

Handleiding energieprestatiemetingen van proefkassen

Rapport ENERGLIK WP4.2

December 2025

Filip Bronchart (UGent)

Luis Corbala (ILVO)

Disclaimer:



**Hoog
mikken voor
de lage landen!**

grensregio.eu

Inhoud

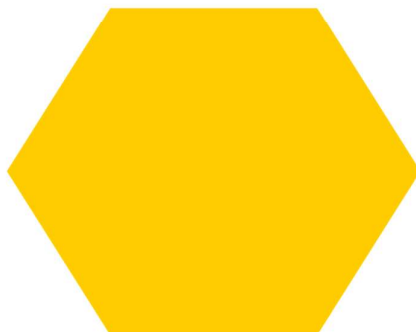
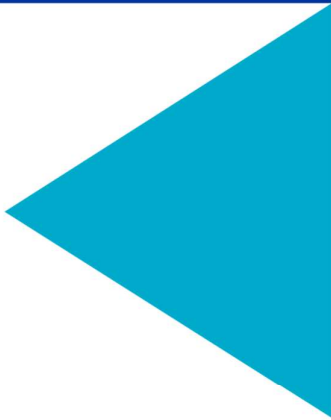
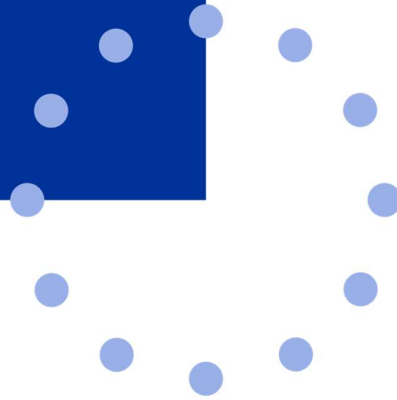
Inleiding	5
1. Theoretische berekeningsmethodiek van energiestromen door de zijwanden van de proefkas	7
1.1 Algemene situering	8
1.2 De energiestromen doorheen de zijwanden en zijn vergelijkingen	9
1.3 De convectieve warmteoverdracht tussen zijwand en kas	11
1.4 De warmtestralingsuitwisseling vanuit de zijwand	12
1.4.1 De warmtestraling van de zijwand naar de plant	12
1.4.2 De straling van de zijwand naar plant en bovenkant	13
1.4.3 De straling van een zijwand naar de corridor	15
1.4.4 De straling van de zijwand naar buiten	15
1.5 De inschatting van de temperatuur van de verschillende lagen	16
1.5.1 Inleiding	16
1.5.2 Schatting van de stralingstemperatuur van de onderste laag (T_{un})	16
1.5.3 Schatting van de stralingstemperatuur van de bovenste laag (T_{up})	17
1.5.4 De algemene vergelijking van de temperatuur van de lagen boven de bovenste laag ..	19
1.6 Het bepalen de zijwand temperatuur (T_{sw}) en de warmtedoorgang doorheen de zijwand ($q_{i \rightarrow test}$)	19
1.7 Het berekenen van ($q_{i \rightarrow test}$) bij een dubbele zijwand	20
1.7.1 De additionele weerstand/conductiviteit van het toevoegen van een plasticfolielaag in de zijwand	20
1.7.2 Het berekenen van de warmtetransfer bij een extra zijwand	22
1.8 Slot	22
2. Gemeten warmtedoorgangscoefficienten door proefkaszijwanden: variatie, gemiddelden en fout op de proefkasenergiemeting	23
2.1 Inleiding	24
2.2 Meetmethode	24
2.3 Warmtedoorgangscoefficient metingen zijwanden te PCH	25
2.3.1 Buitenwand (U_{out} , $W/^\circ C/m^2$)	25
2.3.2 $U_{corridor}$	27
2.3.3 U_{Afd}	28
2.4 Warmtedoorgangsmetingen te PSKW	30
2.5 De fout op de berekende netto-energie door de onnauwkeurige inschatting van de wanden ..	31

2.6 Conclusies	33
3. Lekventilatieproefkassen en hun invloed op de energieprestatie	35
3.1 Theorie.....	36
3.2 Lekventilatie in de praktijk.....	36
3.3 Discussie en conclusies.....	37
4. Warmtedoorgangsmetingen kasdek: een directe en nauwkeurige methode voor het meten van de prestatie van schermen in de praktijk.....	39
4.1 Voorafgaand	40
4.2 Berekeningsmethodiek	41
4.3 Resultaten en discussie	44
4.3.1Plaats afhankelijke variabiliteit van de warmtedoorgangsmetingen	44
4.3.2Methodiek dataselectie	45
4.3.3Nagemeten schermcombinaties	45
4.3.4Algemene observatie	46
4.3.5Resultaten en discussies PSKW.....	47
4.4 Resultaten, discussies PCH.....	51
4.5 Conclusies	53
4.6 Dankwoord.....	53
5. Literatuur.....	54

Gebruikte afkortingen:

<u>Variabelen</u>		<u>Subscripts</u>	
b	Breedte (m)	a	of the air
F	Viewfactor	av	average
h	Warmttransportcoefficient ($W/m^2/^\circ C$)	A	van de teeltproef
h	Hoogte	B	van een afdeling naast de teeltproef
n	Number of ()	black	bij de veronderstelling van een zwarte straler
Q	Heat (J)	conv	convectie
$\dot{Q}$	Heat flow (W)	cov	of the cover
q	Heat flux (W/m^2)	corr	of the corridor
R	Warmteweerstandscoefficient ($m^2/^\circ C/W$)	dls	a double layer sidewall
T	Temperatuur in $^\circ C$ of K	gl	van het glas
		gr	groeibuis
		i	inside
		o	outside
		os	other side of tegenovergesteld
		pl	of the plant
		rad	for thermal radiation
		sw	of the sidewall
		swA	the side A of the sidewall
		swB	the side B of the sidewall
		scr	of the screen
		un	het onderste oppervlak dat de scheidingswand ziet
		up	het bovenste oppervlak dat de scheidingswand ziet
		upup	de laag boven de up-laag
		upupup	de laag boven de upup-laag
		unscr	of under screen

Inleiding



Dit rapport maakt deel uit van het INTERREG-project ENERGLIK (Op weg naar een klimaatneutrale glastuinbouw) en behandelt de uitvoering van werkpakket 4.2.1, dat focust op meetmethoden voor energieproefkassen.

Teeltproeven in kleine proefkassen worden veelvuldig uitgevoerd. Deze kassen worden voornamelijk ingezet voor gewasonderzoek, maar ook regelmatig voor energieonderzoek. Toch is er tot op heden weinig aandacht besteed aan de vraag hoe proefkassen correct voor energieonderzoek moeten worden gebruikt en in welke mate ze hiervoor geschikt zijn. De kennis hierover is beperkt en een degelijke theoretische onderbouwing ontbreekt grotendeels.

In dit rapport beschrijven we diverse aspecten van energieonderzoek in proefkassen. Het bevat essentiële informatie om relevant en betrouwbaar energieonderzoek in dergelijke kassen mogelijk te maken.

Het rapport bestaat uit meerdere hoofdstukken die wetenschappelijke inzichten aanreiken rond energieonderzoek in proefkassen:

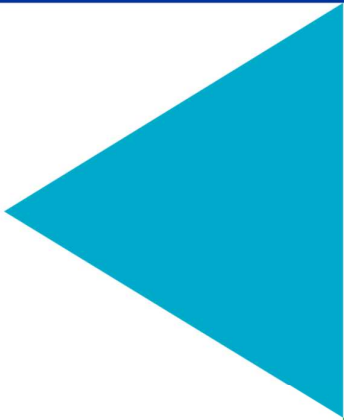
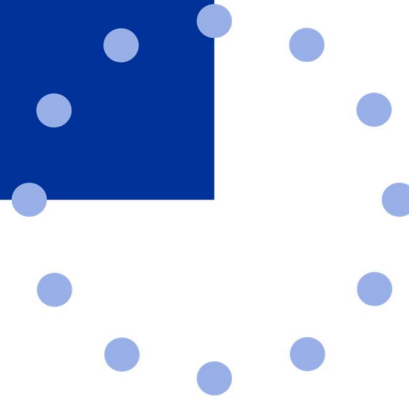
- Deel 1 en deel 2 behandelen de warmtedoorgang door de zijwanden van proefkassen. De zijwanden hebben een oppervlakte die vergelijkbaar is met die van het kasdek. Het is daarom cruciaal om de warmtedoorgang via deze zijwanden correct te kennen, zodat dit warmteverlies kan worden afgetrokken van het totale energieverbruik van de kas (=bruto) en een netto energieverbruik van de proefkas kan worden bepaald. Dit wordt toegelicht in twee hoofdstukken: .
 - Deel 1 beschrijft de wetenschappelijke vergelijkingen waarmee de warmtedoorgang door zijwanden kan worden benaderd. Deze is onder meer afhankelijk van schermstanden, schermtypes, viewfactoren en andere parameters.
 - Deel 2 presenteert metingen van warmtedoorgangssensoren in de zijwanden, inclusief hun variatie en gemiddelde coëfficiënten, tijdens teeltproeven bij PCH en PSKW. Het hoofdstuk stelt eenvoudige correlatiecoëfficiënten voor zijwanden voor sluit af met een analyse van de fout op zowel momentane als jaarrondenergiemeetresultaten.
- Deel 3 beschrijft de theorie rond luchtlekken in een proefkas en past deze toe op metingen uitgevoerd bij PSKW.
- Deel 4 toont aan dat metingen met warmtedoorgangssensoren op het kasdek een nauwkeurige methode vormen om het isolatievermogen van schermen in combinatie met het kasdek te bepalen. Deze methode levert waardevolle en betrouwbare data op, is aanzienlijk eenvoudiger dan volledige energieproefkasmetingen en biedt een alternatief om, bij gebrek aan nauwkeurige energieproefkasmetingen, toch correcte resultaten te bekomen en een uitspraak over schermen te kunnen doen.

Met deze vier hoofdstukken hopen UGent en ILVO een wezenlijke bijdrage te leveren aan een meer correcte energiemeting in proefkassen, ten voordele van de glastuinbouw in Vlaanderen en Nederland.

De auteurs danken ten slotte de proefcentra PCH en PSKW voor het registreren van de metingen en het ter beschikking stellen van de proefkassen.



1. Theoretische berekeningsmethodiek van energiestromen door de zijwanden van de proefkas



1.1 Algemene situering

Een proefkas (zie Fig. 1 als voorbeeld) is een kasunit waarvan de zijwanden grenzen aan andere proefkassen of aan buitengevels. Het totale oppervlak van die zijwanden is vaak groter dan het oppervlak van het kasdek. Omdat er via deze wanden eveneens energiestromen optreden, bemoeilijkt dit het energieonderzoek, dat zich in de eerste plaats richt op het optimaliseren van de warmteverliezen door het kasdek.

Een correcte analyse van energiebesparing in kasexperimenten vereist daarom twee zaken:

1. De berekening van de netto warmte-input op basis van de gemeten (bruto) warmte-input. De netto warmte-input corrigeert voor de verliezen via de scheidingswanden en vertegenwoordigt de situatie van een grote kas waarin de onderzochte energietechnologieën en klimaatstrategieën worden toegepast.
2. Een inschatting van de foutenmarges op deze netto warmte-input.

Dit hoofdstuk, over de berekeningsmethodiek van het netto proefkasenergieverbruik, behandelt enkel het eerste punt. Voor het tweede punt moeten de zijwandmetingen geanalyseerd en vergeleken worden met theoretische modellen. Dat valt buiten de scope van dit hoofdstuk en werd hier niet uitgevoerd.

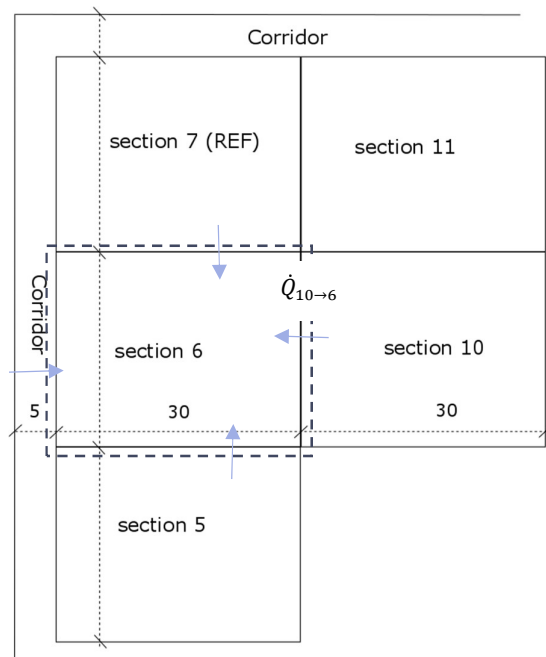


Fig. 1 Een typische opstelling van een proefkas - zoals in het ENERGLIK-project te Sint-Katelijne-Waver - omringd door andere proefkassen en een gang. De testsectie is nr. 6. De warmtestromen vanuit de zijafdelingen zijn weergegeven.

De algemene vergelijking voor het bepalen van de netto warmtevraag van de kas ($\dot{Q}_{NET,test}, W$) voor een kas met n zijwanden is :

$$\dot{Q}_{NET,test} = \dot{Q}_{BR,test} + \sum_{i=1}^n \dot{Q}_{i \rightarrow test}$$

1

Met

- $\dot{Q}$ is de het vermogen of warmtestroom van de proefkas (W)



Of

$$\dot{Q}_{NET,test} = \dot{m}_{HEAT} \cdot (T_{HEATi} - T_{HEATo}) + \dot{m}_{Gb} \cdot (T_{Gbi} - T_{Gbo}) + \sum_{i=1}^n \dot{Q}_{i \rightarrow test}$$

Hierbij zijn de warmtestromen ($\dot{Q}_{i \rightarrow test}$) positief als het extra energie is die in de kas komt.

Voor de berekening van het netto energieverbruik over een bepaalde periode ($\dot{Q}_{NET,test}$) wordt enkel over die periodes gesommeerd waarin:

- $\dot{Q}_{NET,test}$ positief is.
De reden hiervoor is dat we uitsluitend de verwarmingsbehoefte van de kas willen bepalen.
- $\dot{Q}_{BR,test}$ positief is.
Dit criterium geldt omdat we enkel positieve meetwaarden hebben voor de energievraag van de kas. Wanneer de energievraag negatief wordt, gaan de ramen open en hebben we geen data hoeveel energie de kas verliest. Dit zou eventueel tot fouten kunnen leiden want in principe kan het voorkomen dat $\dot{Q}_{BR,test}$ negatief is, terwijl de warmtestromen via de scheidingswanden naar de proefkas toch positief zijn, waardoor $\dot{Q}_{NET,test}$ alsnog positief zou uitvallen. In de praktijk zal dit echter zelden gebeuren, omdat de proefkas ook grenst aan buitengevels en aan wanden richting de corridor. Hierdoor geldt meestal dat $\dot{Q}_{BR,test}$ groter is dan $\dot{Q}_{NET,test}$.

In vergelijkingsvorm kan het netto energieverlies van de testkas dus nauwkeurig bepaald worden door:

$$Q_{NET,test} = \sum \dot{Q}_{NET,test} dt \quad 2$$

Met als voorwaarde:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{BR,test} &> 0 \\ \dot{Q}_{NET,test} &> 0 \end{aligned}$$

Het probleem die nu resteert is het bepalen van

- Een goede schatter voor de warmtestroom doorheen de zijwanden ($\dot{Q}_{i \rightarrow test}$)
- De fout op $Q_{NET,test}$

1.2 De energiestromen doorheen de zijwanden en zijn vergelijkingen

Zoals in vorig hoofdstuk wordt aangegeven is de warmtestroom ($\dot{Q}_{i \rightarrow test}$, W) doorheen de zijwanden de term die gekend moet zijn voor het bepalen van de netto verwarming uit de bruto verwarming (vgl. 2).

Voor het berekenen van dit warmtetransport kan het nodig zijn de zijwand op te splitsen in n sub-zijwanden met elk hun eigen warmteoverdrachtskarakteristieken. Deze verschillen ontstaan door variaties in viewfactoren voor warmtestraling. Zo kan een deel van de zijwand uitsluitend het gewas "zien", terwijl een ander deel zowel het gewas als het kasdek "ziet" (zie Fig. 2)

Het warmtetransport over de volledige zijwand bestaat dan uit de sommatie van m warmtefluxen te vermenigvuldigen met de m oppervlaktes. Als vergelijking:

$$\dot{Q}_{i \rightarrow test} = \sum_{j=1}^m A_j q_{i \rightarrow test,j} \quad 3$$



Voor het kunnen berekenen van de warmtestroom ($\dot{Q}_{i \rightarrow test}$), moeten we dus de heatflux ($q_{i \rightarrow test,j}$) kennen over de verschillende delen van een zijwand. Voor het geval van de kas, zoals Fig. 2 aangeeft, zal het meestal nodig zijn de zijwand op te delen in 2 delen gezien hun verschillende viewfactoren:

- Een deel waarbij de zijwand het gewas ziet
- Een deel van de zijwand die boven het gewas uitziet.

Deze heatflux ($q_{i \rightarrow test,j}$) is een gevolg van zowel convectie (q_{conv}) als warmtestraling (q_{rad}) (zie Fig. 2) en dit aan beide zijden van de zijwand:

$$q_{i \rightarrow test,j} = q_{conv,j,testi} + q_{rad,j,testi} = q_{conv,j,i} + q_{rad,j,i} \quad 4$$

Met

- $q_{conv,j,testi}$ de convectieve warmteoverdracht op deel j van de zijwand aan de zijde van de testkas (W/m^2)
- $q_{rad,j,testi}$ de stralingswarmteoverdracht op deel j van de zijwand aan de zijde van de testkas
- $q_{conv,j,i}$ de convectieve warmteoverdracht op deel j van de zijwand aan de tegenover gestelde zijde van de testkas (W/m^2)
- $q_{rad,j,i}$ de stralingswarmteoverdracht op deel j van de zijwand aan de tegenovergestelde zijde van de testkas

Gezien het glas een dun materiaal met een beperkte warmtegeleidbaarheid ($\lambda=1W/m^2/K$) en dus enkel warmte zal geleiden loodrecht op zijn oppervlak, zal de warmteoverdracht aan beide zijden van het glas idem zijn.

Hierbij stellen we dat q positief is als de warmtestroom gericht is naar de proefkas (zie ook tekenconventie op Fig. 2)

Verder is het nuttig te specificeren dat de stralingswarmteoverdracht tussen de zijwand gebeurt met de objecten die het glas ziet, nl de plant of het kasdek of scherm. (zie ook Fig. 2).

In de volgende hoofdstukken worden de termen $q_{conv,j,i}$ en $q_{rad,j,i}$ bepaald.

- In de hoofdstukken 1.3 en 1.4 worden eerst de vergelijkingen voor de conductiviteiten (h , $W/m^2/K$) en/of weerstanden (R , $m^2 K/W$)-dit is de reciproke waarde van conductiviteit- weergegeven voor respectievelijk convectie en stralingsoverdracht.
- In het hoofdstuk 1.5, wordt bepaald hoe we de temperaturen kunnen inschatten van de verschillende lagen die bijdragen aan stralingsoverdracht.
- Gezien zowel straling als convectie voorkomt aan beide zijde van de tussenwand en deze tussenwand zelf geen warmtestraling doorlaat, is deze tussenwand een "node" waarbij de temperatuur zich instelt in evenwicht met de heat transfer aan beide zijden van de tussenwand. In hoofdstuk 1.6 worden de evenwichtsvergelijkingen opgesteld en de temperatuur van de zijwand bepaald.
- Eenmaal de temperatuur van de zijwand is bepaald, kan $q_{i \rightarrow test,j}$ bepaald worden met vgl. 4 en tenslotte kan $Q_{NET,test}$ bepaald worden met vergelijkingen 3 en 2.

De subscripten i en j wordt in de vergelijkingen van volgende hoofdstukken weggelaten, om de vergelijkingen niet onnodig lang te maken.



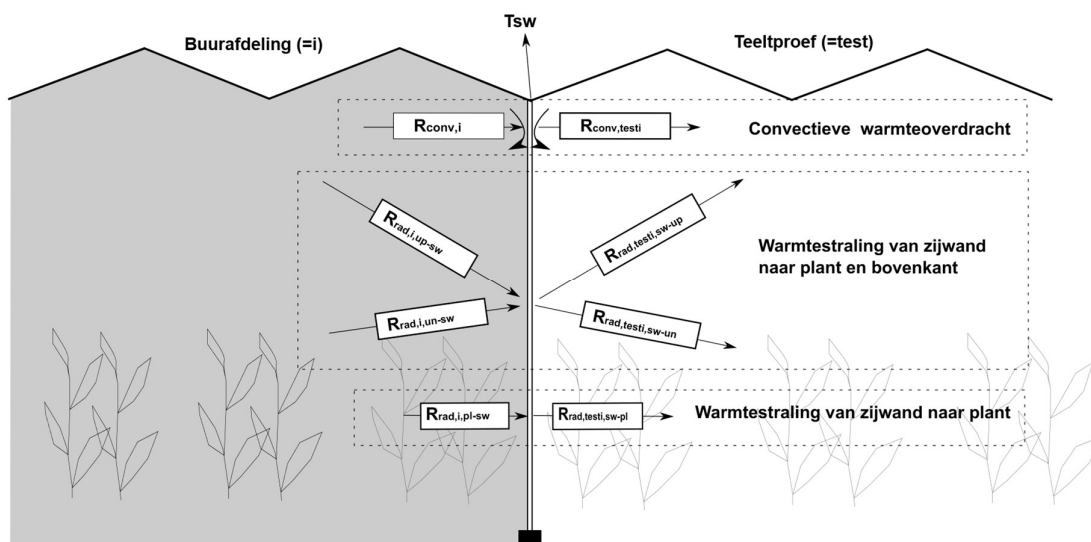


Fig. 2 Schematische voorstelling van convectie en warmtestralingsoverdrachts bij een scheidingwand. R zijn de optredende weerstanden, de pijlen geven de optredende warmtestromen weer. De convectieve weerstand (R_{conv}) wordt verondersteld constant te zijn over de volledige zijwand. De stralingsweerstand is afhankelijk van de positie nl in het gewas of boven het gewas. De som van convectie en stralingsuitwisseling aan beide zijden van de wand is gelijk (zie tekst). De richting van de pijlen heeft de tekenconventie weer die gebruikt wordt in dit document.

