

Van meten van schermen tot zijn prestatiecoëfficiënten

Rapport ENERGLIK WP3.2, bijdrage UGent

April 2025

Filip Bronchart, UGent



Disclaimer:

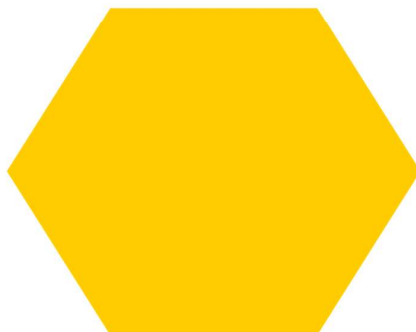
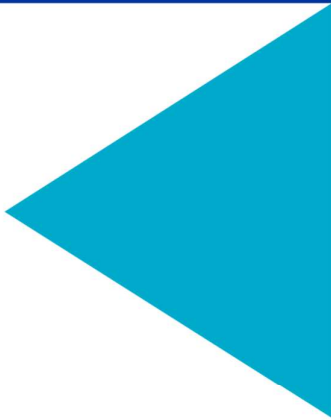
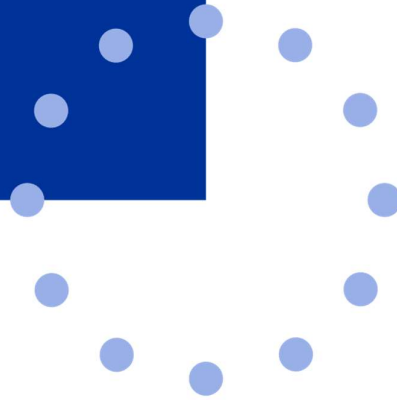
Hoog
mikken voor
de lage landen!

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 prestatiecoëfficiënten van schermen	11
3.1 Inleiding.....	12
3.2 Gebruikte afkortingen.....	12
3.3 Definitie van warmte- en massatransport prestatiecoëfficiënten van schermen.....	12
3.3.1 Damptransportweerstand ($r_{m_{scr+2bl}}$).....	12
3.3.2 De warmtetransportweerstand van een enkele scherm laag (R_{scr1la}).....	14
3.3.3 Temperatuur transportweerstand ($r_{h_{scr1la}}$).....	17
3.3.4 De lichtverlieswarmteweerstand van een scherm (LLTR)	17
3.4 Discussie over de voorgestelde prestatiecoëfficiënten	18
3.5 R_{scr1la} , r_{scr1la} , $LLTR_{scr1la}$ en $r_{m_{scr+2bl}}$ van de gemeten schermen	18
3.6 Conclusies	19
4. Literatuur	22

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 nachtschersmsystemen.

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

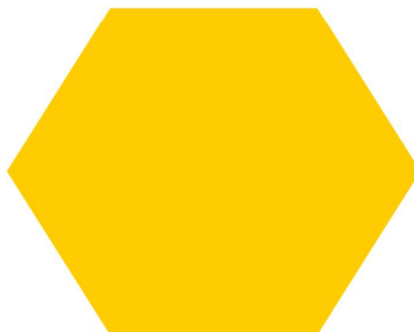
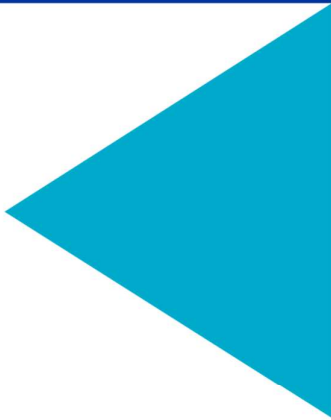
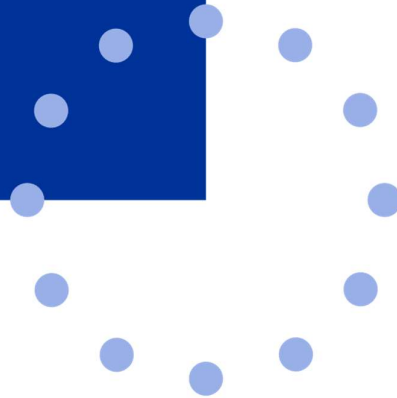
Dit rapport is complementair en voegt volgende elementen toe:

- 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} , $m^2 \text{ } ^\circ C/W$), thermische weerstandswaarde (rh_{scr1la} , s/m), lichtverliesweerstandswaarde (LLR_{scr1la} , $m^2 \text{ } ^\circ C/W$) 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 huidige 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 geleverd 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°.

