



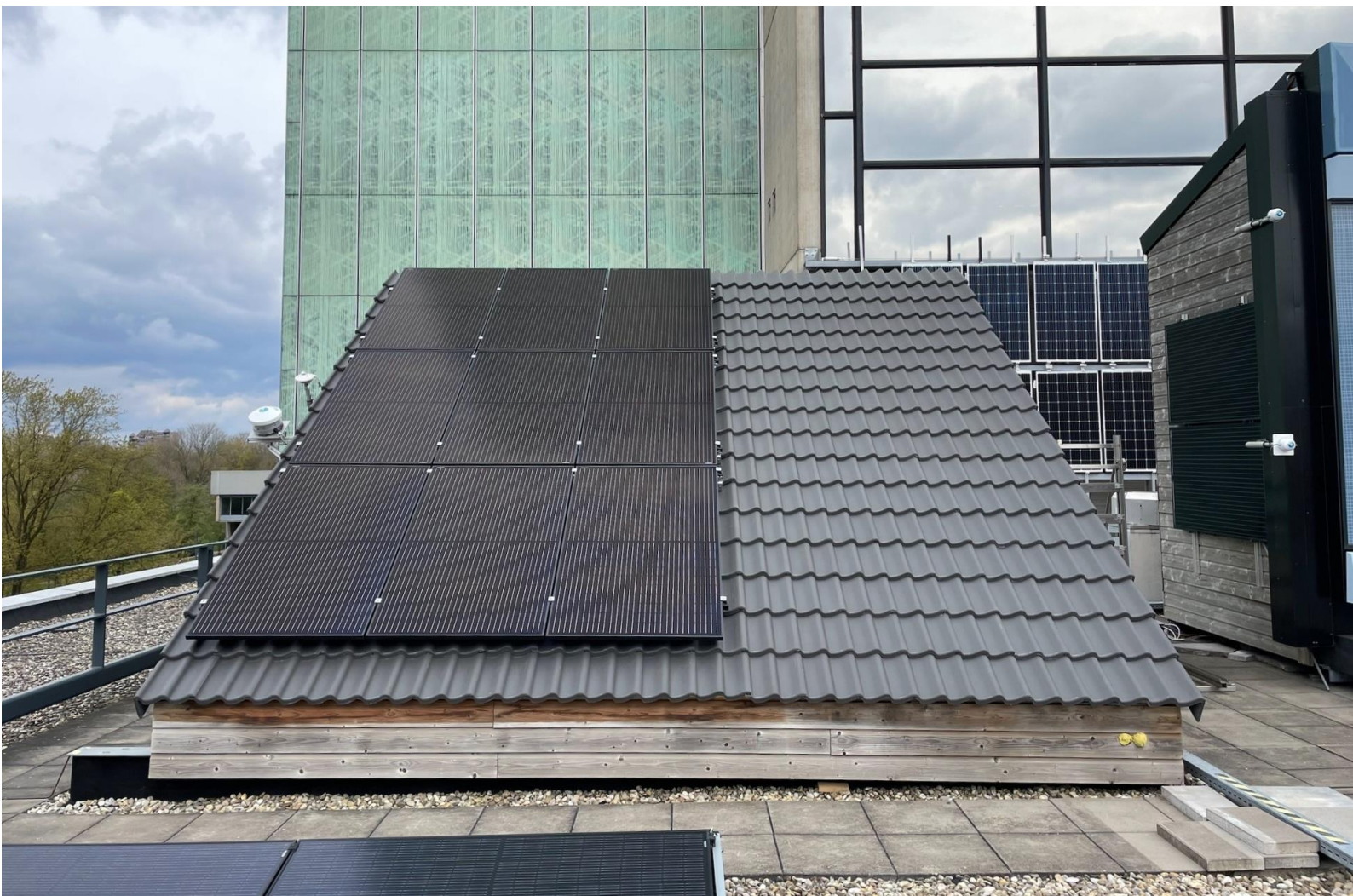
**Viridis**

Onderzoeksbureau  
voor natuur en landschap

April 2024

# Experimentele opzet

## Effect van PV-panelen op het microklimaat onder dakpannen



In opdracht van: Zoogdierstichting  
Projectnummer: 2024-011

**TNO**



© 2024 Ecologisch Adviesbureau Viridis bv, Culemborg

Ecologisch Adviesbureau Viridis bv  
Randweg 30  
4104 AC Culemborg  
T 0345 753 275  
E info@bureau-iridis.nl  
W www.bureau-iridis.nl  
KvK 110 557 87  
Btwnr NL 820598215B01  
IBAN NL46 TRIO 0198 4486 00



**Viridis**  
Onderzoeksbureau  
voor natuur en landschap

Tekst: S. (Sophie) van der Voorst  
Veldonderzoek: S. Villa, D. Out, R. Valckenborg (TNO)  
Foto's: TNO

Foto voorblad: Onderzoekscentrum SolarBEAT, TU Eindhoven

Projectnummer: 2024-011  
Wijze van citeren: Snijder, M.A., S. van der Voorst, 2024. Het effect van PV-panelen op het microklimaat onder dakpannen. Ecologisch Adviesbureau Viridis, Culemborg, PRNR-2024-011.

In opdracht van: De zoogdierstichting  
Contactpersoon: Martin Epe

Datum: 25-04-2024  
Ondertekening: M.A. (Marco) Snijder  
Paraaf:

**TNO**

**Zoogdier**  
vereniging

Dit rapport is vervaardigd op verzoek van de opdrachtgever zoals hierboven aangegeven en is zijn eigendom. Niets uit deze rapportage mag worden vermenigvuldigd of openbaar gemaakt worden door middel van scanning, druk, internet, fotokopie of andere wijze zonder schriftelijke toestemming van de opdrachtgever en Ecologisch Adviesbureau Viridis bv, noch mag het zonder deze toestemming voor een ander doel gebruikt worden dan waarvoor het vervaardigd is.

Ecologisch Adviesbureau Viridis is niet aansprakelijk voor vervolgschade, alsmede schade die voortvloeit uit toepassingen van de resultaten van de werkzaamheden, kaartmateriaal (Basis Registratie Topografie Kadaster 2024, tenzij anders wordt vermeld) inclusief getoonde begrenzingen of andere gegevens verkregen van Ecologisch Adviesbureau Viridis. De opdrachtgever vrijwaart Ecologisch Adviesbureau Viridis voor aanspraken van derden in verband met deze toepassing.

Omdat ecologisch onderzoek een momentopname is, kan de aanwezigheid van beschermde soorten soms niet worden uitgesloten of bevestigd. Daarnaast is de natuurwetgeving aan verandering en jurisprudentie onderhevig. Ecologisch Adviesbureau Viridis is mede om die redenen lid van het Netwerk Groene Bureaus, brancheorganisatie voor kwaliteitsbevordering en belangenbehartiging van ecologische adviesbureaus. Hierdoor zijn wij zo goed mogelijk op de hoogte van de nieuwste ontwikkeling op het gebied van ecologie en wetgeving. Door de inzet van conform de wet ter zake kundige ecologen, waarborgen wij onze onderzoekskwaliteit. Wij zijn echter niet aansprakelijk voor de gevolgen van onverwacht verschijnende of verdwijnende flora of fauna, noch voor de gevolgen van veranderende wetgeving of jurisprudentie.

# Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Aanleiding</b> .....	<b>2</b>	<b>3.3</b>	Relatieve luchtvochtigheid .....	<b>13</b>
1.1	Situatie .....	2	3.3.1	Referentiezijde .....	13
1.2	Doelstelling .....	2	3.3.2	Met PV panelen .....	13
<b>2</b>	<b>Onderzoeksmethode</b> .....	<b>3</b>	3.3.3	Referentie versus PV panelen .....	13
2.1	Proefopstelling en materialen .....	3	3.4	Luchtstroom .....	15
2.2	Sensoren .....	4	3.4.1	Referentie versus PV-panelen .....	15
2.3	Stralingssterkte .....	4	<b>4</b>	<b>Discussie</b> .....	<b>16</b>
2.4	PV panelen .....	4	<b>5</b>	<b>Literatuurlijst</b> .....	<b>17</b>
2.5	Data.....	4	5.1	Literatuur.....	17
<b>3</b>	<b>Resultaten</b> .....	<b>5</b>	5.2	Websites .....	17
3.1	Datareeksen .....	5	<b>Bijlage A.</b>	<b>Meetwaarden gehele periode</b> .....	<b>18</b>
3.2	Temperatuur .....	6	<b>Bijlage B.</b>	<b>Vershil in luchttemperatuur</b> .....	<b>19</b>
3.2.1	Referentiezijde.....	6	<b>Bijlage C.</b>	<b>Overige figuren</b> .....	<b>20</b>
3.2.2	Met PV panelen .....	6			
3.2.3	Referentie versus PV-panelen.....	9			



# 1 Aanleiding

## 1.1 Situatie

Een essentieel component in de energietransitie is de omzetting van zonnestraling in elektriciteit en warmte. De bijdrage van zonnestroom aan het eindverbruik van hernieuwbare energie in Nederland is ruim 13 procent [1] echter betreft dit slechts 2,1% van het totale energiegebruik [2]. De productie van zonnestroom neemt de afgelopen jaren sterk toe [1]. In Nederland worden massaal zonnepanelen geplaatst, anderhalf miljoen woningen zijn reeds voorzien van zonnepanelen op het dak [2].