1.3 De convectieve warmteoverdracht tussen zijwand en kas

De algemene vergelijking voor de convectieve warmteoverdracht is:

$$q_{conv} = h_{conv} (T_a - T_{sw}) = \frac{(T_a - T_{sw})}{R_{conv}} \quad 5$$

Met

- T_a is de temperatuur van de lucht (air, K)
- T_{sw} is de temperatuur van de zijwand (sidewall, K)

Hierbij zijn de onbekende T_{sw} en h_{conv} of R_{conv} (T_a wordt gemeten).

Voor T_{sw} zie sectie 1.6.

h_{conv} bedraagt in het geval van natuurlijke convectie over een verticale wand (see (Lienhard IV & Lienhard V, 2008))

$$h_{conv,vert,nat} = 1.42 \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^{0.25} \quad 6$$

- For $\Delta T=1$, $L=1 \rightarrow h_{conv,vert,nat}=1.42 \text{ W/m}^2/\text{K}$
- For $\Delta T=3$, $L=1 \rightarrow h_{conv,vert,nat}=1.87 \text{ W/m}^2/\text{K}$

Deze waarden liggen lager dan de EN673-norm voor ramen, waar een interne warmteoverdrachtscoëfficiënt voor convectie van $3,6 \text{ W/m}^2/\text{K}$ wordt gehanteerd.

Ook bij de zijwand zal de uiteindelijke convectieve warmteoverdracht iets hoger liggen, gezien het optreden van extra luchtbeweging door verschillende factoren.

Voor het verwerken van de data stellen we daarom voor

$$h_{conv,vert,nat} = 2 \text{ W/m}^2/\text{K}$$

Het kan nuttig zijn deze waarde bij het vergelijken van de gemeten data met berekende waarde te variëren indien dit de fout zou verkleinen.



Voor verticaal glas aan de luwzijde van een gebouw nemen we als convectiecoëfficiënt dezelfde als voor het kasdek (Bot, 1983)

$$h_{vert,forc} = 2.3 + 1.7 u^{0.8} \quad 7$$

Volgens EN 15026-2007 is voor een verticale wand van een gebouw

$$h_{vert,forc} = 4 + 4 * v$$

Gezien de sidewall bij het PCH in een hoek staat en gezien 4 /m²/K voor natuurlijke convectie voor een gladde wand te groot is, wordt het model van Bot verkozen boven de norm.

1.4 De warmtestralingsuitwisseling vanuit de zijwand

Bij een zijwand tussen verschillende afdelingen, straalt de zijwand naar verschillende oppervlakten (Fig. 2).

- De onderste delen van de zijwand wisselen enkele straling uit met de plant
- De delen hierboven hebben bij benadering een viewfactor van 50% naar de plant ("under") en 50% naar het kasdek ("upper")

Voor een zijwand gericht naar een corridor, straalt de volledige zijwand naar 3 andere oppervlakten:

- het kasdek
- de overkant van de zijwand
- de grond

Voor een zijwand gericht naar buiten, straalt de volledige zijwand naar volgende oppervlakten:

- een deel naar de hemel
- een deel naar de aarde
- en een deel naar zijwanden van andere serres

Voor deze scenario's worden hieronder de gebruikte vergelijkingen uitgewerkt.

In de hierna volgende afleidingen wordt de warmtestralingsvergelijking in de conductiviteitsvorm geschreven. Deze kan altijd omgevormd worden naar weerstanden met volgende vergelijking:

$$q_{rad} = h_{rad} (T - T_{sw}) = \frac{(T - T_{sw})}{R_{rad}}$$

1.4.1 De warmtestraling van de zijwand naar de plant

Dit scenario stemt overeen met de onderzijde van Fig. 2.

De algemene vergelijking voor de warmtestralingsuitwisseling tussen 2 parallelle oppervlakten is (Lienhard IV & Lienhard V, 2008):

$$q_{rad, //} = \frac{\sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\left(\frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}\right)} \approx \frac{4 \sigma T_{av}^3 (T_1 - T_2)}{\left(\frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}\right)} \quad 8$$

Met

- T_{av} is temperatuur tussen T1 en T2 (K)
- σ is de stefaan boltzmann constante ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$)

Voor hun emissiviteiten worden volgende waarden genomen:

- De zijwand bestaat uit glas met een emissiviteit rond 0.94 (Lienhard IV & Lienhard V, 2008)
- Een plantenblad heeft volgens (López et al., 2012) een emissiviteit van 0.98 voor tomatenbladeren in het gebied 8-14 micron. Verder heeft (Lienhard IV & Lienhard V, 2008) een emissiviteit van 96% aan voor een waterdikte



van minimaal 0.1mm. Echter de zijwand ziet niet 1 verticaal blad zoals bij een parallelle wand - waarvoor bovenstaande vergelijking geldt - maar een verdeling van bladeren. Voor degelijke oppervlakten is het typisch dat ze zich gedragen als een zwarte straler ($\varepsilon_{pl} \sim 1$).

In dit geval betreft het dus straling van de zijwand naar een zwarte straler. Voorgaande vergelijking dan ook herschreven worden tot een meer eenvoudige basisvorm:

$$q_{rad,sw-pl} \approx 4 \varepsilon_{gl} \sigma T_{av}^3 (T_{sw} - T_{pl}) = 5.2 (T_{sw} - T_{pl}) = h_{rad} (T_{sw} - T_{pl}) \quad 9$$

Met

- ε_{gl} is de emissiviteit van glas
- T_{av} wordt hier de temperatuur van 290K wordt genomen. Een beperkte variatie heeft weinig effect op h_{rad}

1.4.2 De straling van de zijwand naar plant en bovenkant

Een radiosity model benadering

Dit scenario stemt overeen met het midden van Fig. 2.

Het model om de warmtestralingsuitwisseling tussen drie oppervlakten te berekenen – waarbij elk oppervlak als een grijze straler wordt beschouwd en er specifieke viewfactoren gelden – is vrij complex (zie (Lienhard IV & Lienhard V, 2008) hoofdstuk 10.4). Daarbij moet de radiosity worden bepaald: dit is de totale warmtestraling die een oppervlak uitzendt, bestaande uit zowel de gereflecteerde als de zelf uitgezonden straling.

Echter de oplossing van een dergelijk “radiosity model” kan vereenvoudigd worden voor ons schermscenario door volgende voorwaarden te integreren:

- De oppervlak van de zijwand is veel kleiner dan deze van het onderste en bovenste oppervlak. Hierdoor zal dit onderste en bovenste vlak zich als een zwarte straler gedragen voor de zijwand (i.e. uitgezonderd warmtestraling vanuit de zijwand zal niet teruggereflecteerd kunnen worden).
- De viewfactoren voor onderzijde en bovenzijde zijn $F_{sw,up} = 0.5$ en $F_{sw,un} = 0.5$

Integratie van deze voorwaarden in het “radiosity model” resulteert in volgende vergelijking voor de stralingsuitwisseling met het onderste oppervlak (hier plant)

$$q_{rad,sw-u} = \frac{\varepsilon_{sw}}{2} \sigma T_{sw}^4 - \frac{\varepsilon_{sw} (\varepsilon_{un} + \varepsilon_{un}(1 - \varepsilon_{up}))}{2 \varepsilon_{up} + \varepsilon_{un}(1 - \varepsilon_{up})} \sigma T_{un}^4$$

$q_{rad,sw-un}$ in deze vergelijking omvat naast de straling tussen onderste oppervlak en zijwand ook het deel van straling uitgezonden door het bovenste deel en via reflectie via het onderste deel op de zijwand komt.

Een vergelijkbare vergelijking kan uitgewerkt worden voor $q_{rad,sw-u}$ door het wisselen van up en un op laatste vergelijking.

Alhoewel deze vergelijking gebaseerd is op een correcte uitwerking van warmtestraling, wordt niet voor dit model gekozen omwille van :

- De temperatuurstermen tot de 4^{de} macht kun je niet samenvoegen gezien hun verschillende coëfficiënten, waardoor de linearisatie van de stralingsuitwisseling moeilijker is. Dit zorgt voor extra complexiteit gezien we voor de bepaling van de temperatuur van de zijwand een stelsel moeten oplossen (zie 1.6) .
- Ook is het model geschikt voor zowel reflectieve als emissieve schermen maar niet voor transmissieve schermen.
- Bovendien is de temperatuur van zowel onder en bovenzijde helemaal niet nauwkeurig gekend, waarom een complex en correct model niet noodzakelijk zal resulteren in een verhoging van de precisie van het model, gezien de andere onbekenden.

Een vereenvoudigde benadering op basis van zwarte straler model

Daarom wordt gekozen voor een vereenvoudigde benadering.

Voor deze vereenvoudigde benadering vertrekken we vanuit de veronderstelling van zwarte stralers. Dit levert volgende vergelijking:

$$q_{rad,sw-u,black} = F_{sw,un} \sigma (T_{sw}^4 - T_{un}^4) = 2 \sigma T_{av}^3 (T_{sw} - T_{un})$$



$$q_{rad,sw-up,black} = F_{sw,up} \sigma (T_{sw}^4 - T_{up}^4) = 2 \sigma T_{av}^3 (T_{sw} - T_{up})$$

In werkelijkheid zal de stralingsuitwisseling verschillen gezien de afwijkende emissiviteiten.

- Zo heeft het glas van de zijwand een emissiviteit rond 0.94 (Lienhard IV & Lienhard V, 2008)
- Voor de onderzijde kun je echter wel aannemen (planten) dat dit oppervlak zich gedraagt als een zwarte straler gezien
 - Het veel groter horizontale oppervlak versus de verticale zijwand
 - De indeling van het horizontale oppervlak in kleine oppervlakten die typisch leidt tot een zwarte straler

Hierdoor als vergelijking voor uitwisseling tussen zijwand en bovenkant van het gewas:

$$q_{rad,sw-un} = F_{sw,un} \varepsilon_{sw} \sigma (T_{sw}^4 - T_{un}^4) = 2 \cdot 0.94 \sigma T_{av}^3 (T_{sw} - T_{un}) = \frac{5.2}{2} (T_{sw} - T_{un}) \quad 10$$

Deze vergelijking is dus sterk gelijkend op de vergelijking met de uitwisseling met de plant (eq. 9) met dit verschil dat er hier een viewfactor van 50% wordt toegevoegd.

Voor de bovenzijde is er een toegevoegde complexiteit

- Bij een volledige reflectieve bovenkant, ziet de zijwand in feite de onderzijde
- Bij een emissieve bovenkant bekom je dezelfde vergelijking als voor de onderzijde.
- Tenslotte bij een transmissieve bovenkant, ziet de zijwand het oppervlak erboven.

Deze 3 eigenschappen geïntegreerd in vergelijkingvorm resulteert in vergelijking voor uitwisseling tussen zijwand en de scherm laag:

$$q_{rad,sw-up} = F_{sw,up} \varepsilon_{sw} \sigma \left(\varepsilon_{up} (T_{sw}^4 - T_{up}^4) + \rho_{up} (T_{sw}^4 - T_{un}^4) + \tau_{up} (T_{sw}^4 - T_{upup}^4) \right) \quad 11$$

$$= \frac{5.2}{2} \left(\varepsilon_{up} (T_{sw} - T_{up}) + \rho_{up} (T_{sw} - T_{un}) + \tau_{up} (T_{sw} - T_{upup}) \right)$$

Deze laatste vergelijking zal geen correcte uitwerking zijn (een correcte uitwerking is te complex, zie hierboven), maar maakt een model die rekening houdt met de stralingseigenschappen van de bovenste laag. Dit niet correcte model, zal aanleiding geven tot een fout, zoals het gebrek aan oppervlakte temperaturen dit ook zal doen. Het is tenslotte de fout die berekend zal worden tussen model en meetwaarden die een uitspraak zal doen over de algemene precisie van dit hier voorgestelde model.

Dit vereenvoudigd model zou je nog kunnen uitbreiden naar een dubbele transmissieve scherm laag, dit wordt dan:

$$q_{rad,sw-up} = F_{sw,up} \varepsilon_{sw} \sigma \left(\varepsilon_{up} (T_{sw}^4 - T_{up}^4) + \rho_{up} (T_{sw}^4 - T_{un}^4) + \tau_{up} (T_{sw}^4 - T_{upup}^4) \right) \quad 12$$

$$= \frac{5.2}{2} \left(\varepsilon_{up} (T_{sw} - T_{up}) + \rho_{up} (T_{sw} - T_{un}) \right. \\ \left. + \tau_{up} \left(\tau_{upup} (T_{sw} - T_{upupup}) + (1 - \tau_{upup}) (T_{sw} - T_{upup}) \right) \right)$$

Met

- T_{up} de temperatuur van de 1^{ste} scherm laag boven de teelt
- T_{upup} de temperatuur van de 2^{de} scherm laag boven de teelt
- T_{upupup} = de temperatuur van de 3^{de} laag boven de teelt.

Algemene opmerking:

- Beide vorige vergelijkingen zijn vereenvoudigingen, die geen rekening houden met de reflectie van de scherm lagen boven het onderste scherm. Dat kan tot een relevante fout leiden bij een zeer transmissief scherm onderaan. Maar in de teeltproeven hebben we niet deze case.
- De zijwand staat loodrecht op de scherm laag. De gemeten stralingseigenschappen zijn deze voor hemisferische warmtestralingsuitwisseling. Zo zal voor deze configuratie transmissie lager zijn dan de hemisferische transmissie.



- Vandaar dat het ook geen zin heeft te ver in detail te gaan, gezien ook de warmtestralingseigenschappen in deze configuratie niet precies gekend is.

1.4.3 De straling van een zijwand naar de corridor

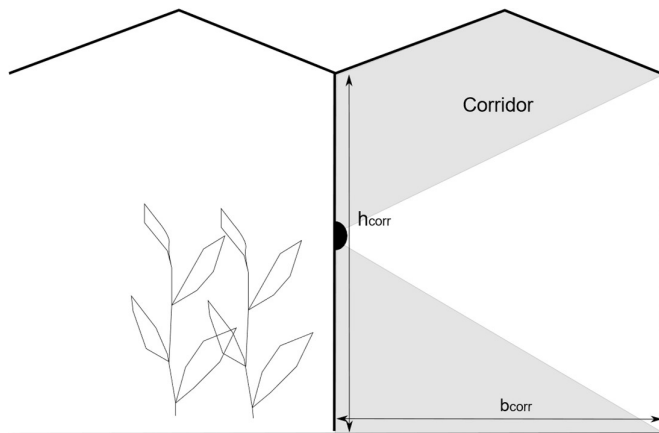


Fig. 3 De zijwand heeft een viewfactor naar het kasdek, de andere zijde en de grond.

De zijwand (zie Fig. 3) ziet zowel het kasdek, als de grond als de zijwand met allemaal verschillende temperaturen. De viewfactoren voor de tegenovergestelde zijde van de corridor kan berekend worden met volgende vergelijking (Lienhard IV & Lienhard V, 2008)

$$F_{corr,os} = \sqrt{1 + \left(\frac{b_{corr}}{h_{corr}}\right)^2} - \frac{b_{corr}}{h_{corr}}$$

Met

- $F_{corr,os}$ view factor voor tegenovergestelde zijde in de corridor (os=opposite side)
- b_{corr} is de breedte van de corridor (m)
- h_{corr} is de hoogte van de corridor (m)

Voor de viewfactor van de grond en kasdek geldt dan

$$F_{corr,up} = F_{corr,un} = \frac{1 - F_{corr,os}}{2}$$

Ook hier geldt (zie eerste deel hfdst 1.4.2) dat voor een correcte uitwerking voor grijze stralers de radiosity boven elke oppervlak moet worden berekend. Dit levert complexe vergelijkingen op die te ver gaan voor de gezochte correlatie. Daarom wordt hier – net als in hoofdstuk 1.4.2- een benadering voorgesteld op basis van zwarte stralers en het toevoegen van de emissiviteit van het glas van de zijwand.

Dat levert dan volgende vergelijking op basis (zie vgl. 9 voor verklaring van het getal 5.2):

$$q_{rad,corr-sw} = F_{corr,os} 5.2 (T_{os,corr} - T_{sw}) + F_{corr,up} 5.2 (T_{up,corr} - T_{sw}) + F_{corr,un} 5.2 (T_{un,corr} - T_{sw})$$

1.4.4 De straling van de zijwand naar buiten

De proefkas van PCH heeft een zijwand naar buiten.

De zijwand straalt naar volgende oppervlaktes

- Een deel van de zijwand straalt naar de hemel met temperatuur T_{sky} . De viewfactor wordt als 35% ingeschat.
- Een andere deel straalt naar de grond en de gebouwen errond. Voor al deze andere voorwerpen wordt als gemiddelde temperatuur de buitenluchttemperatuur genomen.

Gezien de stralingsuitwisseling op een iets lagere temperatuur gebeurt dan bij een binnenwand in de kas, zal ook de warmtestralingscoëfficiënt iets lager zijn volgens de wet van Stefan Boltzman. Uitwerking levert:



$$h_{rad,o} = \varepsilon_{gl} 4 \sigma T_{av}^3 = 4.7 W/m^2/K$$

13

Hierbij werden volgende parameters gebruikt:

- $\varepsilon_{gl}=0.94$
- $T_{av}=280K$

Op basis van de hierboven vermelde viewfactoren en warmtestralingcoëfficiënt, levert dit volgende vergelijking voor warmtestralingsoverdracht tussen buiten en de zijwand:

$$q_{rad,o-sw} = 1.645 (T_{sky} - T_{sw}) + 3.055 (T_o - T_{sw}) = h_{rad,sky} (T_{sky} - T_{sw}) + h_{rad,nosky} (T_o - T_{sw}) \quad 14$$

1.5 De inschatting van de temperatuur van de verschillende lagen

1.5.1 Inleiding

Vorige hoofdstukken 1.3 en 1.4 bevatten de vergelijkingen voor respectievelijk de convectieve en warmtestralingsoverdracht aan beide zijden van de zijwand van de testkast.

In deze vergelijkingen zijn de bekenden de warmteoverdrachtcoëfficiënten en de onbekenden de temperatuurverschillen. Eén term van deze temperatuurverschillen is altijd de temperatuur van de zijwand (T_{sw}). Deze wordt berekend in volgende hfdst. 1.6.

Voor het berekenen van de convectieve warmteoverdracht, is de andere term de temperatuur van de lucht ($T_{a,test}$ of $T_{a,i}$) aan beide zijden van de zijwand. Deze worden gemeten en zijn dus ook gekend.

Voor het berekenen van de warmtestralingsoverdracht, is de andere term de stralingstemperatuur van de onderste laag (T_{un}) en de stralingstemperatuur van de bovenste laag (T_{up}) en eventueel de temperaturen van de lagen daarboven (T_{upup} en T_{upupup}) in het geval van transmissieve schermen (bv zie vgl. 11).

Om deze stralingstemperaturen zo nauwkeurig mogelijk te bepalen, zijn er de volgende mogelijkheden, gerangschikt van meest naar minst nauwkeurig:

1. Ten eerste kan deze stralingstemperatuur gemeten worden met een pyrgeometer die naar onder (T_{un}) of naar boven voor (T_{up}) kan gericht zijn. Ter verdere verduidelijking: zo heeft een pyrgeometer gericht naar boven een enkele stralingstemperatuur weer, die al rekening houdt met de reflectie en transmissie van de enkele of eventueel meerdere scherm lagen. Bij het beschikbaar zijn van een dergelijke gemeten temperatuur, zal in de plaats van vgl 11 een vergelijking van het type 10 moeten worden toegepast. Indien deze temperaturen gemeten worden is dat het meest precies. Echter ook in dit geval zal er altijd nog een fout zijn gezien de pyrgeometer niet in dezelfde richting kijkt als de zijwand. Een horizontaal gerichte pyrgeometer zou echt wel de precieze temperatuur geven.
2. De tweede optie is als simulatiedata beschikbaar is van gewas en/of grond en/of schermtemperatuur. Deze kan dan gebruikt worden.
3. Tenslotte kunnen de temperaturen van de lagen ook ingeschat worden op basis van vereenvoudigde modellen. Deze staan hier verder uitgelegd.

1.5.2 Schatting van de stralingstemperatuur van de onderste laag (T_{un})

De temperatuur van het gewas en de grond stemt bij benadering overeen met de luchttemperatuur. De variatie is daarbij beperkt omwille van volgende redenen:

- Planten hebben s nachts gesloten huidmondjes, en koelen hierdoor niet af, maar ze koelen wel af door stralingsverlies naar boven en warmen op door de straling via de grond of de verwarmingsbuizen.
- Overdag, als planten verdampen en zonlicht opvangen, zal de temperatuur van het blad meestal iets boven de luchttemperatuur liggen.

De verschillen zijn niet zeer groot, dus in vergelijkingsvorm:

$$T_{un} = T_{pl} = T_{a,i}$$



1.5.3 Schatting van de stralingstemperatuur van de bovenste laag (T_{up})

Inleiding

De temperatuur van de bovenste laag (T_{up}) of lagen (T_{up} , T_{upup}) kan worden benaderd met een vereenvoudigd weerstandsschema. In plaats van weerstanden gebruiken we hier de warmteoverdrachtscoëfficiënten tussen de verschillende lagen, die de reciproke waarden van de weerstanden zijn. Fig. 4 geeft hiervan een algemeen overzicht. Daarnaast toont Fig. 4 dat er twee buitentemperaturen in rekening moeten worden gebracht. Om het weerstandsschema op te lossen en T_{up} te bepalen, moeten deze beide temperaturen eerst worden samengevoegd tot één equivalente buitentemperatuur ($T_{av,o}$), zoals voorgesteld in de figuur.