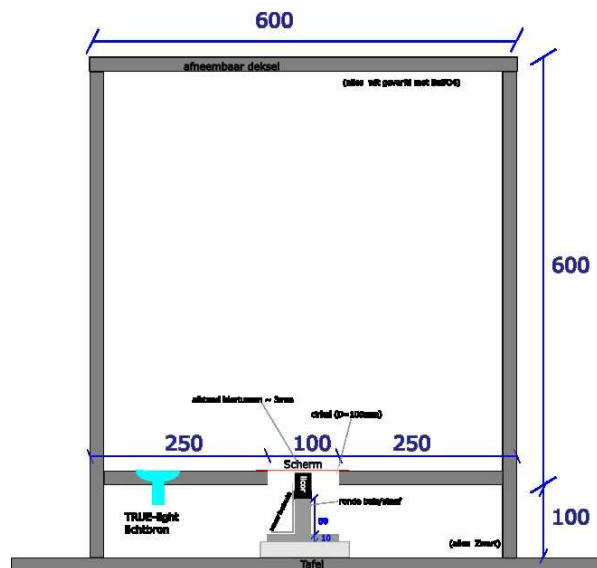


Fig. 1 Eenvoudige meetopstelling voor het meten van de hemisferische lichttransmissie.

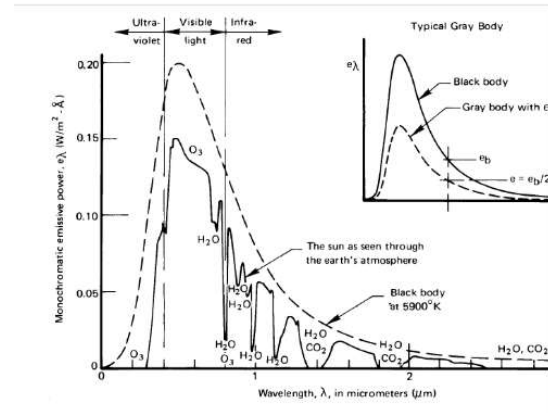
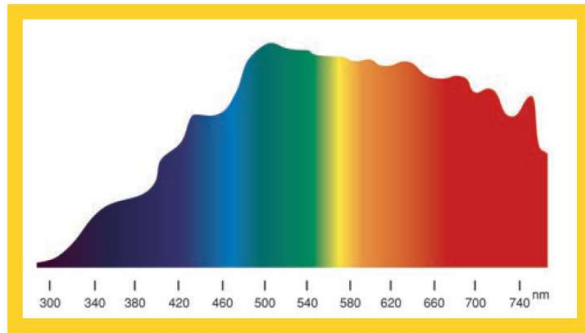


Fig. 2 Spectrum van een commerciële lamp van True-light (links) zoals gebruikt in de hemisferische lichttransmissie meetopstelling versus spectrum van zonlicht (rechts).

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

Energlik Code	omschrijving	Warmtestralingseigenschappen						Hemisferische lichttransmissie		
DAGSCHEM		UGent			WUR			UGent		WUR
		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 teeltproef PCH 2020	0.12	0.22	0.66				0.82		
	folie teeltproef PCH 2021	0.02	0.23	0.75				0.79		
23EO								0.81	0.84	0.78
NACHTSCHEM		Ugent		WUR						
		ρ	ϵ	ρ	ϵ					
23AW	ALU-scherf	0.78	0.22	0.98	0.02					
23BW-up	ALU-scherf	0.84	0.16	0.94	0.06					
23BW-un	ALU-scherf	0.82	0.18	0.91	0.09					
23CW-up	ALU-scherf	0.83	0.17	0.93	0.07					
23CW-un	ALU-scherf	0.84	0.16	0.95	0.05					
23DW-up	ALU-scherf	0.85	0.15	0.94	0.06					
23DW-un	ALU-scherf	0.41	0.59	0.51	0.49					
23EW-up	ALU-scherf +microperforatie	0.79	0.21	0.95	0.05					
23EW-un	ALU-scherf +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.

