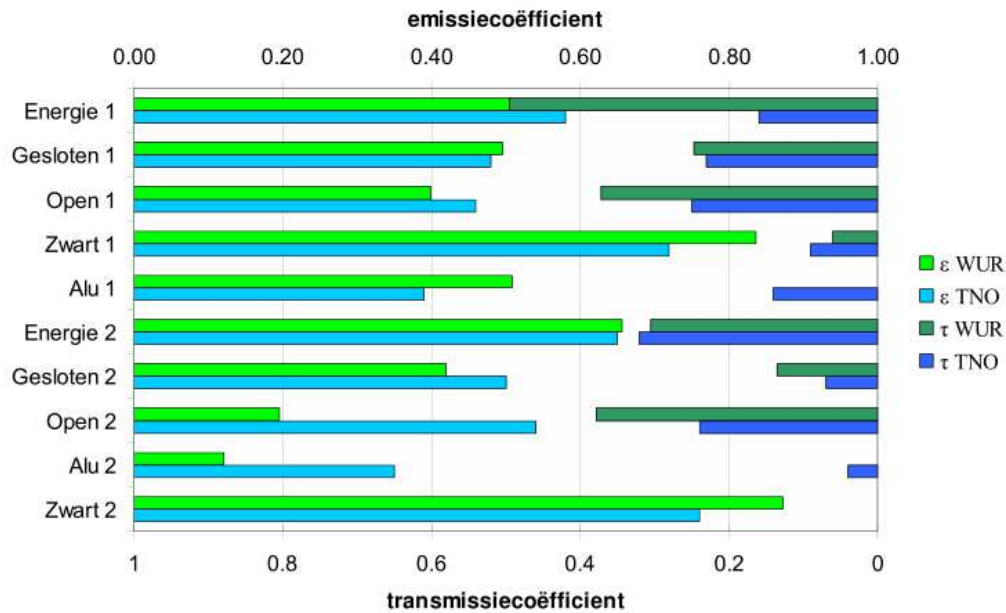
Figuur 4. De model-input en output van het schermeigenschap simulatieprogramma voor het geval er één transparant foliescherm zou worden gebruikt dat geen lucht doorlaat.

Zoals te zien in Figuur 4 moet in dit geval 78 W/m² kas worden toegevoerd om op dezelfde 20 °C op de meetbox uit te komen. De feitelijke k-waarde is hierdoor gezakt met 0.3 W/(m² K) zodat gesteld kan worden dat het kiezen van een luchtdicht scherm 0.3 W/(m² K) bespaart (in het geval er één scherm aanwezig is).

Een grotere stap wordt gemaakt wanneer er in plaats van een transparant scherm een 100% gealuminiseerd scherm zou worden gebruikt. Dit is te zien in Figuur 6, waar de lek weer op 5 m³ per m² per uur is gesteld, maar waarbij de emissiecoëfficiënten, en ook de transmissiecoëfficiënt zodanig zijn veranderd dat de eigenschappen van een gemiddeld gealuminiseerd scherm worden beschreven. De gekozen waarden (dat zijn een emissiecoëfficiënt van 0.35 en een transmissiecoëfficiënt van 0.1) zijn ontleend aan het onlangs verschenen TNO rapport waarin de optische eigenschappen van verschillende schermmaterialen werden besproken¹. In dit rapport staat het onderstaande grafiekje. De grafiek in Figuur 5 laat met de balkjes aan de linkerkant de emissiecoëfficiënt van verschillende

¹ U-waarde kas met scherm; meetprotocol voor schermdoeken, TNO rapport 034-DTM-2009-05659

schermssystemen zien en rechts de transmissiecoëfficiënt. Het restant van emissiecoëfficiënt en transmissiecoëfficiënt (het gat tussen de balkjes) is de reflectiecoëfficiënt van het scherm voor langgolvlige straling.



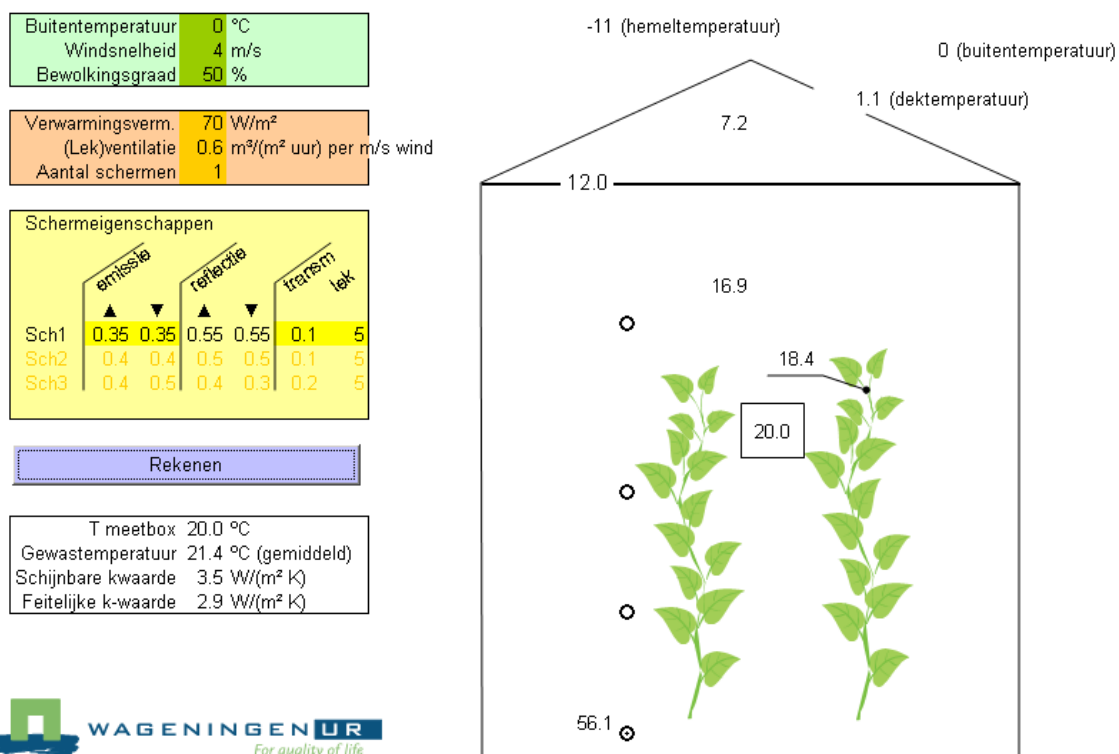
Figuur 5. Optische eigenschappen van verschillende schermmaterialen. (uit: U-waarde kas met scherm; meetprotocol voor schermdoeken)

De resultaten in de figuur zijn gebaseerd op metingen door TNO en metingen door Wageningen UR en het valt meteen op dat de resultaten voor een aantal schermtypen niet eenduidig waren. De meting van deze optische eigenschappen is namelijk bijzonder lastig, met name omdat de warmtestroom door optische effecten moeilijk is te onderscheiden van de warmtestroom door convectieve overdracht.

Gelukkig heeft het onderzoek waaraan Figuur 5 is ontleend geleid tot een nieuwe meetmethode en is de aanzet gegeven voor een nieuw meetinstrument waarmee deze eigenschappen wél kunnen worden bepaald. Bij het tot stand komen van dit rapport waren de opnieuw bepaalde waarden voor de optische eigenschappen echter nog niet voorhanden zodat er gebruik is gemaakt van 'aannemelijke waarden'.

Uitgaande van de waarden die in Figuur 5 staan afgebeeld wordt een redelijke waarde voor een gealuminiseerd scherm gebaseerd op de gegevens bij Alu 1 en Alu 2, resulterend in een emissiecoëfficiënt van 0.35 en een transmissiecoëfficiënt van een gemiddeld gealuminiseerd doek op 0.1.

Voor een (transparant) energiescherm worden soortgelijke waarden bepaald uit de gepresenteerde gegevens voor Energie 1 en Energie 2. Zoals ook te zien in Figuur 4 wordt voor een energiescherm gewerkt met een emissiecoëfficiënt 0.6 en een transmissiecoëfficiënt 0.25.



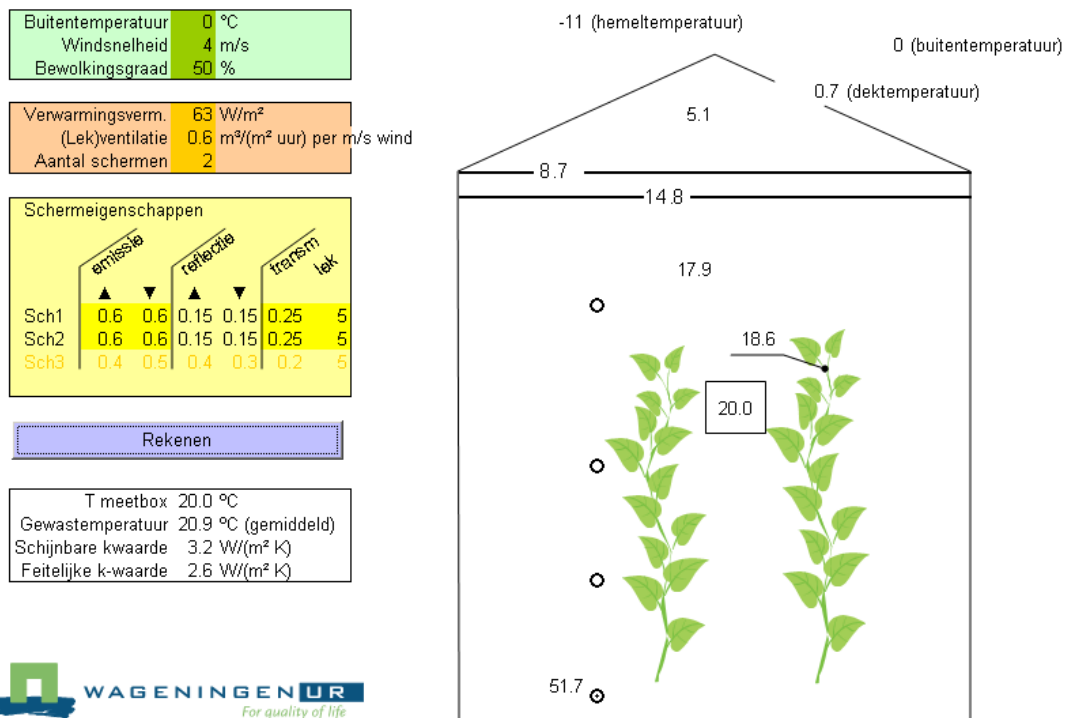
Figuur 6. De modelinput en output van het schermeigenschap simulatieprogramma voor het geval er één gealuminiseerd energiescherm in de kas is aangebracht.

