



Van meten van schermen tot zijn performantiecoëfficiënten

Rapport ENERGLIK WP3.2, bijdrage UGent

April 2025

Filip Bronchart, UGent



Disclaimer:

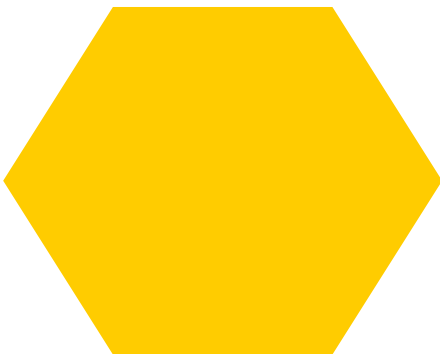
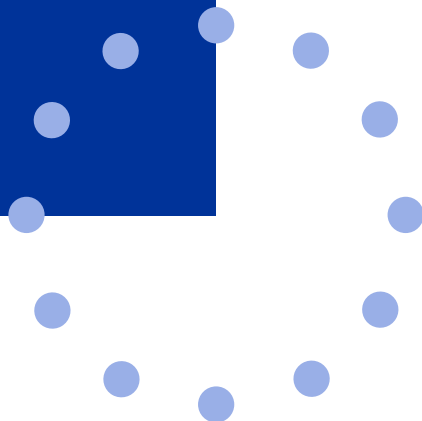
Hoog
mikken voor
de lage landen!

grensregio.eu

Inhoud

1. Inleiding.....	3
2. Schermmetingen @ugent	5
2.1 Opstelling	6
2.1.1 Meetopstelling hemisferische lichttransmissie	6
2.1.2 Vacuummeetbox voor het bepalen van de warmtestralingseigenschappen.....	7
2.2 Resultaten.....	8
2.3 Conclusies	9
3. De warmte- en massatransport performantiecoëfficiënten van schermen.....	11
3.1 Inleiding.....	12
3.2 Gebruikte afkortingen.....	12
3.3 Definitie van warmte en massatransportparameters van schermen.....	12
3.3.1 Damptransportweerstand ($r_{m_{scr+2bl}}$).....	12
3.3.2 De warmtetransportweerstand van een enkele scherm laag (R_{scr1la}).....	13
3.3.3 Thermische transportweerstand (rh_{scr1la}).....	15
3.3.4 De lichtverliesweerstand van een scherm (LLR)	16
3.4 Discussie over de voorgestelde performantiecoëfficiënten.....	17
3.5 R_{scr1la} , r_{scr1la} , LLR_{scr1la} en $r_{m_{scr+2bl}}$ van de gemeten schermen.....	17
3.6 Conclusies	18
4. Literatuur.....	21

1. Inleiding



Dit rapport maakt deel uit van het project INTERREG project ENERGLIK (Op weg naar een klimaatneutrale glastuinbouw) en heeft betrekking op de uitvoering van werkpakket 3.2. Doorontwikkeling energie-balancerende (EB) dag- en nachtschermsystemen.

De WUR schreef al een rapport over door hen uitgevoerde metingen op verschillende innovatieve schermen (WUR, 2025).

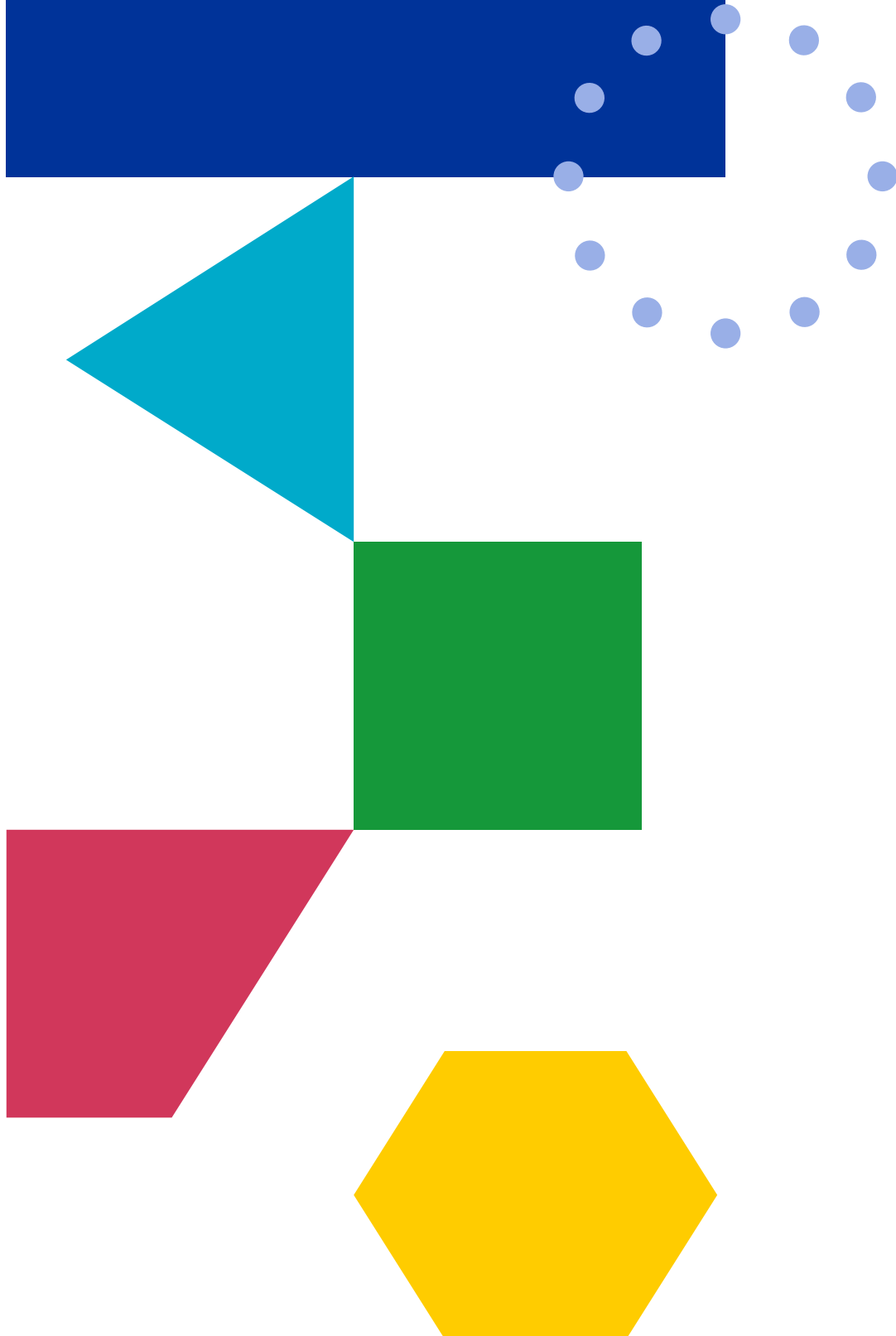
Dit rapport is complementair en voegt volgende elementen toe:

- Ook UGent voerde in ENERGLIK verschillende schermmetingen uit maar met verschillende apparatuur. We plaatsen de waarden naast elkaar en bediscussiëren de verschillen.
- Een theoretisch kader wordt gegeven voor het berekenen van prestatieparameters van schermen op basis van de gemeten waarden. Het betreft de waarden warmtetransportweerstand (R_{scr1la} , $m^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$), thermische weerstandswaarde (rh_{scr1la} , s/m), lichtverliesweerstandswaarde (LLR_{scr1la} , $m^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$) en damptransportweerstandswaarde ($rm_{scr+2bl}$, s/m). Daarna worden deze getallen berekend op de gemeten schermen.