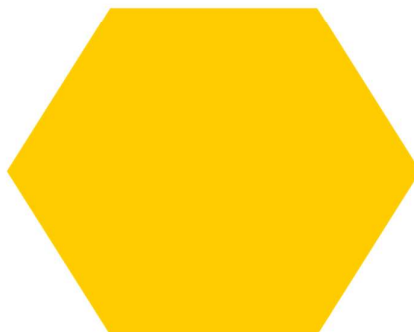
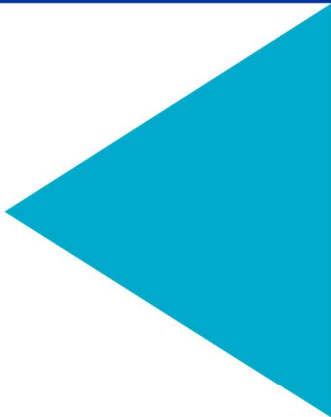
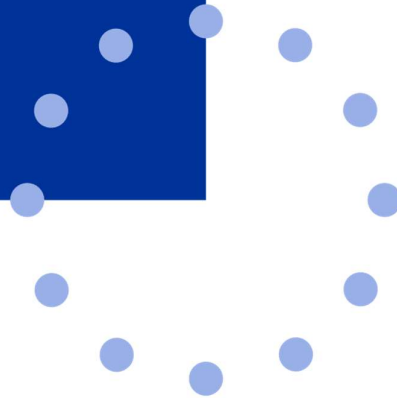
2.3 Conclusies

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 prestatiecoëfficiënten 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 (prestatiecoëfficiënten).

Welke prestatiecoëfficiënten en hoe deze prestatiecoëfficiënten 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)	HLT	Hemisferische lichttransmissie
LLR	Lichtverliesweerstand = "light loss resistance" (W/m ² /°C)	i	Binnen = "inside"
n	Damptransport in wetenschappelijke eenheid (kg/m ² /s)	o	Buiten = "outside"
q	Warmteflux (W/m ²)	rad	Thermal radiation
Q	Warmte (J)	scr+2bl	Schermet met de 2 laminaire grenslagen
Q̇	Warmtetransport (W)	scr1la	Invloed van een enkele scherm laag op gebied van warmte- en massatransport
rh	Thermische transportweerstand (s/m)	sky	hemel
rm	Damptransportweerstand (s/m)	THB	Van de transhumid box
R	Warmtetransportweerstand (J/m ² /°C)	un	Onder scherm="under"
RH	Relatieve vochtigheid (%)	up	Boven scherm
T	Temperatuur (°C)		

3.3 Definitie van warmte- en massatransport prestatiecoëfficiënten van schermen

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

De damptransportweerstand van een scherm ($rm_{scr+2bl}$) heeft de weerstand weer voor het damptransport tussen de bulk lucht onder en boven het scherm. In vergelijkingsvorm:

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

1



Met

- $n_{scr+2bl}$ het damptransport tussen de bulk lucht onder en boven het scherm ($\text{kg/m}^2/\text{s}$)
- $AV_{un,blk}$ is het absoluut vochtgehalte van de bulk lucht onder het scherm (g/m^3).
- $AV_{up,blk}$ is het absoluut vochtgehalte van de bulk lucht boven het scherm (g/m^3).
- rm_{scr+2} de damptransportweerstand van een scherm onder kasomstandigheden (s/m).

Deze vergelijking kan eenvoudig worden herschreven van damptransport (in $\text{kg/m}^2/\text{s}$) naar latent warmtetransport (in $\text{J/m}^2/\text{s}$) door de rechterzijde te vermenigvuldigen met de verdampingswarmte van water ($\sim 2,45 \text{ MJ/kg}$).

De vergelijking laat zien dat een grotere weerstand tegen damptransport ($rm_{scr+2bl}$) leidt tot een lager damptransport.

Deze damptransportweerstand ($rm_{scr+2bl}$) varieert in kasomstandigheden slechts beperkt. Dit komt doordat de niet-uniforme convectiecoëfficiënt – het is vooral niet uniforme convectie die de oorzaak is van het damptransport- weinig varieert (zie Bronchart 2024). Daardoor vormt deze grootheid een goede referentie om het damptransport doorheen schermen in een kas te voorspellen en verschillende schermen in kasomstandigheden te vergelijken.