De grotere reflectie van straling door het scherm leidt tot een lagere dektemperatuur en een lagere temperatuur boven het scherm, waardoor het warmteverlies duidelijk afneemt. Het benodigde buisvermogen om dezelfde 20 °C in de meetbox te meten daalt met bijna 10 W/m² en de feitelijke k-waarde daalt dan ook van 3.6 naar 2.9 W/(m² K)

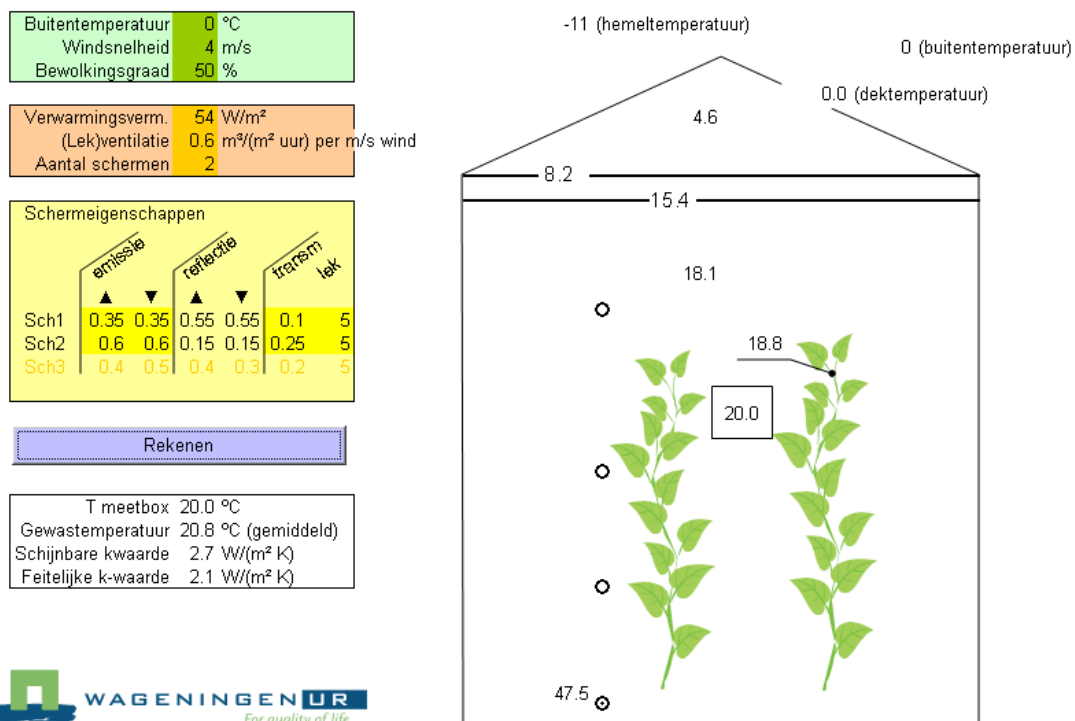
Figuur 3, Figuur 4 en Figuur 6 laten ook goed zien dat er onder de getoonde omstandigheden de koptemperatuur steeds onder de temperatuur van de meetbox ligt, maar dat dit verschil kleiner wordt naarmate het scherm beter isoleert. In het algemeen kan dus gesteld worden dat bij betere isolatiewerking van de schermen het risico op natslag in de kop afneemt.

De vergelijking van de bovenstaande 3 cases laten zien dat het gebruik van een gealuminiseerd scherm in geval men slechts één scherm heeft een duidelijk effect op de warmtevraag oplevert. Echter, een gealuminiseerd scherm is niet geschikt voor gebruik overdag omdat de kas dan donker blijft. Aangezien een scherm op koude winterse dagen en 's ochtends vroeg niet alleen een energetisch voordeel biedt maar ook een teeltkundig voordeel (namelijk een hogere luchtvochtigheid in de kas bij schraal koud weer en een kleinere temperatuurgradiënt) zullen tuinders er niet voor kiezen om een gealuminiseerd scherm in plaats van een transparant scherm te gebruiken. Behalve de relatief kleine verbetering die kan worden aangebracht door beperking van de lekverliezen door het scherm (door bijvoorbeeld een folie te gebruiken in plaats van een geweven scherm) kan de isolatiegraad van de kas worden verhoogd door het aanbrengen van één of meer extra schermen.

In Figuur 7 wordt het effect van het gebruik van een dubbel transparant scherm getoond.



Figuur 7. De model-input en output van het schermeigenschap simulatieprogramma voor het geval er twee transparante schermen boven elkaar worden gebruikt. De nummering van Sch1, Sch2 en Sch3 telt van boven naar beneden, dus Sch1 is het bovenste scherm.



Figuur 8. De model-input en output van het schermeigenschap simulatieprogramma voor het geval er één 100% gealuminiseerd energiescherm in de kas is aangebracht.

In vergelijking tot Figuur 3 is de feitelijke k-waarde van de kas door de toevoeging van het tweede scherm gezakt van 3.6 naar 2.6 W/(m² K).

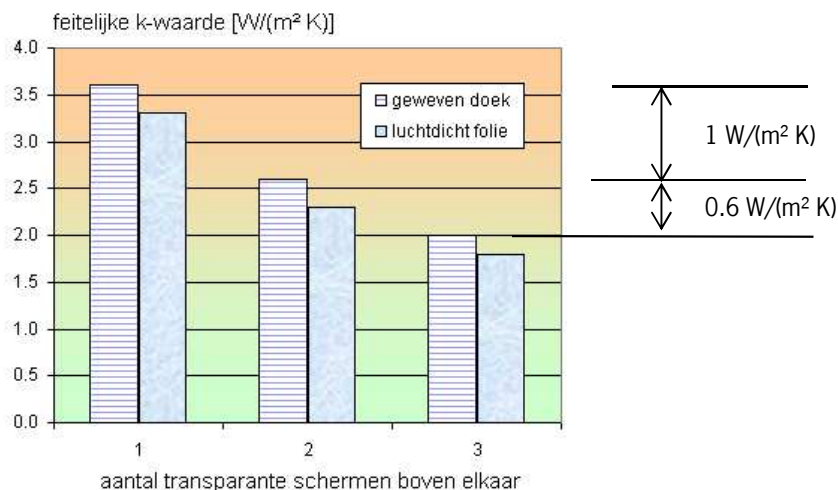
Als vervolgens één van de twee schermen als een gealuminiseerd scherm wordt uitgevoerd zakt de feitelijke k-waarde naar 2.1 W/(m² K). Dit blijkt uit Figuur 8.

Met het simulatieprogramma kan worden berekend of het uitmaakt of het gealuminiseerde scherm als bovenste of als onderste scherm wordt geplaatst. Het blijkt dat plaatsing als bovenste, zoals in Figuur 8 beter werkt dan wanneer het als onderste scherm wordt gepositioneerd, maar het verschil komt pas in de tweede decimaal van de k-waarde tot uitdrukking. Als de schermen ook nog leklicht gemaakt zouden kunnen worden dan gaat er 0.15 W/(m² K) per leklicht gemaakt scherm af van de feitelijke k-waarde.

Vanuit teeltkundig oogpunt levert het gebruik van een dubbel scherm als additioneel voordeel dat de temperatuur van het onderste scherm veel dichterbij het dauwpunt van de kaslucht komt te liggen of zelfs boven dat dauwpunt uit kan stijgen. De problemen door condensatie en druipt zullen hierdoor sterk verminderen.

Eenzelfde analyse is ook uitgevoerd voor het gebruik van 3 scherm lagen.

Onderstaande grafiek laat de afname van de feitelijke k-waarde van de kas zien wanneer er 1, 2, of 3 transparante schermen boven elkaar worden geplaatst (type LS 10 puls) en wanneer er 1, 2 of 3 luchtdichte folieschermen boven elkaar worden geplaatst



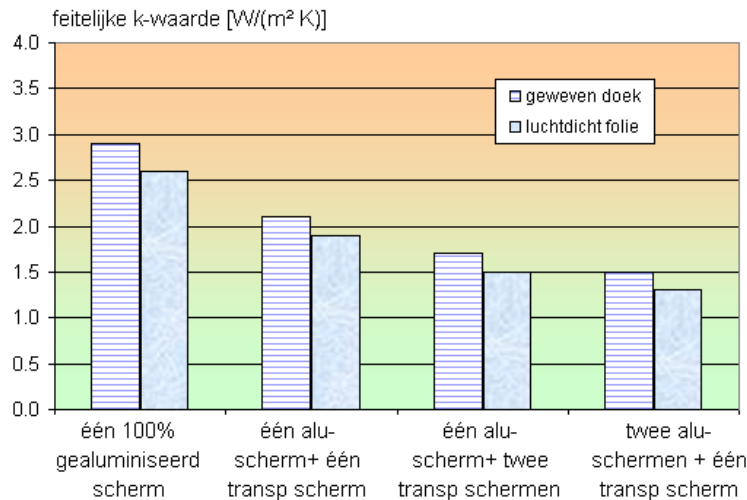
Figuur 9. Invloed van het aantal scherm lagen op de feitelijke k-waarde van een kas (met feitelijke k-waarde wordt het verwarmingsvermogen voor de overbrugging van het temperatuurverschil tussen binnen en buiten en is dus exclusief het warmteverbruik voor de verdamping). Voor de geweven doeken is een lek van 3 m³/(m² uur) verondersteld.