De energietransitie en noodzaak tot isolatie en renovatie van bestaande woningen zorgen voor het in rap tempo verdwijnen van potentiële verblijfplaatsen voor gebouwbewonende soorten vleermuizen. Naar schatting worden bij 200.000 woningen per jaar ingrijpende isolerende maatregelen toegepast die verstorend werken voor eventueel aanwezige beschermde soorten [3]. Hierdoor verdwijnen in rap tempo potentiële verblijfplaatsen voor gebouwbewonende vleermuizen [4] [5], (Haarsma, 2020) en [6].

De effecten van het plaatsen van zonnepanelen op daken zijn echter niet bekend, er zijn vrijwel geen publicaties die een negatief effect aantonen van zonnepanelen op verblijfplaatsen van vleermuizen. Aangenomen werd dat zonnepanelen zorgen voor schaduwwerking, waardoor dakpannen minder opwarmen door directe zonnestraling, wat mogelijk zou kunnen resulteren in een afkoelend effect van potentiële verblijfplaatsen. In 2021 is een pilotstudie gedaan in opdracht van de provincie Fryslân [7]. Dit is enkel een verkennende studie zonder metingen. De vervolgonderzoeken zijn ook gedaan of lopen nog maar deze zijn nog niet gepubliceerd. Een studie naar huismussen en de effecten van dakisolatie in combinatie met zonnepanelen in 2023 [8] stelt dat de panelen in zowel warme als koude periode als buffer dienen en de temperaturen minder koud (ca. 1-4 graden) en minder warm (ca. 2-10 graden) laten zijn onder de dakpannen.

Het ministerie van LNV heeft een subsidie ter beschikking gesteld via de Zoogdierverseniging waarvan een onderdeel bedoeld is om nader onderzoek te doen naar de effecten van zonnepanelen op de verblijfplaatsen van gebouwbewonende soorten.

## 1.2 Doelstelling

De doelstelling van het onderzoek is het verkrijgen van inzicht in het effect van zonnepanelen op het microklimaat onder dakpannen.





## 2 Onderzoeksmethode

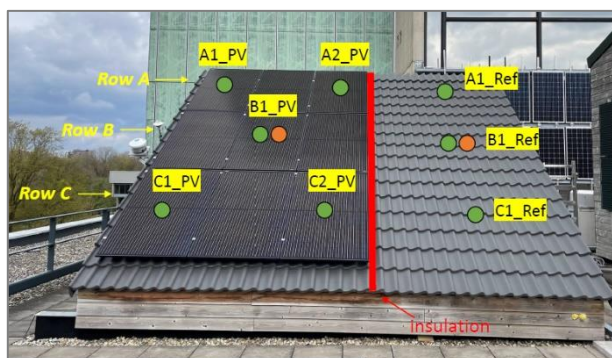
Om antwoord te kunnen geven op de onderzoeksvraag is een proefopstelling gemaakt waarin het dak van een standaard rijtjeshuis met en zonder PV-panelen is nagebootst. Met deze opstelling is gedurende 6 maanden informatie over de temperatuur op diverse plaatsen op het dak verzameld.

### 2.1 Proefopstelling en materialen

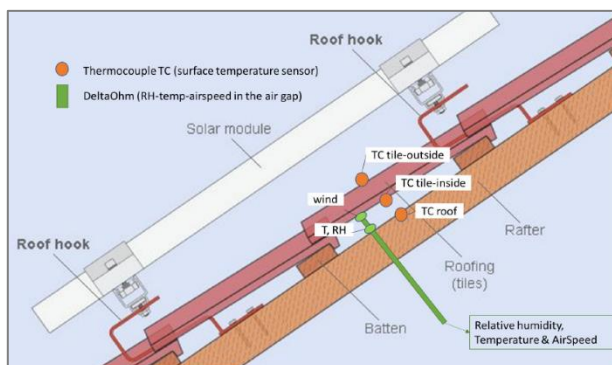
Voor het onderzoek is gebruik gemaakt van één van de SolarBEATS testhuisjes van TNO op het dak van het Vertigo gebouw van de TU Eindhoven. Het testhuisje was voorzien van een lessenaarsdak zonder extra isolatiemateriaal tussen de dakpannen en het dakbeschot. Om de testopstelling zo representatief mogelijk te maken is de bestaande dakbedekking vervangen door Monier Sneldek Antraciet dakpannen. Deze dakpannen zijn in Nederland zeer algemeen in gebruik en zijn daarom representatief voor een Nederlands huishouden. TNO heeft de installatie gebouwd en het onderzoek uitgevoerd.

Het dak van het testhuisje is in twee delen opgedeeld, met links een vlak bedekt met 9 PV panelen en rechts een vlak zonder PV-panelen als referentie (Figuur 2.1). In de tussenlaag tussen de dakpannen en het dakbeschot is een verticale isolerende afscheiding gemaakt tussen de zijde met PV-panelen en de referentiezijde om contaminatie van de meetwaarden te voorkomen. In het dak werden in totaal 13 sensoren verwerkt die met regelmatige intervallen metingen deden. Acht van de sensoren zijn DeltaOhm-RH-temp-airspeed sensoren. Deze zijn geplaatst in de ruimte tussen het dakbeschot en de dakpannen, om de relatieve luchtvochtigheid, luchttemperatuur en windsnelheid te meten. De andere 5 sensoren zijn type T Thermocouple sensoren. Deze meten de oppervlaktetemperatuur op 1 punt van de materialen in de lagen van het dak. Aan de zijde van de PV-panelen meet de Thermocouple de oppervlaktetemperatuur van de buitenzijde van de dakpan, de onderzijde van de dakpan en de buitenzijde van het dakbeschot (Figuur 2.2).

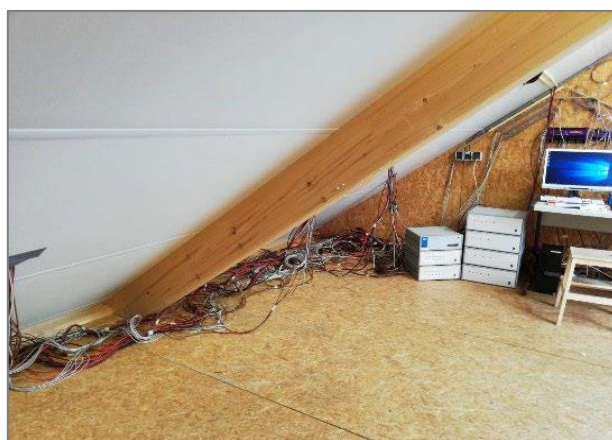
Aan de referentie zijde meet de Thermocouple alleen de binnenzijde van de dakpan en de buitenzijde van het dakbeschot. Een dwarsdoorsnede van de opstelling is te zien in Figuur 2.2.



Figuur 2.1 | Dak van testhuisje met geïnstalleerde PV-panelen en ligging van sensoren. In groen de locaties van de DeltaOhm sensoren. In oranje de locaties van de oppervlakte temperatuurmeters.



Figuur 2.2 | Dwarsdoorsnede sensoropstelling met PV-panelen.



Figuur 2.3 | Binnenkant testhuisje met meetapparatuur.



## 2.2 Sensoren

Bij het onderzoek zijn twee soorten sensoren gebruikt. De DeltaOhm-RH-temp-air-speed sensoren en de Thermocouple sensoren.

De DeltaOhm sensoren zijn van het serienummer HD29V371 TC2.10. Het bereik van de luchtsnelheidsensors kan worden ingesteld op dit type sensor. Voor deze opstelling is gekozen voor een range van 0.1-2 m/s, wat uitkomt op instelling 2. De uitwerking van de range selectie op de standaardafwijking van de gemeten resultaten kan uitgelezen worden in tabel 2.1.

De thermocouple sensoren zijn allen direct op het oppervlak bevestigd. De locatie voor van de thermometers is in het midden van beide opstellingen om externe invloeden op de temperatuur zoals wind te beperken tot een minimum. Om de temperatuur van de buitenzijde van het dakbeschot en de binnenzijde van de dakpannen met elkaar te kunnen vergelijken zijn de thermometers recht boven elkaar geplaatst. Deze kolom van thermometers geven allen een output in graden celcius met een nauwkeurigheid van 3 decimalen.