Deze damptransportweerstand van een scherm kan worden afgeleid uit metingen. Zo kan de damptransportweerstand afgeleid worden uit metingen met de transhumid box van WUR (zie Hemming et al., 2021, voor een beschrijving). Deze transhumid box meet het damptransport (DT , $\text{g/m}^2/\text{h}$) bij een bepaald verschil in dampdruk onder en boven het scherm. Deze DT -waarde wordt vervolgens omgerekend naar een damptransportweerstand van het scherm ($rm_{scr+2bl}$, s/m), door de eerder gegeven vergelijking om te vormen tot de volgende vergelijking:

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

Met

- AV_{un} is het absoluut vochtgehalte onder het scherm (g/m^3)
- AV_{up} is het absoluut vochtgehalte boven het scherm (g/m^3)
- DT is het gemeten damptransport ($\text{g/m}^2/\text{h}$)
- $rm_{scr+2bl,THB}$ de damptransportweerstand zoals gemeten in de transhumid box (s/m)

Zo werden tijdens het ENERGLIK project meerdere schermen nagemeten op hun damptransport met de transhumid box. Tijdens deze metingen had de lucht boven het scherm een temperatuur van 10°C en een RV van 60%, en onder het scherm een temperatuur van 22° en RV van 90%. Dit resulteert in volgende absolute vochtgehaltes van de lucht:

$$\begin{aligned} AV_{un} &= 17.503 \text{ gr/m}^3 \\ AV_{up} &= 5.644 \text{ gr/m}^3 \end{aligned}$$

Deze waarden zijn gebruikt voor de berekening van $rm_{scr+2,THB}$ met bovenstaande vergelijking van de gemeten schermen en de resultaten hiervan zijn voorgesteld in Tabel 2.

Het is belangrijk te benadrukken dat er een verschil is tussen de gemeten damptransportweerstand met de Transhumid box ($rm_{scr+2bl,THB}$) en de waarde in de kas ($rm_{scr+2bl,kas}$), omwille van de volgende redenen:

- In de Transhumid box wordt de lucht boven en onder het scherm op een vaste temperatuur gehouden met behulp van een ventilator. Dit veroorzaakt geforceerde convectie, of een combinatie van geforceerde en natuurlijke convectie, ter hoogte van het scherm.
- In de kas daarentegen wordt het damptransport uitsluitend aangedreven door natuurlijke convectie: het scherm is kouder dan de lucht eronder, waardoor de afgekoelde lucht naar beneden zakt, waardoor luchtbeweging ontstaat die ook damp meeneemt.



Door de aanwezigheid van niet-gekwantificeerde geforceerde convectie in de Transhumid box mag worden aangenomen dat de gemeten damptransportweerstand kleiner is, of in het beste geval vergelijkbaar met de waarde in de kas (op basis van zuiver natuurlijk convectie):

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

Om hier duidelijkheid over te krijgen, bouwt UGent binnen het ENERGLIK-project een meetopstelling die volledig gebaseerd is op natuurlijke convectie. In deze opstelling kunnen gradiënten in relatieve vochtigheid en temperatuur nauwkeurig worden opgelegd. Het doel is om de damptransportweerstand snel en precies te bepalen onder realistischere kasomstandigheden.

3.3.2 De warmtetransportweerstand van een enkele scherm laag (R_{scr1la})

De warmtetransportweerstand van een scherm bepaalt in welke mate het scherm voelbare warmte (Q , J) doorlaat. In de literatuur over warmte- en massatransport wordt voelbare warmte doorgaans simpelweg warmte genoemd; de toevoeging *voelbaar* is overbodig (zie bv. Welty et al., 2015) en wordt hier enkel gebruikt om latente warmte – de energie die gepaard gaat met faseovergang van waterdamp naar vloeibaar water – uit te sluiten. Verder in de tekst spreken we daarom meestal gewoon van warmte.

De warmteflux door een scherm kan verlopen via convectie, warmtestraling of, in het geval van schermen met grote openingen, via luchtstroming (zie Fig. 3). Dat laatste mechanisme laten we verder buiten beschouwing, omdat het bij conventionele schermen niet voorkomt (Bronchart, 2024) maar wel bv bij schermkieren. Van de vermelde processen is warmtestraling doorgaans de dominante term.