Deze twee stappen – het bepalen van de laagtemperaturen en het samenvoegen van de buitentemperaturen – worden in de volgende twee subsecties verder uitgewerkt, waarbij de nodige vergelijkingen worden voorgesteld.

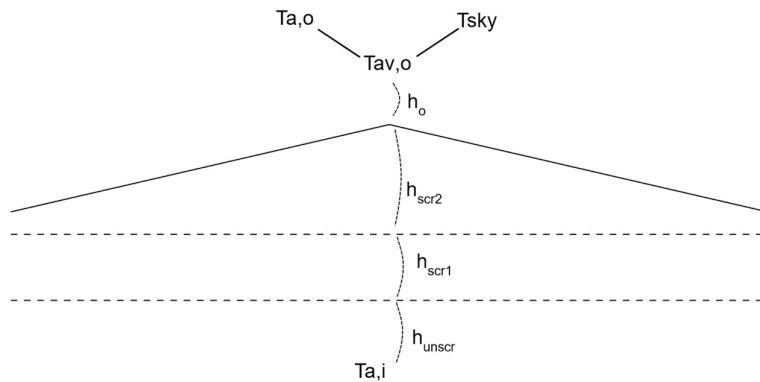


Fig. 4 Schematisch overzicht als ondersteuning voor de berekening van T_{up} . De getallen geven de gemiddelde warmteoverdrachtscoëfficiënten mee tussen de lagen (h , $W/m^2/K$). Zie verder tekst.

Het bepalen van een enkele buitentemperatuur

De vergelijking voor het bepalen van een enkele buitentemperatuur op basis van stralings- en luchttemperatuur is:

$$T_{av,o} = \frac{h_{conv,o}T_{a,o} + h_{rad,o}T_{sky}}{h_{conv,o} + h_{rad,o}} \quad 15$$

Hierbij is:

- $h_{conv,o}$ = de convectieve warmteoverdracht aan de buitenzijde = $3.3 \text{ W/m}^2/K$ of precieser via vgl. 7
- $h_{rad,o}$ = de warmtestralingscoëfficiënt aan de buitenzijde = $4.7 \text{ W/m}^2/K$ (zie vgl. 13)

Verder bedraagt de warmteoverdrachtscoëfficiënt van het kasdek naar deze buitentemperatuur ($T_{av,o}$):

$$h_o = h_{conv,o} + h_{rad,o}$$

Verklaring van vgl. 14: Wanneer aan beide zijden de kasdektemperatuur wordt afgetrokken en de vergelijking verder wordt uitgewerkt, blijkt dat de gebruikte $T_{av,o}$ en h_o leiden tot dezelfde warmteoverdracht als wanneer met de twee afzonderlijke buitentemperaturen wordt gerekend.

De algemene vergelijking van de temperatuur van de bovenste laag en/of lagen.

Op basis van het stromingsschema (reciproke van weerstandsschema) van Fig. 4 kan de temperatuur van de bovenste laag (T_{up}) berekend worden volgens volgende vergelijking:

$$T_{up} = T_{a,i} - \frac{T_{a,i} - T_{av,o}}{\frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_{unscr}} + \sum_{k=1}^{nscr} \frac{1}{h_{scr,k}}} \frac{1}{h_{unscr}} \quad 16$$

Met

- h_o de warmteoverdrachtscoëfficiënt boven het kasdek
- h_{unscr} is de warmteoverdrachtscoëfficiënt aan de onderkant van het scherm.



- $h_{scr,k}$ is de overdrachtscoëfficiënt tussen 2 schermen of tussen scherm en bovenkant kasdek
- n_{scr} het aantal scherm

De onbekenden zijn h_{unscr} en $h_{scr,k}$. Hun waarde hangt af van de stralingseigenschappen van het scherm. In de volgende subsecties wordt hiervoor een benaderend model gegeven.

Het bepalen van $h_{scr,k}$

De warmtegeleidbaarheid tussen 2 schermlagen wordt bepaald door 2 parallele warmtestromen:

- De convectieve overdracht. Deze is vast en bedraagt ongeveer $1.5 \text{ W/m}^2/\text{K}$ ($=h_{scr,conv,k}$)
- De stralingsoverdracht ($=h_{scr,rad,k}$): Deze hangt af van de stralingseigenschappen van beide schermen. Het betreft hierbij de stralingseigenschappen van het oppervlak van het scherm gericht naar de spouw.

Als vergelijking:

$$h_{scr,k} = h_{scr,conv,k} + h_{scr,rad,k} = 1.5 + h_{scr,rad,k} \quad 17$$

De onbekende uit voorgaande vergelijking is $h_{scr,rad,k}$. Voor een gemiddelde benaderende zwarte straler, bedraagt de stralingsoverdracht $5.2 \text{ W/m}^2/\text{K}$ (zie vergl. 9 voor de afleiding). Dit getal wordt dan kleiner bij reflectieve schermen (deze remmen de warmteoverdracht) en groter bij transmissieve schermen (deze bevorderen de warmteoverdracht). Hun invloed wordt benaderd a.d.v. van volgende vergelijkingen:

Als min 1 van de 2 schermen reflectief is wordt de stralingsoverdrachtsterm ($h_{scr,rad,k}$):

$$h_{scr,rad,k} = 5.2 (1 - \rho_1)(1 - \rho_2) \quad 18$$

Met

- ρ_1 en ρ_2 de reflectiviteiten van de 2 zijden van de hier betreffende spouw

Uitleg: Dit vereenvoudigde model is in feite een regressie, waarbij het invullen van de extreme waarden ($\rho = 1$ of 0) tot een correcte oplossing leidt. Het stemt niet volledig overeen met een radiosity-model, dat de stralingsuitwisseling nauwkeuriger beschrijft. Aangezien dergelijke radiosity-modellen echter uitgaan van grijze stralers, terwijl schermen dat niet zijn, kunnen we niet stellen dat dit vereenvoudigde model daardoor minder precies is.

Wanneer er minstens één transmissief scherm aanwezig is (en geen reflectief scherm, aangezien reflectieve en transmissieve schermen synergetisch werken en we dan de voorgaande vergelijking gebruiken), hanteren we de volgende vergelijking:

$$h_{scr,rad,k} = \frac{5.2}{(1 - \frac{(\tau_1 + \tau_2)}{2})} \quad 19$$

Uitleg:

Ook dit model is een regressiemodel, waarbij het invullen van de extreme waarden resulteert in een benaderend correcte oplossing.

- De vergelijking is iets anders opgesteld dan de vorige, om de invloed van enkele of dubbele transmissie in combinatie met emissieve schermen mee te nemen. De transmissies van beide lagen worden hierbij opgeteld en vervolgens gedeeld door twee.
- Voor een volledig emissief scherm ($\tau = 0$) geeft het model voor $h_{scr,rad,k}$ een waarde van 5,2, wat overeenkomt met vergl. 9.
- Voor een dubbel transmissief scherm ($\tau = 1$) wordt $h_{scr,rad,k}$ oneindig, wat betekent dat er geen extra additionele weerstand aanwezig is.
- Bij een enkel transmissief scherm is $h_{scr,rad,k}$ dubbel zo groot als bij een emissief scherm. Dit komt doordat transmissieve schermen aan beide zijden dezelfde transmissiviteit hebben, en de invloed van volledige transmissiviteit in de berekening over beide zijden wordt verdeeld. Indien we dit niet zouden doen zou een enkele laag transmissief resulteren in 2 maal oneindige $h_{scr,rad,k}$ (met de laag erboven en eronder). Dit komt omdat dit model werkt van scherm laag tot scherm laag, terwijl de transmissieve eigenschap van een scherm alleen over het scherm zelf gaat. Met andere woorden: de weerstand van een transmissief scherm is nul, en in



dit vereenvoudigde model wordt die eigenschap verdeeld over beide zijden gezien het model van scherm tot scherm werkt.

Het bepalen van h_{unscr}

Net zoals hierboven, wordt de warmteoverdrachtcoëfficiënt aan de onderkant van het scherm bepaald door zowel een convectieterm als een stralingsterm. In vergelijkingvorm.

$$h_{unscr} = h_{conv,unscr} + h_{rad,unscr}$$

Waarbij

- $h_{conv,unscr}$ = de convectieterm aan de onderzijde van het scherm= Deze is vast en bedraagt ongeveer 3 W/m²/K (= $h_{scr,conv,k}$)
- $h_{rad,unscr}$ = de stralingsoverdrachtsterm aan de onderzijde van het scherm.

Net als hierboven bij het bepalen van de stralingsoverdrachtsterm tussen 2 schermen wordt $h_{rad,unscr}$ benaderd door integratie van hun stralingseigenschappen. De basiswaarde van $h_{rad,unscr}$ voor een benaderde zwarte straler bedraagt hierbij ook 5.2 W/m²/K. Voor een reflectief en transmissief scherm worden respectievelijk vgl 18 en 19 toegepast maar dan met een enkele term.

1.5.4 De algemene vergelijking van de temperatuur van de lagen boven de bovenste laag

De temperatuur van de lagen boven de bovenste laag, worden ook bepaald a.d.v. van het oplossen van het resistentie of conductiviteitsschema.

Zo bedraagt de temperatuur van de laag boven het onderste scherm:

$$T_{upup} = T_{a,i} - \frac{T_{a,i} - T_{av,o}}{\frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_{unscr}} + \sum \frac{1}{h_{scr,k}}} \left(\frac{1}{h_{unscr}} + 1/h_{scr,1} \right)$$

Hierbij

- $h_{scr,1}$ de warmteoverdrachtcoëfficiënt tussen het eerste en het 2^{de} scherm

1.6 Het bepalen de zijwand temperatuur (T_{sw}) en de warmtedoorgang doorheen de zijwand ($q_{i \rightarrow test}$)

In vorige hoofdstukken werd de warmtedoorgang doorheen de zijwand beschreven. Zo levert vgl. 4 de algemene vergelijking van de warmtedoorgang met behulp van straling en convectie doorheen een plaats j doorheen de i de zijwand. In de hoofdstukken hierna werden de coëfficiënten van deze convectie en straling bepaald alsook hun vergelijkingen. Al deze vergelijking zijn bestaan uit lineaire vergelijkingen met als term het temperatuursverschil tussen de zijwand (T_{sw}) en een andere temperatuur die vermenigvuldigd wordt met een zeker warmteoverdrachtscoëfficiënt. De volgende vergelijking herschrijft vgl. 4 voor de beide zijden van de zijwand in een zo algemeen mogelijke manier rekening houdend met bovenstaande. Hierbij wordt verder de positie op de zijwand indicator weggelaten (j):

$$q_{i \rightarrow test} = \sum_{ki=1}^{li} (T_{i,ki} - T_{sw}) h_{ki} = \sum_{kt=1}^{lt} (T_{sw} - T_{test,kt}) h_{kt} \quad 20$$

Hierbij is

- ki is het aantal verschillen objecten naar waar de zijwand warmte overdraagt aan de zijde i
- kt is het aantal verschillen objecten naar waar de zijwand warmte overdraagt aan de zijde van de testkas
- $T_{i,ki}$ is de temperatuur van een object ki aan de zijde i
- $T_{test,kt}$ is de temperatuur van een object aan de testzijde voor het object kt
- h_{ki} is de warmteoverdrachtcoëfficiënt naar het ki de object aan de zijde i van de zijwand



- h_{kt} is de warmteoverdrachtcoëfficiënt naar het kt de object aan de testzijde van de zijwand

Om de warmtestroom ($q_{i \rightarrow test}$) te kennen, moeten we de temperatuur kennen van de zijwand (T_{sw}) die huidig nog onbekend is. Gezien bovenstaande vergelijking een dubbele vergelijking is, kan hieruit T_{sw} afgeleid worden. De oplossing hiervan is:

$$T_{sw} = (\sum_{ki=1}^{li} T_{i,ki} h_{ki} + \sum_{kt=1}^{lt} T_{test,kt} h_{kt}) / (\sum_{ki=1}^{li} h_{ki} + \sum_{kt=1}^{lt} h_{kt}) \quad 21$$

De berekende T_{sw} met voorgaande vergelijking kan dan ingevuld worden in vgl. 20 voor het berekenen van de warmteoverdracht doorheen de zijwand. Deze procedure moet dan natuurlijk herhaald worden over de verschillende zijwanden en de deelgebieden in de zijwanden zoals beschreven in vgl. 4.

In het volgende hfdst wordt nog ingegaan voor de cases dat de zijwand voorzien is van een extra isolatie

1.7 Het berekenen van ($q_{i \rightarrow test}$) bij een dubbele zijwand

In de proefkassen wordt vaak een extra folie (zoals PVDF) geplaatst parallel met de zijwand om het energieverlies naar de gang en de buitenlucht te minimaliseren en dus de energieresultaten van de teeltproef minder te beïnvloeden.

In het volgende hoofdstuk wordt een vereenvoudigd model voorgesteld die de additionele weerstand van het toevoegen van de folie berekend. In het hoofdstuk daarop wordt deze additionele weerstand geïntegreerd voor het berekenen van de warmtestroom doorheen een dubbele wand.

1.7.1 De additionele weerstand/conductiviteit van het toevoegen van een plastiekfolielaag in de zijwand

Bij het toevoegen van een extra laag, gaat de warmtestroom geremd worden maar natuurlijk blijven bestaan. De warmte wordt doorheen deze extra laag overgedragen door convectie en straling.

De warmtestromen die resulteren uit convectie is relatief eenvoudig te bepalen, maar de warmteoverdracht door straling is complexer (zie Fig. 5). Een correct oplossing vanuit stralingsoverdrachtstheorie bestaat hieruit om de radiosities vanuit alle oppervlakten te berekenen. Dit gaat over een oplossing van verschillende stelsels en dit maakt de situatie complex en kan enkel met programmeren worden opgelost. Er is hier daarom gekozen om dit te vereenvoudigen waarbij dit complexere radiosity model gereduceerd wordt tot het berekenen van de additionele stralingswarmteoverdrachtweerstand (verder uitgewerkt als zijn reciproke waarde i.e. zijn conductiviteit) door het toevoegen van de zijwand. Deze conductiviteit is hierbij verhoogt (of weerstand verlaagt) voor de in dit model ontbrekende rechtstreekse stralingsuitwisseling tussen de glazen zijwand doorheen de folie met de kas.



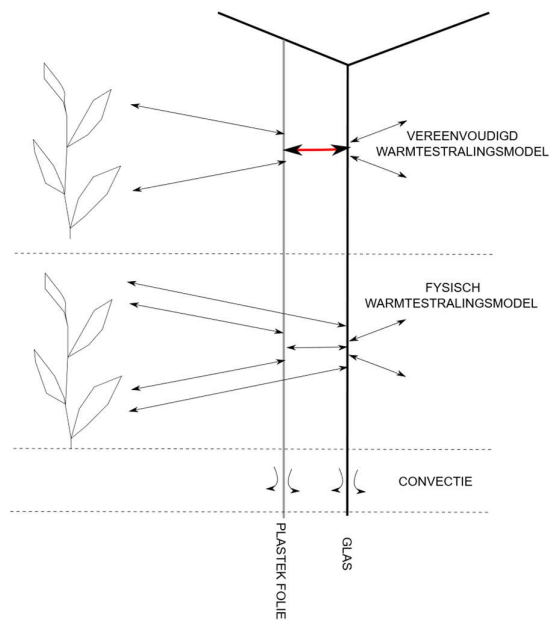


Fig. 5 Schematische voorstelling van de warmtestromen bij het toevoegen van een extra zijwand. Deze zijwand is transmissief. De warmte wordt overgebracht door convectie en warmtestraling. Een correct fysisch warmtestralingsmodel (zie midden figuur) berekent de radiosities tussen de verschillende oppervlakken volgens het schema. We kiezen hier voor een vereenvoudigd warmtestralingsmodel waarbij we warmtestralingsuitwisseling tussen de twee oppervlakken (zie rode lijn) gaan verhogen om te compenseren voor rechtstreeks uitwisseling tussen glas en kas.

Voor de berekening van de stralingsoverdrachtscoëfficiënt volgens een vereenvoudigd warmtestralingsmodel vertrekken we van vgl. 8, het algemene model voor stralingsuitwisseling tussen parallelle oppervlaktes waarbij beide oppervlaktes niet transparant zijn.

We gaan dit model aanpassen voor 1 gedeeltelijk transparante laag (hier de 2^{de} laag) tot volgende vergelijking:

$$q_{rad, //} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} - \tau_2} \approx \frac{4 \sigma T_{av}^3 (T_1 - T_2)}{\frac{1}{\varepsilon_1} - \tau_2}$$

Met

- ε_1 de emissiviteit van de glasplaat
- τ_2 de transmissiviteit van de plasticfolie

Dit model is gebaseerd op het volgende:

- Deze aanpassing stemt niet overeen met fysische modellering maar betreft een regressiemodel (als bij vgl. 18 en 19) waarbij het invullen van de extremen ($\tau_2 = 0$ of 1) resulteert in een benaderende oplossing.
- Het model is enkel correct in de veronderstelling wanneer geen reflectieve laag aanwezig is in de scheidingswand, wat hier het geval is met de glazen scheidingswand. Bij hogere reflectie (=lagere ε_1) stijgt wel de isolatiewaarde volgens dit model maar dit zal onvoldoende zijn daar reflectie en transmissie synergetisch werken. Het model houdt hier geen rekening mee.

Volgende getallen kunnen we invullen in bovenstaande vgl:

- ε_1 van de glasplaat van 0.94
- τ_2 is bijvoorbeeld voor PVDF folie 25 micron volgens metingen rond 0.35.

Dit resulteert in voor $T_{av}=290K$ in volgende warmtestralingsoverdrachtswaarde:

$$h_{rad, dls} = \frac{4 \sigma T_{av}^3}{1 - 0.35} = 7.75 \frac{W}{m^2 / K}$$

Naast de bijkomende weerstand voor warmtestraling, is een extra laag in de zijwand ook een weerstand voor convectie. Vgl 6 heeft de vergelijking mee voor deze waarde. Er wordt de kozen om een iets hogere waarde te nemen, omdat de



folie voor de zijwand niet volledig effen is wat zorgt voor extra warmteoverdracht daar de grenslaag onderbroken wordt. Dus als verticale convectiecoëfficiënt voor 1 zijde wordt genomen

$$h_{conv,dlsW} = \frac{2W}{m^2} / K$$

De totale toegevoegde conductiviteit door een extra plasticfolie is daarbij sommatie van seriële dubbele convectie die serieel is geschakeld en een warmtestralingsoverdracht, dit resulteert in:

$$h_{dlsW} = 7.75 + \frac{2}{2} = 8.75 \text{ W/m}^2/\text{K}$$

1.7.2 Het berekenen van de warmtetransfer bij een extra zijwand

De vergelijking die de heat transfer door een dubbel zijwand beschrijven zijn sterk vergelijkbaar als vgl. 20. De warmtetransfer is hierbij (subscript j voor de plaats op de zijwand is hierbij weggelaten):

$$q_{i \rightarrow test} = \sum_{ki=1}^{li} (T_{i,ki} - T_{sw,i}) h_{ki} = h_{dlsW} (T_{sw,i} - T_{sw,itest}) = \sum_{kt=1}^{lt} (T_{sw,itest} - T_{test,kt}) h_{kt} \quad 22$$

De linker vergelijking is tussen dubbele zijwand en buurafdeling, de middelste vergelijking tussen de 2 lagen van de zijwand en de rechter vergelijking is tussen zijwand en testkas.

Hierbij zijn

- $T_{sw,i}$ de temperatuur van de zijwand aan de buurkas zijde
- $T_{sw,itest}$ de temperatuur van de zijwand i aan de testkaszijde

Beide 3 vergelijkingen zijn aan elkaar gelijk. Er zijn 3 onbekenden nl $T_{sw,i}$, $T_{sw,itest}$ en de variabele die we wensen te kennen $q_{i \rightarrow test}$. De oplossing voor het vinden van een temperatuur is gelijkaardig als oplossing vgl 21 maar is iets complexer gezien het hier 3 vergelijkingen zijn en niet 2.

We herschrijven vorige vergelijkingen in een mathematische vorm:

$$\begin{aligned} q_{B \rightarrow swB} &= \sum_{i=1}^n h_i (T_i - T_{swB}) \\ q_{swB \rightarrow swA} &= h_{dlsW} (T_{swB} - T_{swA}) \\ q_{swA \rightarrow A} &= \sum_{j=1}^m h_j (T_{swA} - T_j) \end{aligned}$$

De oplossing voor $T_{sw,i}$ is hierbij:

$$T_{sw,i} = \frac{h_{dlsW} \sum_{ki=1}^{li} T_{i,ki} h_{ki} + \sum_{ki=1}^{li} T_{i,ki} h_{ki} \sum_{kt=1}^{lt} h_{kt} + h_{dlsW} \sum_{kt=1}^{lt} T_{test,kt} h_{kt}}{h_{dlsW} \sum_{ki=1}^{li} h_{ki} + \sum_{ki=1}^{li} h_{ki} \sum_{kt=1}^{lt} h_{kt} + h_{dlsW} \sum_{kt=1}^{lt} h_{kt}}$$

Eenmaal $T_{sw,i}$ werd berekend kan dan de warmteoverdracht doorheen de dubbele zijwand berekend worden met vgl 22.