Door dit rapport wordt dan ook een vollediger beeld gegeven over de inspanning van UGent binnen het project ENERGLIK om tot meer performante energieschermen te komen.



2. Schermmetingen @ugent



2.1 Opstelling

UGent heeft volgende schermmeetapparatuur ter beschikking

- Vacuummeetbox voor het meten van de warmtestralingseigenschappen.
- Een kamer met hemisferisch daglicht voor het meten van de hemisferische lichttransmissie

De meetapparatuur op UGent moet aanzien worden als experimentele meetapparatuur die ontworpen is vanuit de bedoeling kennis op te doen rond het bouwen van performante meetapparatuur of met de bedoeling om schermen te kunnen beoordelen bij de ontwikkeling hiervan. Zo werden beide meetapparatuur al gebruikt in het voorgaande INTERREG project GLITCH.

2.1.1 Meetopstelling hemisferische lichttransmissie

I.v.m. met de meetapparatuur voor het bepalen van de hemisferische lichttransmissie, bestaat huidig een norm (NEN 2675) die de hemisferische lichttransmissie precies narekent.

De meetapparatuur van UGent voldoet hier niet aan en betreft een eenvoudige opstelling (zie Fig. 1) bestaande uit

- Een lichtbron met een spectrum die vergelijkbaar is met het PAR licht (zie Fig. 2) binnen in box geverfd met BaSO₄ (97% diffuse lichtreflectie)
- Hierdoor ontstaat binnen in de box hemisferisch licht
- Een opening onderaan de box met een diameter van 10cm
- Een LICOR PAR sensor (LI-190R) geplaatst midden in deze opening. Deze sensor meet over 180°
- Het scherm wordt geplaatst boven de opening. De afstand tussen het scherm en de sensor is 5 mm. Hierdoor ziet de sensor niet over 180° maar over 169°.

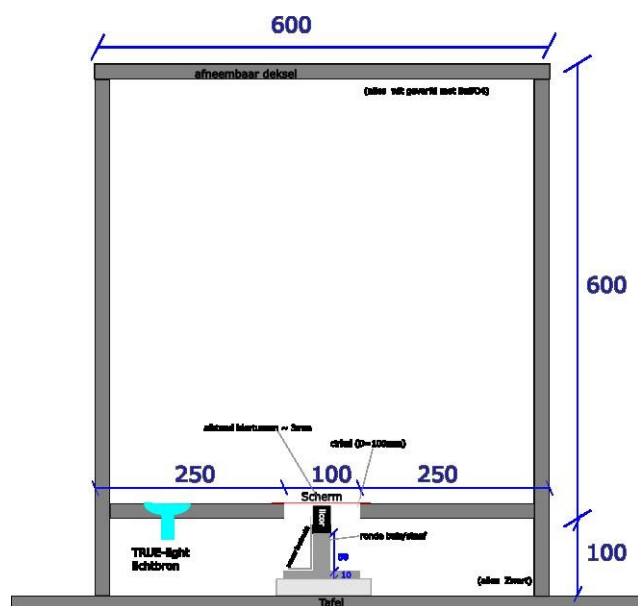


Fig. 1 Eenvoudige meetopstelling voor het meten van de hemisferische lichttransmissie.



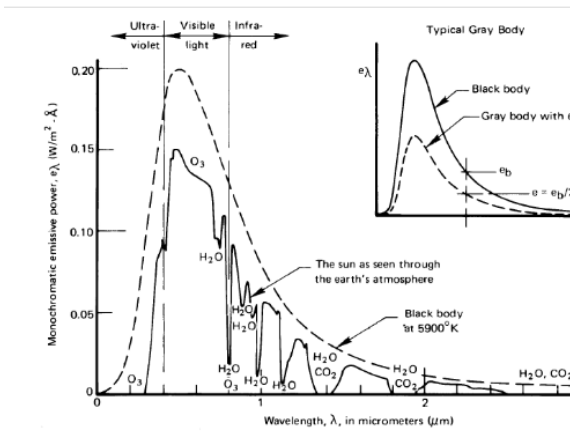
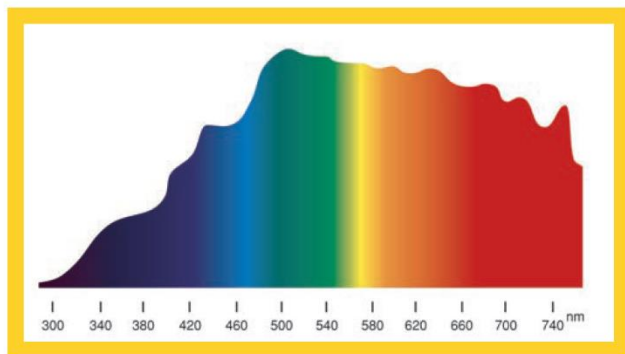


Fig. 2 Spectrum van een commerciële lamp van True-light (links) zoals gebruikt in de hemisferische lichttransmissie meetopstelling versus spectrum van zonlicht (rechts).

Het meten van de hemisferische lichttransmissie van een scherm bestaat uit 2 stappen

1. Meten van de lichtintensiteit zonder scherm.
2. Meten van de lichtintensiteit met scherm
3. Beide waarden gedeeld door elkaar geven dan de hemisferische lichttransmissie.

Deze meetmethode is niet genormeerd en is minder precies dan de WUR methode oa. voor volgende redenen

- Meting over 169° versus over 180°
- De PAR sensor zal lichtjes reflecteren. Deze gereflecteerde lichtstralen reflecteren voor een deel op het scherm en keren zo terug naar de PAR sensor.

Beide fouten zullen ervoor zorgen dat de gemeten waarde iets hoger zal zijn dan de werkelijke hemisferische waarden zoals gemeten volgens norm NEN2675.

Het voordeel van deze eenvoudige meetmethode is

- Een meting is snel (5min per meting) .
- Je kunt ook de lichttransmissie bepalen met condens. Condens op een scherm kun je bekomen door het scherm eerst bovenop een pot met warm water te plaatsen.
- De meetinstallatie is eenvoudig.

2.1.2 Vacuummeetbox voor het bepalen van de warmtestralingseigenschappen.

De vacuummeetbox werd ontworpen in het INTERREG project GLITCH en is beschreven in (Bronchart & Corbala, 2021).

Een belangrijk voordeel van deze meetmethode is dat ze onafhankelijk is van thermopile-sensoren, waarvan bekend is dat ze een golflengteafhankelijkheid vertonen. Bij metingen aan schermen kan dit mogelijk leiden tot afwijkingen die tot nu toe weinig onderzocht zijn. De TNO-koffer die door WUR wordt gebruikt (Baart de la Faille et al., 2009), werkt op basis van thermopile-technologie. Bovendien meet de vacuummeetbox over 180° en de TNO koffer over 90° wat in bijkomende afwijkingen kan resulteren.

Het belangrijkste nadeel van de vacuummeetbox is dat bij een transmissief scherm een dubbele transmissie van het scherm wordt gemeten. De herrekening van een dubbele transmissie naar een enkele transmissie is mogelijk maar leidt tot bijkomende fouten. Dit komt door de golflengteafhankelijkheid van de doorgelaten straling.



Men kan dan ook concluderen dat voor het meten van de warmtestralingseigenschappen van schermen er huidig geen enkel geschikte meetapparatuur bestaat en in deze fase van het project werden metingen uitgevoerd met beide apparaten om de resultaten naast elkaar te kunnen leggen en te zien welke verschillen worden gezien. UGent is verder in het project ook verantwoordelijk voor de ontwikkeling van aangepaste meetapparatuur die deze tekortkomingen wegwerkt.