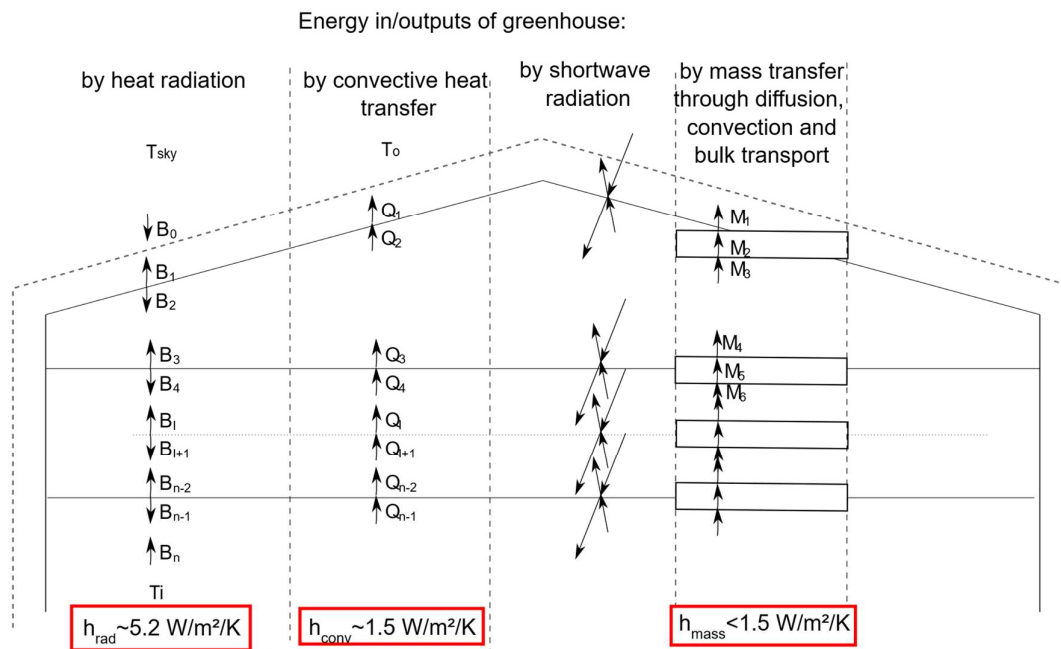


Fig. 3 geeft de verschillende processen weer van het energietransport doorheen een scherm en in de kas. De weergegeven zwarte lijntjes Merk op dat warmtestraling bij uitstek de grootste term is van de energieverliezen.

Latente warmtetransport (dampgerelateerd energietransport) wordt niet meegenomen in de definitie van de warmtetransportweerstand, om de volgende redenen:

- De belangrijkste reden is dat opname van damptransport ertoe zou leiden dat de berekende warmtetransportweerstand van een scherm lager uitvalt. Dat zou de indruk wekken dat een dampdicht scherm (hoge R_{scr1la}) efficiënter is dan een dampopen scherm (lage R_{scr1la}), terwijl in werkelijkheid het tegenovergestelde

geldt. Zoals Bronchart (2024) aantoon, verloopt damptransport door een scherm zeer efficiënt. Een dampopen scherm draagt zo bij tot betere ontvochtiging en kan daardoor, ondanks de iets lagere R_{scr1la} , tot energiebesparing leiden in de kas.

- Een bijkomende reden is het verschil in eenheden en drijvende krachten tussen beide processen: voor warmteoverdracht is dit een temperatuurgradiënt, voor damptransport een concentratiegradiënt. Het samenvoegen van beide mechanismen in één coëfficiënt is rekenkundig niet correct en zou tot misleidende resultaten leiden.

De energie die via damptransport wordt verplaatst kan afzonderlijk worden berekend op basis van de damptransportweerstand (zie hfdst 3.3.1).

Bij het bepalen van de warmtetransportweerstand van een scherm (R_{scr1la}) is het essentieel dat de randvoorwaarden duidelijk worden vastgelegd. Alleen zo kunnen schermen correct met elkaar worden vergeleken. Daarbij spelen zowel de configuratie als de klimaatcondities een bepalende rol. Beide worden in volgende hoofdstukken gedetailleerd.

3.3.2.1 De configuratie voor het bepalen van de warmtetransportweerstand van een enkel scherm (R_{scr1la})

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: Deze is gedefinieerd als de extra warmtetransportweerstand van een kas met 1 scherm versus een kas zonder scherm (zie schematisch in **Error! Reference source not found.**). Enerzijds geeft deze waarde een goed beeld van de intrinsieke energieprestatie van het scherm. Anderzijds worden schermen in de praktijk vaak in enkelvoudige lagen toegepast – precies de configuratie die hier als referentie wordt gehanteerd – en kan deze warmtetransportweerstand van enkel scherm daarmee rechtstreeks in de praktijk toegepast worden.