In de grafiek is de te verwachten graduele verkleining van het effect van elke extra scherm laag te zien. Bij de overgang van 1 naar 2 scherm lagen loopt de feitelijke k-waarde met 1 W/(m² K) terug en wanneer daar nog een 3^e scherm onder wordt geplaatst dan zakt de k-waarde met 0.6 W/(m² K). Er treden dus afnemende meeropbrengsten op. De grafiek laat ook zien dat het effect van het luchtdicht maken van een scherm (het hoogteverschil tussen de paaltjes die tegen elkaar aan staan) een stuk kleiner is dan het effect van een extra scherm (het hoogteverschil tussen de groepen paaltjes).

Figuur 10 laat een soortgelijke grafiek zien, maar dan voor de situatie waarin het bovenste doek een gealuminiseerd doek is. De uitgangswaarde, dus met één gealuminiseerd doek, is met 2.9 W/(m² K) lager dan de k-waarde in die één transparant scherm oplevert en omdat de uitgangswaarde kleiner is, zijn de effecten van de toevoegingen van extra schermen ook kleiner.

Als er onder een gealuminiseerd scherm een tweede scherm wordt geplaatst dan ligt het voor de hand dat dit een transparant scherm is dat ook overdag gebruikt kan worden. Met zo'n scherm wordt de k-waarde 's nachts met $0.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ verlaagd. Worden er twee schermen onder het bovenste scherm geplaatst dan zouden dit twee transparante, maar ook een transparant en een gealuminiseerd scherm kunnen zijn. In het eerst geval verkleint de k-waarde met $0.4 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ en in het tweede geval met $0.6 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

Wanneer de schermen luchtdichte folies zijn dan vermindert de k-waarde grofweg met $0.15 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ per verbeterd scherm.



Figuur 10. Invloed van het plaatsen van additionele, transparante en/of gealuminiseerde schermlagen onder een 100% gealuminiseerd scherm op de k-waarde van een kas (voor nadere uitleg, zie Figuur 9). Voor de geweven doeken is een lek van $3 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ uur})$ verondersteld.

Relatie tussen k-waardeverlaging en energiebesparing

De hoeveelheid energie die per uur bespaard wordt volgt uit het product van de k-waardeverlaging, en het op dat moment geldende temperatuurverschil tussen binnen en buiten.

Als we kijken naar het teeltjaar 2009 dan heeft een kas als de SunergieKas het tweede scherm gedurende 1800 uur gesloten en de experimenten rond 'Energie onder de knie' lieten een soortgelijk aantal gebruiksuren zien.

Over deze 1800 uur was het gemiddeld temperatuurverschil tussen de kas- en buitentemperatuur $14.3 \text{ }^\circ\text{C}$. Bij vergelijking van Figuur 3, geldend voor de situatie met een enkel transparant scherm met Figuur 7, waar een dubbel transparant scherm wordt getoond, dan blijkt dat dit extra scherm de k-waarde met $1 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ verlaagt. Gemiddeld betekent dit een verlaging van het warmteverlies van $1 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}) \times 14.3 \text{ }^\circ\text{C} = 14.3 \text{ W}/\text{m}^2 = 51.5 \text{ kJ per m}^2 \text{ per uur}$. Over deze 1800 uur is dit $92670 \text{ kJ}/\text{m}^2 = 92.7 \text{ MJ}/\text{m}^2$. Uitgedrukt in m^3 aardgas equivalenten is dit 2.9 m^3 .

Bij vergelijking van Figuur 3 met Figuur 8, blijkt dat wanneer het tweede scherm een gealuminiseerd scherm is, de k-waarde met $1.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ wordt verlaagd. Hetzelfde sommetje levert dan een besparing van $138 \text{ MJ}/\text{m}^2$ per jaar op, wat overeenkomt met 4.4 m^3 aardgas equivalenten.

Nog verdere verlagingen van de k-waarde zullen hun waarde op grofweg dezelfde uren opleveren en bij hetzelfde temperatuurverschil (aangenomen dat de tuinder niet harder gaat stoken onder een zwaar isolerend scherm dan onder een standaard scherm) zodat gesteld kan worden dat voor een tomatenteelt iedere $\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ dat het schermstelsel de k-waarde verlaagt 93 MJ stookenergie oplevert, wat overeenkomt met 2.9 m^3 aardgas equivalenten.

Bij warmer geteelde gewassen is dit effect groter en bij kouder geteelde gewassen is dit effect natuurlijk kleiner.

De bovengenoemde getallen gelden bij een gemiddeld temperatuurverschil van $14.3 \text{ }^\circ\text{C}$ tijdens de gebruikperiode van het scherm. Een teelt die door de bank genomen een graad warmer geteeld wordt dan de tomaat zal in diezelfde

gebruiksuren gemiddeld 15.3 °C warmer zijn dan de buitentemperatuur. Het scherm-effect neemt dan met 7% toe en geeft in zo'n teelt dus 3.1 m³ aardgas equivalenten per W/(m² K) verlaging van de k-waarde.

Bij een teelt die gemiddeld genomen een graad kouder is zakt de energiebesparing naar 2.7 m³ aardgas equivalenten per W/(m² K).

Verlaging contractcapaciteit

Naast de verlaging van het verbruik, zal een extra of een verbeterd systeem ook een duidelijke vermindering van de benodigde contractcapaciteit opleveren. Immers, als het gascontract is gebaseerd op een te bereiken temperatuur-overbrugging van 30 °C zal er bij een k-waarde van 5 W/(m² K) een vermogen van 150 W/m² moeten kunnen worden geleverd, terwijl dat bij een k-waarde van 4 slechts 120 W/m² bedraagt. De verlaging van de benodigde contractcapaciteit zal evenwel wat minder kunnen afnemen dan de verlaging van de k-waarde door een scherm omdat een deel van het verwarmingsvermogen nodig is voor de verdamping. Bij dubbele schermssystemen is het ook goed denkbaar dat de k-waarde verlaging alleen in de nacht plaatsvindt en dus de daggemiddelde k-waarde wat minder af zal nemen dan de afname van de nachtelijke k-waarde.

Als vuistregel zou kunnen worden gesteld dat een verbetering van de k-waarde van 1 W/(m² K) een verlaging van de contractcapaciteit van 25 m³/(ha uur) kan opleveren. Dit geldt bij een gewenste temperatuur-overbrugging van 30 °C (dus de kas op 20 °C kunnen houden als het buiten -10 °C is).

Concreet betekent dit dat de plaatsing van een transparant scherm als tweede scherm tot een 25 m³/(ha uur) verlaging van de contractcapaciteit kan leiden en een gealuminiseerd tweede scherm de contractcapaciteit met 37 m³/(ha uur) zou kunnen verlagen.

Conclusie

De conclusies die uit de analyse van de invloed van schermeigenschappen op de warmtedoorgang van kassen volgt is dat het aanbrengen van extra lagen meer effect heeft dan het verbeteren van de eigenschappen per scherm laag (hetzij door verbeterde stralingseigenschappen of door vermindering van de lek).

Als de kas uitgerust is met een transparant scherm en er wordt een tweede scherm aangebracht heeft men de keus tussen een transparant of een gealuminiseerd scherm. Een additioneel transparant scherm verlaagt de k-waarde dan met 1 W/m² K, terwijl een additioneel gealuminiseerd scherm geeft een verlaging van 1.5 W/(m² K). De vermindering van de infrarood-transmissie (wat het belangrijkste effect is van een gealuminiseerd scherm) geeft dus een extra verlaging van 0.5 W/(m² K), wat een wat groter effect is als de vermindering van de lek. Verkleining van de lek verlaagt de k-waarde met 0.3 W/(m² K).

Uitgaande van 1800 gebruiksuren van zo'n tweede scherm en een gemiddeld temperatuurverschil tussen binnen en buiten gedurende die gebruiksuren van 14.3 °C (beide getallen zijn gebaseerd op een actuele teelt in de SunergieKas in de tomatenteelt van 2009) betekent het gebruik van een transparant scherm als tweede scherm een energiebesparing van 2.9 m³ aardgas equivalenten per m² per jaar en het gebruik van een gealuminiseerd scherm een besparing van 4.4 m³ aardgas equivalenten per m² per jaar.

Zou er nog een derde scherm worden toegevoegd dan zou dit zijn diensten grofweg in dezelfde uren verlenen, maar omdat de effecten van extra schermen afnemen is de energiebesparing die zo'n scherm oplevert 1.2 m³ aardgas equivalenten als het een transparant scherm betreft en 1.8 m³ aardgas equivalenten per m² per jaar als een gealuminiseerd scherm wordt gebruikt.