**Tabel 2.1|Technische specificaties DeltaOhm RH-temp-air-speed sensor**

Common technical specifications		Notes
Air speed Measuring range	0.05...1m/s 0.1...2m/s 0.20...10m/s 0.20...20m/s	The measuring range can be selected by dip-switch.
Air speed Accuracy range 0...1m/s range 0...2m/s range 0...10m/s range 0...20m/s	±(0.1m/s+3% of measurement) ±(0.15m/s+3% of measurement) ±(0.5m/s+3% of measurement) ±(0.7m/s+3% of measurement)	at 50%RH and 1013hPa
Temperature Measuring range	-10...+60°C	HD2937, HD29V37, HD29371 and HD29V371 models
Temperature Accuracy	±0.3°C	
Relative Humidity Measuring range	0...100%RH	
Relative Humidity Accuracy	±1.5%RH (10...90%RH) ±2.0%RH (in the remaining range) for T= 15...35°C ----- ±(1.5+1.5% of the displayed value) %RH in the remaining temperature range	HD29371 and HD29V371 models
Relative Humidity Output Range	0...100%RH	
Output (according to the models)	4...20mA 0...10Vdc	R <sub>i</sub> < 500Ω R <sub>i</sub> > 10kΩ
Power supply	18...40Vdc or 12...24Vac±10%	
Response time (selected by jumper)	0.2s 2.0s	Fast Slow
Operating temperature electronics probe	0...+60°C -10...+80°C	
Compensation temperature	0...+80°C	
Storage temperature	-10...+70°C	
Electronics protection class	IP67	
Sensor working conditions	Clean air, RH<80%	
Case dimensions	80x84x44	Without probe

## 2.3 Stralingssterkte

De stralingssterkte is gemeten met een pyranometer die in dezelfde hoek als het dak is geïnstalleerd. Deze pyranometer heeft de zoninstraling op het dak B<sub>poa</sub> gemeten in W/m<sup>2</sup>.

Waarbij de Plane of array (POA) is:

$$\Delta T(\%) = \frac{(T_{PV} - T_{ref})}{T_{ref} * 100}$$

## 2.4 PV panelen

De gebruikte PV-panelen zijn de mono-crystalline half-cut cells (all black module), 330 Wp, van Photo solar een vergelijkbaar type van de in Nederland commercieel toegepaste PV panelen voor montage aan bestaande daken met dakpannen. De panelen worden aan het dak bevestigd middels haken die onder de dakpannen door komen en aan het dakbeschot zijn bevestigd, waardoor het bestaande dak volledig intact blijft. De PV-panelen zijn in een raster van 3 hoog en 3 breed geplaatst, zonder ruimte tussen de individuele panelen en bedekken bijna het volledige oppervlak van de testzijde van het testhuisje.

## 2.5 Data

Gedurende 6 maanden, van mei 2023 tot oktober 2023 zijn er metingen gedaan met de aangebrachte sensoren. Metingen zijn gestart op 29 april 2023 en lopen door tot oktober 2023. In de eerste anderhalve week zijn iedere 5 minuten metingen gedaan. Vanaf 11 mei is de frequentie verhoogd tot iedere minuut een meetmoment. Dit resulteerde in iedere dag 1440 meetmomenten voor de luchtvochtigheid, luchttemperatuur, oppervlakte temperatuur en windsnelheid, welke zijn opgeslagen in datasets in .csv en .xlsx format.

Naast de data van de proefopstelling is er ook gebruikt gemaakt van de data van de aanwezige klimatologische sensoren van het onderzoeksinstituut (Zoninstraling, omgevingstemperatuur, relatieve luchtvochtigheid, neerslaghoeveelheid, neerslagtype, windsnelheid, windrichting, etc.). TNO heeft de data gegenereerd en heeft de analyse verzorgd.

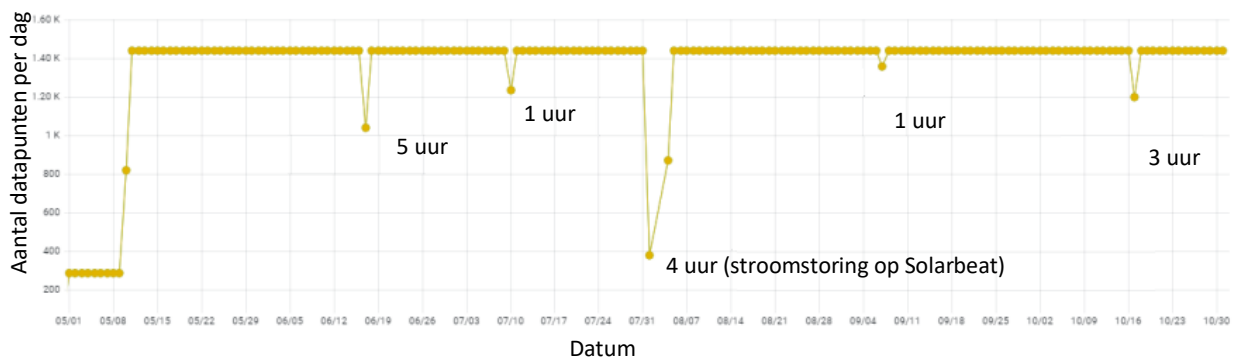


## 3 Resultaten

In dit hoofdstuk worden de resultaten van het onderzoek beschreven. Als eerste een overzicht van de gehele periode. Daarna per onderdeel besproken. Hierbij worden de onderdelen temperatuur, luchtvochtigheid en luchtstroom separaat behandeld. Per hoofdstuk wordt eerst de referentiezijde besproken, dan de zijde met PV-panelen en daarna het vergelijk tussen de twee zijden.

### 3.1 Datareksen

In het totaal zijn er 6 maanden aan continue data verzameld. In totaal is 98% van de data beschikbaar, 2% van de data is verloren gegaan (Figuur 3.1). In Bijlage A is een overzicht te zien van alle data voor Temperatuur, relatieve luchtvochtigheid en luchtstroom voor de gehele periode.



**Figuur 3.1 |** Overzicht van de datareksen tussen 01-05-2023 en 30-10-2023. Het overzicht geeft het aantal datapunten per dag. Het aantal uren dat er geen data is geleverd is aangegeven in de grafiek. Vanaf 11-05-2023 is het interval van 5 minuten naar 1 minuut ingesteld.



## 3.2 Temperatuur

In de tussenruimte tussen het dakbeschot en de dakpannen is de luchttemperatuur gemeten in de proefopstelling en de referentie. In het referentie dak is overdag een beduidend hogere luchttemperatuur gemeten op alle geteste posities ten opzichte van de PV zijde van het dak. In de nachtelijke uren is juist een lagere temperatuur gemeten in de referentiezijde dan in de PV zijde van het dak.

### 3.2.1 Referentiezijde

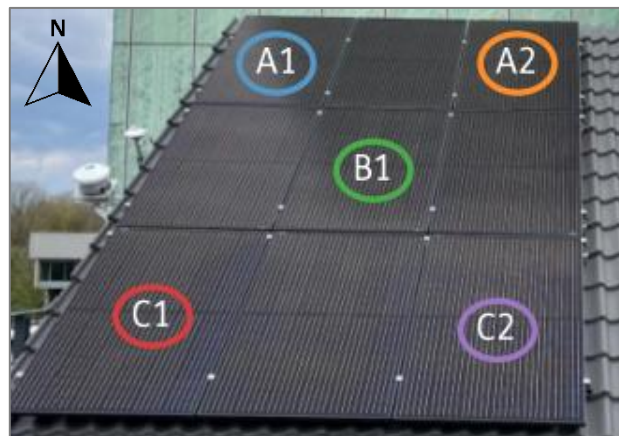
De temperatuur ziet sterke verschillen gedurende de dag ten opzichte van de nacht. In Figuur 3.1 is een voorbeeld gegeven van een willekeurige dag in het onderzoek met de binnendak luchttemperatuur en de ambiante temperatuur. Gedurende de nacht zakt de temperatuur in het dak tot de buitentemperatuur. Overdag daarentegen is een sterke verhoging in het dak te zien ten opzichte van de buitentemperatuur. Ook is een gradatie zichtbaar in de temperatuur tussen de verschillende posities. Positie A1\_REF heeft overdag de hoogste temperatuur. Dat is te verklaren door convectiewerking. De warme lucht stijgt binnen in het dak omhoog.