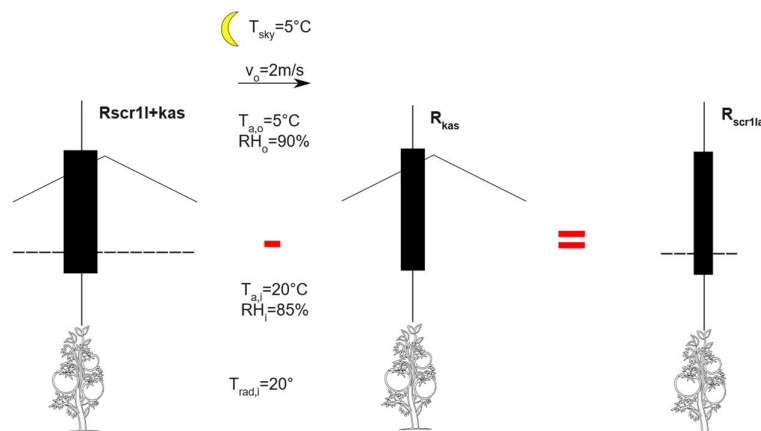


Fig. 4 Voorstelling van hoe de R-waarde van een scherm wordt berekend. Ook de gebruikte binnen en buiten klimaatcondities zijn aangeduid. Zie verder tekst.

In vergelijkingvorm wordt de warmtetransportweerstand van een enkele scherm laag bepaald door:

$$R_{scr1a} = R_{scr1a+kas} - R_{kas}$$

Met

- R_{scr1a} is de warmtetransportweerstand van een enkele scherm laag in de kas ($m^2 K/W$)
- $R_{scr1a+kas}$ is de warmtetransportweerstand van een kas met enkel scherm ($m^2 K/W$)
- R_{kas} is de warmtetransportweerstand van de kas zonder scherm ($m^2 K/W$)

$R_{scr1a+kas}$ wordt berekend op basis van volgende vergelijking:

$$R_{scr1a+kas} = \frac{T_i - T_o}{q_{scr1a+kas}}$$

Met

- $q_{scr1a+kas}$ is de warmteflux doorheen de kas met enkel scherm per grondoppervlakte-eenheid (W/m^2)
- T_i binnentemperatuur (K of $^{\circ}C$)
- T_o buitentemperatuur (K of $^{\circ}C$)

Voor R_{kas} gebeurt dit gelijkaardig voor een kas zonder scherm.

Idealiter worden de onbekenden ($q_{scr1a+kas}$, q_{kas}) bepaald op basis van een fysieke meting. Dit zou natuurlijk een grote inspanning vragen en hier wordt daarom gekozen om q te bepalen op basis van het UGent kas-scherm model. Fig. 3 heeft een overzicht van de interacties die hierbij in rekening worden gebracht. Verschillende schermeigenschappen zoals zijn warmtestralingseigenschappen beïnvloeden deze interacties. Het model wordt in meer detail beschreven in Bronchart & Corbala, 2021.

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_{scr1a} waardes 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-waardes in dit rapport zijn (zoals ook aangegeven in Fig. 4)

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



- $RH_i = 85\%$ (relatieve vochtigheid binnen)

Er is gekozen om voor zowel de buiten- als de binnenomstandigheden de stralings- en luchttemperatuur gelijk te stellen. Daardoor wordt de berekening van de warmteweerstand met de voorgaande vergelijking eenvoudiger en hoeft geen gemiddelde temperatuur uit lucht- en stralingstemperatuur te worden gedefinieerd. Dat zou nochtans wel kunnen en zou slechts tot een beperkte variatie van de warmteweerstandswaarde van het scherm ($R_{scr1la+kas}$) leiden.

3.3.3 Temperatuur transportweerstand (rh_{scr1la})

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

$$rh_{scr1la} = R_{scr1la} \rho_a c_{p_a}$$

Met

- rh_{scr} temperatuur transportweerstand van een enkel scherm laag (s/m)
- ρ_a de dichtheid van de lucht ($\sim 1.19 \text{ kg/m}^3$)
- c_{p_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 *warmte transportweerstand* (R_{scr1l}) 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_{hscr1} 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 $rm_{scr+2, THB}$ 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.

3.3.4 De lichtverlieswarmteweerstand van een scherm (LLTR)

Bij het vergelijken van dagschermen zijn zowel de warmte weerstandswaarde (R_{scr1la}) als 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 LLTR (light loss thermal resistance of lichtverlieswarmteweerstand) combineert beiden waardoor je dagschermen kunt vergelijken wat betreft hun bijdrage tot isolatie van de kas per eenheid hoeveelheid lichtverlies:

De vergelijking van LLTR is

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

$LLTR_{scr1la}$ 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 prestatiecoëfficiënten

R_{scr1la} , r_{scr1la} , $LLTR_{scr1la}$ 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.