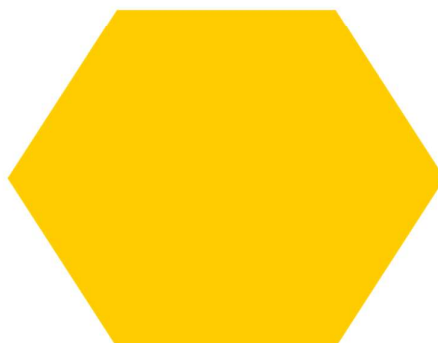
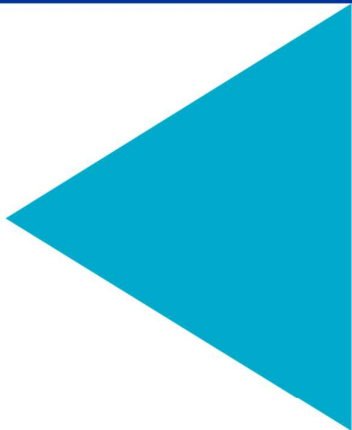
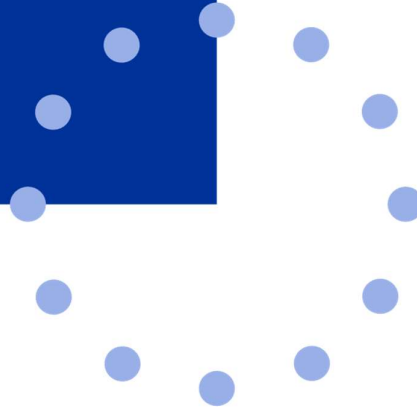
1.8 Slot

Hoofdstuk 2 geeft de vergelijkingen weer waarmee een betrouwbare schatting kan worden gemaakt van de warmtedoorgang door de zijwanden, gebaseerd op de warmteoverdrachtstheorie of vereenvoudigde afgeleide modellen, zodat alles in een weerstandsmodel kan worden gegoten.

De volgende stap is het vergelijken van dit model met metingen in de praktijk en het bepalen van de foutmarge. Dit komt echter niet aan bod in dit rapport.



2. Gemeten
warmtedoorgangscoefficienten
door proefkaszijwanden:
variatie, gemiddelden en fout
op de proefkasenergiemeting



2.1 Inleiding

In het voorafgaande hoofdstuk werden de vergelijkingen afgeleid die de warmteoverdrachtswaarde tussen de verschillende afdelingen bepalen. In dit hoofdstuk wordt de gemeten warmtedoorgang doorheen de zijwanden van de proefkassen bij PCH en PSKW in algemene zin geanalyseerd. Daarbij wordt gekeken naar:

- De gemiddelde warmteoverdrachtscoëfficiënt van de zijwand (U);
- de variatie op deze warmteoverdracht.

Op basis hiervan kan worden vastgesteld welke warmteoverdrachtscoëfficiënt tussen de verschillende afdelingen wordt gehanteerd voor de bepaling van het netto-energieverbruik van de proefkas volgens vergelijking 1. Daarnaast kan de variatie in deze coëfficiënt worden geanalyseerd, wat inzicht geeft in (1) de foutmarge op het berekende netto-energieverbruik bij gebruik van een gemiddelde warmteoverdrachtscoëfficiënt en (2) de meerwaarde van een meer gedetailleerde berekeningsmethode zoals voorgesteld in het vorige hoofdstuk.1.

De data van de gemeten overdrachtscoëfficiënten en hun variatie wordt gegeven ten eerste voor de proeven te PCH (waar het meeste sensoren op de zijwand zijn opgehangen) en erna bij de proeven te PSKW.

2.2 Meetmethode

De sensor die gebruikt werd om de warmtedoorgang door de zijwanden te meten is een HFP01 warmtedoorgangssensor van hukseflux.

Deze zijn wit gecoat met bariumsulfaat. Bariumsulfaat heeft een lichtreflectie van 98%. Hierdoor is het mogelijk om ook bij lage lichtintensiteiten nog de warmtedoorgang te meten zonder dat de meting verstoord wordt door de absorptie van het licht op de sensor.

Deze sensor is geplaatst in een polycarbonaat plaat die even dik (5mm) is als de sensor (zie foto). Bovenop de sensor is bovendien een laagje PVDF voorzien van 25 micron. Hierdoor wordt de BaSO_4 verf van de sensor niet vuil. Deze polycarbonaat plaat heeft dimensie van 28cm op 39cm. De boorden van de polycarbonaat plaat zijn schuin afgedaan zodanig dat de plaat zo weinig mogelijk de convectieve luchtstroom tegen de glasplaat stoort en dus effectief de warmtedoorgang meet van een gladde glasplaat.

De data die gebruikt werden voor de berekening van de warmtedoorgangscoefficienten (U) zijn uitsluitend nachtelijke metingen. Overdag worden de resultaten beïnvloed door instraling op de sensor, zelfs met een BaSO_4 -coating. In meerdere opstellingen zijn de sensoren bovendien naar het zuiden gericht (bijvoorbeeld bij sensoren die naar de corridor zijn opgehangen), waardoor zij rechtstreekse zonnestraling ontvangen. Door de verticale oriëntatie van de sensor en de lage zonnestand in de winterperiode wordt, ondanks de 98% reflectie van de coating, toch een aanzienlijke hoeveelheid energie geabsorbeerd, wat de meting verstoort. Het is dan ook het eenvoudigst om enkel gedurende de nacht de meetdata te gebruiken.



Fig. 6 Foto van de gebruikte warmtedoorgangssensors.

De sensor meet de warmteflux ($q, \text{W/m}^2$). Op basis van de luchttemperatuur aan beide zijden van de scheidingswand wordt deze warmteflux omgerekend naar een overdrachtscoëfficiënt ($U, \text{W/m}^2/\text{K}$):

$$U = \frac{q}{(T_i - T_o)} \quad 23$$

- q is flux die binnenkomt in de kas (W/m^2)
- T_o is de luchttemperatuur aan de buitenzijde van de zijwand
- T_i is de luchttemperatuur aan de binnenzijde van de zijwand

Dit betekent dat de U-waarde in de grafieken van de volgende hoofdstukken als negatieve waarden wordt weergegeven. Verder volgt uit de theorie in het voorgaande hoofdstuk (2) dat het warmtetransport doorheen de zijwand voornamelijk wordt bepaald door de stralingstemperaturen aan beide zijden. Het is dan ook te verwachten dat de berekende U-waarden een grote variatie vertonen.

2.3 Warmtedoorgangscoefficiënt metingen zijwanden te PCH

De figuur toont de plattegrond van de proefkas (rood kader). De proefkas grenst met zijn zijwanden aan andere proefafdelingen, aan de buitenomgeving en aan de corridor. Op deze verschillende zijwanden werden warmtedoorgangssensoren opgehangen. De resultaten hiervan worden in de volgende hoofdstukken voorgesteld en besproken.

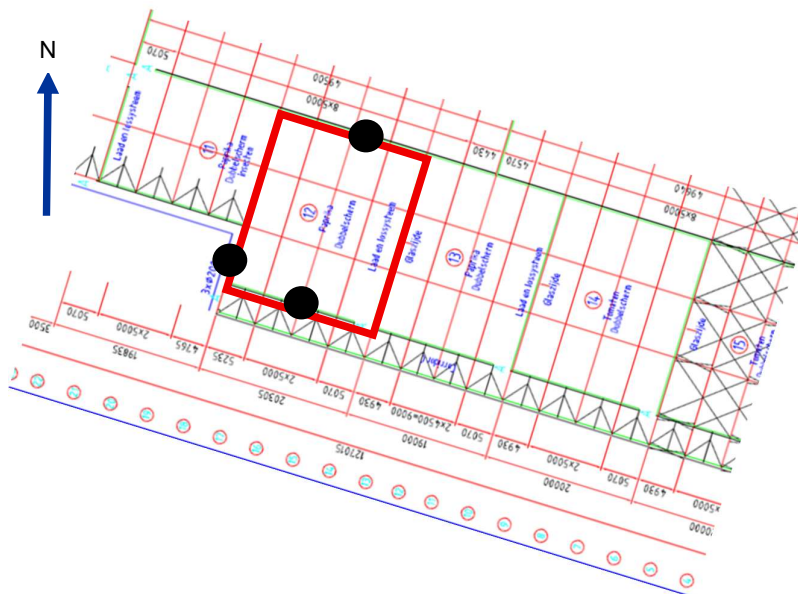


Fig. 7 Plattegrond van proefkas 18 te PCH. De zwarte cirkels zijn de plaatsen van de opgehangen warmtedoorgangssensoren.

2.3.1 Buitenwand ($U_{\text{out}}, \text{W/}^\circ\text{C/m}^2$)

De naar buiten gerichte zijwand van de proefkas is aan de binnenzijde van het glas voorzien van een bijkomende PVDF-folie.

De eerste figuur hieronder toont de evolutie van de U-waarde, berekend volgens vergelijking 23, over verschillende dagen en dit op de momenten met lage instraling (nacht, voor verklaring zie 2.2) .



De tweede figuur geeft de spreidingswolk weer in functie van het temperatuursverschil tussen binnen en buiten. Uit de spreidingswolk blijkt dat wanneer het temperatuursverschil kleiner wordt dan 5 °C, de warmteoverdrachtscoëfficiënt toeneemt. Dit is te verklaren doordat het verschil tussen de kasttemperatuur en respectievelijk de buitenluchttemperatuur en de hemeltemperatuur groter wordt, waardoor de buitenluchttemperatuur een minder geschikte referentie vormt voor de berekening van de warmtedoorgang. Dit leidt tot een stijging van de berekende U-waarde.

Bij temperatuursverschillen groter dan 5°C

- Gemiddelde waarde is $U_{out} = 3.43$
- St.dev=0.45
- 73% tussen 3 en 4);:

Voor de teeltproeven voor deze zijwand wordt een U-waarde van 3,43 gehanteerd. Deze waarde vormt een (beperkte) onderschatting, aangezien bij kleinere temperatuursverschillen de U-waarde hoger uitvalt.

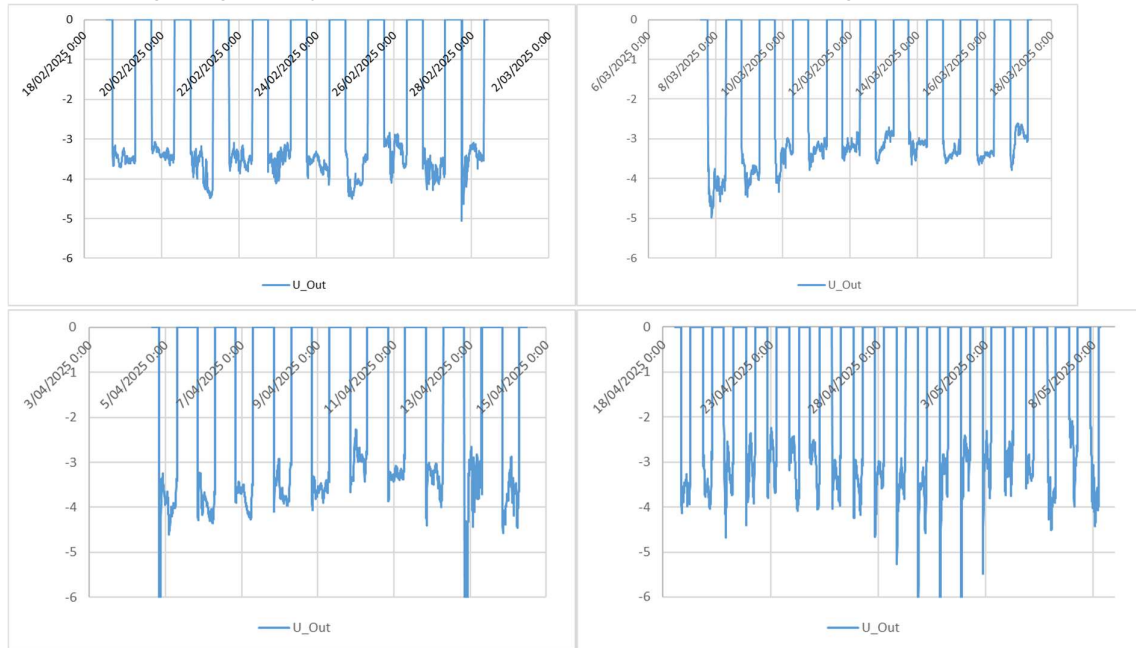


Fig. 8 Beeld van de evolutie van de gemeten U-waardes op de buitenwand.

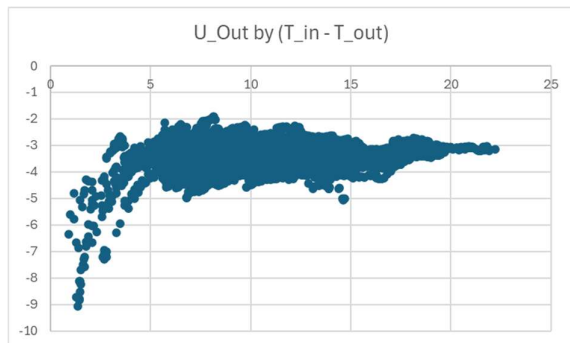


Fig. 9 Puntenwolk van gemeten U-waardes



2.3.2 U_corridor

De corridor van de proefkas is naar het zuiden gericht en heeft een dubbele wand: een glasplaat met daarvoor een laag PVDF-folie van 40 micron.

Voor de berekening van U_{corridor} is eerst nagegaan of het temperatuurverschil tussen corridor en afdeling goed correleert met de gemeten warmtedoorgang. Deze relatie is weergegeven door de blauwe lijnen in de grafieken. Uit deze blauwe lijnen blijkt echter dat er geen stabiele U -waarde kan worden afgeleid. De oorzaak is dat het temperatuurverschil tussen afdeling en corridor klein is, terwijl de warmtedoorgang voornamelijk door straling wordt bepaald en dus dit temperatuursverschil geen goede correlator is.

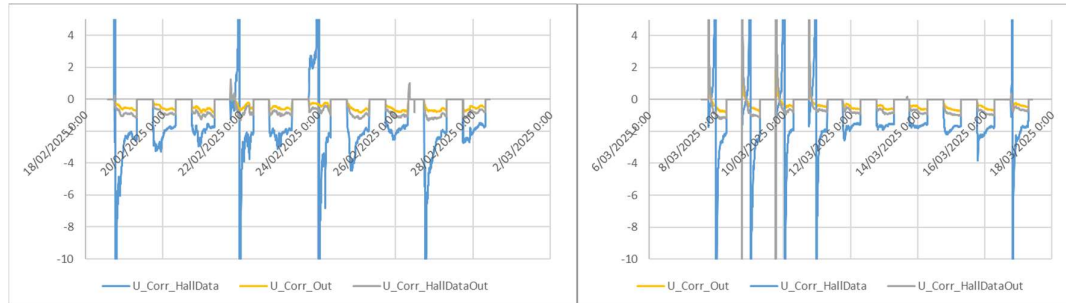


Fig. 10 Berekenende U -waardes tussen afdeling en corridor. De blauwe lijn toont de U -waarde die is berekend op basis van het gemeten temperatuurverschil van de lucht tussen afdeling en corridor. De overige lijnen worden in de volgende grafiek opnieuw weergegeven en daar verder toegelicht.

Omdat de gemeten corridortemperatuur weinig correlatie vertoont met de warmtedoorgang, is onderzocht of de warmtestroom door de zijwanden beter kan worden verklaard met het temperatuurverschil tussen de afdeling en de buitentemperatuur. Dit is weergegeven door de oranje lijnen in de voorgaande grafiek en in de onderstaande grafiek.

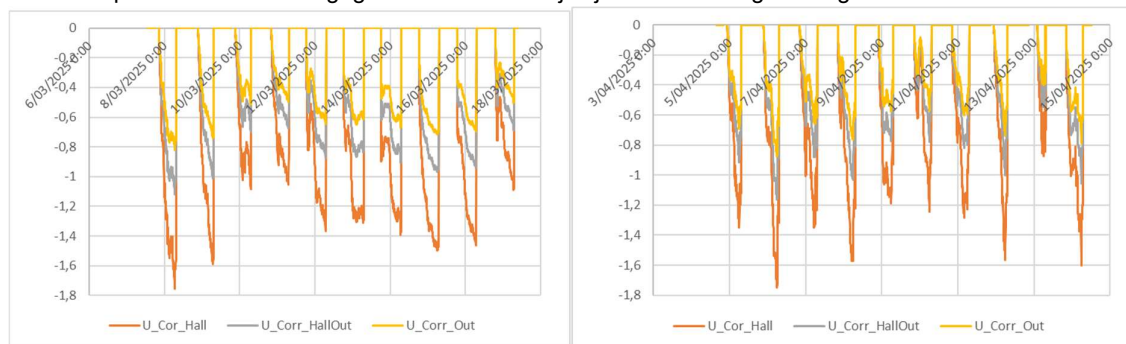


Fig. 11 Berekenende U -waardes tussen afdeling en corridor, waarbij de U -waarde telkens is berekend op basis van een ander luchttemperatuurverschil: oranje lijn: temperatuurverschil tussen afdeling en buiten, rode lijn: temperatuurverschil tussen de afdeling en de gemiddelde waarde van afdeling en buiten, grijze lijn: gemiddeld temperatuurverschil van de twee bovenstaande benaderingen

De oranje lijnen leveren een stabielere U -waarde op dan de U -waarde die wordt berekend op basis van het luchttemperatuurverschil tussen afdeling en corridor.

In de onderstaande grafiek is de spreidingswolk te zien van de U -waarde voor de corridor, berekend op basis van het temperatuurverschil tussen de afdeling en de buitentemperatuur.



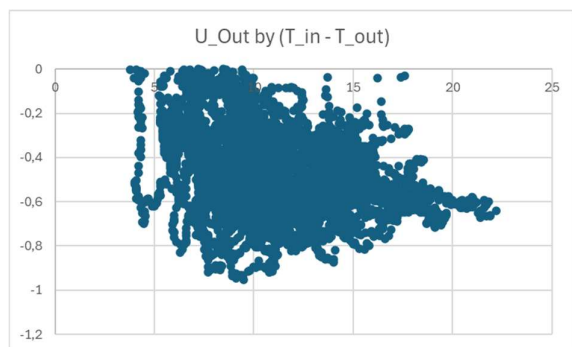


Fig. 12 Spreiding van de berekende U-waardes voor de corridor van de proefkas te PCH. De U-waardes zijn berekend op basis van de temperatuursverschil tussen de afdeling en de buitentemperatuur.

Op basis van de grafiek wordt een warmteoverdrachtswaarde naar de corridor (U_{corr}) van 0,5 voorgesteld. Voor de berekening van de warmteoverdracht moet deze U-waarde vermenigvuldigd worden met het temperatuursverschil tussen kas en buitenlucht. Daarbij is het belangrijk te vermelden dat deze U-waarde afhankelijk is van het ingestelde klimaat in de corridor en dat er een grote spreiding in de meetgegevens optreedt, waardoor de precisie beperkt is.

2.3.3 U_{Afd}

De testafdeling is vooral omgeven door andere proefkassen (zie Fig. 7). Wat betreft oppervlakte is dit de belangrijkste buurafdeling.

5 warmtedoorgangssensoren werden opgehangen aan de noordzijde van de afdeling.

Het eerste wat opvalt bij de analyse van de warmtedoorgangsmetingen ter bepaling van een U-waarde (op basis van het temperatuursverschil tussen compartimenten), is dat wanneer het luchttemperatuurverschil aan beide zijden kleiner is dan $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, een warmtestroom in beide richtingen kan worden gemeten, onafhankelijk van welke zijde op dat moment warmer is. Dit wijst erop dat verschillen in stralingstemperatuur doorslaggevend zijn en dat de luchttemperatuur aan beide zijden deze verschillen onvoldoende weergeeft.

In grafiekvorm resulteert dit in een afwisseling van positieve en negatieve U-waarden, gecombineerd met een grote spreiding (zie grafiek hieronder). Deze verschillen in stralingstemperatuur hangen samen met de schermstanden tussen beide afdelingen en met het type scherm dat tussen de afdelingen aanwezig is (voor een nadere toelichting, zie hfdst.

Error! Reference source not found.).

Op basis van dergelijke wisselende U-waarden is het niet mogelijk een representatieve gemiddelde U-waarde te bepalen. Daarom wordt voor de berekening van een gemiddelde U-waarde uitsluitend gebruikgemaakt van data waarbij het temperatuursverschil tussen beide afdelingen minimaal $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ bedraagt (zie oranje lijn in de grafiek hieronder). In dat geval verdwijnen de wisselende positieve en negatieve U-waarden.



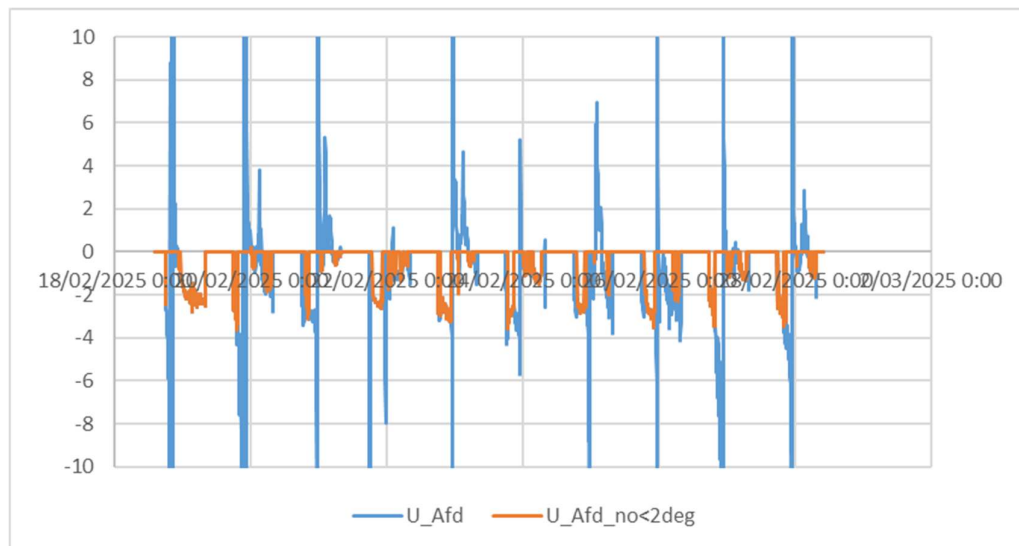


Fig. 13 U-waarde tussen afdeling en buurafdeling op basis van luchttemperatuursverschil. Blauwe lijn voor alle optredende luchttemperatuursverschillen tussen beide afdelingen, orange lijn als deze temperatuursverschillen minimaal 2°C zijn.