Al deze besparingseffecten nemen moet 7% toe of af per graad dat de teelt respectievelijk warmer of kouder is dan een gemiddelde tomatenteelt.

Naast een verlaging van het jaarverbruik levert een extra of beter scherm ook een verlaging van de benodigde contractcapaciteit. Als richtlijn kan hier worden genomen dat bij een gewenste temperatuur-overbrugging van 30 °C de contractcapaciteit met 25 m³/(ha uur) naar beneden kan per W/(m² K) verbetering van de k-waarde van de scherminstallatie.

Met het toenemen van het aantal schermlagen zullen de teeltkundige problemen door druipt afnemen doordat de temperatuur van het onderste scherm dicht bij de dauwpunttemperatuur zal komen te liggen of daar zelfs bovenuit zal komen. In het laatste geval blijft het scherm droog.

6 Effect van schermeigenschappen op teelt en energie

In het vorige hoofdstuk is naar voren gekomen dat de energiebesparing die schermen kunnen opleveren vooral gezocht moet worden in de vergroting van het aantal schermen en niet zozeer in de verbetering van de schermeigenschappen, alhoewel dat ook enige energiebesparing kan opleveren. In de voorbeelden die in hoofdstuk 5 werden besproken was het effect van een gealuminiseerd scherm in vergelijking met een transparant scherm ongeveer 30% ten opzichte van het effect van de toevoeging van een extra scherm.

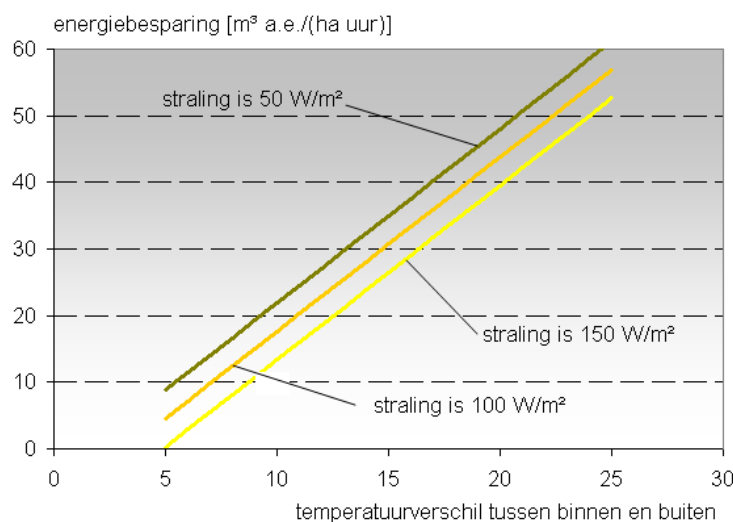
Het besparend effect wordt dus vooral veroorzaakt door de beperking van de convectieve overdrachtsprocessen. Stralingsprocessen spelen ook een rol maar de precieze stralingseigenschappen van het ene of het andere scherm hebben een kleinere impact dan de toevoeging van een extra scherm.

Dit biedt de mogelijkheid om bij gebruik van meerdere schermlagen tenminste één van de schermen te optimaliseren naar de gebruiksmogelijkheid overdag.

Het kunnen blijven gebruiken van schermen overdag leidt niet alleen tot een verlaging van het energieverbruik, maar zeker in het begin van de teelt, ook tot een groeizamer klimaat. Een gesloten energiescherm voorkomt dat de kaslucht te droog wordt en houdt de temperatuurgradiënt over de hoogte van het gewas binnen de perken en de koptemperatuur dicht bij de omgevingstemperatuur.

De belangrijkste eis voor het gebruik van een scherm overdag is dat de extra isolatie door het scherm in verhouding staat tot de vertraging van de groei door lichtverlies. Een scherm zal altijd enig licht wegnemen zodat dit productie kost.

Met behulp van het schermeigenschap simulatieprogramma uit het vorige hoofdstuk kan bepaald worden dat het gebruik van één transparant scherm de k-waarde van de kas $2.3 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ verkleint. Op het eerste gezicht is de energiebesparing dan dus makkelijk te berekenen aan de hand van het actuele temperatuurverschil. Echter, met het sluiten van het scherm wordt er ook een beetje zonlicht uit de kas weggehouden zodat de feitelijke energiebesparing een beetje kleiner is dan op grond van het k-waarde effect mag worden verwacht. De lijnen in onderstaande grafiek houden met dit effect rekening en tonen het resulterende effect bij een k-waarde verlaging van $2.3 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ door het sluiten van een transparant scherm met een lichtdoorlatendheid van 80%.

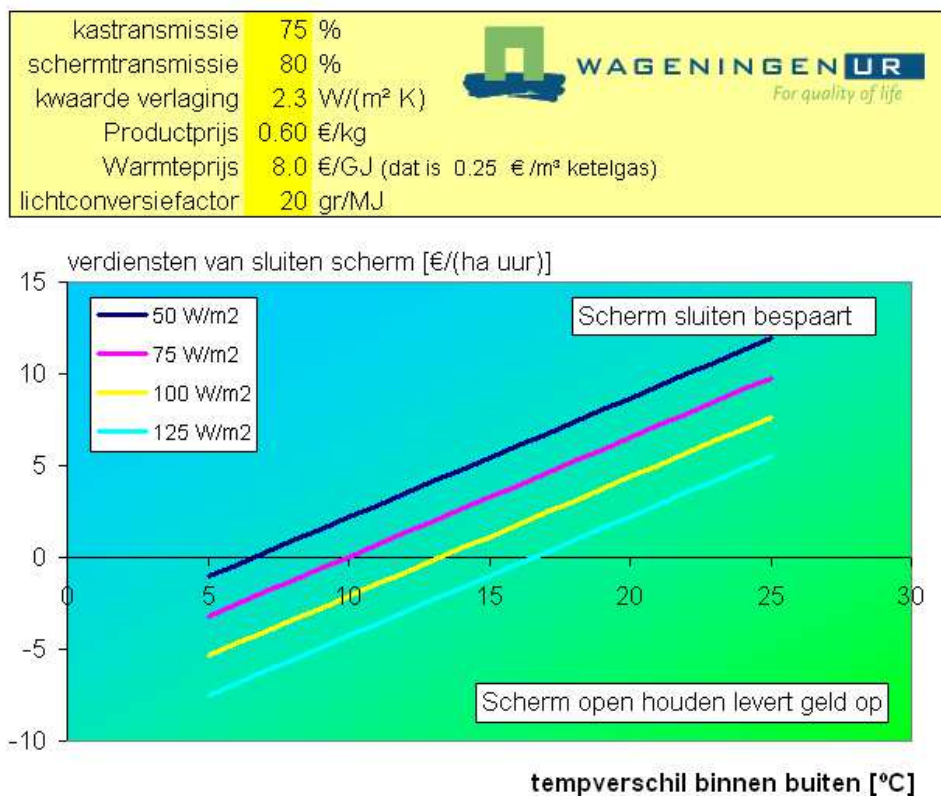


Figuur 11. Energiebesparing ten gevolge van het sluiten van een transparant scherm overdag als functie van het temperatuurverschil tussen de kaslucht en buiten bij drie stralingsintensiteiten. Uitgangspunt is dat het scherm een k-waarde effect van $2.3 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ heeft en 80% licht doorlaat.

Vanuit de gegevens uit Figuur 11 zou voor iedere gasprijs gemakkelijk de verdiensten door het sluiten van het scherm kunnen worden bepaald.

De groeivertraging heeft echter ook een prijs. Als we bijvoorbeeld uitgaan van de resultaten die in het voorjaar van 2009 in de SunergieKas gemeten zijn, dan blijkt een tomatengewas zonlicht in vruchten om te zetten met een efficiëntie van 20 gram vers product per MJ zonlicht in de kas. Stel dat er buiten 100 W/m² straling is en de kas met geopend scherm een transmissie van 75% heeft en met gesloten scherm een transmissie van 75% \times 80% = 60% dan scheelt het sluiten van het scherm $100 \times 3600 \times (0.75 - 0.60) / 1e6 = 0.054$ MJ zonlicht per m² kas per uur. Hiervan mag dan een opbrengstderiving van $0.054 \times 20 = 1.08$ gram per m² per uur = 10.80 kg per ha per uur verwacht worden. Wanneer deze opbrengstderiving wordt vermenigvuldigd met de prijs, bijvoorbeeld € 0.60 per kg versgewicht dan is de opbrengstderiving van het sluiten van het scherm bij een lichtintensiteit van 100 W/m² € 6,48 per ha per uur. Als we vervolgens een gasprijs van €0.25 per m³ veronderstellen (dat is een warmteprijs van 8 €/GJ) dan is het sluiten van het scherm overdag interessant als er meer dan 26 m³ gas per ha per uur mee bespaard wordt. Uit Figuur 11 volgt dan dat de buitentemperatuur in dit geval meer dan 13.5 °C onder de gewenste kasluchttemperatuur moet liggen willen de voordelen van het sluiten van het scherm opwegen tegen de kosten.

In de voorgaande verhandeling bleek al dat er veel grootheden van een waarde moeten worden voorzien voordat er een antwoord kan worden gegeven op de vraag onder welke condities het verstandig is een transparant scherm overdag te sluiten. Om al deze variabelen op de juiste manier te laten doorwerken op een onderbouwd sluitingscriterium is een klein programmatje ontwikkeld, waarvan Figuur 12 een resultaat toont.



Figuur 12. Input (het omkaderde vakje) en resultaat van de kosten-batenanalyse van het sluiten van een transparant scherm gedurende de dag. Het snijpunt van de lijnen met de x-as geeft aan onder welk temperatuurverschil tussen binnen en buiten het scherm bij een bepaalde stralingsintensiteit geopend moet worden.