### 3.2.2 Met PV panelen

#### Randwerking

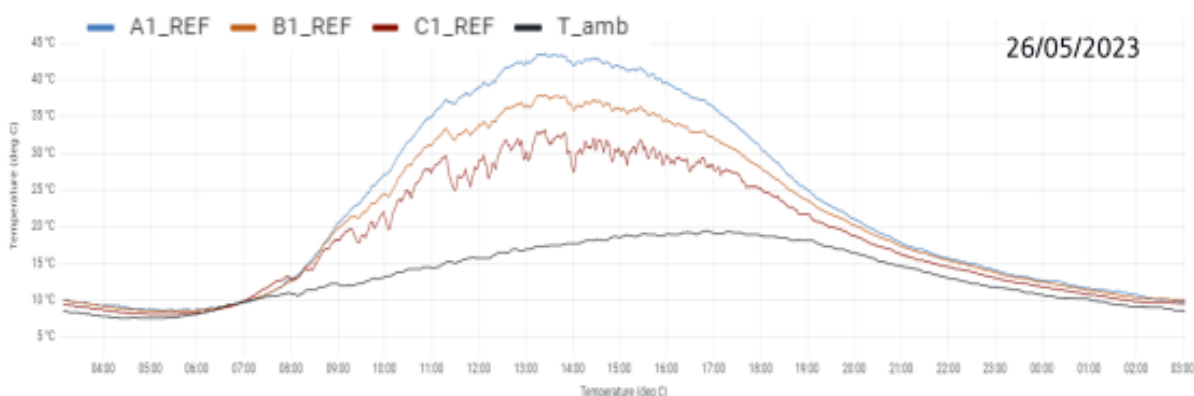
Uit de data-analyse blijkt dat de sensoren onder de PV-panelen aan de randen van het dak een lagere temperatuur laten zien. Op Figuur 3.2 zijn de locaties van de luchttemperatuursensoren weergegeven (DeltaOhm). De temperatuur van de luchttemperatuursensoren op A1 en C1 zijn over het algemeen kouder dan de andere sensoren. Dit is sterk afhankelijk van de wind en de windrichting. Figuur 3.3 geeft een beeld

van een voor dit fenomeen typische dag. Gedurende de middag komt de wind op deze specifieke dag voornamelijk uit westelijke richting.



Figuur 3.2 | De codering van de luchttemperatuursensoren onder de PV-panelen. De kleuren komen overeen met de kleuren in de grafieken.

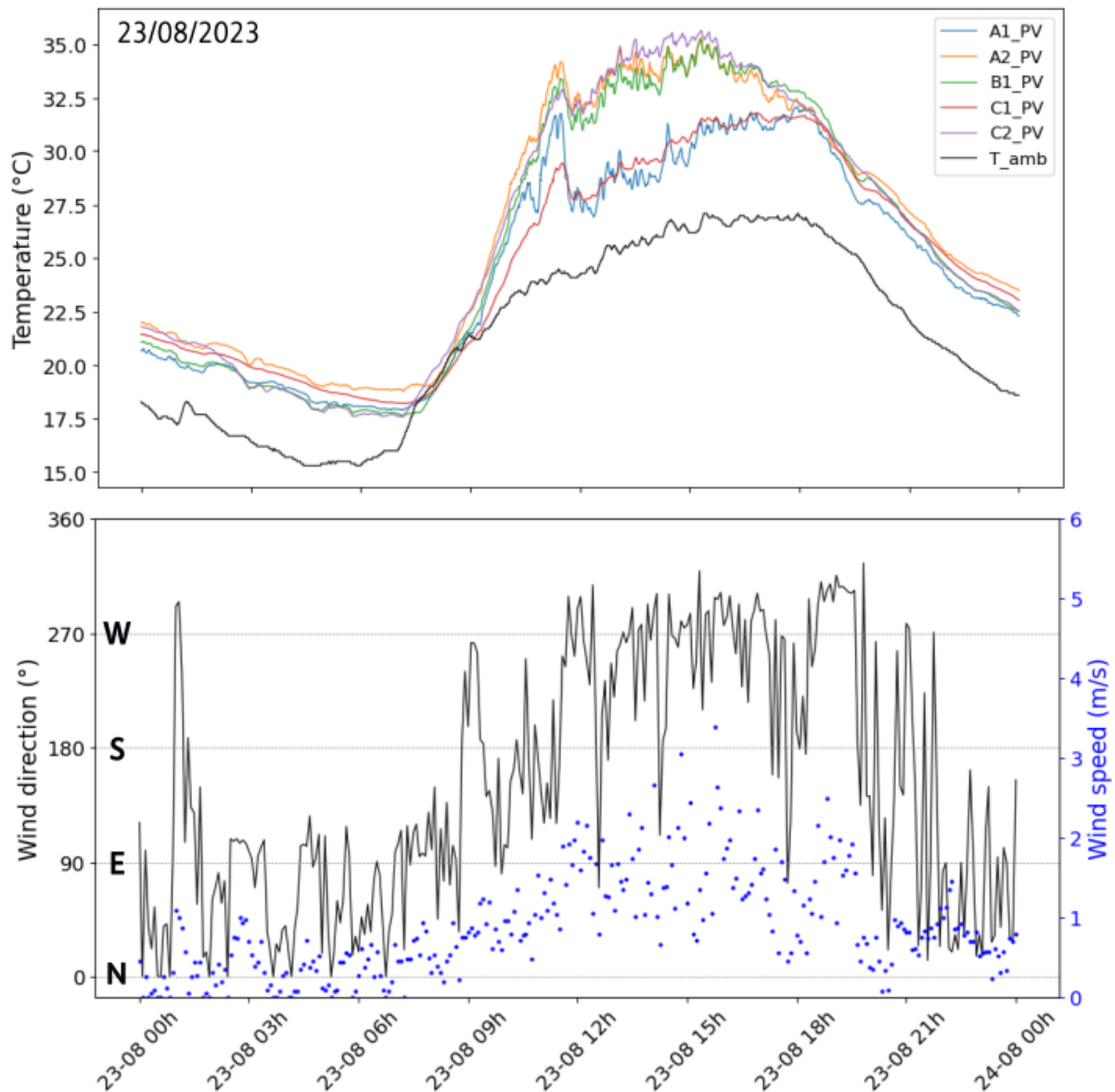
Met data over de gehele periode blijkt dat er nogal wat verschillen zijn tussen de gemeten temperaturen op de verschillende sensorlocaties op Figuur 3.2. Door convectie is het te verklaren dat de sensoren boven in het dak een hogere temperatuur meten dan die onder in het dak (Figuur 3.4). Figuur 3.4 geeft twee andere dagen met andere windrichtingen en snelheden waarbij geen patronen zijn te zien die door wind zouden kunnen worden verklaard. Wanneer de gehele reeks aan data over de gehele onderzoeksperiode gebruikt wordt en het verschil (de delta) in temperatuur weergegeven wordt ten opzichte van de centrale sensor (B1). Dan is te zien dat A1 en C2 schommelingen maken die door de wind veroorzaakt wordt. Figuur 3.5 geeft dit visueel weer.



Figuur 3.1 | De temperatuur gemeten met luchttemperatuur sensoren onder het referentie dak op 26-05-2023 over tijd op de x-as. Hier is duidelijk het verband te zien van de hoogte van de sensoren op het dak. De hoogste sensor (A1) is altijd warmer dan de laagste (C1).