Bij de R_{scr1la} - en $LLTR_{scr1la}$ -coëfficiënten voor dagschermen is een belangrijke kanttekening dat schermen met een hogere lichttransmissie thermisch beter presteren, omdat er meer zonne-energie via daglicht de kas binnenkomt. Dit positieve effect wordt echter niet meegenomen in de R_{scr1la} - en $LLTR_{scr1la}$ -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 $LLTR_{scr1la}$ -waarden kijkt. Bij de vergelijking van schermen moet hiermee rekening worden gehouden.

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

In Tabel 2 worden de prestatiecoëfficiënten van verschillende schermen uit de praktijk weergegeven, berekend op basis van de metingen uitgevoerd in het kader van ENERGLIK en gepubliceerd door WUR (2025) en vervolgens berekend volgens de vergelijkingen van vorige hoofdstukken.

Bijkomend (onderaan) worden ook de R_{scr1la} en r_{scr1la} waarde weergegeven van volledig reflectieve, emissive of transmissieve schermen als referentiewaarde.

De conclusies i.v.m. met de transportweerstand voor warmte uit de Tabel 2 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 m².°C/W. Deze benaderen daarmee het theoretische maximum voor warmtetransportweerstand.
- Voor de $LLTR_{scr1la}$ 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 $LLTR$ 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 ($rm_{scr+2bl}$) 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 $rm_{scr+2bl}$) is in verhouding veel lager dan de hoeveelheid warmte die doorheen het scherm gaat (bepaald door rh_{scr1la}). Alleen bij heel dampopen schermen (23BD en 23CD), toont de verhouding van de weerstandswaarden aan dat een dampopen scherm met $rm_{scr+2bl} \sim 550$ s/m een vergelijkbare hoeveelheid energie doorlaat via damp dan een reflectief scherm met $rh_{scr1la} \sim 750$ s/m voor voelbare warmte.

3.6 Conclusies

Voorgaande hoofdstukken beschrijft het theoretisch kader van de prestatiecoëfficiënten van een scherm. Deze prestatiecoëfficiënten zijn:

- R_{scr1la} : De warmtetransportweerstand van een enkel scherm
- r_{scr1la} : De temperatuurtransportweerstand van een enkel scherm
- $LLTR_{scr1la}$: De lichtverlieswarmteweerstand van een enkel scherm
- $rm_{scr+2bl}$: De damptransportweerstand

Op basis van deze getallen kunnen schermen onderling worden vergeleken.

Deze prestatiecoëfficiënten zijn berekend voor praktijkschermen op basis van metingen binnen het ENERGLIK-project. De resultaten laten zien dat de innovatieve stappen die verschillende schermproducenten tijdens het project hebben gezet, daadwerkelijk bijdragen aan de ontwikkeling van betere schermen. Hopelijk worden in de komende jaren verdere verbeteringen doorgevoerd, zodat deze schermen en schermen met hogere prestatiecoëfficiënten ook commercieel beschikbaar komen voor tuinders.