2.2 Resultaten

In de tabel hieronder worden de uitgevoerde metingen door UGent weergegeven zowel wat betreft warmtestralingseigenschappen als hemisferische lichttransmissie.

De gebruikte ENERGLIK code stemt overeen met deze gebruik in het rapport van de WUR, (2025).

Tabel 1: Overzicht van uitgevoerde metingen aan schermen op UGent: warmtestralingseigenschappen gemeten in de vacuümbox en hemisferische lichttransmissie. Indien beschikbaar, zijn ook metingen van WUR opgenomen op hetzelfde scherm, waarbij de warmtestraling werd bepaald met de TNO-koffer en de lichttransmissie volgens NEN 2675

Energliek Code	omschrijving	Warmtestralingseigenschappen						Hemisferische lichttransmissie		
		UGent			WUR			UGent		WUR
DAGSCHERM		ρ	τ	ϵ	ρ	τ	ϵ	droog	nat	droog
23AA	PVDF+coating	-0.02	0.25	0.769	0.04	0.31	0.65	0.86		0.87
23BA	PVDF + coating	0.02	0.28	0.706				0.87	0.86	
23DO	folie op basis van PE + extra's	0.03	0.24	0.73	0.04	0.37	0.60	0.84	0.86	0.81
23FO	folie op basis van PE + extra's	0.00	0.30	0.70				0.81	0.81	
23GO	folie op basis van PE + extra's	-0.01	0.30	0.70				0.80	0.81	
23HO	folie op basis van PE + extra's	0.02	0.25	0.73				0.80	0.81	
	folie teeltproof PCH 2020	0.12	0.22	0.66				0.82		
	folie teeltproof PCH 2021	0.02	0.23	0.75				0.79		
23EO								0.81	0.84	0.78
NACHTSCHERM		UGent		WUR						
		ρ	ϵ	ρ	ϵ					
23AW	ALU-scherm	0.78	0.22	0.98	0.02					
23BW-up	ALU-scherm	0.84	0.16	0.94	0.06					
23BW-un	ALU-scherm	0.82	0.18	0.91	0.09					
23CW-up	ALU-scherm	0.83	0.17	0.93	0.07					
23CW-un	ALU-scherm	0.84	0.16	0.95	0.05					
23DW-up	ALU-scherm	0.85	0.15	0.94	0.06					
23DW-un	ALU-scherm	0.41	0.59	0.51	0.49					
23EW-up	ALU-scherm +microperforatie	0.79	0.21	0.95	0.05					
23EW-un	ALU-scherm +microperforatie	0.60	0.40	0.69	0.31					

De resultaten tonen aan

- Voor warmtestralings-transmissieve schermen blijkt uit de resultaten dat de vacuümbox systematisch lagere transmissiewaarden geeft dan de metingen met de TNO-koffer. Zoals besproken in het vorige hoofdstuk, zijn de transmissiewaarden uit de vacuümbox afgeleid op basis van meetresultaten van een dubbele transmissie, wat aanleiding kan geven tot meetfouten. Dit zou een mogelijke verklaring kunnen zijn voor het verschil.
- Voor de gemeten warmtestralingsreflectie zien we dat de vacuümbox eveneens systematisch lagere waarden registreert dan de TNO-koffer. Een waarschijnlijke verklaring hiervoor is dat de TNO-koffer meet onder een invalshoek van ongeveer 90°, terwijl de vacuümbox over een hemisferisch bereik (180°) meet. Vanuit de stralingsleer (Howell et al., 2021) is bekend dat bij reflecterende oppervlakken de reflectiviteit afneemt bij grotere invalshoeken. Dit effect kan het waargenomen verschil tussen de metingen van WUR en UGent verklaren.
- De hemisferische lichttransmissiemetingen van UGent en WUR komen goed met elkaar overeen maar is minder precies en heeft een lichte overschatting. Dit toont aan dat ook met een eenvoudige meetopstelling – zoals beschreven in het vorige hoofdstuk – een betrouwbare inschatting van de lichttransmissie mogelijk is. Bovendien laat deze opstelling toe om metingen uit te voeren in aanwezigheid van condens.



- De resultaten voor zowel de gecoate PVDF als de PE met coating en/of uitvloeier tonen aan dat deze schermen hun hoge lichttransmissie behouden bij condensvorming. In sommige gevallen wordt de transmissie zelfs licht verbeterd of licht verminderd, afhankelijk van type coating.

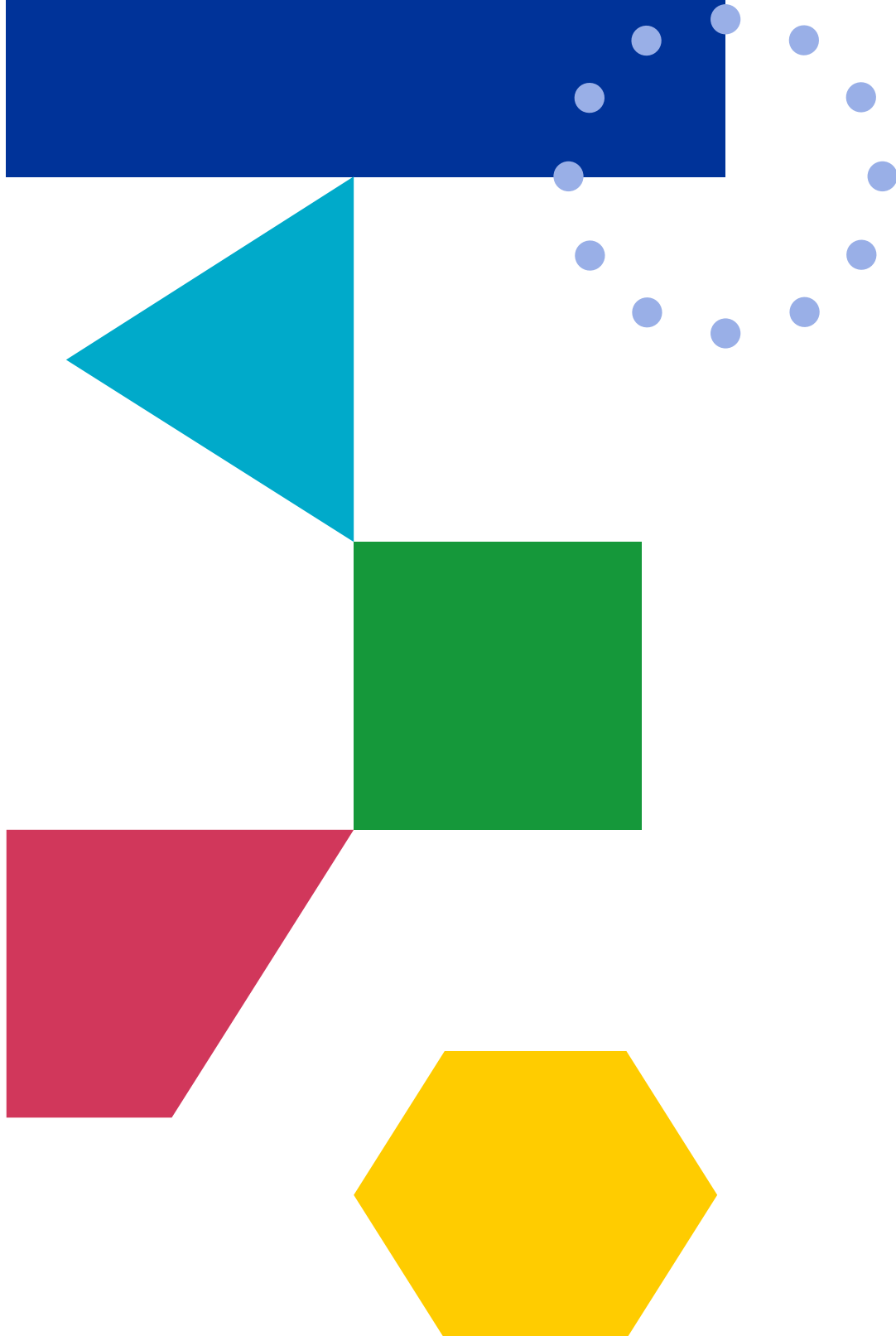
2.3 Conclusies

De meetapparatuur op UGent heeft zowel wat betreft warmtestralingseigenschappen als hemisferische lichttransmissie gelijkaardige resultaten.