In het voorbeeld zoals in Figuur 12 getoond zijn dezelfde waarden ingevuld die in de hierboven besproken redenering zijn genoemd zodat het snijpunt van de lijn die geldt voor een lichtintensiteit van 100 W/m² inderdaad de x-as bij een temperatuurverschil van 13.5 °C snijdt.

De grafiek laat zien dan naarmate er meer licht is, de buitentemperatuur lager moet zijn om het scherm overdag lucratief te kunnen sluiten dan wanneer er minder licht is.

Uiteraard schuiven alle lijnen bij wijzigingen in relevante grootheden. Als gas duurder wordt dan is het verstandig om meer te schermen en als de productwaarde toeneemt (of de omzettingsefficiëntie van het gewas) is het vanuit een doelmatig energiegebruik verstandig wat minder te schermen.

Vanuit de achtergrond van dit project, waarbij het er om gaat te onderzoeken wat de relatie is tussen scherm-eigenschappen en energieverbruik, is het interessant om te analyseren hoeveel uren het scherm overdag meer gesloten zou worden indien de lichttransmissie van het scherm in plaats van 80% bijvoorbeeld 90% zou zijn. Het in Figuur 12 getoonde spreadsheet programma berekent dat dit zou betekenen dat onder overigens gelijke omstandigheden het scherm nog economisch verantwoord dichtgehouden kan worden tot een temperatuurverschil van 7 °C tussen kaslucht en buitenlucht.

Indien de kas overdag bijvoorbeeld op 19 °C gestookt wordt dan zou het 80% transparante scherm bij 100 W/m² straling bij een buitentemperatuur van 3 °C opengetrokken moeten worden terwijl bij een 90% doorlatend schermmateriaal het scherm pas geopend zou moeten worden als het buiten warmer dan 12 °C is.

Wanneer deze afweging voor een jaarrond-situatie gemaakt wordt (uitgaande van de weergegevens van 2009) dan blijkt dat een 90% transparant scherm 650 uur per jaar extra gebruikt zou worden ten opzichte van een 80% transparant scherm. Deze 650 extra uren zijn niet de koudste uren. Immers, als het erg koud is zal een 80% transparant scherm net zo goed gesloten blijven als een 90% transparant scherm. Als er weer wordt uitgegaan van de tomatenteelt in de Sunergiekas in het teeltjaar 2009, dan blijkt dat het gemiddelde temperatuurverschil tussen de kaslucht en de buitenlucht tijdens de uren dat een 90% transparant scherm gebruikt zou worden en een 80% transparant scherm niet 11.3 °C te zijn. De energiebesparing die door het extra gebruik van het scherm dan gerealiseerd wordt bedraagt dus 650 uur x 11.3 °C x 2.3 W/(m² K) x 3600 s/uur = 6 10⁷ J = 60 MJ = 1.9 m³ aardgas equivalenten per m² per jaar.

Condensatie op het scherm

In hoofdstuk 5 kwam naar voren dat bij gebruik van meerlaagse schermssystemen de drup door condensatie tegen het onderste scherm sterk zal afnemen. Bij drie-laagse systemen zal er zelfs nauwelijks nog condensatie plaatsvinden.

Bij gebruik van een scherm overdag zal er vanwege de lichttransmissie-eisen evenwel meestal slechts één scherm gebruikt worden zodat de condensatie en drup direct weer de kop op zullen steken, zeker in combinatie met de hogere dauwpunttemperaturen overdag (door hogere kasluchttemperatuur en grotere verdamping van het gewas). Een transparant scherm dat overdag gebruikt moet worden zal dus zijn lichttransmissie-eigenschappen zoveel mogelijk moeten behouden ondanks de onvermijdelijke condensatie tegen het scherm. Bij AC-folies (Anti Condens folies) wordt hiertoe gebruik gemaakt van een oppervlaktebehandeling die ervoor zorgt dat condens in de vorm van een film zoveel mogelijk aan het folie blijft hangen. De benaming 'Anti Condens' is overigens een misleidende naam want deze folies beperken niet zozeer de hoeveelheid condens, maar vooral de nadelige effecten van condens.

Conclusie

Overdag kunnen transparante schermen de k-waarde van de kas met ruim 2 W/(m² K) verlagen (de eigenschappen van de in dit rapport veronderstelde transparante schermen geven een k-waarde verlaging van 2.3 W/(m² K)). Het gesloten houden van een scherm overdag levert daarmee een duidelijke energiebesparing.

Het sluiten van het scherm kost echter ook licht, en dus productie. Bij afnemend verschil tussen buitentemperatuur en stooklijn neemt de energiebesparing in absolute zin af zodat er altijd een punt zal zijn waarbij de energiebesparing niet meer opweegt tegen het productieverlies. Als een scherm meer transparant is wordt dit punt omhoog geschroefd, zodat er meer scherm-uren gemaakt zullen worden.

De precieze relatie tussen schermeigenschappen en energiebesparing voor een scherm dat overdag gebruikt wordt is afhankelijk van een heleboel zaken (basistransmissie van de kas, waarde van het product, de kostprijs van energie, en de lichtconversiefactor van het gewas). Om een idee te krijgen van de hoeveelheid energie die bespaard kan worden indien een schermmateriaal een stuk transparanter zou zijn is een jaarrond-effect berekend voor het geval dat de lichtdoorlatendheid 90% in plaats van 80% zou zijn.

Uitgaande van de buitenomstandigheden van 2009 blijkt dat zo'n verandering in een tomatenteelt tot 650 extra schermuren zou leiden en dat dit groter aantal gebruiksuren de warmtevraag van de kas met 1.9 m³ aardgas equivalenten per m² per jaar zou laten dalen.

7 Constructieve aspecten van scherminstallaties

Het onderzoek waarvan dit rapport een weerslag is laat zien dat verbeteringen van de isolatiegraad van kassen door middel van schermen vooral gerealiseerd kan worden door extra schermen aan te brengen en in mindere mate door verbetering van de schermeigenschappen.

Extra schermen vereisen extra installaties en op dit punt heeft TNO recentelijk hernieuwde richtlijnen en rekenmethodieken gepubliceerd.

De opgestelde richtlijnen hebben als uitgangspunt dat de installatie aan de ene kant sterk genoeg is, maar aan de andere kant met zo min mogelijk onderscheppende delen gemaakt kan worden.




Onderstaande dia's van een presentatie van Leo van der Knaap (leo.vanderknaap@tno.nl) en de daarbij behorende toelichtingen geven inzicht in de belangrijkste constructieve aspecten die bij scherminstallaties een rol spelen.

Typen scherminstallaties

- **Belangrijkste schermmechanieken**
 - trekdraden systeem
 - trek-duwsysteem

↓ Te combineren met:

- **Belangrijkste open-/sluitsystemen**
 - slijpblokken
 - veren
 - slijpblokken met veer
 - vast (ongecontroleerd)



Het type schermmechaniek dat het meest wordt toegepast is het zogenaamde trekdraden systeem. Dit levert immers minder onderscheppende delen (alleen dunne draden) dan wanneer er trek en drukstangen moeten worden gemonteerd.

In het trekdraden systeem worden de schermprofielen die het schermdoek “meenemen” gemonteerd aan een kabel onder het schermdoek. Deze kabel wordt bij de uiteinden van de schermafdeling via een “omkeerwiel” teruggeleid naar de mechaniek-as die de kabels op- en afrolt bij openen en sluiten van het schermdoek. De mechaniekkabel wordt met een voorspanning gemonteerd. Zo ontstaan relatief grote (maar constante) krachten op de gevelprofielen van de kasconstructie.

Bij een zogenaamd trek-duwmechaniek worden de schermprofielen gemonteerd aan een as, die via een tandheugel door de mechaniek-as wordt aangedreven. De grootste krachten op de kasconstructie vind je bij dit type mechaniek bij bevestigingspunten van de tandheugels. De belastingen zijn hierbij sterk wisselend.

Bij het sluiten van het schermdoek wordt gestreefd naar een zo klein mogelijk pakket. Om dit met een gecontroleerde voorspanning te kunnen doen zijn er verschillende technieken ontwikkeld. Zo kan men genoemde schermmechanieken combineren met slijpblokken, buigveren of een combinatie van beiden. Vooral het aantal typen slijpblokken dat we nu kennen is groot. Er zijn ook scherminstallaties zonder slijpblokken of buigveren toegepast. Voor (in de richting evenwijdig aan de schermbeweging) relatief kleine schermafdelingen kan dat wellicht een redelijke oplossing zijn. In het

algemeen zullen in verband met thermisch vervorming van de kasconstructie de gecontroleerde open- en sluittechnieken met slipblokken en/of buigveren nodig zijn.

Wanneer tijdens het ontwerp van de kasconstructie de werkelijke krachten van de scherminstallatie niet bekend zijn mag worden uitgegaan van de hieronder genoemde richtwaarden. Deze belastingen zijn bepaald uit resultaten van een door TNO uitgevoerd onderzoek naar belastingen van scherminstallaties (2006).