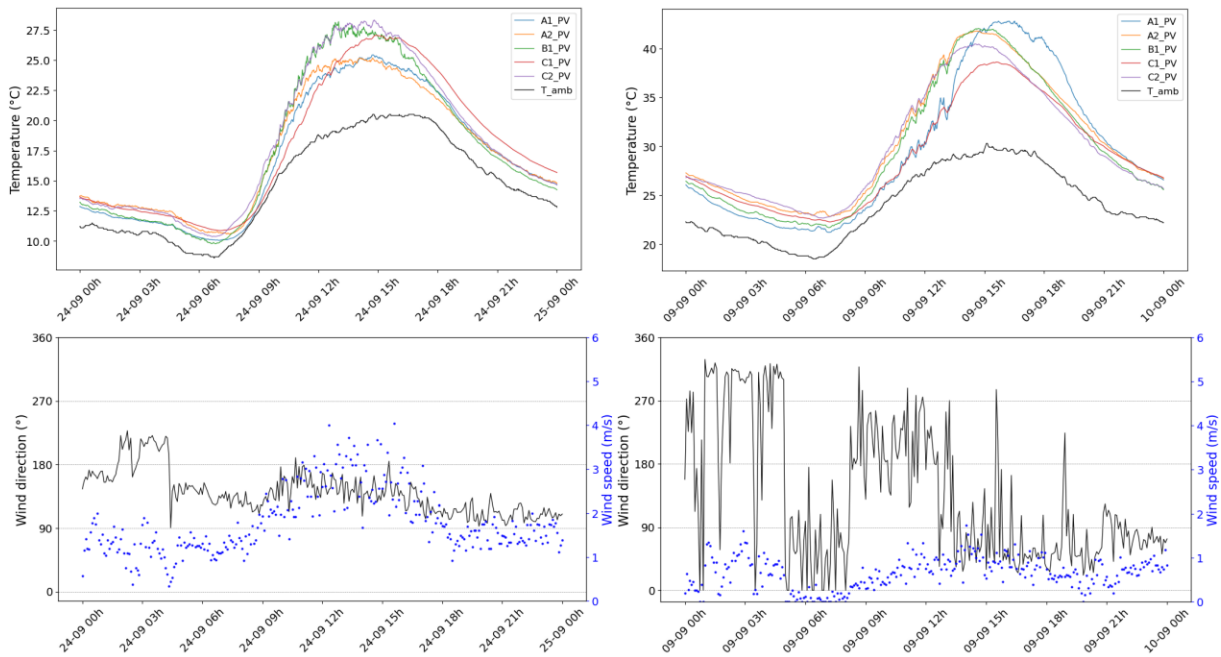




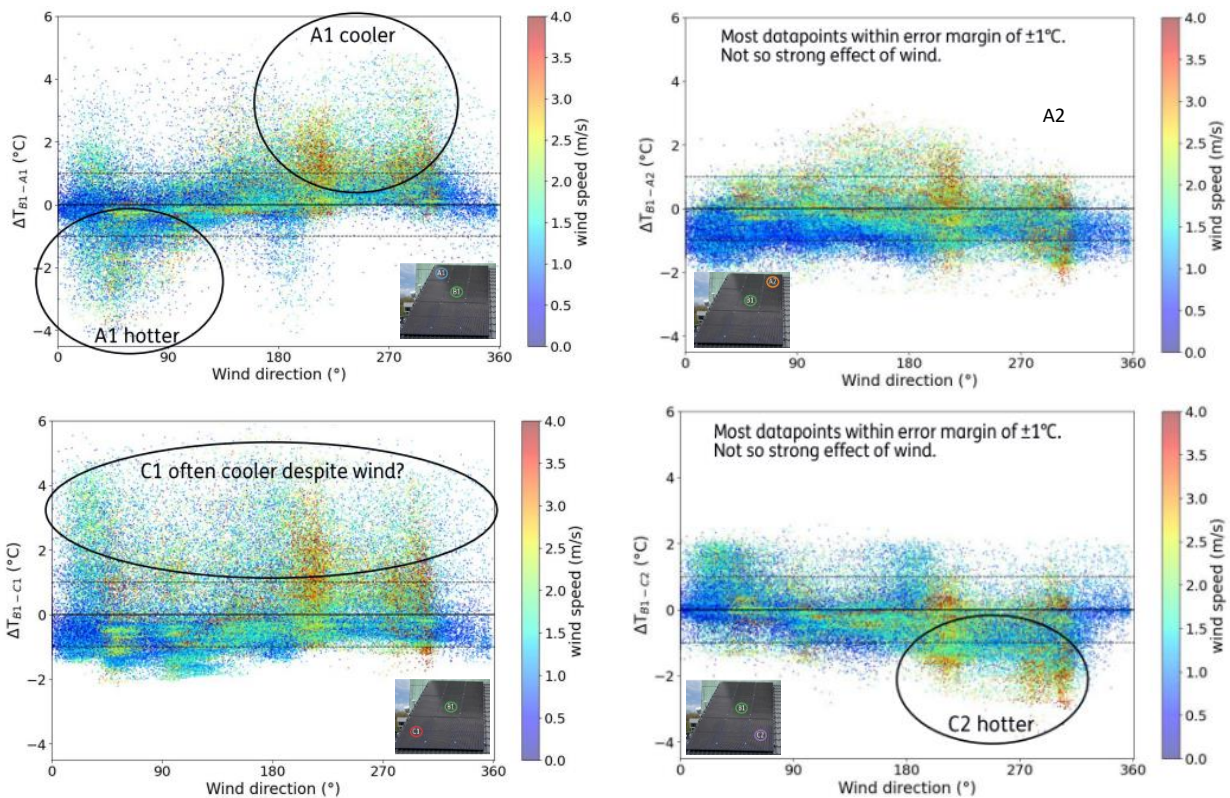


Figuur 3.3 | De temperatuur gemeten met luchttemperatuur sensoren onder de PV-panelen op 23-08-2023 (boven) met de windsnelheid en windrichting op dezelfde dag uitgesplitst over tijd op de x-as (onder). Hier is duidelijk het verband te zien van de windrichting in combinatie met de lagere temperaturen van de sensoren voor A1 (blauw) en C1 (rood).





**Figuur 3.4** | Twee reeksen 24-09-2023 en 09-09-2023. De temperatuur gemeten met luchttemperatuur sensoren onder de PV-panelen (boven) met de windsnelheid en windrichting op dezelfde dag uitgesplitst over tijd op de x-as (onder) geeft geen patroon zoals in Figuur 3.3.



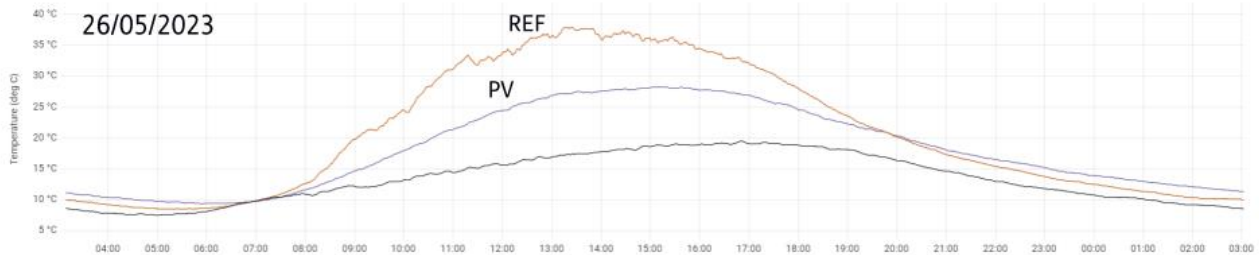
**Afbeelding 3.5** | Overzicht van de  $\Delta T$  tussen B1 (centrale luchttemperatuur sensor) t.o.v. de omliggende sensoren. Op de X-as de windrichting in graden ( $90^\circ$  = oost,  $180^\circ$  = zuid,  $270^\circ$  = west,  $360^\circ$  = noord) en in kleur de windsnelheid. Grafieken geven de datapunten voor de gehele onderzoeksperiode (maart t/m oktober) met 2 minuten resampling. Hierbij is te zien dat het verschil tussen de temperaturen van sensor aan de rand (A1) of verder van de rand (C2) ten opzichte van de midden sensor (B1) afhankelijk is van de windrichting. Waarbij C1 ook aan de rand ligt maar ondanks dat over het algemeen koeler is dan B1. Voor A2 is er geen invloed van de wind.



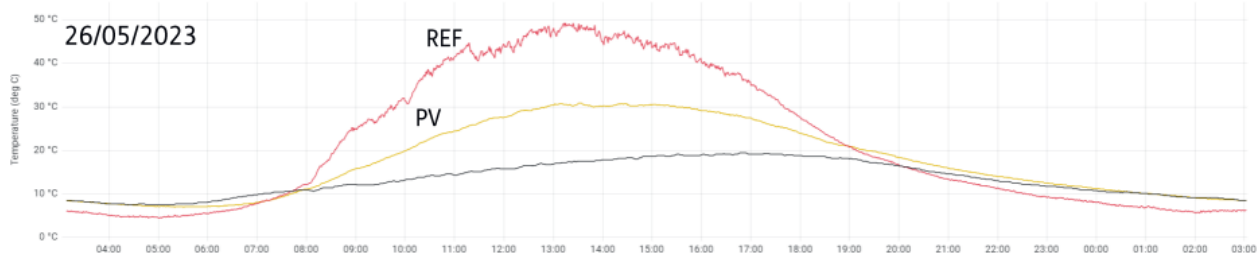
### 3.2.3 Referentie versus PV-panelen

Bij de temperatuurmetingen blijkt dat de absolute temperatuurverschillen tussen het referentie dak en het dak met de PV-panelen verschillen voor zowel luchttemperatuur als oppervlaktetemperatuur. Figuur 3.6 geeft de luchttemperatuur weer op een willekeurige dag. De luchttemperatuur is gedurende de dag tot maximaal 10°C lager onder de PV-panelen ten opzichte van de luchttemperatuur onder het

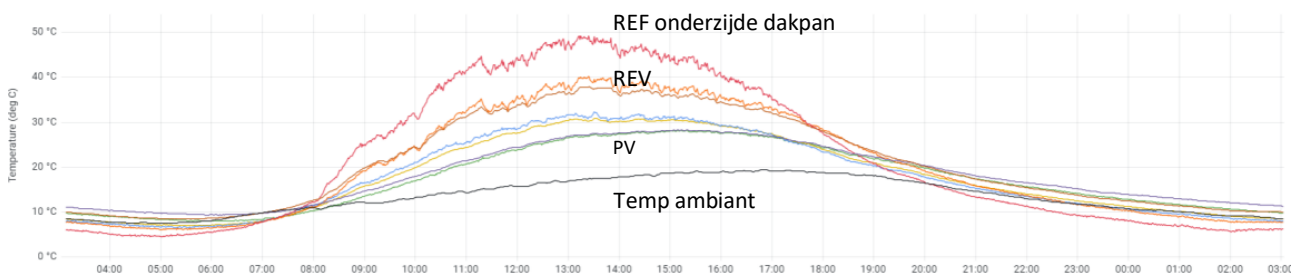
referentie dak. Gedurende de nacht is de luchttemperatuur ongeveer 1 – 1,5 °C hoger dan onder het referentie dak, hetzelfde patroon maar dan sterker is gemeten door de oppervlakesensoren. In figuur 3.7 is de temperatuur van de binnenzijde van de dakpan in het referentie dak 18 graden hoger overdag. Gedurende de nacht is de temperatuur van de dakpan in het referentie dak juist 2 tot 3 graden lager dan het PV-dak (Figuur 3.8).