Bij warmtestralingseigenschappen kunnen de verschillen oplopen tot 20%, wat de nood aangeeft voor meetapparatuur die wetenschappelijke correct ontworpen is en eenduidig de warmtestralingseigenschappen bepaald.



3. De warmte- en massatransport performantiecoëfficiënten van schermen



3.1 Inleiding

In het ENERGLIK project werden schermen nagemeten door de WUR (WUR, 2025) en door UGent (vorig hoofdstuk) wat betreft hun warmtestralingseigenschappen en damptransport.

Deze gemeten waarden geven niet direct info hoe een scherm zich dan in de kas zal gedragen.

Daarom is het nuttig deze waarden om te rekenen tot praktische waarden die het gedrag in de kas bepalen (performantiecoëfficiënten of performanties).

Welke performanties en hoe deze performanties worden berekend is voorgesteld in het volgende hoofdstuk. In het daaropvolgende hoofdstuk worden deze waarden berekend op basis van de gemeten waarden vanuit het rapport van de WUR (WUR, 2025) en worden de resultaten bediscussieerd.

3.2 Gebruikte afkortingen

	Variabelen		Subscripts
AV	Absoluut vochtgehalte (g/m ³)	blk	Bulk lucht= grote massa lucht buiten de laminaire grenslagen
DT	Damptransport (g/m ² /u)		
LLR	Lichtverliesweerstand = "light loss resistance" (W/m ² /°C)	HLT	Hemisferische lichttransmissie
n	Damptransport in wetenschappelijke eenheid (kg/m ² /s)	i	Binnen = "inside"
q	Warmtetransport per oppervlakte (J/m ²)	o	Buiten = "outside"
Q	Warmtetransport (J)	rad	Thermal radiation
rh	Thermische transportweerstand (s/m)	scr+2bl	Scherf met de 2 laminaire grenslagen
rm	Damptransportweerstand (s/m)	scr1la	Invloed van een enkele scherm laag tegenover warmte- en massatransport hemel
R	Warmtetransportweerstand (J/m ² /°C)	sky	Van de transhumid box
RH	Relatieve vochtigheid (%)	THB	Onder scherm="under"
T	Temperatuur (°C)	un	Onder scherm="under"
		up	Boven scherm

3.3 Definitie van warmte en massatransportparameters van schermen

3.3.1 Damptransportweerstand ($rm_{scr+2bl}$)

De damptransportweerstand heeft de weerstand weer voor het damptransport tussen de bulk lucht onder en boven het scherm. In vergelijkingsvorm:

$$n_{scr+2bl} = \frac{(AV_{un,blk} - AV_{up,blk})}{rm_{scr+2bl} \cdot 1000}$$

Met

- $n_{scr+2bl}$ het damptransport tussen de bulk lucht onder en boven het scherm (g/m²/s)
- $AV_{un,blk}$ is het absoluut vochtgehalte van de bulk lucht onder het scherm (g/m³).
- $AV_{up,blk}$ is het absoluut vochtgehalte van de bulk lucht boven het scherm (g/m³).



- $rm_{scr+2bl}$ de damptransportweerstand van een scherm onder kasomstandigheden (s/m).

Indien we i.p.v. damptransport latente warmtetransport willen weten, moet de term $n_{scr+2bl}$ vermenigvuldigd worden met de verdampingswarmte ($\sim 2.45\text{MJ/kg}$).

Hoe groter de weerstand hoe lager het damptransport. Deze damptransportweerstand varieert in kasomstandigheden beperkt en is daarom een goede referentie voor het damptransport in kasomstandigheden.

De damptransportweerstand van een scherm kan bepaald worden uit de metingen met de transhumid box (voor beschrijving transhumid box, zie (Hemming et al., 2021)). De transhumid box meet damptransport (DT, g/m²/h) onder bepaalde hoeveelheid damp onder en boven het scherm. Deze DT waarde wordt daarom omgevormd tot een damptransportweerstand van een scherm ($rm_{scr+2bl}$, s/m) door de vorige vergelijking om te vormen tot de volgende:

$$rm_{scr+2bl,THB} = \frac{(AV_{un} - AV_{up}) * 3600}{DT}$$

Met

- AV_{un} is het absoluut vochtgehalte onder het scherm (g/m³)
- AV_{up} is het absoluut vochtgehalte boven het scherm (g/m³)
- $rm_{scr+2bl,THB}$ de damptransportweerstand in de transhumid box

Gezien in de transhumid box tijdens de uitgevoerde metingen de lucht boven het scherm een temperatuur van 10°C en een RV van 60% heeft, en onder het scherm een temperatuur van 22° en RV van 90%, resulteert dit

$$AV_{un} = 17.503\text{gr/m}^3$$

$$AV_{up} = 5.644\text{gr/m}^3$$

Het is echter niet gekend in welke mate de damptransportweerstand zoals gemeten in de transhumid box ($rm_{scr+2bl,THB}$) zal overeenstemmen met deze zoals in de kas ($rm_{scr+2bl,kas}$). Een mogelijk verschil kan ontstaan doordat:

- In de transhumid box is een lichte vorm van geforceerde convectie aanwezig
- In de kas wordt het damptransport aangedreven door natuurlijke convectie.

Gezien de beperkte hoeveelheid geforceerde convectie, kunnen we stellen dat de bekomen damptransportweerstand uit de transhumid box iets kleiner of ongeveer gelijk zal zijn aan de damptransportweerstandswaarde in de kas.

$$rm_{scr+2bl,THB} \leq \approx rm_{scr+2bl,kas}$$

3.3.2 De warmtetransportweerstand van een enkele schermlaag (R_{scr1a})

De warmtetransportweerstand van een scherm bepaalt in welke mate een scherm voelbare warmte doorlaat. De warmte die een scherm doorlaat kan komen via (zie Fig. 3) de processen van convectie, warmtestraling en of eventueel luchtbeweging bij een scherm met grote openingen (deze laten we verder buiten beschouwing). Het is de warmtestralingsterm (Fig. 3) die bij uitstek de grootste term is.

Deze warmtetransportweerstand betreft enkel het transport van voelbare warmte. Latente warmte of damp en het hiermee gerelateerde energietransport wordt niet meegenomen in deze warmtetransportweerstand omwille van volgende redenen:

- De belangrijkste reden hiervoor is dat indien we damptransport mee zouden betrekken bij het berekenen van de warmtetransportweerstand van een scherm, dan zou de warmtetransportweerstand van een scherm lager worden. Dit zou dan aanleiding geven om te denken dat een dampdicht scherm (hogere R_{scr1a}) efficiënter is dan een dampopen scherm (lagere R_{scr1a}) terwijl zoals Bronchart (2024) aangeeft in zijn werk het net het tegengestelde is. Zo is damptransport doorheen een scherm zeer efficiënt en zal dus een dampopenscherm efficiënter ontvochtigen dan een dampdicht scherm en dus leiden tot een energiebesparing in de kas ondanks de iets lagere R_{scr1a} .
- Bijkomende reden om de latente warmte niet mee te nemen in de warmtetransportweerstand (R_{scr1a}) is het verschil in eenheden tussen beide processen. Zo is voor de ene de gradiënt warmte en voor de andere de gradiënt concentratie. Rekenkundig is het niet logisch deze twee termen in 1 coëfficiënt samen te brengen en kan dit aanleiding geven tot foutieve berekeningen.