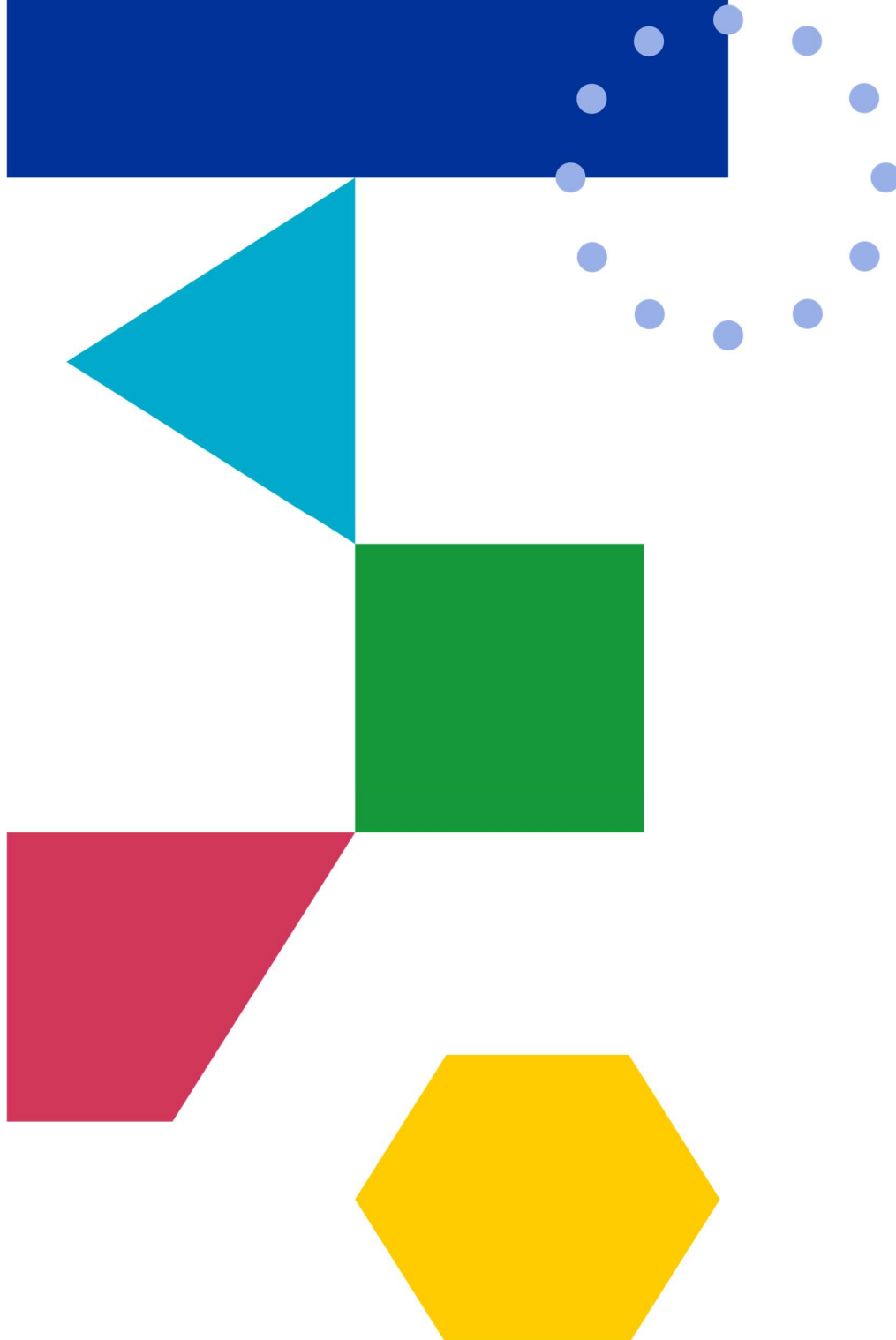
Tabel 2: De prestatiecoëfficiënten van de in het ENERGLIK project nagemeten schermen aangevuld met referentiewaarden voor volledig reflectieve, emissieve en transmissieve schermen (onderaan in de tabel). De gebruikte meetdata zijn de metingen van de WUR (WUR, 2025). De verschillende prestatiecoëfficiënten 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								Prestatiecoëfficiënt			
Energliek code		Day-(D) or Night-screen (N)	TNO Box or Perkin Elmer FTIR			Permea		TransHumid						
			Hemisf. light transm. [-]	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]	rm _{scr+2bl} (s/m)	R _{scr1la} (m ² °C/W)	rh _{scr1la} (s/m)	LLTR _{scr1la} (m ² °C/W)
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	pch '23/24				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	pskw 23/74,botany '24				0.23	0.04	0.73							
24AB	botany '24	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		N			0.74	0.06	0.21	0.40	0.43	30.5	1400	0.359	433	
23ES_ob	double screen pch '23/24				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							Prestatiecoëfficiënt			
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 _{scr1la} (m² °C/W)	rh _{scr1la} (s/m)	LLTR _{scr1la} (m² °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/m²/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 23/24	D	0.78	n/a	0.05	0.40	0.55	0.37	0.37			0.137	165	0.6
23AA film pch 23/24	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>
- Howell, J. R., Mengüç, P. M., Daun, K., & Siegel, R. (2021). *Thermal radiation heat transfer* (Seventh). CRC Press.
- Welty, J. R., Rorrer, G. L., & Foster, D. G. (2015). *Fundamentals of Momentum Heat and Mass Transfer* (6th ed.). John Wiley & Sons.
- WUR. (2025). *WUR measurement methods and results of screen properties*. https://interregvianed.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



AGENTSCHAP
LANDBOUW &
ZEEVISSERIJ



Ministerie van Landbouw,
Natuur en Voedselkwaliteit



Ministerie van Economische Zaken



**Provincie
Antwerpen**



provincie limburg



provincie
Oost-Vlaanderen

Partners:



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH



Maastricht University **Tomere**