Krachten uit schermdraden, praktijkmeting

- **Krachten uit schermdraden op gevels:**
 - Per mechaniekdraad systeem "slipblokken": 2020 N - 3780 N
 - Per mechaniekdraad systeem "vast": 1970 N - 3100 N
(bij systeem "vast" was de afstand tussen mechaniekdraden beduidend kleiner)
 - Per kunststof geleidedraden: 100 N - 150 N
- **Krachten uit slipblokken (alle typen)**
 - Variatie scherm dicht: 15 N - 70 N
 - Variatie scherm open: 18 N - 86 N
 - Verhouding dicht/dicht: 0,62 - 1,85
- **Krachten uit schoordraden mechaniek-as:**
 - Neutrale stand: 410 N - 1600 N
(middenscheiding: krachten iets hoger, verschil gelijk)
 - Open: 40 N - 1760 N
 - Dicht: 150 N - 1920 N



Meting van de voorspanning met een 3-punts buigproef

In opdracht van AVAG is door TNO ca. 2 jaar geleden onderzoek gedaan naar krachten uit scherminstallaties op de kasconstructie (TNO-rapport 2007-D-0495). Het doel van het onderzoek was om meer inzicht te krijgen in deze krachten, zodat vervolgens deze krachten en de statische berekening van de kasconstructie beter op elkaar konden worden afgestemd. Het onderzoek begon met metingen in de praktijk. Op de foto is een voorbeeld te zien van een apparaat waarmee de trekkracht in draden en kabels kan worden gemeten.

De metingen van de krachten uit mechaniekdraden op de gevels lieten zien, dat er relatief grote verschillen bestaan ten aanzien van de voorspanning in deze draden. Dat bleek het geval bij schermmechanieken zonder slipblokken en evenzeer bij schermmechanieken met slipblokken. Een te hoge voorspanning levert onnodig grote krachten op de gevels. Een te lage voorspanning van de mechaniekdraden veroorzaakt grotere maattoleranties bij openen en sluiten. De spreiding in de voorspanning van de kunststof geleidedraden bleek heel beperkt te zijn. De gemeten trekkrachten bij kassen die al enige tijd in gebruik waren bleken tussen 100 N en 150 N te liggen. Door kruip in het materiaal was kennelijk relaxatie in de kunststof draden opgetreden in geval van een te hoge voorspanning.

De typen slipblokken onderscheiden zich onder andere door een verschil in de hoogte van de slipweerstand. De slipweerstand moet overeenkomen met de aandrukkracht die nodig is om een type schermdoek "op pakket" voldoende klein op te vouwen. De onderlinge afstand tussen de mechaniekdraden, de slipweerstand en de buigstijfheid van het meeneemprofiel zijn de tools waarmee de dikte van het scherpakket kan worden gestuurd. Tijdens de metingen in de praktijk zijn geen uitzonderlijk hoge waarden voor de slipweerstand gevonden. Wel heel lage waarden, zelfs een gemiddelde van 15 N per slipblok. Opmerkelijk was, dat één type slipblok bij openen een hogere of lagere slipweerstand kan hebben dan bij sluiten. Dit heeft mogelijk te maken met excentrische belasting op het meeneemprofiel, waardoor deze de neiging krijgt te gaan kantelen. Hierbij ontstaat een hogere wrijvingskracht ten gevolge van een extra kracht loodrecht op de richting van de mechaniekdraad.

Bij de mechaniekas wordt de kracht uitgeoefend om de onderdelen van het scherm in beweging te zetten. De mechaniekas wordt in de meeste gevallen aan de tralieligger van een Venlo-kas gemonteerd. Die is in principe niet geschikt om horizontale belastingen op te nemen. Daarom worden deze krachten met schoren naar kolommen afgevoerd. Om de vervormingen in de richting loodrecht op de tralieligger zo veel mogelijk te beperken, worden de schoren voorgespannen. De metingen in de praktijk leverde grote verschillen in de voorspankrachten van de toegepaste schoordraden en schoorkabels. Een aantal schoren waren niet of nauwelijks (dus te weinig) voorgespannen en andere veel strakker dan nodig. De kolommen waar de schoordraden aan werden gekoppeld, werden vaak onverantwoord zwaar belast, zodat voor deze wijze van schoren een alternatief moest worden gevonden.


Krachten uit schermdraden, berekening

(STOREKA, WSL, ISSO 88)

- Richtwaarden voorspanning:
 - Mechaniekdraad: 3250 N
 - Schoordraden: 1000 N
 - Kunststof geleidedraden: 150 N
 - Stalen geleidedraden: 1000 N

- Krachten uit veer/slipblok
 - $\text{Kracht} \times \text{aantal vakken} < 1,25 \times \text{voorspanning mechaniekdraad}$
(aanbeveling: lengte schermafdeling max. 25 vakken in gootrichting)

- Belasting op tralieligger
 - Drukkracht in tralieligger: 1000 N per schoorverband
 - Horizontale belasting uit scherm: $< 25 \text{ N/m}$ per randprofiel
(> 25 N/m: schoren of aanvullende berekening)



Methode BRL 2007

Aantal scherminstallaties: 4

1e scherm bovenrand

2e scherm bovenrand

3e scherm tussenrand

Positie scherm tegen: **onderrand**

Mechaniekdraadkrachten berekenen:

-voorspanning: 1000 N

-slipoppeling: 50 N

-aantal vakken: 25

	aantal	kracht
Mechaniekdraad na omkeerveel	1,5 x	3250 N
Kunststof geleidedraad	12 x	150 N
Stalen geleidedraad	2 x	1000 N

CASTA Kassenbouw

Om de krachten uit mechaniekdraden in de berekening van de kasconstructie op te kunnen nemen zijn afspraken gemaakt over een gecontroleerde voorspanning bij montage. De krachten uit mechaniekdraden, slipblokken, geleidedraden, e.d. moeten aan de constructeur van de kasconstructie worden opgegeven. Wanneer tijdens het ontwerp van de kasconstructie de werkelijke krachten van de scherminstallatie niet bekend zijn mag worden uitgegaan van de hier genoemde richtwaarden, die voldoende zijn voor elke "standaard" scherminstallatie.

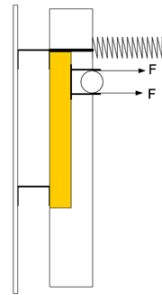
Door een gecontroleerde voorspanning in de schoordraden kan bij de berekening van de kasconstructie (met CASTA/kassenbouw) een voldoende nauwkeurige inschatting worden gemaakt van de extra drukkracht in de boven- en onderrand van de tralieligger. Voor deze randprofielen is afgesproken, dat zonder aanvullende berekening of aanvullende voorziening de belasting loodrecht op het vlak van de tralieligger niet hoger mag zijn dan 25 N/m.

De belasting uit schoren op kolommen was dermate ongunstig, dat is afgesproken dat dit niet meer zo mag voorkomen. De oplossing hiervoor is het aanbrengen van drukprofielen tussen de (alle) kolommen waar de schoren aangrijpen. Zo ontstaat een soort intern frame dat de voorspankrachten neutraliseert en de krachten bij openen en sluiten over een groter aantal (minimaal 3) kolommen verdeelt.

Deze afspraken voor gecontroleerde montage van scherminstallaties en nauwkeurige berekening van de kasconstructie worden gesteund door AVAG, STOREKA, WSL en zijn opgenomen in ISSO 88.

Krachten uit schermdraden, berekening

- **Omkeerprofiel aan gevel:**
 - brug tussen gordingen tegen kantelen
 - hogere belasting op bovenste gording, integratie functies (*wind, scherm, gewas*)
- **Scheiding van afdelingen:**
 - groter aantal mechaniekdraden
 - geleidedraden scherm tussengevel
 - steundraden ahangstrook
(*extra draden: 30% – 50% hogere drukkracht in goten*)



De mechaniekdraden oefenen een relatief grote kracht op de kasconstructie uit op de punten waar de omkeerwielen van de mechaniekdraden worden bevestigd. Bij gevels kan een omkeerwiel niet altijd aan de kopgevelkolom worden gemonteerd. Dan is een aanvullende voorziening nodig om te voorkomen, dat de gevelgordingen met een torsiebelasting worden belast. De torsiebelasting is ongunstig voor de stabiliteit van de gevelgordingen en voor de sterkte van de verbinding tussen de gevelgording en de gevelroeden. Als oplossing kan bijvoorbeeld een profiel tussen 2 gordingen worden gemonteerd. Ook is de toepassing van een kokerprofiel tussen de gevelkolommen een goede oplossing. De constructeur van de kasconstructie kan er bij de keuze van het gevelgordingprofiel rekening mee houden, dat er naast windbelasting op de gevel ook krachten uit scherminstallaties, gewasdraadbogen, e.d. moeten worden opgenomen. Zo'n geïntegreerde aanpak heeft de voorkeur boven aanvullende voorzieningen door de verschillende constructeurs.

Bij scheiding van schermafdelingen zijn extra mechaniekdraden nodig en wordt een ahangstrook op draden gemonteerd. Als er ook een verticaal gevelscherm (verduistering) wordt toegepast, wordt het aantal extra draden aan de gevel nog groter. Het lokaal grotere aantal draden kan gemakkelijk leiden tot een 30% - 50% grotere drukkracht in de goten van de kas. Het is dus van belang, dat de constructeur van de kasconstructie hiermee rekening houdt, maar ook dat de scherminstallateur aangeeft waar de krachten zullen optreden. Ook kan er op gelet worden, dat in de praktijk vaak veel hogere trekkrachten in deze extra draden worden aangebracht dan voor het gebruik noodzakelijk is.