Indien de lezer vragen heeft hoe latente warmtetransport doorheen een scherm dan wel moet worden berekend, verwijzen we naar vorig hoofdstuk.

Voor het bepalen van de warmtetransportweerstand van een scherm (R_{scr1la}) is het nodig de randvoorwaarden vast te leggen zodanig als we schermen vergelijken dit onder dezelfde randvoorwaarden gebeurt. Dit gaat hierbij ten eerste over de configuratie en ten tweede over de klimaatcondities.

3.3.2.1 De configuratie voor het bepalen van de warmtetransportweerstand van een enkel scherm

De configuratie – met andere woorden: welke lagen zich boven en onder het scherm bevinden – beïnvloedt de R-waarde van het scherm.

Zo zal een scherm in een kas met slechts één scherm laag een andere bijdrage leveren aan de totale warmteweerstand dan wanneer het scherm deel uitmaakt van een dubbele schermconfiguratie. Zo is bij een enkel scherm, de stralingstemperatuur en luchttemperatuur onder het scherm doorgaans vergelijkbaar (planten). In een dubbele schermopstelling is dat anders: voor het bovenste scherm is de luchttemperatuur onder het scherm meestal aanzienlijk lager dan zijn stralingstemperatuur.

Deze verschillen zorgen ervoor dat de warmtestralingseigenschappen van een scherm, afhankelijk van de configuratie, een grotere of kleinere invloed hebben op de warmtetransportweerstand van het scherm. Bovendien kunnen bij meerdere scherm lagen synergetische of antagonistische effecten ontstaan op de warmtetransportweerstand door interactie tussen warmtestraling van de verschillende lagen.

Toch is het zinvol om een referentiewaarde voor de warmtetransportweerstand van een scherm te definiëren. Enerzijds geeft deze waarde een goed beeld van de intrinsieke performantie van het scherm, los van de configuratie. Anderzijds worden schermen in de praktijk vaak in enkelvoudige lagen toegepast – precies de configuratie die hier als referentie wordt gehanteerd.

Fig. 4 heeft schematisch weer hoe die thermische weerstand van een scherm in een enkellaagse configuratie bepaald wordt:

Eerst wordt de warmtetransportweerstand bepaald, op basis van modellering, van het “scherm + kas” en de warmtetransportweerstand van “de kas zonder scherm”. Beiden worden dan van elkaar afgetrokken tot het bekomen van de warmtetransportweerstand van het scherm.

Als vergelijking:

$$R_{scr1la} = R_{scr1la+kas} - R_{kas}$$

Met

- R_{scr1la} is de warmtetransportweerstand van een enkele scherm laag in de kas
- $R_{scr1la+kas}$ is de warmtetransportweerstand van een kas met enkel scherm
- R_{kas} is de warmtetransportweerstand van de kas (zonder scherm)

$R_{scr1la+kas}$ wordt berekend op basis van volgende vergelijking bij een kas uitgerust met een enkel scherm laag.

$$R_{scr1la+kas} = \frac{T_i - T_o}{q_{scr1la+kas}}$$

Voor R_{kas} gebeurt dit gelijkaardig (zonder scherm).

Idealiter werd $q_{scr1la+kas}$ bepaald op basis van een fysieke meting. Dit zou natuurlijk een grote inspanning vragen en hier wordt gekozen om q te bepalen op basis van het UGent kas-scherm model.



3.3.2.2 De klimaatcondities voor het bepalen van de warmtetransportweerstand van een enkel scherm

Naast van de configuratie, is de R-waarde van een scherm in mindere mate afhankelijk van de gekozen klimaatcondities. Bij grotere temperatuursverschillen, zal de luchtbeweging door natuurlijke convectie iets sterker zijn en zal de warmtetransportweerstand iets kleiner zijn. Nu deze temperatuurverschillen beïnvloeden niet de warmtestralingsoverdracht, en gezien deze term de grootste is, is de invloed van de gekozen omstandigheden onder en boven het scherm beperkt.

Toch is het nuttig, indien we R_{scr1la} waarden willen vergelijken tussen schermen, de omstandigheden vast te leggen zodat iedereen keer op dezelfde manier wordt gerekend en er geen verschillen ontstaan die niet het gevolg zijn van de schermeigenschappen maar een gevolg zijn van de gekozen klimaatcondities.

De gekozen klimaatcondities voor het berekenen van de R-waarden in dit rapport zijn

- Buitenklimaatomstandigheden
 - $T_{a,o} = 5^{\circ}\text{C}$ (buitenluchttemperatuur)
 - $T_{sky} = 5^{\circ}\text{C}$ (hemeltemperatuur)
 - $v = 2\text{m/s}$ (luchtsnelheid buiten)
 - $RH_o = 90\%$ (relatieve vochtigheid buiten)
- Binnenklimaatomstandigheden
 - $T_{a,i} = 20^{\circ}\text{C}$ (binnenluchttemperatuur)
 - $T_{rad,i} = 20^{\circ}\text{C}$ (gemiddelde stralingstemperatuur vanuit de planten en/of grond en/of verwarming)
 - $RH_i = 85\%$ (relatieve vochtigheid binnen)

Er wordt voor gekozen dat zowel voor de buitenomstandigheden als de binnen omstandigheden de stralings- en luchttemperatuur idem zijn. Hierdoor is het berekenen van weerstandswaarden met voorgaande vergelijking eenvoudiger en moet er geen gemiddelde temperatuur gedefinieerd worden op basis van de lucht- en stralingstemperatuur.

3.3.3 Thermische transportweerstand (rh_{scr1la})

De bekomen warmtetransportweerstand voor het scherm (R_{scr1la}) heeft als eenheid $\text{m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$ en heeft een weerstandswaarde aan voor de transport van warmte (Q,J). Deze kan omgevormd worden tot een fundamentele thermische weerstandswaarde (r,s/m) met behulp van volgende vergelijking

$$rh_{scr1la} = R_{scr1la} \rho_a cp_a$$

Met

- rh_{scr1la} thermische transportweerstand van een enkel scherm laag (s/m)
- ρ_a de dichtheid van de lucht ($\sim 1.19\text{kg/m}^3$)
- cp_a de specifieke warmte van de lucht ($1006\text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$)

Deze bijkomende term wordt gedefinieerd om de volgende redenen:

De term *warmtetransportweerstand* (R_{scr1la}) is bijzonder geschikt om het warmtetransport door een scherm (uitgedrukt in J) te berekenen en om de isolatiewaarde van verschillende schermen met elkaar te vergelijken.

Wanneer we echter inzicht willen krijgen in de fysieke barrière die een scherm vormt voor damp ten opzichte van warmte, kun je dit rechtstreeks vergelijken op basis van rh_{scr1la} en $rm_{scr+2bl}$.

Ook voor het inschatten van de hoeveelheid energie — in de vorm van voelbare en latente warmte — die onder kasomstandigheden door een scherm getransporteerd wordt, biedt de verhouding tussen $rm_{scr+2bl,THB}$ en rh_{scr1la} een benadering. Let wel: deze benadering is enkel geldig bij typische kastemperaturen ($10\text{--}20^{\circ}\text{C}$). Bij hogere of lagere temperaturen verliest deze stelling haar geldigheid.