Figuur 3.6 | De luchttemperaturen (in C° op de Y-as) onder het dak voor het referentie dak (B1 REF) en onder de PV-panelen (B1 PV) met de tijd op de X-as als voorbeeld is hier 26-05-2023 gekozen. De zwarte lijn is de ambient temperatuur.



Figuur 3.7 | De temperaturen (in C° op de Y-as) van de oppervlakesensor op de binnenzijde van de dakpan voor het referentie dak (B1 REF) en onder de PV-panelen (B1 PV) met de tijd op de X-as als voorbeeld is hier 26-05-2023 gekozen. De zwarte lijn is de ambient temperatuur.



Figuur 3.8 | De temperaturen (in C° op de Y-as) van alle sensoren voor het referentie dak (B1 REF) en onder de PV-panelen (B1 PV) met de tijd op de X-as als voorbeeld is hier 16-05-2023 gekozen. In het midden van de grafiek van boven naar onder op kleur: rood = REF oppervlaktetemperatuur binnenzijde dakpan, oranje = REF oppervlaktetemperatuur dakbeschoot, bruin = REF lucht temperatuur, blauw = PV-oppervlaktetemperatuur buitenzijde dakpan, geel = PV oppervlaktetemperatuur binnenzijde dakpan, paars = PV lucht temperatuur, groen = PV oppervlaktetemperatuur dakbeschoot, zwart = ambient temperatuur.

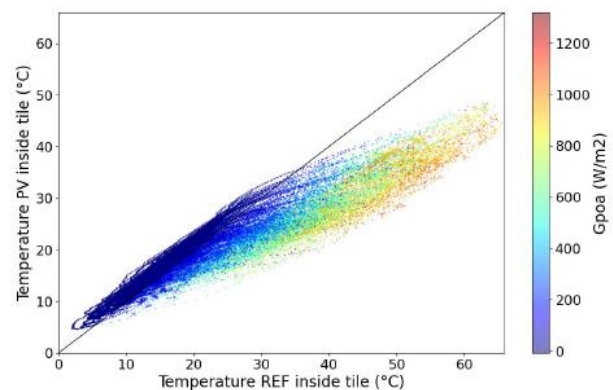


### Temperatuur x wind

Er zijn enkele patronen duidelijk geworden in de verdeling van de temperatuur. Warme lucht stijgt, en dat is ook teruggevonden in de metingen. De temperatuur bovenin het dak is over het algemeen hoger dan de temperatuur onderaan het dak. De richting van de wind heeft echter ook invloed op de temperatuur onder het dak. In figuur 3.3 is een overzicht te zien van de temperatuur in alle luchtthermometers gedurende een etmaal. Rond twaalf uur op de middag begint de wind toe te nemen en draait deze naar het westen. De op het westen gelegen thermometers A1 en C1 tonen een lagere temperatuur dan de andere thermometers. Deze randwerking is nader onderzocht door aan de PV-zijde de centrale sensor B1 te vergelijken met de sensoren er omheen. Hieruit is voortgekomen dat de randwerking het sterkste is in de sensoren A1 en C1. Positie A1 is lichtelijk warmer dan B1 bij een windrichting vanuit het oosten en koeler bij wind vanuit het westen. Positie C1 is in alle windrichtingen vaak koeler dan B1. Mogelijk is de lagere temperatuur in C1 deels te verklaren door de stijgende werking van warme lucht in combinatie met de verkoelende werking van de wind. Let wel, in de testopstelling liggen sensoren A1 en C1 dicht bij de rand van het dak waar de wind makkelijk onder het dak kan, maar bij sensoren A2 en C2 zit de scheidingwand tussen het PV-deel van het dak en het referentie dak. De wind kan aan die kant dus niet zo goed doorstromen, en effecten van de wind op de temperatuur aan deze zijde zijn daardoor mogelijk minder goed waar te nemen.

### Temperatuur x straling

De grootste invloed op de temperatuur komt van de instraling van de zon. De zoninstraling op het dak is het hoogst wanneer de zon loodrecht op het dak staat op een heldere dag. Omdat de zoninstraling één van de belangrijkste factoren is voor het verwarmen van het dak is op de dagen dat de lucht helder is het verschil tussen de maximale en de minimale temperatuur binnen een etmaal het grootst. Het dak kan dan het beste opwarmen gedurende de dag. De correlatie van hogere temperatuur in de referentiezijde ten opzichte van de PV-zijde is goed te zien in figuur 3.9. In deze figuur is ook duidelijk de correlatie met de zoninstraling te zien. Bij een lage zoninstraling is de temperatuur aan beide zijden van het dak vaker gelijk.

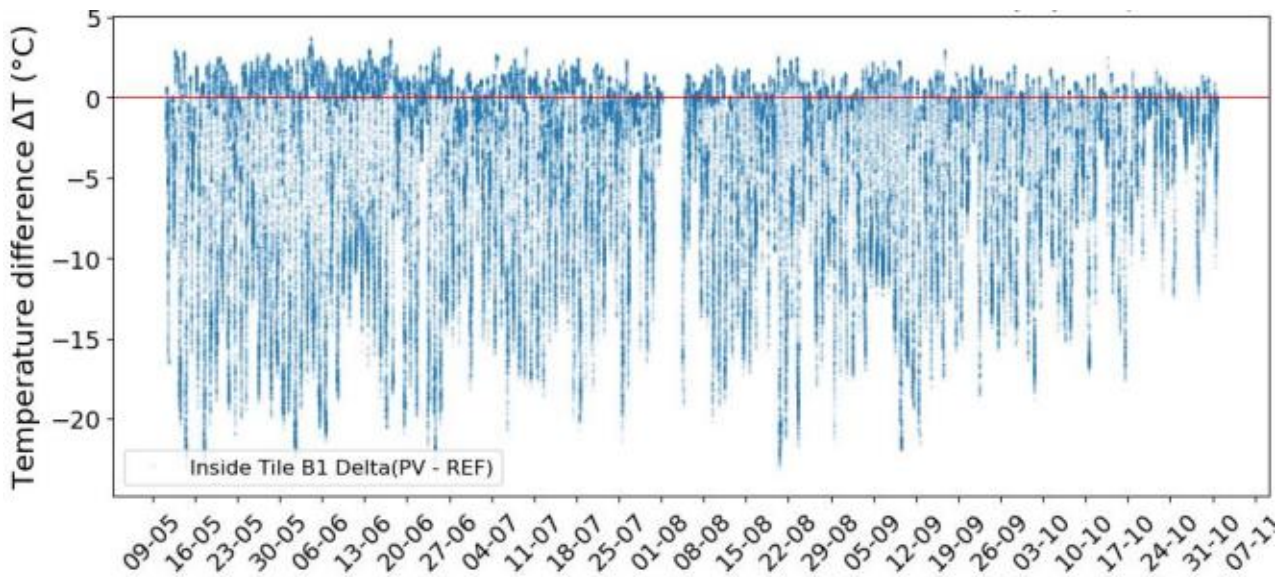


**Figuur 3.9 | Temperatuur in de PV zijde uitgezet tegen de temperatuur in de referentiezijde. De kleuren geven de zoninstraling  $G_{poa}$  in  $W/m^2$ .**