De grafiek hieronder heeft dan de spreiding voor die U-waardes bij temperatuursverschillen groter dan 2°C.

De conclusie hiervan is:

- We zien een toename van de spreiding bij kleinere temperatuursverschillen
- Deze spreidingstoename is wel symmetrisch, waardoor het inschatten van een gemiddelde U-waarde ook geldig is voor <2°C temperatuursverschil.
- Als gemiddelde waarde nemen we $U = -2 \text{ W/m}^2/\text{K}$

Deze waarde is iets lager dan je theoretische zou verwachten.

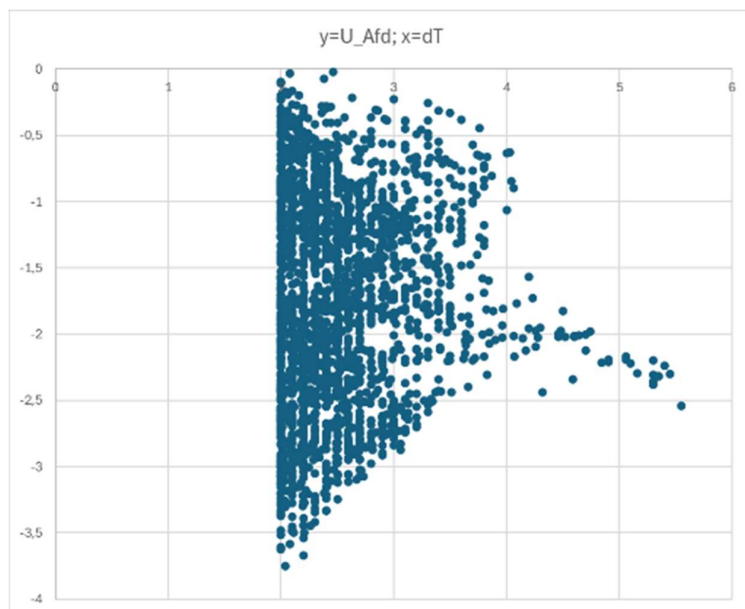


Fig. 14 Gemeten U-waardes tussen 2 afdelingen te PCH



2.4 Warmtedoorgangsmetingen te PSKW

Op het PSKW waren minder sensoren op de zijwanden opgehangen dan in PCH (zie vorig hoofdstuk 2.3). Dit komt omdat het in het PSKW enkel de bedoeling was sensoren op te hangen voor de omstandigheden die niet vergelijkbaar waren met de situatie in het PCH.

Zo kunnen we veronderstellen dat ook in het PSKW ongeveer dezelfde overdrachtsscoëfficiënten geldig zijn voor de zijwanden tussen 2 proefkassen ($U=2 \text{ W/m}^2/^\circ\text{C}$) gezien de vergelijkbare omstandigheden. Er werd dan ook gekozen om op deze zijwanden te PSKW geen sensoren op te hangen.

Echter de zijwanden gericht naar de corridor is geen vergelijkbare omstandigheid. De corridorzijwanden (zie Fig. 15) waren dan ook voorzien van warmtedoorgangssensoren. Echter zowel afdeling 6 als 7 hebben een corridor gericht naar een kas met tomaat. Echter afdeling 7 is ook een lange zijde gericht naar een sla-afdeling (afd. 8, zie Fig. 15). Gezien deze afdeling op een lagere temperatuur staat en gezien de warmteoverdracht vooral door straling plaatsvindt, is het te veronderstellen dat de warmteoverdracht naar afdeling 8 beter gecorreleerd wordt aan het temperatuursverschil tussen afdeling 7 en 8.

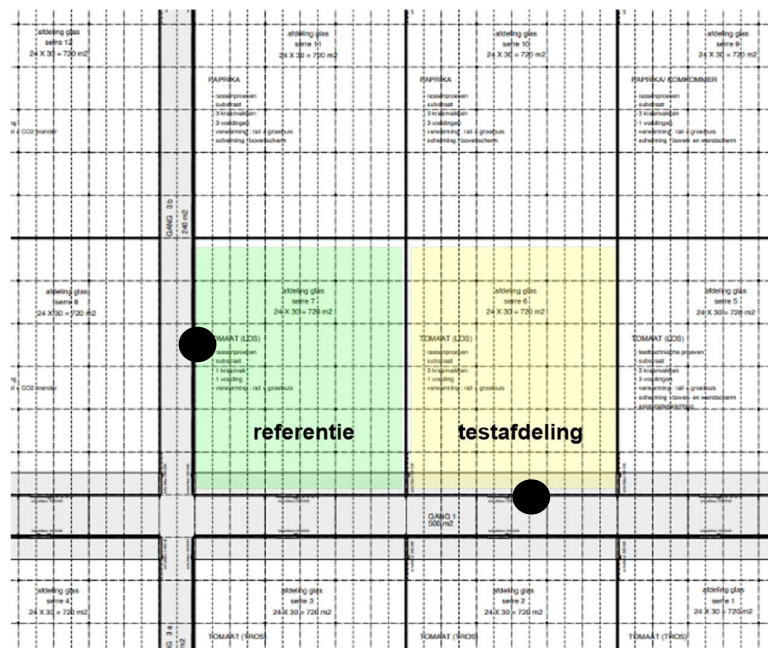


Fig. 15 De testafdeling en referentieafdeling van de teeltproeven in ENERGLIK in het PSKW. Zowel de testafdeling als referentieafdeling hebben zijwanden gericht naar de corridor. De warmtedoorgangssensoren (zwarte bollen) werden opgehangen op deze zijwanden.

De grafiek hieronder heeft de warmteoverdrachtswaarde weer tussen de afdelingen 6 en 7 en de corridor waarbij deze beide afdelingen gericht zijn naar de tomatenafdelingen 2 en 3.

Op basis van deze grafiek stellen we als overdrachtswaarde $2.5\text{-}3\text{ W/m}^2/\text{K}$ voor over het temperatuursverschil tussen de afdeling en de corridor luchttemperatuur.

Het valt daarbij op dat de overdrachtswaarde naar de corridor groter is dan naar de buurafdelingen ($U=2\text{ W/m}^2/\text{K}$). Dit komt ongetwijfeld om dat de corridor geen schermen heeft waardoor de afdelingen voor een deel een kouder kasdek zien. Dit verklaart de hogere warmteoverdrachtswaarde.



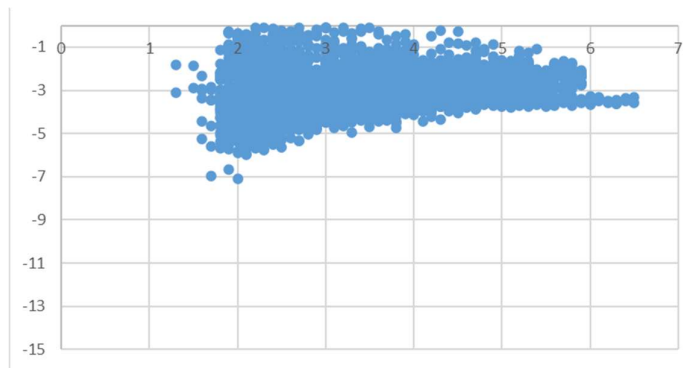


Fig. 16 Warmteoverdrachtswaarde tussen de afdelingen 6 en 7 en de corridor voor de zijden van deze afdelingen gericht naar een tomatenafdeling.

Voor de zijwand van afdeling 7, gericht naar de sla-afdeling, bedraagt de warmteoverdrachtswaarde naar de corridor 4 à 4,5 W/m²/°C, bepaald op basis van het temperatuursverschil tussen afdeling 7 en de corridor. Deze hogere overdrachtswaarde is een rechtstreeks gevolg van de uitstraling naar de sla-afdeling. Door deze invloed vertoont de berekende warmteoverdracht naar de corridor, gebaseerd op het temperatuursverschil met de corridor, een aanzienlijke spreiding.

Een iets betere correlatie wordt gevonden voor de warmteoverdracht van afdeling 7 naar de sla-afdeling, berekend op basis van het temperatuursverschil tussen afdeling 7 en de sla-afdeling (zie Fig. 17). Op basis van de puntenwolk wordt hiervoor een overdrachtswaarde van ongeveer 1,5 W/m²/°C afgeleid, uitgaande van het temperatuursverschil tussen afdeling 7 en sla-afdeling 8.

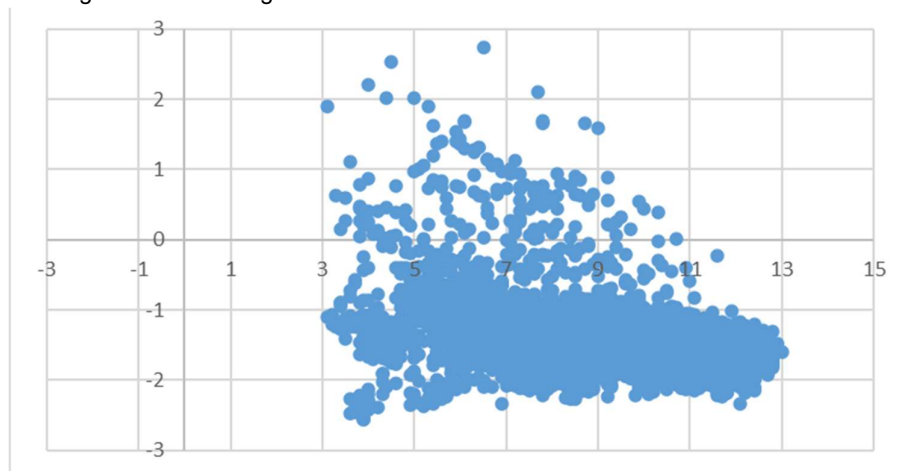


Fig. 17 Gemeten warmteoverdrachtswaarden tussen afd. 7 en sla-afdeling doorheen de corridor.

2.5 De fout op de berekende netto-energie door de onnauwkeurige inschatting van de wanden

In de voorgaande hoofdstukken werden de U-waarden, berekend op basis van warmtedoorgangsmetingen, gepresenteerd voor de verschillende types zijwanden van de proefkassen in PSKW en PCH. Daarbij werd vastgesteld dat deze U-waarden een aanzienlijke spreiding vertonen. Voor de bepaling van het netto energieverbruik werd daarom de gemiddelde U-waarde gebruikt als beste schatter.

Voor de bepaling van de fout op het netto energieverbruik wordt uitgegaan van vergelijking 1, die hieronder opnieuw wordt weergegeven:



$$\dot{Q}_{NET,test} = \dot{Q}_{BR,test} + \sum_{i=1}^n \dot{Q}_{i \rightarrow test}$$

Met

- $\dot{Q}$ de warmtestroom naar de testafdeling (J/s)

Deze vergelijking wordt gedeeld door de grondoppervlakte van de kas, resulterend in:

$$q_{NET,test} = q_{BR,test} + \sum_{i=1}^n a_i q_{i \rightarrow test} \quad 24$$

Met

- $q_{NET,test}$ de warmteflux (per m² kasoppervlak)(W/m²)
- $q_{i \rightarrow test}$ de warmteflux voor zijwand i (W/m²)
- a_i de relatieve oppervlakte van zijwanden i (m²/m²)

In vorige vergelijking, wordt de U waarde tussen de afdelingen geïntegreerd, resulterend in:

$$q_{NET,test} = q_{BR,test} + \sum_{i=1}^n a_i U_{i \rightarrow test} \Delta T_{i \rightarrow test} \quad 25$$

Op basis van voorgaande vergelijking, wordt de vergelijking voor de fout op $q_{NET,test}$ afgeleid:

$$err(q_{NET,test}) = \sqrt{(err(q_{BR,test}))^2 + err\left(\sum_{i=1}^n a_i U_{i \rightarrow test} \Delta T_{i \rightarrow test}\right)} \quad 26$$

In dit hoofdstuk gaat het over het tweede deel van de foutvergelijking dat overeenstemt met de error voortvloeiend uit de zijwanden. Het eerste deel wordt hier buiten beschouwing gelaten.

Om een inschatting te hebben van de error voortvloeiend uit de zijwanden, wordt vertrokken van volgende condities:

- 4 type zijwanden, allemaal gericht naar andere proefkassen
- a_i is 0.25 m²/m²
- $\Delta T_{i \rightarrow test}$ bedraagt 2.5°C tot de buurafdeling op basis van de gemiddelden gemeten te PCH in 2024 (zie tabel)

Tabel 1: Gemiddelde temperatuursverschil tussen afdeling 19 (testafdeling) en zijn buurafdelingen te PCH. De gemiddelde temperatuursverschillen betreffen de momenten als de testafdeling verwarmd wordt ($q_{BR,test} > 5$). |dT| betreft het gemiddelde absolute temperatuursverschil, dT het gemiddelde van de positieve en negatieve temperatuursverschillen.

	afd. 17	afd. 15	afd.7	afd.6
dT	2.6	2.8	1.2	3.5
dT	2.1	2.5	-0.5	2.3

Integratie van de voorgaande elementen, wordt vergelijking 26 :

$$err(q_{NET,test}) = err\left(\sum_{i=1}^4 0.25 \cdot 2.5 U_{i \rightarrow test}\right)$$

Bij de uitwerking hiervan dient te worden nagegaan of de fouten op de U-waarden van de verschillende afdelingen onderling gecorreleerd dan wel onafhankelijk zijn. In deze analyse wordt ervoor gekozen deze fouten als gecorreleerd te beschouwen, aangezien zij vaak samenhangen met schermstanden of hemeltemperaturen. Dit resulteert in:

$$err(q_{NET,test}) = 2.5 err(U_{i \rightarrow test})$$

Op basis van Fig. 14 wordt de error ingeschat als +3W/m²/°C, dit integrerend resulteert in:



$$err(q_{NET,test}) = 7.5 \text{ W/m}^2 \quad 27$$

Uit dit resultaat volgt dat zijwanden naar andere proefkassen met een gelijkaardig klimaat, een beperkte invloed hebben op de energiemetingen.

Een grotere bijdrage aan de totale fout is vooral te verwachten van zijwanden die gericht zijn naar buiten of naar de corridor. Zo beschikt de proefkas in PCH over 10% buitenzijwand. Tijdens de verwarmingsperiode in 2024 heerste over deze buitenzijwand een gemiddeld temperatuursverschil van 11 °C, wat resulteert in een fout van:

$$err(q_{NET,test,buitenwand}) = 10\% \cdot 1.5 \cdot 11 = 1.6 \text{ W/m}^2 \quad 28$$

Hierbij

- 1.5 is de fout op de U-waarde van de zijwand volgens Fig. 9

Verder kan worden verwacht dat ook voor zijwanden die gericht zijn naar de corridor een grotere fout optreedt dan voor zijwanden tussen proefkassen, als gevolg van de grotere temperatuursverschillen. Gedetailleerde berekeningen zijn hiervoor niet beschikbaar, maar op basis van de voorgaande vergelijkingen 27 en 28 wordt een benaderende schatter voor de fout op de warmteflux ingeschat als:

$$err(q_{NET,test}) = 10 \text{ W/m}^2 \quad 29$$

De volgende stap is de jaarrond integratie, met de omvorming van de fout op $q_{NET,test}$ (warmteflux per m² grondopp.) naar de fout op $Q/A_{NET,test}$ (warmtevraag per oppervlakte).

Voor de foutberekening worden de volgende aannames gehanteerd:

- De fout over een langere periode wordt uitgemiddeld richting de gemeten gemiddelde U-waarde. Indien deze gemeten gemiddelde U-waarde overeen zou stemmen met de werkelijke gemiddelde U-waarde tussen de verschillende afdelingen, zou de fout reduceren tot nul. De metingen betreffen echter slechts één zijwand en zijn uitgevoerd gedurende een beperkte nachtperiode, niet gedurende de dag en ook niet over een gans jaar. Hierbij wordt ingeschat dat het middelen over een langere periode de fout met 50% reduceert. De andere 50% wordt dus ingeschat als een gevolg van onvoldoende nauwkeurige gemiddelden.
- In 2024 werd de kas gedurende 34% van de proefkasttijd verwarmd. De proefperiode beslaat 300 dagen.

Door deze aannames te integreren, resulteert dit in fout op warmtevraag per m² over de volledige teeltproef:

$$err(Q/A_{NET,test}) = 300 \cdot 10 \cdot 0.34 \cdot 24 \cdot 0.5 = 12 \text{ kWh/m}^2 \quad 30$$

Op basis van de uitgevoerde heatfluxmetingen is vastgesteld dat, mits voldoende relevante U-waarden voor de zijwanden beschikbaar zijn, de fout door de zijwanden ongeveer 12 kWh/m²/jaar bedraagt.

Gezien de energievraag in de proefkassen gedurende het ENERGLIK-project veel groter is — ongeveer 100 kWh/m²/jaar in de klimaatneutrale teeltproefkassen en circa 250 kWh/m²/jaar voor de referentie — kan met zekerheid worden gesteld dat de waargenomen warmtevraagreductie het gevolg is van de toegepaste schermen en klimaatstrategie, en niet van effecten van de zijwanden.

Bovendien kan met zekerheid worden aangenomen dat het opschalen van de klimaatneutrale technieken zoals toegepast in de proefkassen, vergelijkbare resultaten zal opleveren binnen de genoemde foutmarge.

2.6 Conclusies

Gedurende de teeltproeven te PCH en PSKW in 2024 en 2025 werd de warmtedoorgang door de zijwanden gemeten met BaSO₄-gecoate heatflux-sensoren. De warmtedoorgangscoefficienten, berekend op basis van deze meetgegevens



voor de verschillende zijwandtypes, tonen een grote variatie. Dit is voornamelijk het gevolg van verschillen tussen stralingstemperatuur en luchttemperatuur aan beide zijden van de wand: De stralingstemperatuur wordt sterk beïnvloed door de gebruikte schermen aan beide zijden en door de hemeltemperatuur en dit is niet weerspiegelt in de gemeten luchttemperatuur.

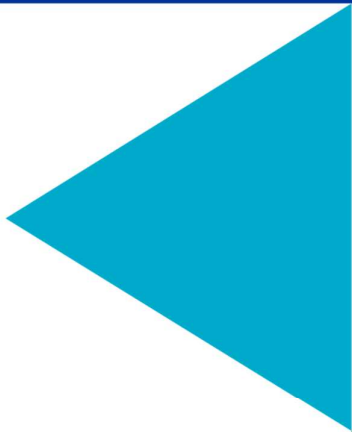
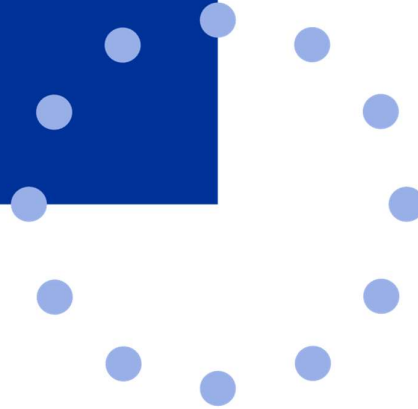
Voor zijwanden die naar de corridor zijn gericht, biedt de corridortemperatuur vaak geen representatieve maatstaf; in dat geval is het beter om de luchttemperatuur aan de andere zijde van de corridor te gebruiken.

De variatie in de warmtedoorgangscoefficiënt werd omgerekend naar een fout op de energiemetingen. Deze fout wordt ingeschat op ongeveer 10 W/m^2 proefkas voor de momentane warmtevraag en 12 kWh/m^2 proefkas voor de jaarrond warmtevraag. Deze foutmarges kunnen worden toegepast op de teeltproeven uitgevoerd te PCH en PSKW in 2024 en 2025.

Indien deze foutmarges ook in andere teeltproeven worden gebruikt, is het belangrijk om, net zoals in de beschreven proeven, correlaties te definiëren voor de zijwanden die overeenkomen met de configuratie van de specifieke teeltproef. Indien dit niet gebeurt, zullen de foutmarges groter zijn.



3. Lekventilatieproefkassen en hun invloed op de energieprestatie



3.1 Theorie

Lek staat voor ongecontroleerde en ongewenste ventilatie van de kas. Deze lekverliezen kunnen het gevolg zijn van windinvloed of van natuurlijke trek veroorzaakt door temperatuurverschillen. Lek leidt tot een lagere energieprestatie van de kas, doordat zowel voelbare als latente warmte wordt afgevoerd op momenten waarop dit niet gewenst is. Lek kan worden bepaald door het volgen van de evolutie van de concentratie van een tracergas. In deze studie wordt CO₂ als tracergas gebruikt. De evolutie van de CO₂-concentratie wordt beschreven door:

$$-\frac{d(\rho_{CO_2,in})}{d(t)} H = \frac{(\rho_{CO_2,in} - \rho_{CO_2,out})}{r_{leak}}$$

With

- $\rho_{CO_2,in}$ CO₂ concentration inside (kg/m³)
- H hoogte kas (m)
- r_{leak} is de lekweerstand van de kas (s/m), omgekeerde van luchtdoorlaatbaarheid
- t is tijd (s)

Bij integratie, levert dit:

$$\int -\frac{d(\rho_{CO_2,in})}{(\rho_{CO_2,in} - \rho_{CO_2,out})} = \int \frac{d(t)}{H \cdot r_{leak}}$$

$$LN \left[\frac{(\rho_{CO_2,in} - \rho_{CO_2,out})_{begin}}{(\rho_{CO_2,in} - \rho_{CO_2,out})_{end}} \right] = \frac{\Delta t}{H \cdot r_{leak}}$$

$$r_{leak} = \frac{\Delta t}{H \cdot LN \left[\frac{(\rho_{CO_2,in} - \rho_{CO_2,out})_{begin}}{(\rho_{CO_2,in} - \rho_{CO_2,out})_{end}} \right]}$$

31

$$\rho_{CO_2,in} = \rho_{CO_2,out} + (\rho_{CO_2,in} - \rho_{CO_2,out})_{begin} e^{-\frac{\Delta t}{H \cdot r_{leak}}}$$

3.2 Lekventilatie in de praktijk

Er werden metingen uitgevoerd te PSKW eind 2024 (klein gewas) met scherm(folie) en zonder scherm. De CO₂ concentratie werd gemeten in het midden van de afdeling op een hoogte van bij benadering 2m. De grafieken hieronder geven de evolutie van de CO₂, schermstanden en windsnelheden buiten weer. De tabel daaronder heeft het verwerkte resultaat van de data met behulp van de vergelijking van lekweerstand.