Energy in/outputs of greenhouse:

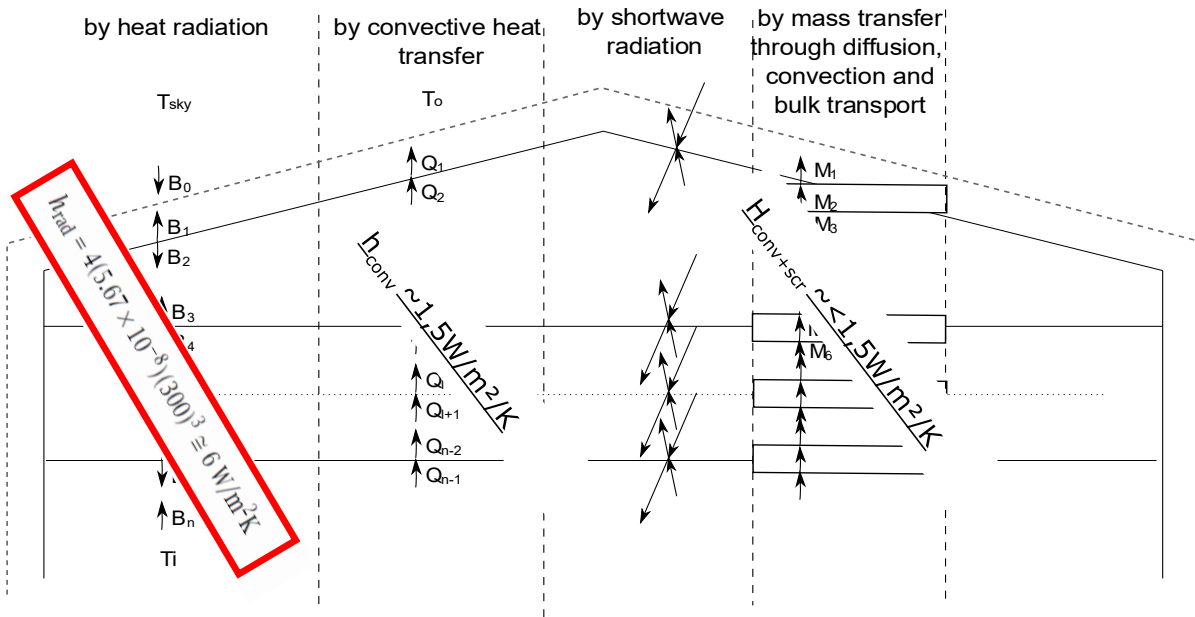


Fig. 3 geeft de verschillende processen weer van het energietransport doorheen een scherm. Merk op dat warmtestraling bij uitstek de grootste term is.

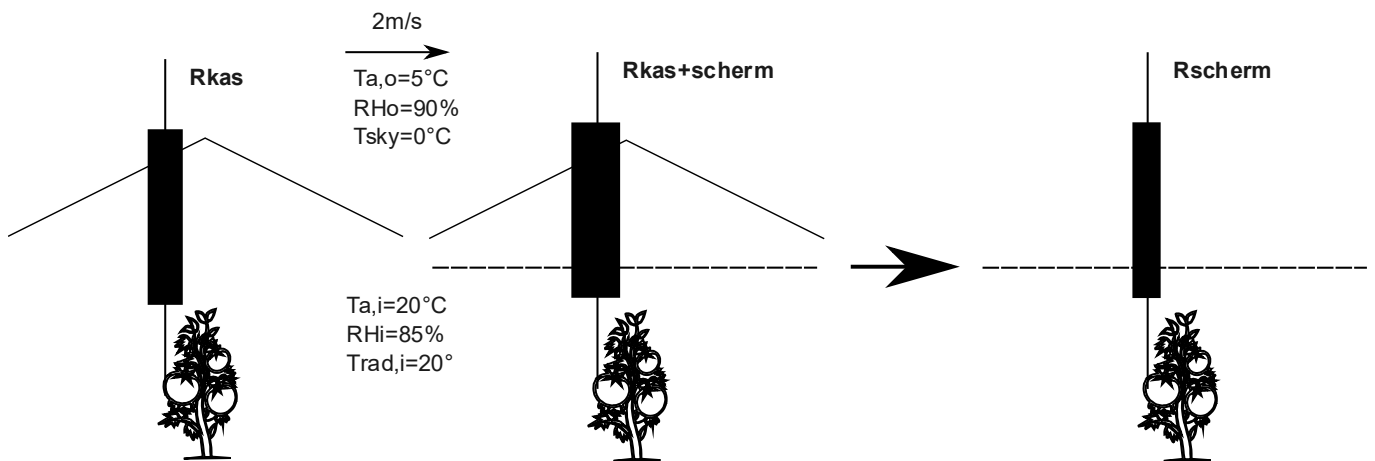


Fig. 4 Voorstelling van hoe de R-waarde van een scherm wordt berekend. Zie verder tekst.

3.3.4 De lichtverliesweerstand van een scherm (LLR)

Bij het vergelijken van dagschermen heb zijn zowel de thermische weerstandswaarde (R_{scr1la}) en de hemisferische lichttransmissie (HLT) belangrijke karakteristieken. Hierbij is de doelstelling het behalen van een zo hoog mogelijke R_{scr1la} en een zo laag mogelijk lichtverlies (dus zo hoog mogelijk HLT). De LLR (light loss resistance of lichtverliesweerstand) combineert beiden waardoor je dagschermen kunt vergelijken wat betreft hun bijdrage tot isolatie van de kas per eenheid hoeveelheid lichtverlies:



De vergelijking van LLR is

$$LLR_{scr1la} = R_{scr1la} / (1 - HLT)$$

LLR_{scr1la} is altijd groter dan R_{scr1la} tenzij voor een nachtscherm die geen licht doorlaat, daarbij geldt

$$LLR_{scr1la,ns} = R_{scr1la,ns}$$

Deze laatste vergelijking heeft natuurlijk geen praktisch nut, maar is zuiver theoretisch.

3.4 Discussie over de voorgestelde performantiecoëfficiënten

R_{scr1la} , r_{scr1la} , LLR_{scr1la} en $rm_{scr+2bl}$ zijn parameters die het mogelijk maken om in één oogopslag schermen met elkaar te vergelijken en het gedrag ervan in de kasomgeving te voorspellen.

Wat betreft de R_{scr1la} en LLR_{scr1la} -coëfficiënten voor dagschermen kan een belangrijke kanttekening worden gemaakt: schermen met een hogere lichttransmissie presteren thermisch beter doordat er meer zonne-energie via daglicht de kas binnendringt. Dit positieve effect wordt echter niet meegenomen in de R_{scr1la} - en LLR_{scr1la} -coëfficiënten.

Hoewel het aantrekkelijk lijkt om dit voordeel te integreren in deze coëfficiënten, is dat theoretisch niet wenselijk of haalbaar. De coëfficiënten drukken immers een weerstand uit als functie van een temperatuurverschil, terwijl zonnewinsten geen directe temperatuursafhankelijkheid vertonen. Hierdoor is een combinatie van beide fysisch niet correct.

Het is echter wél belangrijk om te beseffen dat de thermische prestatie van meer lichttransmissieve schermen ondergewaardeerd wordt wanneer men enkel naar de R_{scr1la} - en LLR_{scr1la} -waarden kijkt. Bij de vergelijking van schermen moet hiermee rekening worden gehouden.

3.5 R_{scr1la} , r_{scr1la} , LLR_{scr1la} en $rm_{scr+2bl}$ van de gemeten schermen

In Tabel 2 worden de performantiecoëfficiënten van verschillende schermen weergegeven, berekend op basis van de metingen van de WUR uitgevoerd in ENERGLIK (WUR, 2025) en volgens de vergelijkingen van vorige hoofdstukken. Bijkomend (onderaan) worden ook de R_{scr1la} en r_{scr1la} weergegeven van volledig reflectieve, emissive of transmissieve schermen als referentiewaarde.