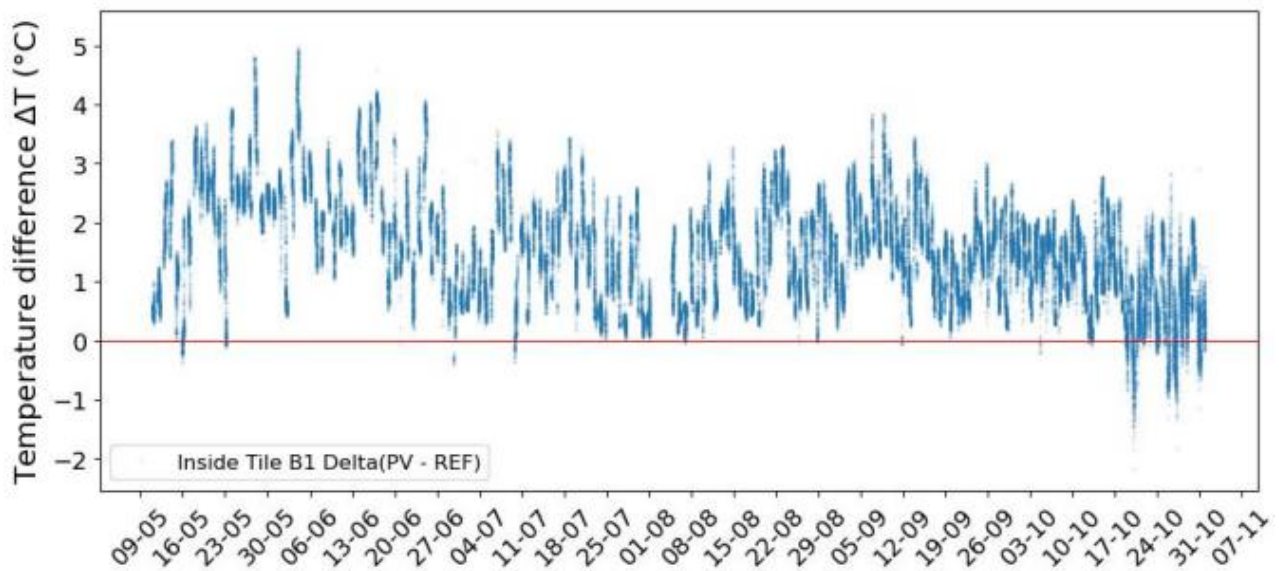
Het grootste waargenomen verschil in temperatuur is het verschil in de temperatuur aan de binnenzijde van het dakpan oppervlak. Figuur 3.10 geeft een overzicht van het relatieve temperatuurverschil tussen de PV-zijde en de referentiezijde. De temperatuur aan de PV-zijde is regelmatig tot 40% lager dan de temperatuur aan de referentiezijde. In de nacht is het omgekeerde waar. De temperatuur aan de PV-zijde valt doorgaans tussen de 0 en 20% hoger uit aan de PV-zijde van het dak (Figuur 3.11). Ditzelfde patroon is te zien in de metingen van de luchttemperatuur onder de dakpannen (Bijlage B). Figuur 3.12 geeft van alle vier de gemeten klimatologische waarden een overzicht.





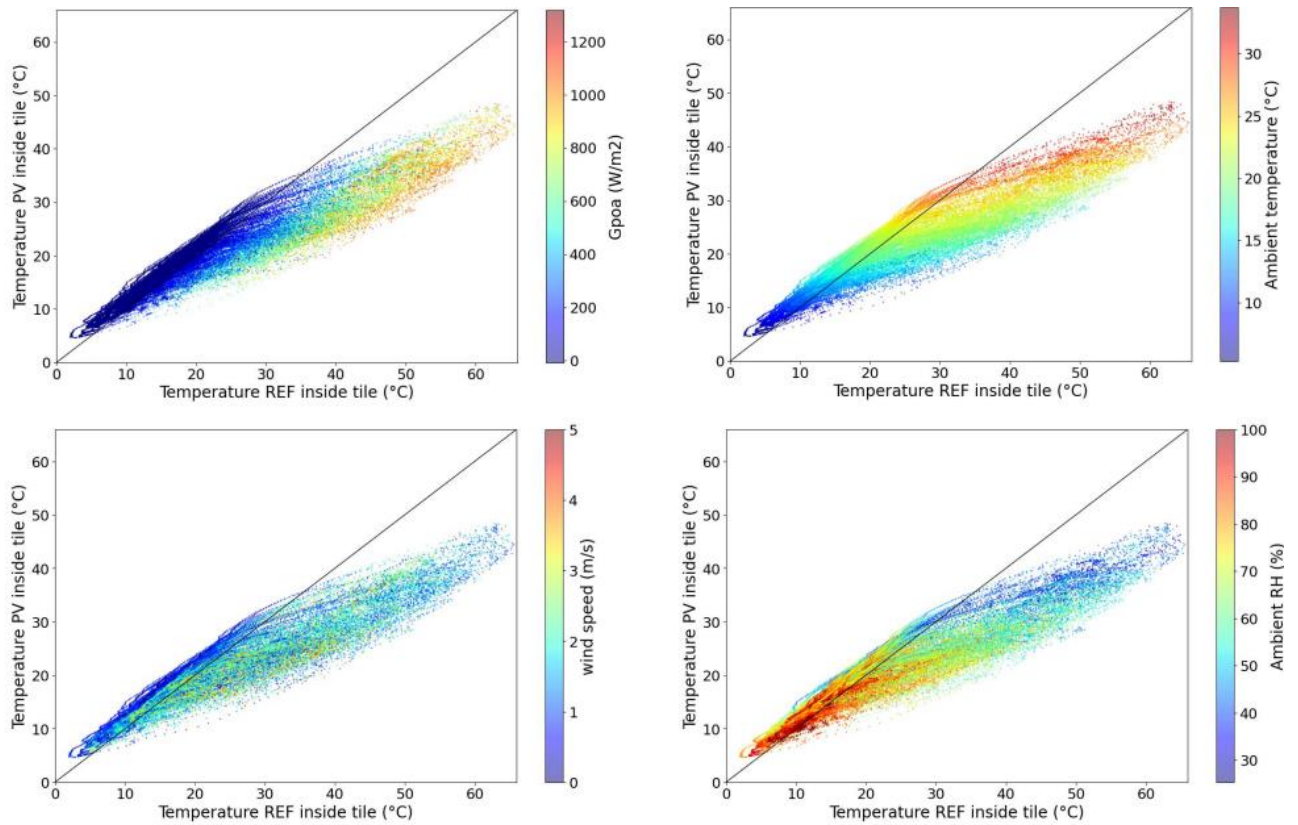


Figuur 3.10 | Het verschil in oppervlaktetemperaturen (in C° op de Y-as) tussen de sensor aan de binnenzijde van de dakpan onder het referentie dak (B1 REF) en onder de PV-panelen (B1 PV) met de dagen op de X-as gedurende de dag. Dag = G<sub>poa</sub> >10 W/m<sup>2</sup>.  $\Delta T(\%) = \frac{(T_{pv} - T_{ref})}{T_{ref} * 100}$



Figuur 3.11 | Het verschil in oppervlaktetemperaturen (in C° op de Y-as) tussen de sensor aan de binnenzijde van de dakpan onder het referentie dak (B1 REF) en onder de PV-panelen (B1 PV) met de dagen op de X-as gedurende de nacht. Nacht = G<sub>poa</sub> <0 W/m<sup>2</sup>.  $\Delta T(\%) = \frac{(T_{pv} - T_{ref})}{T_{ref} * 100}$





**Figuur 3.12 | De absolute oppervlaktetemperaturen (in °C) van de sensor aan de binnenzijde van de dakpan onder het referentie dak (B1 REF) op de X-as en onder de PV-panelen (B1 PV) op de Y-as en in kleur vier verschillende variabelen:  $G_{poa}$  (in W/m<sup>2</sup>), Ambiante temperatuur (in °C), windsnelheid (in m/s) en ambiante relatieve luchtvochtigheid (in %).**



### 3.3 Relatieve luchtvochtigheid

De luchtvochtigheid is op 8 punten gemeten met de DeltaOhm sensoren. Vijf punten in de PV-zijde en 3 punten in de referentiezijde. Wanneer de luchtvochtigheid de honderd procent nadert is de temperatuur zowel op het PV-dak als het referentiedak lager dan wanneer de luchtvochtigheid laag is. Verklaring is dat bij lagere temperatuur de lucht sneller verzadigd is.

#### 3.3.1 Referentiezijde

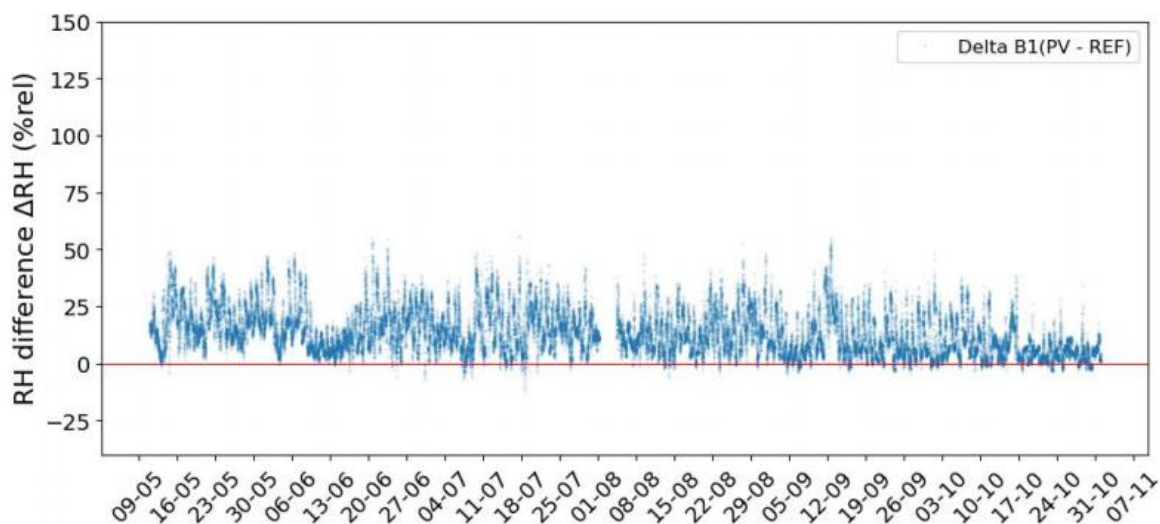
In het referentiedak is vaak een grote stijging in temperatuur waargenomen gedurende de dag. Met deze stijging in temperatuur gaat een daling in de relatieve luchtvochtigheid gepaard, zodoende dat de luchtvochtigheid regelmatig tot beneden de vijftig procent daalt.