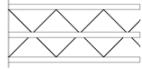
Tralieligger met tussenrand

- Problemen vaste tussenrand:

- Onderbreken diagonalen:
 - lage dwarskrachtcapaciteit
 - grote vervormingen

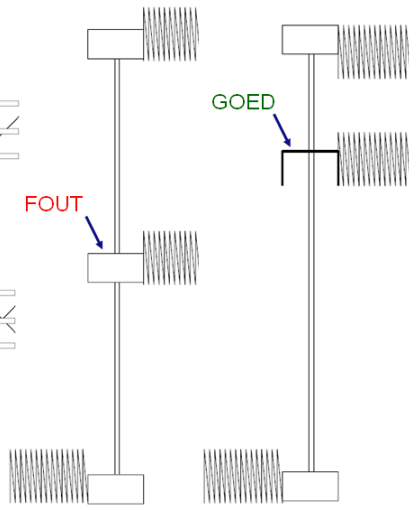


- 2 liggers boven elkaar:
 - hoge buigstijfheid tralieligger
 - schade bij verzinken (ΔT)



- Positie schermen:

- horizontale belasting
- lichtonderschepping
- luchtstroming



Bij toepassing van 3 schermen boven elkaar wordt in de praktijk veelal gekozen voor een tussenligger halverwege de boven- en onderrand van de tralieligger. Hierbij moet men er op letten, dat deze tussenligger geen invloed heeft op de sterkte- en stijfheidseigenschappen van de tralieligger. Het onderbreken van diagonalen heeft tot gevolg, dat de tralieligger veel meer zal doorbuigen dan men heeft berekend. Je kunt de tralieligger ook extra stevig maken door 2 vakwerkliggers boven elkaar aan te brengen. Dat heeft echter tot gevolg dat thermische vervorming – met name in de verzinkerij – wordt verhinderd door trek en druk in de diagonalen. Dit kan bezwijken van diagonaalknoppen tot gevolg hebben.

Uitvoering van schoorverbanden

- Voorspanning schoren: 1000 N
- Schoren van massief stalen draad of dikkere kabels



Design: Snelder

Verlenging schoor rond 3 mm:

- 20 vakken à 5 m
- 12 tralieligger
- slijpkracht: 50 N

$$\Delta L = L \cdot F / EA$$

$$\Delta L = 7810 \cdot 1/4 \cdot 20 \cdot 60 / (7 \cdot 210000) = 1,6 \text{ mm}$$

Horizontale verplaatsing midden tralieligger:

$$\delta H = \sqrt{(7811,3^2 - 6000^2)} - 5000 = 2,0 \text{ mm}$$

Vergelijk: buiging rand tralieligger (60x30x2 mm) door horizontale belasting uit slijpblokken:

$$\delta H = 1/384 \cdot 0,025 \cdot 4000^2 / (210000 \cdot 52391) = 1,5 \text{ mm}$$

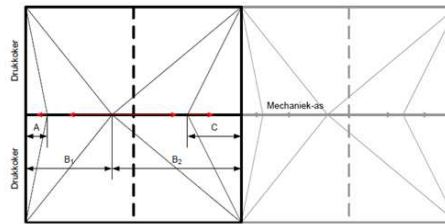
- Voorkom cumulatie van krachten in goot- of spantrichting
- Hoek schoorprofiel t.o.v. spantrichting ≥ 45 graden
- Spantoverspanning $> 2 \times$ vakmaat: afschoren naar 4 kolommenrijen
- Drukprofielen tussen kolommen bij schoorverbanden (*onafhankelijk van kasconstructie*)

Bij de montage van de schoren voor fixatie van de tralieliggers waaraan het mechaniek wordt gemonteerd, kan – in verband met de grotere veerstijfheid – het best worden uitgevoerd met staaldraad. Een wat dikkere kabel kan overigens ook een goede oplossing zijn. Als richtlijn voor de toelaatbare horizontale buiging van de tralieliggers mag worden uitgegaan van de theoretische vervorming die optreedt bij een horizontale belasting van 25 N/m (= de bovengrens voor de horizontale belasting uit slijpblokken).

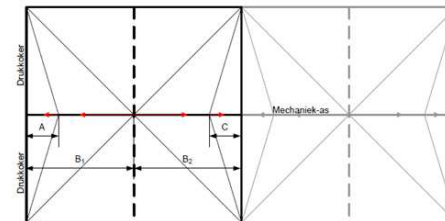
Om de krachten op de kasconstructie zo veel mogelijk te beperken moeten de schoren in het algemeen met een hoek ≥ 45 graden ten opzichte van het vlak van de tralieligger worden gemonteerd. Bij tralieliggers met relatief grote overspanning moeten de schoren over meerdere vakmaten naar de kolommen worden aangebracht.

Uitvoering van schoorverbanden

- Op te nemen kracht per mechaniek-draad:
 $2 \cdot (n_{\text{vak}} \cdot F_{\text{slipblok}})$
- Som van de krachten in spanrichting in evenwicht:
 $\sum H = 0 \text{ N}$
(voorkom verschrinking van de kas in spanrichting)
- Drukkokers tussen kolommen in vakken met schoorverband



FOUT: $A \cdot F + B1 \cdot F \neq B2 \cdot F + C \cdot F$



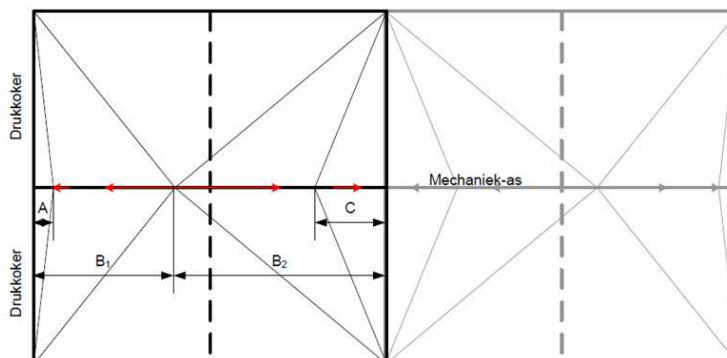
GOED: $A \cdot F + B1 \cdot F = B2 \cdot F + C \cdot F$

In bovenstaande figuren zijn 2 verschillende schoorverbanden getekend. In de bovenste figuur is er sprake van een ongelijke verdeling van de horizontale belasting in spanrichting. Per spantenrij moet de som van de horizontale krachten in spanrichting bij benadering gelijk zijn aan 0 N. Als dat niet het geval is, dan is een verschrinking van de kasconstructie in spanrichting het gevolg. In de onderste figuur is een symmetrisch verband gegeven. Dat is een goede oplossing, waarbij men wel moet opletten, dat de voorspanning in alle schoren gelijk is.

Men kan ook met asymmetrische verbanden voorkomen dat er verschrinking van de kasconstructie ontstaat. Je kunt een asymmetrisch verband gespiegeld toepassen, zodat meerdere overspanningen tezamen een symmetrische oplossing leveren.

Uitvoering van schoorverbanden

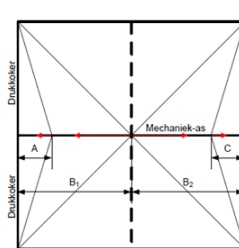
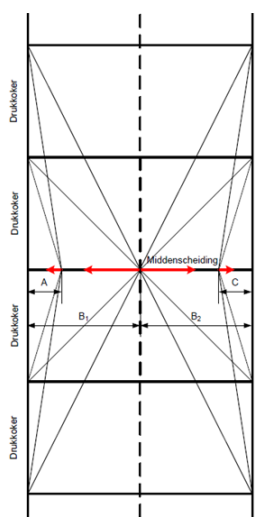
- Symmetrie schoorverbanden door spiegeling
- Som van de krachten in spanrichting in evenwicht: $\sum H = 0 \text{ N}$



Met behulp van volgende formule kan eenvoudig worden gecontroleerd of er sprake is van een ongelijke verdeling van de horizontale belasting in spanrichting: $A + B_1 = B_2 + C$. In de formule wordt uitgegaan van een gelijke voorspanning in de schoren. Bij schoren aan meerdere spanrijen wordt de controle per spanterij apart uitgevoerd.

Uitvoering van schoorverbanden

- Op te nemen kracht bij mechaniek-as:
 $2 \cdot (n_{\text{vak}} \cdot F_{\text{slipblok}})$
- Op te nemen kracht bij middenscheiding:
 $2 \cdot (n1_{\text{vak}} \cdot F1_{\text{slipblok}}) + 2 \cdot (n2_{\text{vak}} \cdot F2_{\text{slipblok}})$

Bij een schoorverband voor een middenscheiding moet je er rekening mee houden, dat de krachten die met de schoren moeten worden afgevoerd globaal 2 keer zo groot zijn als de krachten die optreden bij een schoorverband voor de mechaniek-as.

Belastingen - sneeuw

- NEN6702 basis sneeuwbelasting 700 N/m²
- NEN3859 tuinbouwkassen minimaal 242,5 N/m²
- Afsmelten afhankelijk van kasdek, schermgebruik en temperatuur onder kasdek



Omhullingmateriaal kasdek	Thermische coëfficiënt C _t NEN3859		
	Schermd gesloten of kas onverwamd	Verwamd 12 °C + scherm op pakket	Verwamd 17 °C + scherm op pakket
Enkelglas	1,0	0,5	0,5
Enkellaags kunststoffolie		0,5	0,5
Enkellaags kunststofplaat		0,5	0,5
Kunststof kanaalplaat		1,0	
Afgekit dubbelglas			0,6
Dubbele gasgevulde kunststoffolie			0,8

Ook bij de bepaling van de sneeuwbelasting volgens NEN 3859 is er een relatie met het gebruik van scherminstallaties. De temperatuur onder het kasdek bepaalt of de sneeuw snel kan smelten. Zo niet, dan vergroot dit de kans op sneeuwaccumulatie (de sneeuw is dan nog niet gesmolten bij een volgende sneeuw- of regenbui). Het is wel mogelijk om een kas te construeren waarbij het scherm bij sneeuw gesloten kan blijven, maar dan moet globaal met een 2 keer zo hoge sneeuwbelasting rekening worden gehouden. Daarom is het in de regel voordeliger om bij sneeuwval desnoods minder te schermen om de sneeuw snel te laten afsmelten.