De conclusies i.v.m. met de transportweerstand voor warmte uit de tabel zijn

- De warmtetransportweerstand (R_{scr1la}) van een scherm hangt in sterke mate af van de warmtestralingseigenschappen van het materiaal. Naarmate een scherm evolueert van volledig transmissief, via emissief, naar volledig reflectief, stijgt de R_{scr1la} -waarde van ongeveer 0,1 tot 0,8 m²·°C/W. Concreet betekent dit dat een volledig reflecterend scherm als enkelvoudige laag tot acht keer beter isoleert dan een volledig transmissief scherm. Afhankelijk van de schermconfiguratie — zie paragraaf 3.3.2 — kan dit verschil zelfs nog groter of kleiner uitvallen.
- Deze verhouding is ook geldig voor de thermische transportweerstand (rh_{scr1la}) waarbij de weerstand van een scherm stijgt van 120 tot 970 s/m in de range van transmissief, naar emissief naar reflectief scherm.
- De weerstandswaarde van de gemeten dagschermen zitten in het gebied tussen emissief en transmissief scherm ($R_{scr1la}=0.135-0.17$ m² °C/W). Uitzondering is de “coated screen en film” (24AI en 24BI) die een warmtetransportweerstand haalt tussen 0.3-0.4.
- Nachtschermen, met aluminium in, hebben een hogere warmtetransportweerstand dan een gemiddeld dagscherm. Uit de tabel blijkt dat schermen van de toonaangevende schermproducenten doorgaans een R_{scr1la} tussen 0,25 en 0,4 m²·°C/W behalen. Meer innovatieve nachtschermen — zoals types 23AW tot 23EW —



voorgesteld door bedrijven buiten de traditionele schermsector, bereiken aanzienlijk hogere waarden van 0,6 tot 0,7 $\text{m}^2 \cdot \text{°C/W}$. Deze benaderen daarmee het theoretische maximum voor warmtetransportweerstand.

- Voor de $\text{LLR}_{\text{scr1la}}$ zien we typisch waarden tussen 0.4 en 0.7. De uitschieters zijn schermen die zeer transmissief zijn voor licht (23AA) of gecoate dagschermen die goed isoleren (24AI en 24BI). Beiden hebben gelijkaardige LLR waarden in range van 1. Men kan ook vereenvoudigd stellen dat dergelijke innovatieve dagschermen dubbel zo performant zijn dan de bestaande schermen.

De algemene conclusie op basis van de berekende warmtetransportweerstand is dat het ENERGLIK-project inderdaad producten met betere prestaties voorstelt. Dergelijke schermen zijn momenteel nog niet commercieel beschikbaar, maar gezien hun aanzienlijk hogere prestaties is er zeker potentieel voor dit type producten op de glastuinbouwmarkt.

De conclusies rond de berekende damptransportweerstand ($r_{\text{m}_{\text{scr}+2\text{bl}}}$) zijn:

- Tussen de verschillende schermen is een grote variatie naar damptransport (factor 10).
- Meer dampopen schermen zullen een positieve bijdrage leveren aan een energie-efficiënte ontvochtiging in de kas zolang het damptransport niet gebaseerd is op luchtuitwisseling tussen de bulk lucht boven en onder het scherm (Bronchart, 2024). Dergelijke luchtuitwisseling heb je enkel bij grotere openingen.
- De hoeveelheid energie die doorheen het scherm via damp gaat (bepaald door $r_{\text{m}_{\text{scr}+2\text{bl}}}$) is in verhouding veel lager dan de hoeveelheid warmte die doorheen het scherm gaat (bepaald door $r_{\text{h}_{\text{scr1la}}}$). Alleen bij heel dampopen schermen (23BD en 23CD), toont de verhouding van de weerstandswaarden aan dat een dampopen scherm met $r_{\text{m}_{\text{scr}+2\text{bl}}} \sim 550 \text{ s/m}$ een vergelijkbare hoeveelheid energie doorlaat via damp dan een reflectief scherm met $r_{\text{h}_{\text{scr1la}}} \sim 750 \text{ s/m}$ voor voelbare warmte.

3.6 Conclusies

Voorgaande hoofdstukken beschrijft het theoretische kader om gaande van schermmetingen tot de performantiecoëfficiënten van een scherm te komen (R_{scr1la} , r_{scr1la} , $\text{LLR}_{\text{scr1la}}$ en $r_{\text{m}_{\text{scr}+2\text{bl}}}$). Op basis van deze getallen kunnen schermen onderling worden vergeleken.

Deze performantiecoëfficiënten werden nadien berekend op basis van doorgemeten schermen binnen het ENERGLIK-project. De resultaten tonen aan dat de innovatieve stappen die verschillende schermproducenten binnen het project hebben gezet, effectief bijdragen aan de ontwikkeling van performantere schermen. Hopelijk worden in de komende jaren verdere stappen gezet zodat deze schermen ook commercieel beschikbaar worden voor de tuinders.



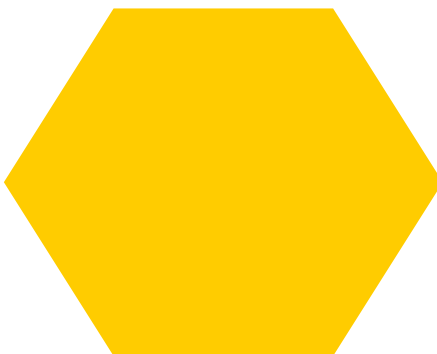
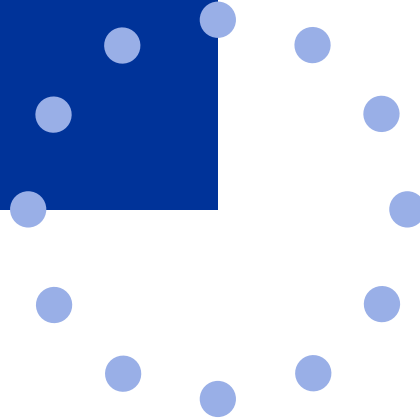
Tabel 2: De performantiecoëfficiënten van de in het ENERGLIK project nagemeten schermen aangevuld met referentiewaarden voor volledig reflectieve, emissieve en transmissieve schermen (onderaan in de tabel). De gebruikte meetdata zijn de metingen van de WUR (WUR, 2025). De verschillende performantiecoëfficiënten werden berekend volgens de theorie van voorgaande hoofdstukken. De weergegeven damptransportwaarden “TransHumid” stemmen niet overeen met deze gepubliceerd in vermeld rapport maar zijn de data van de oorspronkelijke metingen met een hoger vochtgradiënt. Zie tekst voor verdere toelichting.