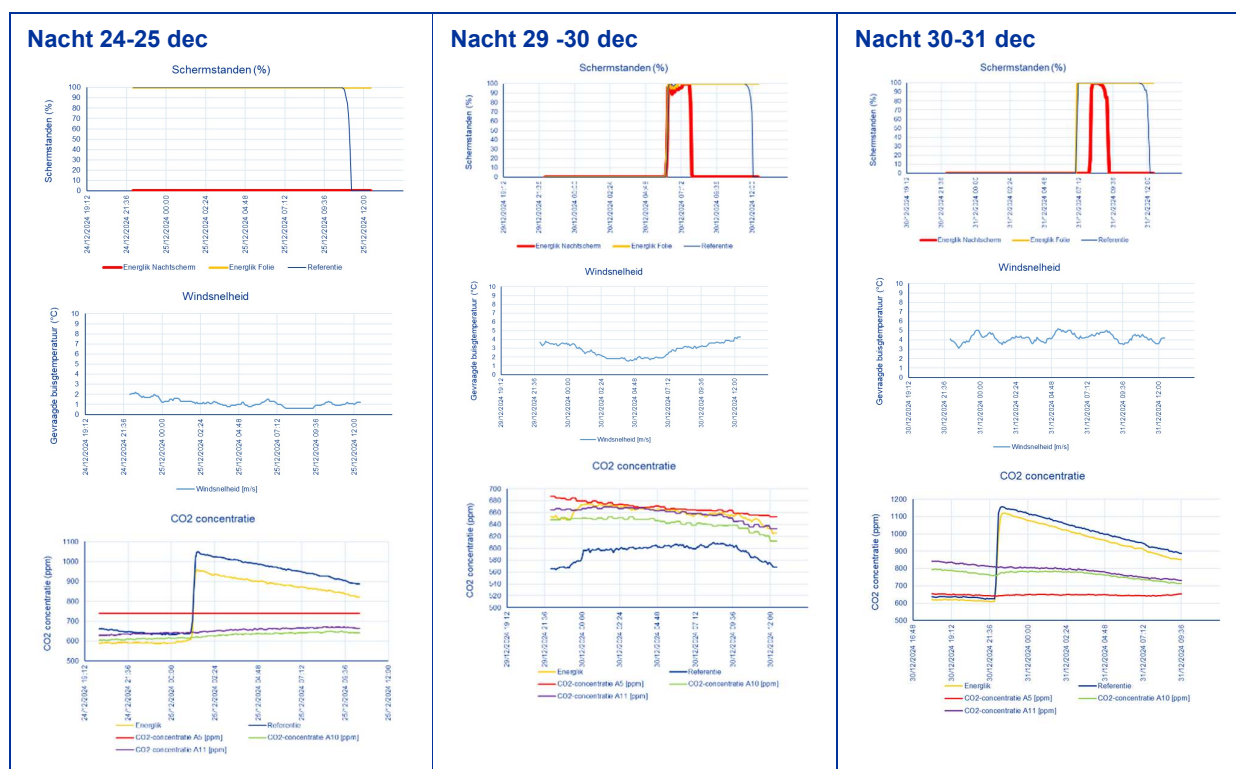


Fig. 18 : Grafieken van de lekproeven. Voor de localisatie van de verschillende afdelingen, zie Fig. 15

Tabel 2: Data van lekproeven te PSKW en berekend resultaat van lekweerstand van de kas. Gebruikte kashoogte is 6.5m. r_{leak} werd berekend volgens vergelijking 31.

	24/12 met scherm		30/12 zonder scherm	
	A6 (ENERGLIK)	A7 (REF)	A6 (ENERGLIK)	A7 (REF)
ppm begin	952	1037	1117	1154
ppm end	862	940	915	960
ppm eq=ppm out	600	600	600	600
time start	25/12/2024 01:35	25/12/2024 01:40	30/12/2024 22:40	30/12/2024 22:30
time end	25/12/2024 07:45	25/12/2024 07:50	31/12/2024 06:50	31/12/2024 06:40
r_{leak} (s/m)	11254	13240	8943	10279
U_{leak_max} (W/m ² /K)	0.11	0.10	0.14	0.12
v_{wind} (m/s)	0.97		4.28	

3.3 Discussie en conclusies

De CO₂-evenwichtsconcentratie in de kas en in de naburige kassen bevindt zich in de range van 600–700 ppm. Dit blijkt uit de evenwichtsconcentraties die worden bereikt, zoals weergegeven in de middelste grafiek van Fig. 18. Deze hogere CO₂-evenwichtsconcentratie ten opzichte van de buitenlucht kan worden verklaard door enerzijds de respiratie van de aanwezige (kleine) planten, en anderzijds doordat de binnenkomende lucht bij lekverliezen vermoedelijk niet afkomstig is van boven het kasdek (buiten), maar eerder uit aangrenzende afdelingen waar een vergelijkbaar CO₂-niveau heerst.



Het bereiken van de CO₂-evenwichtsconcentratie blijkt niet bepaald te worden door de aanwezigheid van schermen en vertoont slechts een beperkte correlatie met de windsnelheid. Zo was tijdens de proef van 30/12 de windsnelheid viermaal hoger dan op 24/12, terwijl op 30/12 geen scherm aanwezig was en op 24/12 wel. Desondanks was de berekende weerstand bij de hogere windsnelheid en zonder scherm slechts beperkt lager (ongeveer 9000 s/m tegenover 11 000 s/m). Dit wijst erop dat zowel windsnelheid als schermgebruik wel een invloed hebben op de luchtuitwisseling, maar dat deze invloed beperkt blijft. Waarschijnlijk is de luchtuitwisseling tussen de verschillende afdelingen in deze proefkassen meer bepalend, maar bewijzen hebben we hiervoor niet op basis van metingen.

De berekende lekweerstand r_{leak} kan bij benadering worden opgevat als de som van het lek tussen de afdeling en de buitenlucht enerzijds, en tussen de afdeling en de naburige afdelingen anderzijds. Indien voor het berekenen van de thermische verliezen door de lek naar buiten wordt verondersteld dat de volledige lek uitsluitend het gevolg zou zijn van uitwisseling met de buitenlucht — wat, gezien de beperkte correlatie met windsnelheid, weinig waarschijnlijk is — kan r_{leak} worden omgerekend naar een equivalente U-waarde volgens:

$$U_{leak} = \frac{\rho_a c p_a}{r_{leak}}$$

Waarbij

- ρ_a is de dichtheid van de lucht (kg/m³)
- $c p_a$ is de warmtecapaciteit van de lucht (J/kg/°C)

De parameter U_{leak} geeft inzicht in het voelbare warmteverlies als gevolg van lekverliezen en kan worden vergeleken met de U-waarde van de kas. Typische U-waarden van kassen liggen in de orde van 1 tot 6 W/m²K, afhankelijk van het aantal ingezette schermen. Een U_{leak} van ongeveer 0,1 W/m²K vertegenwoordigt in vergelijking hiermee een relatief beperkte bijdrage. Bij deze vergelijking dienen echter enkele belangrijke nuances in rekening te worden gebracht.

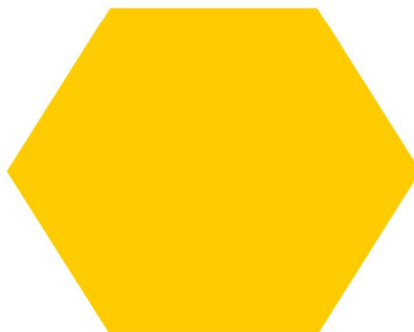
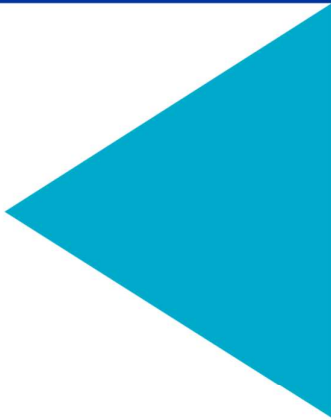
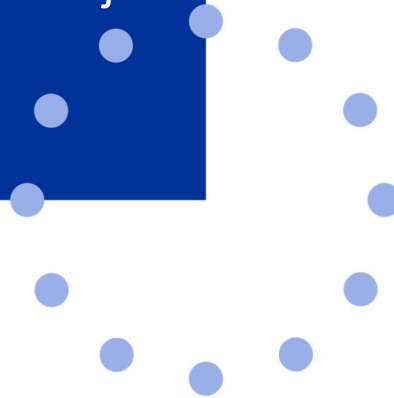
- Indien de kas voornamelijk lekt boven het scherm, zal het warmteverlies kleiner zijn dan wanneer de lek optreedt onder het scherm, aangezien de lucht boven het scherm kouder is dan de kaslucht. Dit effect wordt sterker bij het gebruik van meerdere schermen. Voor de beoordeling van de thermische impact van lekverliezen is het daarom enkel zinvol U_{leak} rechtstreeks te vergelijken met de U-waarde van de kas zonder schermen; bij toepassing van schermen kan U_{leak} bij benadering worden gedeeld door het aantal ingezette schermen bij het vergelijken van de thermische verliezen met de U_{kas} .
- Daarnaast veroorzaken lekverliezen niet alleen voelbaar warmteverlies, maar ook verlies van latente warmte. Ook hier geldt dat, door condensatie aan het kasdek en/of de damptransportweerstand van het scherm, de energetische impact afhangt van het aantal ingezette schermen.

Op basis van deze analyse kan worden geconcludeerd dat de thermische bijdrage van lekverliezen beperkt is. Voor een kas met enkel glas bedraagt het extra warmteverlies door lek ongeveer 2% op basis van het vergelijken tussen U_{leak} en U_{kas} met een vergelijkbare bijkomende bijdrage van energieverlies via latente warmte. Voor kassen met schermen blijven deze percentages bij benadering geldig, aangezien de lekkende lucht kouder en minder vochtig is.

De eindconclusie luidt dat op basis van de uitgevoerde metingen kan worden vastgesteld dat de proefkassen, wat betreft lekverliezen, geschikt zijn om te worden ingezet voor een klimaatneutrale(re) teelt.



4. Warmtedoorgangsmetingen kasdek: een directe en nauwkeurige methode voor het meten van de prestatie van schermen in de praktijk.



4.1 Voorafgaand

De gebruikte warmtedoorgangssensoren werden reeds beschreven in hoofdstuk 2.2. Door deze sensoren aan de binnenzijde van het kasdek te plaatsen (zie Fig. 19) wordt een rechtstreeks beeld verkregen van de warmteoverdracht doorheen het kasdek. Op basis van deze metingen kan de isolatiecapaciteit van de combinatie scherm + kasdek in de praktijk worden bepaald en vergeleken met resultaten uit modelberekeningen van UGent en/of WUR. De warmtedoorgang door het kasdek is geen constante grootheid, maar varieert onder invloed van onder andere de buitensnelheid van de wind en de stralingstemperaturen aan de binnen- en buitenzijde van de kas. Bij het vergelijken van gemeten waarden met modelmatige berekeningen moeten deze invloedsfactoren dan ook expliciet in rekening worden gebracht.

Naast warmtedoorgangsmetingen bestaan er andere methoden om de warmtestroom doorheen het kasdek te bepalen, zoals netto-energiemetingen op basis van de warmtetoevoer via de verwarmingsbuizen (hoofdstuk 2) of metingen met warmtestralingsmeters (pyrgeometers) in de kas.

Het gebruik van warmtedoorgangssensoren biedt echter duidelijke voordelen ten opzichte deze methoden.

Zo heeft de berekening van het netto energieverbruik op basis van de gemeten bruto warmtevraag een momentane fout van ongeveer 10 W/m^2 (zie vergelijking 29) voor de proefkassen van PSKW en PCH. Voor het in de praktijk bepalen van het isolatievermogen van isolerende schermen of scherm pakketten is deze fout relatief groot en laat zij geen betrouwbare conclusies toe. Warmtedoorgangssensoren daarentegen hebben een nauwkeurigheid in de orde van 1 W/m^2 .

Bovendien komt de momentane netto warmtevraag, bijvoorbeeld uitgedrukt als warmteflux in W/m^2 grondoppervlak (zie hoofdstuk 2 voor de berekeningswijze), niet overeen met de warmtedoorgang door het kasdek. Dit verschil wordt veroorzaakt door capacatieve effecten van de thermische massa onder het scherm, in hoofdzaak de bodem.

Samengevat zijn energiemetingen op basis van het verwarmingssysteem onvoldoende nauwkeurig voor het beoordelen van de isolatiecapaciteit van schermen.

Ook meetmethoden die gebruikmaken van warmtestralingsmeters onder het kasdek leveren geen volledig beeld van de warmtestromen, aangezien zij slechts één component van de totale warmteoverdracht meten, namelijk straling.

Daarnaast zijn deze meetinstrumenten gevoelig voor storingen en meten zij vaak slechts binnen een beperkte hoek, terwijl warmtestraling in de kas in alle richtingen (180°) wordt uitgewisseld.

Warmtedoorgangsmetingen zijn in dit kader dan ook bijzonder geschikt, omdat zij alle relevante warmtestromen aan een gesloten kasdek registreren, namelijk:

- warmtestraling die het kasdek bereikt,
- convectieve warmteoverdracht via de kaslucht,
- warmtetoevoer naar het kasdek ten gevolge van condensatie, via convectieve massaoverdracht.

(Voor lezers die minder vertrouwd zijn met deze begrippen wordt verwezen naar standaardwerken uit de warmteoverdrachtsleer, zoals Lienhard IV en Lienhard V (2008).)

Ten slotte is het voor de volledigheid belangrijk te vermelden dat warmtedoorgangssensoren geen luchtlekken detecteren. In hoofdstuk 3 werd deze lekkage op basis van praktijkmetingen gekwantificeerd en bleek zij verantwoordelijk voor maximaal 2 à 4% extra energieverlies. Voor de beoordeling van schermen met behulp van warmtedoorgangssensoren is deze afwijking echter niet bepalend.

Bij de vergelijking tussen modelresultaten en warmtedoorgangsmetingen maken de modellen gebruik van schermeigenschappen die in het laboratorium zijn gemeten. Er moet hierbij een voldoende mate van overeenstemming worden gevonden tussen de modelresultaten en warmtedoorgangsmetingen. De warmtedoorgangsmetingen fungeren in dit opzicht als validatie van het voorafgaande werk rond kasmodellen en schermmeetapparatuur en zijn een noodzakelijke stap richting normering en standaardisering van schermen zoals beschreven in het rapport van (Bronchart, 2025)



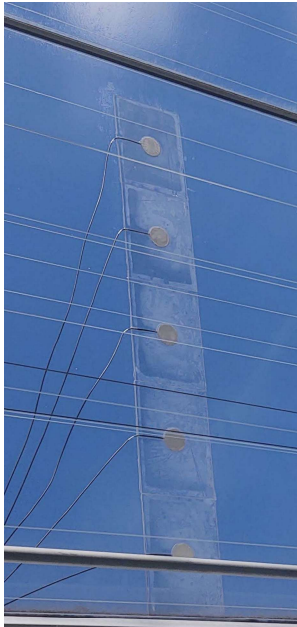


Fig. 19 Warmtedoorgangssensoren zoals geplaatst op het kasdek te PCH tijdens de teeltproeven van 2024 en 2025. 5 sensors werden hierbij boven elkaar geplaatst om eventuele connectieve verschillen te kunnen in kaart te brengen. Zie verder.

4.2 Berekeningsmethodiek

De algemene vergelijking voor de U-waarde van een kasdek met schermen is:

$$U_{kas+scr} = \frac{1}{R_{kas+scr}} = q_{kas+scr} / (T_{av,kas} - T_{av,o}) \quad 32$$

Waarbij:

- q_{kas} is de kasdekwarmteflux berekend per grondoppervlakte eenheid (W/m^2)
- $T_{av,o}$ is de gemiddelde buitentemperatuur (in K, zie verder)
- $T_{av,kas}$ is de gemiddelde kas temperatuur (in K, zie verder)
- $R_{kas+scr}$ de thermische weerstand van kas en schermen samen ($m^2 K/W$)
- U_{kas+s} de warmtedoorgangscoefficient van kas en schermen samen ($W/m^2/K$)

(in dit hoofdstuk 4 werken we enkel met temperatuur uitgedrukt in Kelvin voor het eenvoudiger kunnen berekenen van de warmtestralingsuitwisseling)

De warmteflux q_{kas} kan berekend worden uit de metingen met de warmtedoorgangssensoren mits rekening te houden met de kasdekelling:

$$q_{kas} = \frac{q_{HF}}{\cos(\theta)}$$

Waarbij:

- q_{HF} de gemeten warmteflux doorheen het glas met de huksefluxsensoren (W/m^2)
- θ is de dakhelling

De gebruikte gemiddelde buitentemperatuur ($T_{av,o}$ in vergelijking 32) is nog niet bepaald. Er zijn twee relevante buitentemperaturen, namelijk de hemeltemperatuur en de buitenluchttemperatuur. Indien voor de berekening van de U-waarde de hemeltemperatuur als $T_{av,o}$ wordt gebruikt, resulteert dit in een aanzienlijk lagere U-waarde dan wanneer de buitenluchttemperatuur wordt gehanteerd.



Dit roept de vraag op welke definitie van $T_{av,o}$ het meest geschikt is om de U-waarde te bepalen op een manier die niet, of slechts in beperkte mate, afhankelijk is van de helderheid van de hemel (bijvoorbeeld heldere versus bewolkte omstandigheden).

Voor de bepaling van een relevante $T_{av,o}$ wordt vertrokken van de energiebalans vanaf de buitenkant van het kasdek:

$$q_{kas} = (T_{cov} - T_{a,o}) \frac{h_{conv,o}}{\cos(\theta)} + \varepsilon \sigma (T_{cov}^4 - T_{sky}^4) \quad 33$$

Met

- q_{kas} is warmteoverdracht per m² grondoppervlak
- Θ is de dakhelling
- $T_{a,o}$ de buitenluchttemperatuur (K)
- T_{sky} de hemeltemperatuur (K)
- $h_{conv,o}$ is de warmte convectie coëfficiënt buiten (W/m²/K)

Hierbij stelt de eerste term de convectieve warmteoverdracht voor en de tweede term de stralingsoverdracht. De eerste term behoeft geen verdere toelichting voor degenen vertrouwd met basiskennis in warmteoverdracht. Voor de tweede term hoeft de dakhelling noch een vormfactor (F) in rekening te worden gebracht. Dit volgt uit het feit dat bij stralingsoverdracht het product van vormfactor en oppervlak voor uitwisselende oppervlakken gelijk moet zijn (voor uitleg vormfactoren, zie Lienhard IV & Lienhard V, 2008) en dus:

$$F_{cov} A_{cov} = A_{hor} F_{ho} = A_{ho}$$

Waarbij

- F_{cov} is de vormfactor van de cover die straalt naar de hemel
- A_{cov} is de oppervlakte van het kasdek
- A_{hor} is de equivalente oppervlak van A_{cov} maar horizontaal
- F_{ho} is de horizontale viewfactor van het kasdek naar de hemel (=1)

Met andere woorden: hoewel een grotere dakhelling leidt tot een groter effectief kasdekoppervlak A_{cov} , resulteert dit tegelijk in een kleinere viewfactor F_{cov} . Beide effecten compenseren elkaar, waardoor de dakhelling geen invloed heeft op de stralingsterm per horizontaal oppervlak en dus niet expliciet hoeft te worden meegenomen in de berekening.

Voorgaande vergelijking **33** kan herschreven worden door toepassing van het merkwaardig product op de T⁴ term tot:

$$q_{kas} \approx \frac{h_{conv,o}}{\cos(\theta)} (T_{cov} - T_a) + 4 T_{cov,sky}^3 \varepsilon \sigma (T_{cov} - T_{sky}) = \frac{h_{conv,o}}{\cos(\theta)} (T_{cov} - T_a) + h_{rad,o} (T_{cov} - T_{sky}) \quad 35$$

en

$$h_{rad,o} = 4 T_{co,sky}^3 \varepsilon \sigma$$

Waarbij:

- $T_{cov,sky}$ is een temperatuur bij benadering tussen T_{cov} en T_{sky} (bv het gemiddelde van beide temperaturen) (in K)
- $h_{rad,o}$ is de warmtestralingsoverdrachtscoëfficiënt buiten
- $T_{av,o}$ is de berekende gemiddelde buitentemperatuur op basis van bijdrage van $T_{a,o}$ en T_{sky} (K)

De vergelijking heeft 2 termen weer die beiden op dezelfde manier zijn opgebouwd

- 2 overdrachtstermen
- 2 temperatuursverschillen

Zoals aangegeven met vgl. 32 is het gewenst dat er gewerkt kan worden met 1 buitentemperatuur ($T_{av,o}$). In vergelijkingvorm wensen we dus:



$$q_{kas} \approx (T_{cov} - T_a) \frac{h_{conv,o}}{\cos(\theta)} + h_{rad,o} (T_{cov} - T_{sky}) = (T_{cov} - T_{av,o}) \left(\frac{h_{conv,o}}{\cos(\theta)} + h_{rad,o} \right) \quad 34$$

Door het uitwerken van de 2 delen van bovenstaande vergelijking kan $T_{av,o}$ berekend worden:

$$\begin{aligned} (T_{cov} - T_a) \frac{h_{conv,o}}{\cos(\theta)} + h_{rad,o} (T_{cov} - T_{sky}) &= (T_{cov} - T_{av,o}) \left(\frac{h_{conv,o}}{\cos(\theta)} + h_{rad,o} \right) \\ -T_a \frac{h_{conv,o}}{\cos(\theta)} - h_{rad,o} T_{sky} &= (-T_{av,o}) \left(\frac{h_{conv,o}}{\cos(\theta)} + h_{rad,o} \right) \\ T_{av,o} &= \frac{T_a \frac{h_{conv,o}}{\cos(\theta)} + h_{rad,o} T_{sky}}{\frac{h_{conv,o}}{\cos(\theta)} + h_{rad,o}} \end{aligned} \quad 36$$

Door het gebruik van $T_{av,o}$ als enkelvoudige buitentemperatuur, reduceren we de complexiteit in het weerstandsschema van de warmteoverdracht van het kasdek: ipv dat warmte overgebrachte wordt naar 2 putten, kan dit gereduceerd worden tot 1 put, en kan dus een R_{kas+s} of $U_{kas+scr}$ -waarde berekend worden voor het kasdek op basis van vgl. 32. Gezien de weerstand R_{kas+s} een gevolg is van de optelling van seriële weerstanden die optreden tijdens het warmtetransport van binnen de kas naar buiten, en gezien vgl 34 aantoon dat de seriële weerstand bij de laatste stap enkel bepaald wordt door de overdrachtscoëfficiënten $\left(\frac{h_{conv,o}}{\cos(\theta)} + h_{rad,o} \right)$ kunnen we concluderen dat $R_{kas+scr}$ weinig afhankelijk zal zijn van het verschil tussen hemeltemperatuur en buitenluchttemperatuur bij het gebruik van $T_{av,o}$ berekend volgens vgl. 36.