Daar komt bij dat een kasdek waar sneeuw op ligt nauwelijks licht doorlaat, waardoor het overdag bij niet afgestookte sneeuw vrijwel donker zou blijven.

Dit openen van het scherm moet zodanig plaatsvinden dat het kasdek langzaam opwarmt. Snel openen van het scherm kan bij een bevroren kasdek tot ruitbreuk leiden.

Belastingen - wind

- **Lagere windsnelheid geopende luchtramen:**
 - geheel open: $40\% \times p_w$
 - half open: $65\% \times p_w$

$(p_{w100\%} = 34,2 \text{ m/s}, p_{w65\%} = 22,2 \text{ m/s}, p_{w40\%} = 13,7 \text{ m/s})$




- **Buitenscherm:**
 - scherm dicht: hoge verticale belasting
 - scherm open: hoge horizontale belasting
 - luchtdoorlatend doek: lagere windbelasting
 - hoge windbelasting meten(!): scherm open
 - kies slijpblokken met hoge weerstand



Sluiten van het schermdoek met als doel beperking van lichthinder kan een reden zijn om de luchtramen verder en langduriger te openen om zo maximaal warmte van de lampen voor belichting af te voeren. Bij een dergelijk gebruik moet men erop letten, dat de kassenbouwnorm NEN 3859 niet eist dat luchtramen in heel en half geopende stand bestand zijn tegen hoge windbelasting. Volgens NEN 3859 moet een volledig geopend luchtraam veilig kunnen worden toegepast tot 5 Bft. Helaas is de windmeter op een tuinbouwbedrijf in combinatie met de klimaatinstallatie meestal niet geschikt voor een betrouwbare controle van de windsnelheid.

De toepassing van een scherm boven het kasdek levert bij een gesloten scherm vooral lokaal een grote belasting op de constructie in de richting loodrecht op het vlak van het schermdoek. Bij geopend scherm moeten vooral grote horizontale krachten door de hoofdconstructie van de kas worden opgenomen. Het grote aantal uitstekende delen kan ervoor zorgen dat de horizontale belasting op de kas tientallen procenten hoger is dan zonder buitenscherm. Bestaande kassen zijn daarom meestal niet sterk genoeg om – zonder aanvullende constructieve voorzieningen – een buitenscherm veilig toe te kunnen passen.

Brandwerendheid



- Eisen volgens Bouwbesluit 2003
 - Artikel 6.7.1: Ontruimingsalarminstallatie en ontruimingsplan
 - **Gelijkwaardigheid:** brandmeldinstallatie voor gebouw met lage bezettingsgraad maar met een kostbare inventaris zoals soms bij een lichte industriefunctie het geval kan zijn. Een ontruimingsalarminstallatie is bij een dergelijke vrijwillige geplaatste brandmeldinstallatie niet verplicht.
 - Artikel 6.7.2: Vluchtrouteaanduidingen
 - “een uitzondering voor de lichte industriefunctie aangezien in die functie normaliter weinig personen aanwezig zijn”.
 - Afd. 2.13. Beperking van uitbreiding van brand
 - **Nieuwbouw:** vuurbelasting > 150 MJ/m²: brandcompartiment
 - **Bestaande bouw:** vuurbelasting > 200 MJ/m²: brandcompartiment

In het Bouwbesluit worden voor lichte industriefuncties, waaronder tuinbouwkassen, uitzonderingen gemaakt voor eisen bij brand. Dit in verband met de aanwezigheid van weinig personen, die bovendien bekend zijn op de locatie. In het algemeen hoeft men bij lichte industriefuncties geen rekening te houden met eisen voor vluchtwegen, brandcompartimenten, rookafvoer, ed. Een uitzondering wordt gemaakt voor lichte industriefuncties met een relatief hoge vuurbelasting. Bij een vuurbelasting > 150 MJ/m² (voor bestaande bouw > 200 MJ/m²) moet men zorgen voor brandcompartimenten en de daarbij behorende eisen in acht nemen.

Voor lichte industriefuncties met een kostbare inventaris geeft het Bouwbesluit een (vrijblijvende) aanbeveling om op basis van gelijkwaardigheid een aantal eisen voor (gewone) industriefuncties aan te houden.

Maattoleranties

- Kunnen maatafwijkingen in de kasconstructie (bijv. kromming tralieligger) door de scherminstallatie worden opgevangen?
- Ongelijke vakken (bijv. buiging kopgevelkolom) geen probleem bij toepassing slijpblokken.
- Alle scherminstallaties hebben last van temperatuurwisselingen. Oplossing voor openen/sluiten: napulsen, kleinere afdelingen.
- Rek in mechaniekdraden: kierstand onnauwkeurig.

Verkorting mechaniekdraad door wegnemen voorspanning:

- 20 vakken van 5 m, mechaniekas in het midden
- weerstand slijpblokken 60 N

RVS kabel 3 mm: $\Delta Kier = 10 \cdot 5000 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot 10 \cdot 60 / (5,6 \cdot 120000) = 11 \text{ mm}$

Staaldraad 3 mm: $\Delta Kier = 10 \cdot 5000 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot 10 \cdot 60 / (7,0 \cdot 210000) = 5 \text{ mm}$

Er zijn voor tuinbouwkassen geen specifieke normen die aangeven, welke maattoleranties toelaatbaar zijn uit oogpunt van toepassing van bijvoorbeeld scherminstallaties. Dat betekent, dat de constructeur van de kasconstructie en de scherminstallateur op dit punt samen de oplossing moeten vaststellen. Nu is het met veren en vooral met slijpblokken mogelijk om maatafwijkingen in de constructie te neutraliseren. Met de techniek van napulsen kunnen maatafwijkingen door temperatuurwisselingen regelmatig worden weggewerkt. Een maatafwijking die met een trekdradenmechaniek zelfs met slijpblokken niet kan worden voorkomen is een afwijking in de kierstand. Deze afwijking is een gevolg van rek in de mechaniekdraden. Wanneer een nauwkeurige kierstand belangrijk is, kan men beter kiezen voor een trekdradenmechaniek met massief draad. Nog beter is in dit verband een trek-duwmechaniek.

8 Conclusies

Dit rapport, en de daarbij behorende simulatietools (die kunnen worden aangevraagd middels een e-mail naar Feije.deZwart@wur.nl) laat zien dat het energiebesparingseffect van hoogisolerende schermssystemen vooral wordt bepaald door het aantal schermen en in mindere mate door de precieze eigenschappen van die schermen. Een gealuminiseerd scherm levert bijvoorbeeld 30% meer energiebesparing dan een transparant scherm en het luchtdicht maken van een scherm geeft een vergelijkbare verbetering.

Het gebruik van meer dan één energiescherm maakt het mogelijk om differentiatie in de soorten schermen die gebruikt worden aan te brengen.

Uitgaande van één transparant energiescherm als basis levert de toevoeging van een tweede transparant scherm een energiebesparing van 2.5 m³ aardgas equivalenten per m² per jaar, terwijl het gebruik van een gealuminiseerd scherm als tweede scherm een energiebesparing van 3.8 m³ aardgas equivalenten per m² per jaar oplevert. Zou er nog een derde scherm worden toegevoegd dan zou zo'n scherm 1 m³ aardgas equivalenten aan energiebesparing opleveren als het een transparant scherm betreft en 1.5 m³ aardgas per m² per jaar als een gealuminiseerd scherm wordt gebruikt.

De bovenstaande getallen geven aan dat het besparingseffect van een volgend scherm grofweg de helft is van het effect van het daaraan voorafgaande scherm.

Overigens wordt er bij de berekening van deze besparingen uitgegaan van een groot aantal schermuren voor het tweede scherm (1800 uur, zoals gerealiseerd in de energie onder de knie experimenten en in de Sunergie kas). Dit aantal schermuren is hoog doordat in deze kassen gebruik wordt gemaakt van buitenlucht aanzuiging voor de ontvochtiging van de kas. Het aantal schermuren wordt dan niet meer beperkt door vochtproblematiek, maar uitsluitend door het feit dat het vanuit gewasontwikkelingsoogpunt vaak gewenst is om de temperatuur in de avond snel weg te kunnen laten zakken.

Een bijkomend voordeel van zo'n ontvochtigingssysteem is dat de vochtdoorlatendheid van het scherm geen ontwerp-issue meer is waardoor er wellicht minder compromissen in de eisen aan het doek gemaakt zouden hoeven worden. De doeken zouden dan misschien gemakkelijker luchtdicht gemaakt kunnen worden.

Het beter luchtdicht maken van energieschermen heeft een effect in dezelfde orde van grootte als de verbetering van de stralingseigenschappen en kan de energiebesparing door een scherm dus ongeveer 25% doen verbeteren.

Voor de dagperiode is het van belang dat het scherm hoog-transparant is. Een scherm dat veel licht doorlaat kan overdag op meer uren gebruikt worden omdat de productiederving onder zo'n scherm minder groot is. In dit rapport is voorgerekend dat het verhogen van de lichttransmissie van 80% naar 90% tot 650 schermuren extra overdag zou leiden en dat hiermee 1.9 m³ aardgas per m² per jaar kan worden bespaard (uitgaande van een stooklijn van 19 °C).

De dia's van een presentatie van Leo van der Knaap (leo.vanderknaap@tno.nl) en de daarbij behorende toelichtingen in hoofdstuk 7 geven inzicht in de belangrijkste constructieve aspecten die bij scherminstallaties een rol spelen.