			WUR measurements									Performantiecoëfficiënt			
Energlik code	Day-(D) or Night-screen (N)	Hemisf. light transm. [-]	TNO Box or Perkin Elmer FTIR			Permea		TransHumid			rm _{scr+2bl} (s/m)	R _{scr1la} (m ² °C/W)	rh _{scr1la} (s/m)	LLR _{scr1la} (m ² °C/W)	
			ISSA horti-scatter [-]	TIR Reflect. [-]	TIR Transm. [-]	TIR Emiss. [-]	dry [m 10 ⁻⁷]	wet [m 10 ⁻⁷]	top ca.10°C/60%, bottom ca. 22°C/90% [g/m ² /h]						
23LB	screen	D	0.71	0.22	0.24	0.71	0.04	0.23	0.02	26.0	1642	0.138	166	0.5	
23MB		D	0.73	0.22	0.25	0.73	0.03	0.17	0.07	27.6	1547	0.137	165	0.5	
23MB_ob	Screen pch 2023				0.21	0.77	0.02								
23NB	screen	D	0.72	0.83	0.24	0.40	0.36	0.29	0.06	24.8	1722	0.168	203	0.6	
23OB	screen	N			0.67	0.10	0.24	0.34	0.28	15.7	2719	0.318	383		
23OB_ob					0.29	0.11	0.60								
23PB	screen	N			0.41	0.16	0.44	0.11	0.08	14.8	2885	0.237	286		
23QB	screen	N			0.40	0.08	0.52	0.25	0.20	18.8	2271	0.251	303		
23RB	screen	N			0.38	0.08	0.55	0.85	0.45	32.1	1330	0.246	296		
23SB	screen	N			0.56	0.06	0.38	0.54	0.61	35.3	1209	0.290	349		
23SB_ob					0.23	0.09	0.68								
23ZB		N			0.67	0.03	0.30	0.05	0.10	10.9	3917	0.316	381		
23ZB_ob	Screen pskw 2023				0.23	0.04	0.73								
24AB	screen botany 2024	D	0.71	n/a	0.21	0.46	0.33	0.05	0.02	18.0	2372	0.158	190	0.5	
24BB		D	0.73	N/A	0.17	0.37	0.47	1.59	0.13			0.162	195	0.6	
18HN	screen	D	0.69	n/a	0.19	0.30	0.51	0.53	0.52	11.6	3680	0.173	208	0.6	
22RN	screen	D	0.70	0.03	0.21	0.29	0.50	0.09	0.03	22.2	1923	0.177	213	0.6	
23DN	screen	N			0.61	0.05	0.34	0.35	0.38	47.5	899	0.310	373		
23DN_ob					0.23	0.07	0.71								
24AN	screen	D	0.60	0.90	0.15	0.27	0.58	0.06	N/A			0.17	205	0.4	
19CS	screen	D	0.74	n/a	0.20	0.33	0.47	0.57	0.75	25.5	1674	0.171	205	0.7	
23ES	double screen pch	N			0.74	0.06	0.21	0.40	0.43	30.5	1400	0.359	433		
23ES_ob	2023				0.23	0.07	0.70								
23FS	double screen	N			0.73	0.06	0.20	0.24	0.26	8.4	5083	0.399	480		
23GS	double screen	N			0.18	0.05	0.76	0.26	0.29	34.0	1256	0.208	250		
23GS_ob					0.20	0.07	0.73								
23AD	double screen	D	0.55	n/a	0.25	0.40	0.36	0.34	0.29	26.8	1593	0.171	206	0.4	
23BD	screen	D	0.26	n/a	0.57	0.13	0.31	5.47	5.14	80.5	530	0.273	329	0.4	
23BD_ob					0.23	0.15	0.63								
23CD	screen	D	0.22	n/a	0.61	0.11	0.28	3.76	3.23	76.8	556	0.294	354	0.4	
23CD_ob					0.23	0.14	0.62								

Tabel: vervolg

			WUR measurements							Performantiecoëfficiënt				
Energik code	Day-(D) or Night-screen (N)	Hemisf. light transm. [-]	TNO Box or Perkin Elmer FTIR			Permea		TransHumid		rm _{scr+2bl} (s/m)	R _{scr1a} (m ² °C/W)	rh _{scr1a} (s/m)	LLR _{scr1a} (m ² °C/W)	
			ISSA horti-scatter [-]	TIR Reflect. [-]	TIR Transm. [-]	TIR Emiss. [-]	dry [m 10 ⁻⁷]	wet [m 10 ⁻⁷]	top ca.10°C/60%, bottom ca. 22°C/90% [g/m ² /h]					
23AW	film	N		0.98	0.00	0.02	0.00	N/A			0.656	790		
23AW_ob				0.64	0.00	0.36								
23BW	film	N		0.94	0.01	0.05	0.00	N/A			0.624	752		
23BW_ob				0.91	0.01	0.08								
23CW	film	N		0.93	0.01	0.06	0.00	N/A			0.616	741		
23CW_ob				0.94	0.01	0.05								
23DW	film	N		0.94	0.00	0.06	0.00	N/A			0.600	723		
23DW_ob				0.51	0.00	0.49								
23EW	film	N		0.95	0.02	0.03	0.36	0.25	25.6	1668	0.600	723		
23EW_ob				0.69	0.02	0.29								
23DO	film	D	0.81	n/a	0.05	0.37	0.58	0.00	N/A		0.147	177	0.8	
23EO	film pskw 2023	D	0.78	n/a	0.05	0.40	0.55	0.37	0.37		0.137	165	0.6	
23AA	film pch 2023	D	0.87	n/a	0.04	0.31	0.65	0.00	N/A		0.152	183	1.2	
24AI	coated film	D	0.69	n/a	0.75	0.07	0.18	N/A	N/A		0.395	475	1.3	
24BI	coated screen	D	0.59	0.13	0.62	0.06	0.32	0.85	0.94	31.0	1377	0.339	408	0.8
24BI_ob				0.33	0.11	0.57								
24AT	screen	D	0.59	n/a	0.20	0.71	0.09	0.61	0.62	15.6	2737	0.140	169	0.3
24AT_ob				0.21	0.71	0.09								
24BT	film	D	0.58	n/a	0.34	0.04	0.62	N/A	N/A		0.274	331	0.7	
24CT	screen	N		0.15	0.22	0.63	1.44	1.27	40.0	1067	0.194	233		
24CT_ob				0.15	0.19	0.66								
THEORETISCHE WAARDEN														
100% reflective				1.00	0.00	0.00					0.807	972		
100% emissive				0.00	0.00	1.00					0.197	237		
100 % transmissive				0.00	1.00	0.00					0.100	121		

4. Literatuur



- Baart de la Faille, L., Campen, J., & Oversloot, H. (2009). *U-waarde kas met scherm. Meetprotocol voor schermdoeken*. [TNO, Delft, Netherlands]. <https://doi.org/034-DTM-2009-04659>
- Bronchart, F. (2024). *Advancing towards Climate-Neutral Greenhouses: Thermodynamic Analyses of Greenhouse Systems and of Dehumidification Pathways and Vapor Transport through Screens*. UGent.
- Bronchart, F., & Corbala, L. (2021). Van het meten van de warmtestralingseigenschappen van schermen tot het berkenen van isolatiewaarde van een schermstelsel. *GLITCH-Project, INTERREG, Belgium*. <https://biblio.ugent.be/publication/01HYWAR48ZC99BCCW4VTXYZCGK>
- Hemming, S., de Zwart, F., Mohammadkhani, V., Raaphorst, M., van Breugel, B., & Baeza, E. (2021). *Wet Screens : Characterization of the physical properties of wet screens and quantification of their effect on energy use in greenhouses* [WUR, Wageningen, Netherlands]. <https://doi.org/10.18174/558268>
- Howell, J. R., Mengüç, P. M., Daun, K., & Siegel, R. (2021). *Thermal radiation heat transfer* (Seventh). CRC Press.
- WUR. (2025). *WUR measurement methods and results of screen properties*. https://interregvland.eu/uploads/project-downloads/Report-3_2_b-Measurement-methods-and-results-screens-WUR.pdf



Met de steun van:



Interreg
Vlaanderen-Nederland



Gefinancierd door
de Europese Unie

Energlik



Ministerie van Landbouw,
Natuur en Voedselkwaliteit



Ministerie van Economische Zaken



**Provincie
Antwerpen**



provincie limburg



provincie
Oost-Vlaanderen

Partners:



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH



Maastricht University