Voor $T_{av,kas}$ kan dezelfde afleiding gemaakt worden resulterend in:

$$T_{av,kas} = \frac{T_{a,kas} \frac{h_{conv,o}}{\cos(\theta)} + h_{rad,kas} T_{rad,kas}}{\frac{h_{conv,o}}{\cos(\theta)} + h_{rad,kas}}$$

De verschillen tussen binnenstralingstemperatuur ($T_{rad,kas}$) en luchttemperatuur ($T_{a,kas}$) zijn wel kleiner en kunnen als vereenvoudiging / bij gebrek aan data eventueel ook weggelaten worden.

Voor kunnen oplossen van voorgaande vergelijkingen moeten wel nog verschillende onbekenden berekend worden.

Voor $h_{rad,o}$ kan ervoor gekozen worden om een gemiddelde waarde te nemen:

$$h_{rad,o} = 4 T_{co\ sky}^3 \varepsilon \sigma = 0.94 \cdot 4 \cdot 278^3 \sigma = 4.58 \frac{W}{m^2 K}$$

Andere optie is het gebruik van de gemiddelde temperatuur tussen cover en hemel (maar de cover temperatuur moet dan berekend worden). Een vaste waarde is daarom gemakkelijker maar resulteert in een beperkte fout.

Voor ε wordt de emissiecoëfficiënt voor smooth glas gebruikt, uit (Lienhard IV & Lienhard V, 2008) halen we:

$$\varepsilon = 0.94$$

Voor $h_{conv,o}$ gebruiken we de metingen van (Bot, 1983)

$$h_{conv,o} = 2.3 + 1.7 v^{0.8}$$

Met

- v wind velocity outside in m/s

Deze vergelijking vertrekt van natuurlijke convectie met een U waarde van 2.3W/m²/K waaraan een extra forced convection term wordt toegevoegd. De macht 0.8 stemt overeen met forced convection modellen.



Op basis van deze berekeningsmethodiek zal in volgende hoofdstuk voor de warmtedoorgangsmetingen en klimaatmetingen te PSKW en te PCH de R_{kas+s} en U_{kas+s} waarden bepaald worden en vergeleken worden met modelleringen van UGent.

4.3 Resultaten en discussie

4.3.1 Plaats afhankelijke variabiliteit van de warmtedoorgangsmetingen

Op het PCH zijn vijf warmtedoorgangssensoren boven elkaar op het glas gemonteerd (zie Fig. 19). Tabel 3 geeft de correlatiecoëfficiënten van deze sensoren weer. Fig. 20 toont een voorbeeld van de meetresultaten. Hieruit blijkt dat de metingen met de 5 verschillende sensoren heel dicht bij elkaar liggen waardoor we kunnen concluderen dat de hoogte van ophanging op het glas geen merkbare invloed heeft op de warmtedoorgang; met andere woorden, de warmtedoorgang doorheen het glas kan als homogeen worden beschouwd.

Uit de figuur blijkt wel dat de vijf sensoren overdag licht verschillende meetwaarden registreren. Dit verschil is te verklaren doordat sommige sensoren meer aan licht worden blootgesteld dan andere, of doordat zij door bevulling van hun coating iets meer licht absorberen en resulteren in een licht afwijkende meting.

Tabel 3: De correlatiecoëfficiënten van de 5 opgehangen warmtedoorgangssensoren op het kasdek te PCH. D1 is de onderste sensor, D5 de bovenste.

D5	63.2
D4	64.49
D3	65.32
D2	64.7
D1	64.48

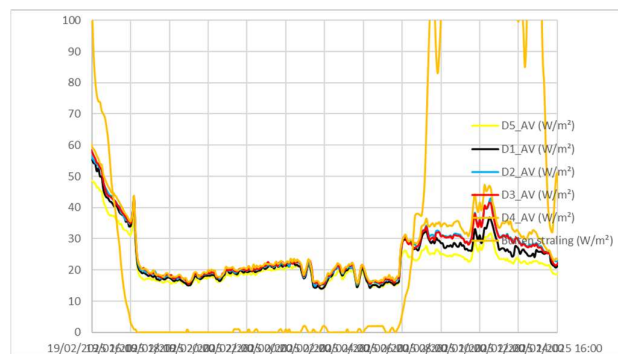


Fig. 20 : Meetresultaat van warmtedoorgang gemeten met 5 boven elkaar staande warmtedoorgangssensoren (voor ligging zie Fig. 19) op 1 ruit te PCH op 19/02/2025. De niet samenliggende lijn is de zonlichtintensiteit (in W/m²).

Op het PSKW werden de sensoren niet boven elkaar geplaatst maar werden 3 sensoren verspreid over de kas geplaatst (2 op rij 6 en 1 op rij 11). Fig. 21 geeft een meting gedurende 2 verschillende periodes weer. Uit de linker figuur blijkt dat de 3 metingen perfect samen liggen. Echter 2 maand later (rechterfiguur), zien we dat er wel een beperkte afwijking ontstaat tussen de sensoren. Bij de dataverwerking werkten we daarom met het gemiddelde van de opgehangen sensoren.



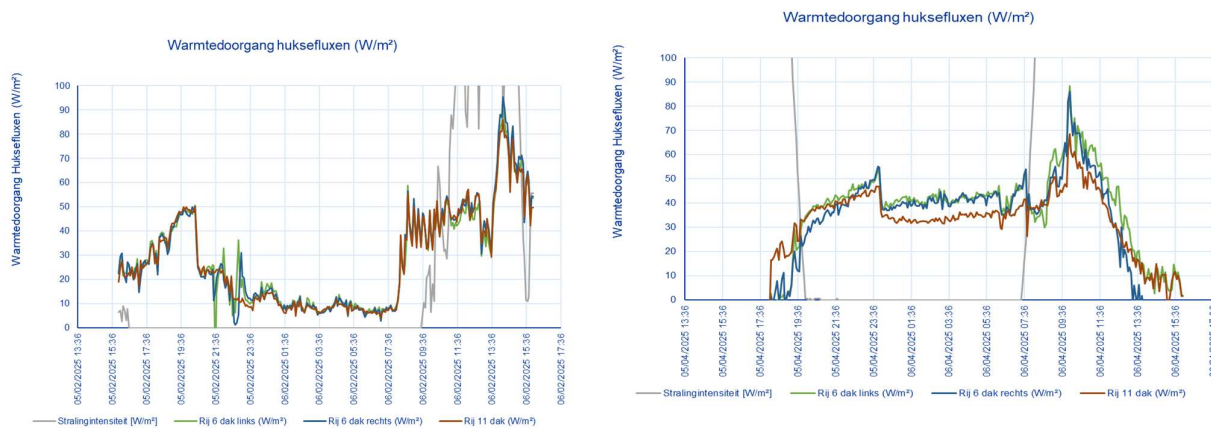


Fig. 21: Warmtedoorgangsmetingen met drie sensoren te PSKW, waarvan twee geplaatst op rij 6 en één op rij 11. Links is een meting in februari 2025 weergegeven, rechts een meting in april 2025. De grijze lijn geeft de buitenlichtintensiteit weer.

4.3.2 Methodiek dataselectie

De metingen betreffen altijd donkere perioden.

Een periode werd gezocht met een bepaalde schermstand en na een stabilisatieperiode werd de data over een stabiele periode geselecteerd (Fig. 22) en gemiddelden berekend. De geselecteerde periode bedraagt tussen 1h tot 4h.

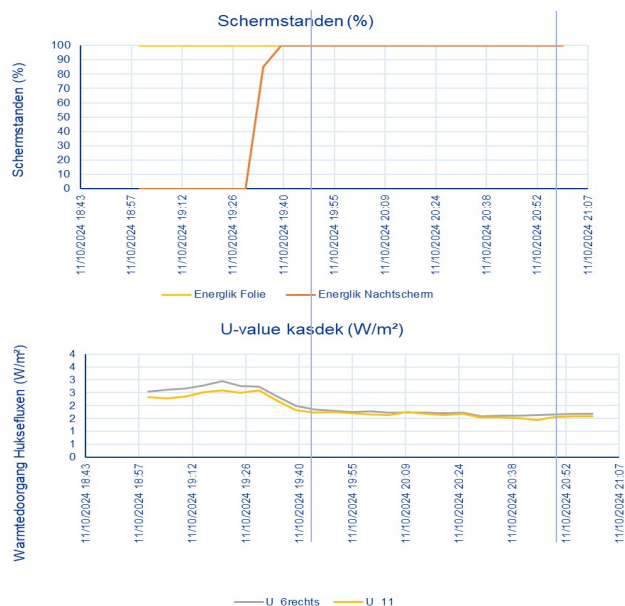


Fig. 22 Een voorbeeld van een geselecteerde periode (tussen verticale lijnen). De U-waarde wordt berekend volgens vergelijking 32.

4.3.3 Nagemeten schermcombinaties

De onderstaande figuur toont welke schermen tijdens de metingen op de locaties te PSKW en PCH aanwezig waren. De weergegeven codes verwijzen naar schermen waarvan de fysische eigenschappen binnen het project ENERGLIK zijn nagemeten. Deze gegevens zijn terug te vinden in Bronchart (2025) of WUR, (2025) .



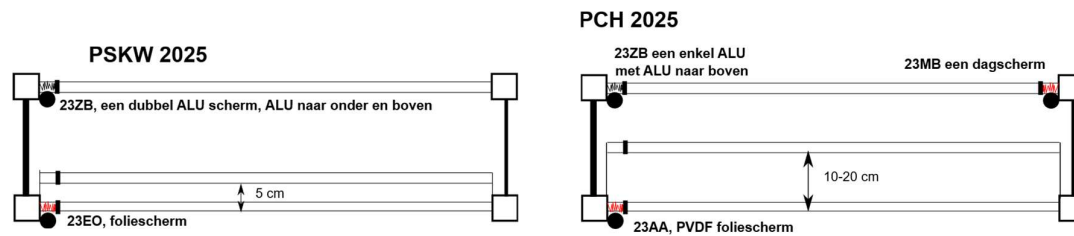


Fig. 23 Nagemeten schermcombinaties

4.3.4 Algemene observatie

De Fig. 24 geeft een algemeen beeld van de invloed van schermen op de isolatiecapaciteit van de kas. Het betreft een meting van in het PSKW.

Tussen de zwarte lijnen is een periode waarin een dagscherm (23EO) wordt ingezet. Dit dagscherm is wat betreft warmtestralingseigenschappen grotendeels absorberend voor warmtestraling, gedeeltelijk transmissief en in beperkte mate reflectief. Door het gebruik van dit scherm verbetert de isolatiecapaciteit van de kas uitgedrukt in U-waarde van ongeveer 5 naar circa 3 $\text{W/m}^2/\text{°C}$.

Tussen de rode lijnen wordt ook het nachtscherm (23ZB) ingezet. Hier is een duidelijk groter effect waarneembaar: door de inzet van één enkel nachtscherm wordt de isolatiecapaciteit van de kas, reeds voorzien van één scherm, verder verbeterd van ongeveer 3 naar circa 1 $\text{W/m}^2/\text{°C}$. Dit nachtscherm heeft dus een duidelijk grotere invloed op de warmtedoorgang van de kas dan het dagscherm.

Op basis van deze visuele observaties van deze meting kan dus vastgesteld worden dat:

1. Het type scherm heeft een grote invloed op de isolatiecapaciteit. Deze grote variabiliteit in isolatiecapaciteit toont aan dat inzet van type scherm bepalender is in energiebesparing dan het aantal schermuren.
2. Beide ingezette schermen (23EO en 23ZB) hebben een lage permeabiliteit, zodat het waargenomen verschil niet kan worden toegeschreven aan verschillen in permeabiliteit.
3. Het grote verschil in isolatiecapaciteit is dus veroorzaakt door het verschil in warmtestralingseigenschappen van de geteste schermen.



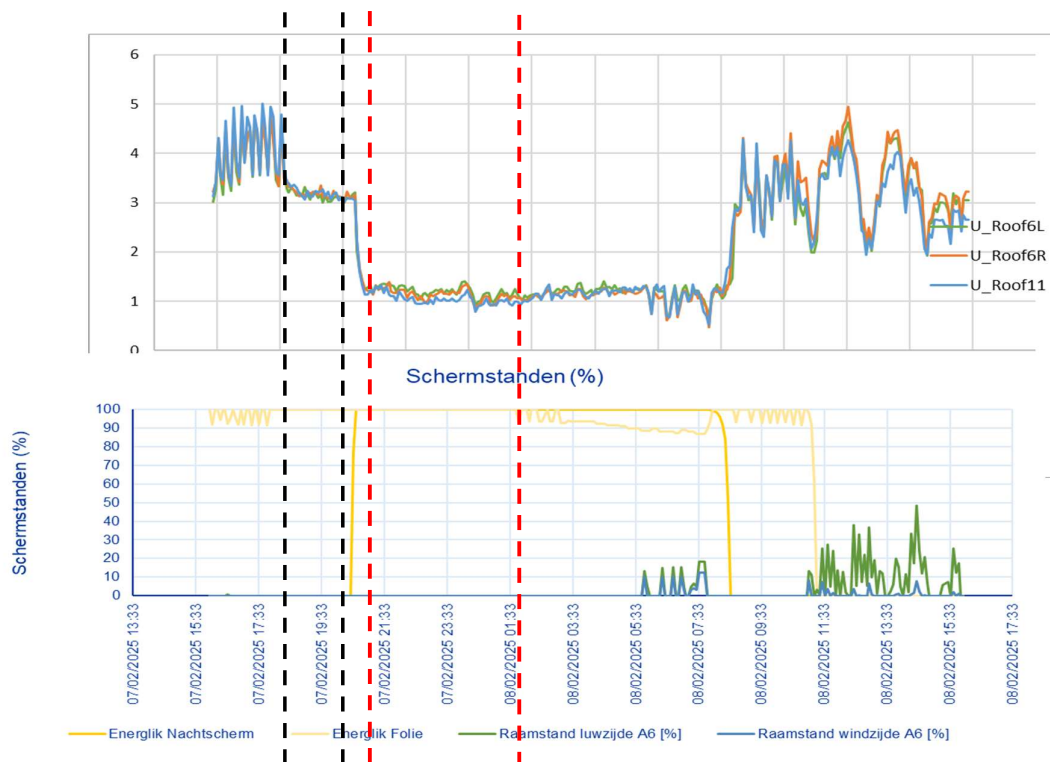


Fig. 24 Visuele representatie van de invloed van type schermen op het energieverbruik met data metingen te PSKW. Onderste grafiek schermstanden. Bovenste grafiek berekende U-waardes ($W/m^2\text{°C}$) volgens vergelijking 32. Tussen zwarte stippellijn: er wordt enkel geschermd met het dagscherm 23EO. Tussen rode stippellijnen: er wordt met dagscherm 23EO en nachtscherm 23ZB geschermd. Zie verder tekst.

4.3.5 Resultaten en discussies PSKW



Tabel 4 heeft een overzicht van de gebruikte data van de verschillende meetperiodes.

De waarden in de tabel stemmen overeen met de theorie van hoofdstuk 4.2.

Alleen de laatste kolom ($R_{\text{scherm HF}}$) is nog niet verduidelijkt: Dit getal geeft de in de praktijk gemeten isolatiewaarde van de schermcombinatie weer (zonder het kasdek). Deze waarde is bekomen door het minderen van de isolatiewaarde van kas met scherm met de isolatiewaarde van de kas. Als vergelijking:

$$R_{scr,exp} = R_{kas+scr,exp} - R_{kas,gem,exp} \quad 37$$

Met

- $R_{kas+s,exp}$ de R-waarde gemeten met de warmtedoorgangssensor van de combinatie kas+scherm ($\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$)
- $R_{kas,gem,exp}$ de gemiddelde R-waarde gemeten met de warmtedoorgangssensor van enkel de kas ($\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$)
- $R_{scr,exp}$ de berekende R-waarde van een scherm of schermcombinatie op basis van experimentele meting ($\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$)

Hierbij is $R_{kas,gem,exp}$ bepaald op basis van verschillende metingen. Deze metingen zijn uitgevoerd op andere momenten dan de meting voor $R_{kas+scr,exp}$.



Tabel 4: Overzicht van de meetperiodes die gebruikt zijn voor het bepalen van de isolatiecapaciteit van schermen op basis van warmtedoorgangssensoren, en de vergelijking met door UGent gemodelleerde waarden (kolom U_model). De kolommen geven, van links naar rechts, weer: tijdstipmoment, tijdsperiode, U-waarde van de drie verschillende sensoren (berekend volgens vgl.32), gemiddelde U-waarde, kasluchttemperatuur, buitenluchttemperatuur, relatieve vochtigheid van de kaslucht, hemeltemperatuur, berekende gemiddelde buitentemperatuur volgens vgl. 36, lichtsnelheid, zonne-instraling, schermcombinatie, berekende U-waarde volgens het UGent-model, temperatuurverschil tussen binnen- en buitenlucht en de op basis van warmtedoorgangsmetingen berekende R-waarde van het scherm (zie vgl. 37).

From	periode	Rij 6 dak li	Rij 6 dak ri	Rij 11 dak	Uav	Ta	To	RHa	Tsky	Tavo	v_o	Sol Rad_o	scr_comb	U_model	dT	Rscherm HF
04/02/2025 20:45	01:00	1.10	0.99	1.04	1.04	16.17	1.17	76.65	-0.73	0.52	4.70	0	glass,232Bd,23EO	1.36	15.65	0.72
05/02/2025 20:45	00:45	1.46	1.35	1.41	1.41	16.04	2.10	74.53	-3.95	-1.71	0.08	0	glass,232Bd,23EO	1.14	17.75	0.48
07/02/2025 21:00	04:00	1.20	1.14	1.05	1.13	16.74	3.60	74.87	-4.28	0.65	3.72	0	glass,232Bd,23EO	1.31	16.09	0.65
14/02/2025 02:00	05:00	1.69	1.58	1.39	1.55	16.19	-2.93	73.40	-13.10	-9.35	0.09	0	glass,232Bd,23EO	1.14	25.54	0.41
14/02/2025 21:00	06:00	1.40	1.28	1.16	1.28	16.23	-1.79	72.68	-13.53	-8.74	0.26	0	glass,232Bd,23EO	1.15	24.97	0.55
16/02/2025 22:00	06:00	1.35	1.22	1.12	1.23	17.45	-1.14	67.44	-19.20	-9.11	2.17	0	glass,232Bd,23EO	1.27	26.56	0.58
17/02/2025 22:00	06:00	1.52	1.38	1.32	1.41	17.23	-1.95	65.28	-19.69	-10.13	1.79	0	glass,232Bd,23EO	1.25	27.36	0.48
															avR scr	0.55
08/02/2025 19:40	01:00	4.14	4.10	3.91	4.05	15.48	8.56	76.89	0.00	3.69	0.50	0	glass	4.16	11.79	
23/03/2025 20:30	01:15	4.52	4.32	4.10	4.31	16.00	10.88	66.34	-2.23	2.99	0.24	0	glass	3.11	13.01	
24/03/2025 20:30	01:15	5.60	5.23	4.77	5.20	15.54	7.66	72.02	3.41	5.95	2.99	0	glass	4.84	9.60	
26/03/2025 20:00	02:00	3.95	3.99	3.70	3.88	15.63	8.36	71.71	-5.06	0.31	0.24	0	glass	3.74	15.32	
27/03/2025 20:30	01:30	4.06	4.08	3.75	3.96	15.72	9.05	63.92	-6.18	-0.52	0.09	0	glass	2.98	16.24	
29/03/2025 19:30	02:15	4.27	4.07	3.61	3.98	15.67	7.68	65.74	-8.40	-1.93	0.28	0	glass	3.53	17.60	
04/04/2025 23:30	06:00	4.58	4.63	4.09	4.43	17.11	12.73	69.47	-2.94	5.36	1.71	0	glass	3.88	11.75	
13/04/2025 23:00	03:30	4.48	4.26	3.82	4.18	16.42	9.87	74.06	0.08	4.24	0.43	0	glass	3.96	12.18	
16/04/2025 03:30	02:00	5.29	5.00	4.36	4.88	16.84	11.56	76.76	0.57	6.96	2.63	0	glass	4.38	9.88	
16/04/2025 23:00	02:30	4.09	3.89	3.49	3.82	16.75	10.07	76.87	4.50	6.59	0.11	0	glass	3.96	10.15	
															av R kas	0.23
05/02/2025 19:00	01:15	2.79	2.78	2.86	2.81	15.18	3.53	75.81	-6.52	-2.39	0.33	0	glass,23EO	2.58	17.56	0.12
07/02/2025 18:30	01:30	3.15	3.18	3.20	3.18	15.35	4.48	75.19	-4.60	1.43	4.97	0	glass,23EO	3.13	13.92	0.08
11/02/2025 09:00	02:30	4.00	4.07	3.67	3.92	17.37	0.69	75.26	0.54	0.61	1.09	11.06452	glass,23EO	3.04	16.76	0.02
13/02/2025 19:00	01:30	2.39	2.39	2.42	2.40	15.16	-1.20	73.53	-16.95	-10.60	0.27	0	glass,23EO	2.55	25.76	0.18
14/02/2025 19:00	01:30	2.41	2.34	2.25	2.33	15.14	-0.64	74.11	-16.88	-9.99	0.44	0	glass,23EO	2.55	25.12	0.19
16/02/2025 19:00	01:45	2.56	2.50	2.48	2.51	15.59	1.50	72.10	-16.67	-6.81	1.89	0	glass,23EO	2.60	22.40	0.16
17/02/2025 19:00	01:30	2.66	2.57	2.25	2.49	15.77	1.05	72.84	-16.83	-6.85	2.12	0	glass,23EO	2.65	22.62	0.17
06/04/2025 01:00	05:00	2.95	2.89	2.38	2.74	17.58	8.74	73.78	-8.56	2.33	3.83	0	glass,23EO	2.91	15.25	0.13
															avR scr	0.13
08/02/2025 21:00	05:00	1.35	1.29	1.29	1.31	16.95	5.96	74.41	-2.24	2.19	1.75	0	glass,232Bd	1.73	14.76	0.53
24/03/2025 22:30	02:00	1.54	1.42	1.34	1.43	17.62	6.99	74.07	4.89	6.08	2.28	0	glass,232Bd	1.84	11.54	0.46
25/03/2025 22:45	01:00	1.70	1.53	1.26	1.50	17.97	8.95	71.84	8.75	8.85	1.63	0	glass,232Bd	1.77	9.12	0.43
23/03/2025 22:30	01:30	1.72	1.57	1.52	1.60	17.39	8.67	68.57	3.01	5.23	0.16	0	glass,232Bd	1.53	12.17	0.39
															avR scr	0.30

De in de tabel gepresenteerde resultaten zijn voor de verschillende schermcombinaties grafisch weergegeven in Fig. 25. Deze grafieken tonen een goede overeenstemming tussen de gemeten warmtedoorgangscoefficienten van kasdek en schermcombinatie en de overeenkomstige gemodelleerde waarden op basis van het UGent-kasmodel. Het UGent-kasmodel houdt in zijn berekeningen geen rekening met de permeabiliteit van schermen, aangezien uit het werk van Bronchart, (2024) blijkt dat de permeabiliteit van schermen onder normale kasomstandigheden niet leidt tot relevante luchtstromen doorheen het scherm. In het model worden daarentegen wel de warmtestralingseigenschappen gebruikt, gemeten met de TNO-box, evenals de damptransportweerstand, berekend op basis van transhumid-boxmetingen beiden uitgevoerd door de WUR. De waarden van deze metingen voor deze schermen zijn terug te vinden in Bronchart (2025).

Op basis van deze resultaten kunnen de volgende bijkomende conclusies worden geformuleerd:

- De warmtedoorgangscoefficienten van schermen variëren slechts in beperkte mate in functie van de buitencondities. Dit bevestigt dat de berekende gemiddelde buitentemperatuur (vgl. 36) geschikt is om een geringe variatie in de afgeleide R-waarden van schermen te bekomen.
- De hier voorgestelde warmtedoorgangscoefficienten zijn in overeenstemming met de resultaten weergegeven in Fig. 24.
- Dit onderzoek bevestigt met praktijkmetingen dat schermen kunnen gekarakteriseerd worden met een warmtetransportweerstandwaarde (R , $m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$). Want zelfs wanneer deze worden gebruikt onder niet-gestandaardiseerde klimaatomstandigheden, zal deze R-waarde weinig variëren.



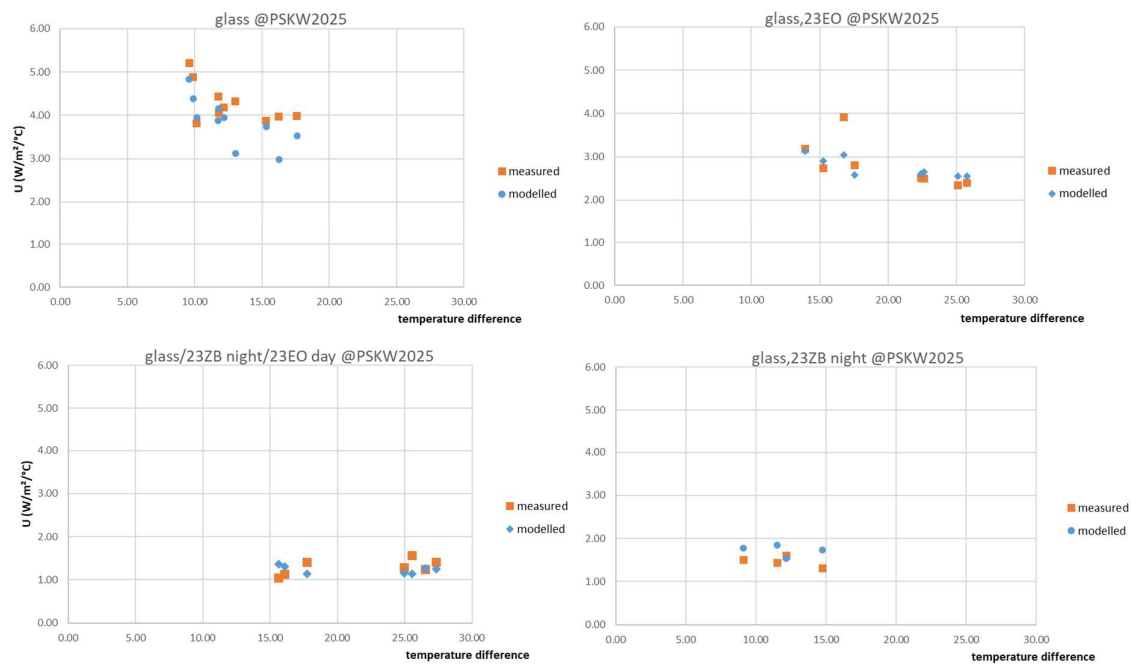


Fig. 25 Resultaten van



Tabel 4 weergegeven in grafiekvorm opgesplitst per schermcombinatie. Blauwe punten zijn de gemodelleerde waarden onder de gemeten klimaatcondities met het UGent kasmodel, de oranje punten zijn de gemeten isolatiewaarde van de schermen gecombineerd met kasdek op basis van de warmtedoorgangsmetingen.

Tenslotte werd op basis van de warmtedoorgangsmetingen de isolatiewaarde van de schermcombinatie bepaald door middel van vgl. 37. Deze waarden staan weergegeven in de laatste kolom van voorgaande Tabel 4. Deze gemiddelden van elke schermcombinatie worden opnieuw weergegeven in

Tabel 5 met ernaast de gemodelleerde waarden op basis van het UGent kasmodel op basis van de nagemeten schermeigenschappen (warmtestralingseigenschappen, damptransportweerstand).

Tabel 5: Isolatiewaarde van de verschillende schermcombinaties te PSKW gemeten in de kas (middelste kolom) en gemodelleerde volgens het UGent kasmodel (rechtse kolom) op basis van de nagemeten schermeigenschappen. Voor de waarden van de gemeten schermeigenschappen, zie Bronchart, (2025) Voor de modellering word het volgende referentieklimaat gebruikt: $T_{o,a}=5^{\circ}\text{C}$, $T_{o,sky}=5^{\circ}\text{C}$, $T_{a,i}=20^{\circ}\text{C}$, $T_{rad,i}=20^{\circ}\text{C}$, $RH_{a,i}=85\%$

Schermbcombinatie	R-waarde op basis van warmtedoorgangsmeting	R-waarde uit kasmodel UGent
23EO	0.13	0.13
23ZB	0.3	0.29
23ZB + 23EO	0.55	0.58

De tabel toont een zeer grote overeenstemming tussen de gemiddelde gemeten isolatiewaarden en de isolatiewaarden die met het UGent-kasmodel onder gemiddelde omstandigheden werden berekend. Dit betekent echter niet automatisch dat alle schermeigenschappen reeds volledig en foutloos worden nagemeten; het blijft mogelijk dat bestaande onzekerheden of meetfouten elkaar gedeeltelijk compenseren en zo tot deze sterke overeenstemming leiden. Desondanks tonen de resultaten duidelijk aan dat er geen grote fouten aanwezig zijn, noch in de modellering met het UGent-kasmodel, noch in de nagemeten schermeigenschappen. Fysisch gezien zien er ook alleen minor opmerkingen te geven over deze modellen of meetapparatuur wat hiermee experimenteel wordt bevestigd.

Een verder belangrijk bijkomende conclusie uit deze meting is:

$$R(23EO) + R(23ZB) < R(23ZB + 23EO)$$

Dat wordt zowel experimenteel vastgesteld maar was ook al bekend vanuit het UGent kasmodel.

Dit is het gevolg van de combinatie van schermen die voor warmtestraling transmissief en reflectief zijn: deze werken samen synergetisch waarbij "stralingsvrije zones ontstaan". Het is de eerste keer dat dergelijk effect ook in de praktijk werd nagemeten.

4.4 Resultaten, discussies PCH

De aanpak in het PCH was gelijkaardig dan in het PSKW zoals beschreven in voorgaande hoofdstukken.

In het PCH werden 5 warmtedoorgangssensoren boven elkaar waren geplaatst (zie 4.3.1).

Tabel 6 geeft het de geselecteerde periodes weer, de klimaatomstandigheden, de gemeten U-waarden en gemodelleerde U-waarden. Fig. 26 geeft de resultaten van de experimenteel gemeten R-waardes weer versus de gemodelleerde waarden voor de verschillende meetperiodes.

Tabel 6: Overzicht van de meetperiodes te PCH die gebruikt zijn voor het bepalen van de isolatiecapaciteit van schermen op basis van warmtedoorgangssensoren, en de vergelijking met door UGent gemodelleerde waarden. De kolommen geven, van links naar rechts, weer: tijdstip, tijdsperiode, gemiddelde U-waarde van de 5 verschillende sensoren (berekend volgens vgl.32), kasluchttemperatuur, buitenluchttemperatuur, relatieve vochtigheid van de kaslucht, hemeltemperatuur, berekende



gemiddelde buitentemperatuur volgens vgl. 36, luchtsnelheid, zonne-instraling, schermcombinatie, berekende U-waarde volgens het UGent-model.

	MEASUREMENTS										Modelled
From	periode	U1-2-3-4-5Ta	To	RHa	Tsky	Tavo	v_o	Rad_o(W/scr_comb	U kas +scr		
18/02/2025 20:20	03:00	1.02	14.81	-0.22	88.16	-25.48	-9.52	3.60	0.08 glass,23ZB,23AA	1.46	
19/02/2025 23:00	03:00	0.99	16.99	2.57	83.65	-14.78	-5.01	2.14	0.26 glass,23ZB,23AA	1.44	
20/02/2025 21:00	03:00	1.03	17.38	11.04	94.89	5.53	8.63	2.27	0.48 glass,23ZB,23AA	1.43	
25/02/2025 06:00	01:00	1.02	18.73	6.87	92.15	4.68	5.45	0.00	0.00 glass,23ZB,23AA	1.44	
25/02/2025 21:00	05:00	1.29	17.46	7.10	94.36	7.10	7.10	2.91	0.03 glass,23ZB,23AA	1.54	
22/02/2025 02:00	03:00	1.38	18.12	12.49	93.95	7.76	10.08	1.13	0.93 glass,23ZB	1.81	
07/03/2025 19:00	02:00	1.80	19.49	11.93	91.88	-9.23	3.45	3.54	0.04 glass,23ZB	2.05	
21/02/2025 17:00	01:00	2.77	21.98	17.42	92.46	8.57	12.95	1.65	23.31 glass	5.42	
20/02/2025 10:00	01:00	2.11	22.26	8.69	88.77	5.25	7.20	2.52	137.91 glass,23AA	3.30	
11/03/2025 13:00	00:45	2.13	22.01	7.54	94.20	3.52	5.28	0.66	103.41 glass,23AA	3.13	
09/03/2025 07:25	01:00	1.49	19.34	5.94	89.92	-13.27	-4.71	0.67	55.12 glass,23MB,23AA	2.08	

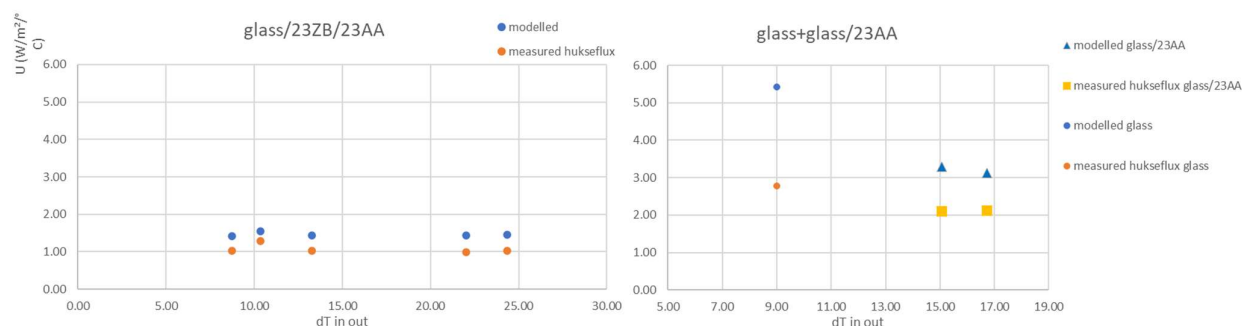


Fig. 26 Resultaten van Tabel 6 weergegeven in grafiekvorm. De oranje punten stemmen overeen met de gemeten isolatiewaarde van de schermen gecombineerd met kasdek op basis van de warmtedoorgangsmetingen, de blauwe punten zijn de gemodelleerde waarden onder de gemeten klimaatcondities met het UGent kasmodel.

Uit de grafiek blijkt, in tegenstelling tot de resultaten op het PSKW (Fig. 25), dat de met het UGent-kasmodel berekende U-waarden systematisch hoger liggen dan de gemeten U-waarden, en dit voor alle schermcombinaties, inclusief de situatie met enkel glas als kasdek. Zo wordt voor het kasdek een gemeten U-waarde van ongeveer 3 W/m²K bekomen. Deze lage waarde is niet in overeenstemming met de algemeen aanvaarde inzichten voor kasdekken en doet vermoeden dat de meetapparatuur de warmtedoorgang systematisch onderschat, waardoor alle resultaten verhoudingsgewijs te laag worden weergegeven.

Dit afwijkend gedrag komt ook tot uiting bij de schermcombinatie 23ZB/23AA, die vergelijkbaar is met de schermcombinatie toegepast op het PSKW (23EO met een dubbel scherm 23ZB). Desondanks wordt op de meting te PCH een lagere U-waarde gemeten voor deze minder isolerende schermcombinatie dan in de PSKW-situatie. Op basis van voorgaande kan worden geconcludeerd dat er sprake moet zijn van een systematische meetfout. Er werd gezocht naar mogelijke oorzaken, maar deze konden niet worden geïdentificeerd. Het uitblijven van een duidelijke verklaring is deels toe te schrijven aan de scheiding tussen de uitvoering van de metingen en de verwerking van de meetdata, wat leidt tot bijkomende complexiteit en het opsporen van dergelijke problemen bemoeilijkt.

Op basis van deze minder kwalitatieve metingen kunnen we minder duidelijke conclusies maken dan met de metingen te PSKW.

De metingen bevestigen echter wel de resultaten zoals te PSKW zoals:

- Sommige schermen isoleren veel meer dan andere.
- Schermtypes hebben een grote invloed op de energiebesparing.
- De invloed van de gemeten schermeigenschappen zien we terug in de praktijkmetingen.
- Een R-waarde kan toegewezen worden aan een scherm daar deze redelijk constant zijn.



4.5 Conclusies

Dit praktijkonderzoek toont aan dat het gebruik van warmtedoorgangssensoren in het kasdek een betrouwbare methode vormt om de isolatiecapaciteit van schermen onder praktijkomstandigheden te bepalen.

Op basis van de resultaten kan worden vastgesteld dat:

- Er een grote variatie bestaat in de isolatiecapaciteit (R_{scr}) van verschillende schermen.
- Bepaalde schermcombinaties een synergetisch effect vertonen.
- De permeabiliteit van schermen geen directe rol speelt in het energiebesparend vermogen van het scherm.
- De warmtestralingseigenschappen doorslaggevend zijn voor het isolatievermogen.
- De resultaten van het UGent-kasmodel goed overeenstemmen met de praktijkmetingen, wat een validatie van het UGent model inhoudt.
- De huidige meetmethoden voor het nameten van schermeigenschappen geven een betrouwbare indicatie van hun thermische prestatie.
- Aan schermen een R-waarde kan worden toegekend, aangezien deze onder praktijkomstandigheden slechts in beperkte mate varieert.

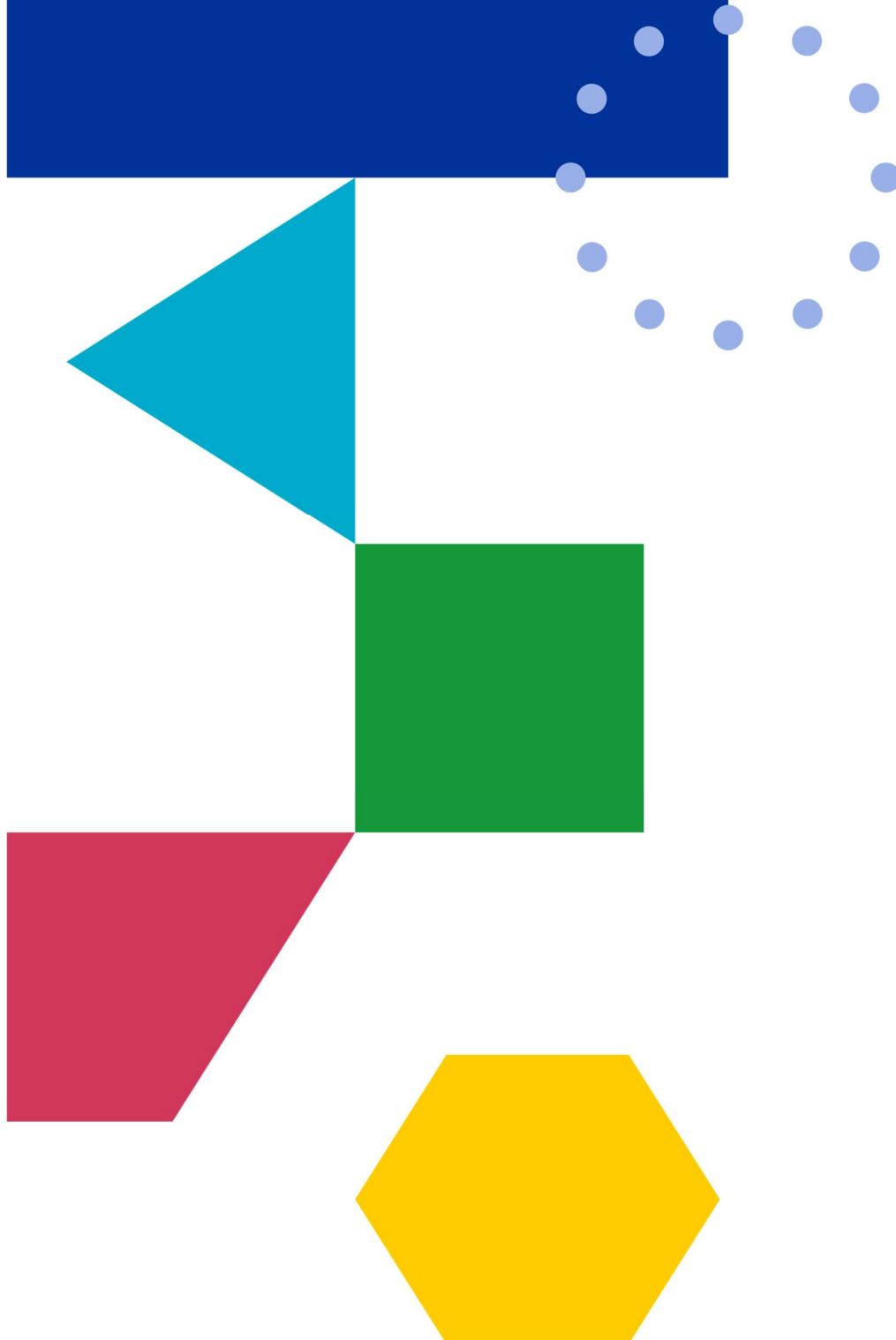
4.6 Dankwoord

Luis Corbala heeft de zorg op zich genomen om de sensors voor te bereiden en aan te sluiten. Zijn werk was precies en nauwkeurig.

PCH en PSKW hebben de meetdata verzameld en doorgegeven. Dank hiervoor.



5. Literatuur



- Bot, G. P. A. (1983). *Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model*. Doctoral thesis, Landbouwhogeschool Wageningen.
- 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. (2025). *Van schermmetingen tot zijn prestatiecoëfficiënten*.
<https://backoffice.biblio.ugent.be/download/01K3PJ65ZDSJ0MP1QWTGMA6ER3/01K3PJRN1AFVYV4D20GKFNZ68R>
- Lienhard IV, J. H., & Lienhard V, J. H. (2008). *A heat transfer textbook*. Phlogiston Press.
- López, A., Molina-Aiz, F. D., Valera, D. L., & Peña, A. (2012). Determining the emissivity of the leaves of nine horticultural crops by means of infrared thermography. *Scientia Horticulturae*, 137, 49–58.
<https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2012.01.022>
- 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



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**