#### 3.3.2 Met PV panelen

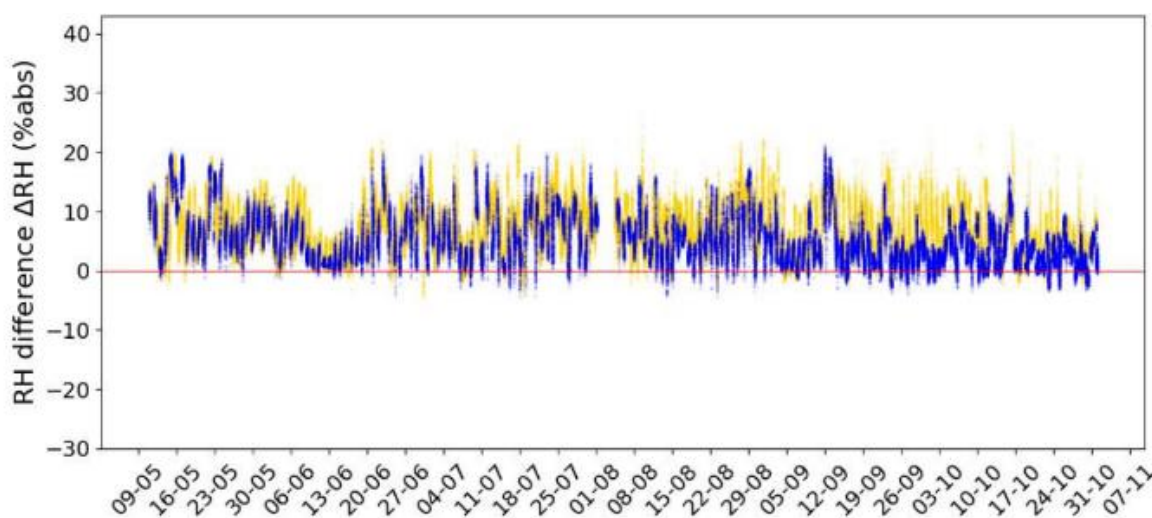
Wanneer de temperatuur in het PV-dak en het referentiedak ongeveer even hoog is er een hogere relatieve luchtvochtigheid waargenomen onder het dak met PV-panelen (Figuur 3.13).

#### 3.3.3 Referentie versus PV panelen

In figuren 3.14 t/m 3.16 is het verschil te zien tussen de relatieve luchtvochtigheid onder de beide daken overdag en 's nachts. Bij een positieve waarde is de luchtvochtigheid hoger onder de PV-zijde, bij een negatieve waarde is de luchtvochtigheid hoger in de referentiezijde. Enkel in de onderste rij is structureel gedurende de nacht een hogere luchtvochtigheid waargenomen in de referentiezijde dan in de PV-zijde.



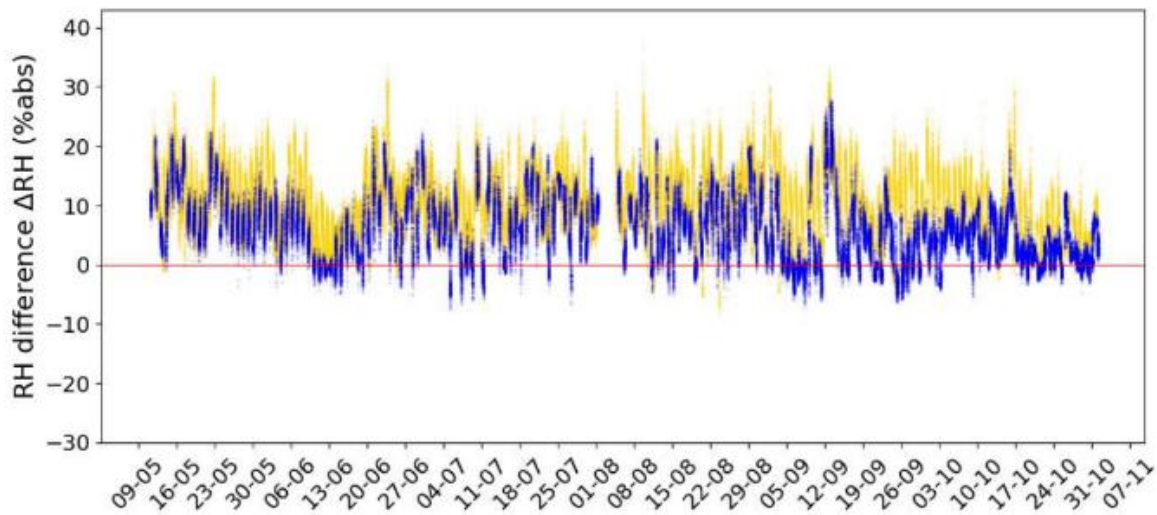
Figuur 3.13 | Verschil in relatieve luchtvochtigheid sensor B1 PV - B1 REF (verschil uitgedrukt in relatief verschil).



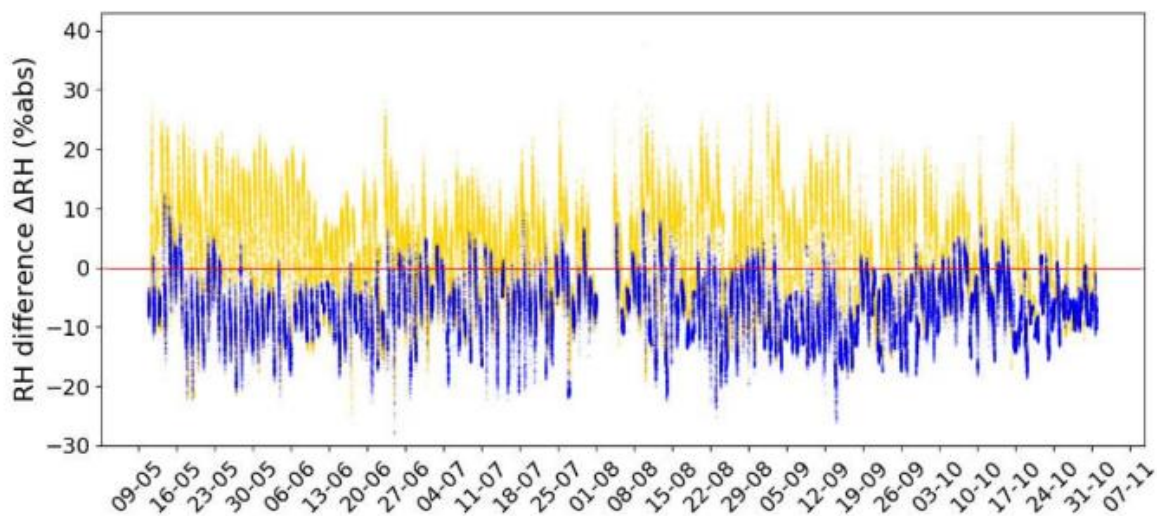
Figuur 3.14 | Verschil (absoluut) in relatieve luchtvochtigheid sensor B1 PV - B1 REF. Geel is overdag, blauw is 's nachts.







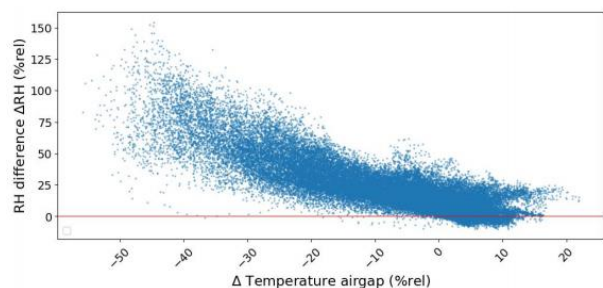
Figuur 3.15 | Verschil (absoluut) in relatieve luchtvochtigheid sensor A1 PV - A1 REF. Geel is overdag, blauw is 's nachts.



Figuur 3.16 | Verschil (absoluut) in relatieve luchtvochtigheid sensor C2 PV - C2 REF. Geel is overdag, blauw is 's nachts.

Het verschil in temperatuur correleert sterk met het verschil in relatieve luchtvochtigheid (Figuur 3.17). In figuur 3.18 is een grafiek te zien met de luchtvochtigheidsdata van 2 weken van sensoren B1\_PV, B\_REF en de luchtvochtigheid buiten. Hier is te zien dat de luchtvochtigheid buiten vrijwel altijd hoger is dan de luchtvochtigheid in het dak.

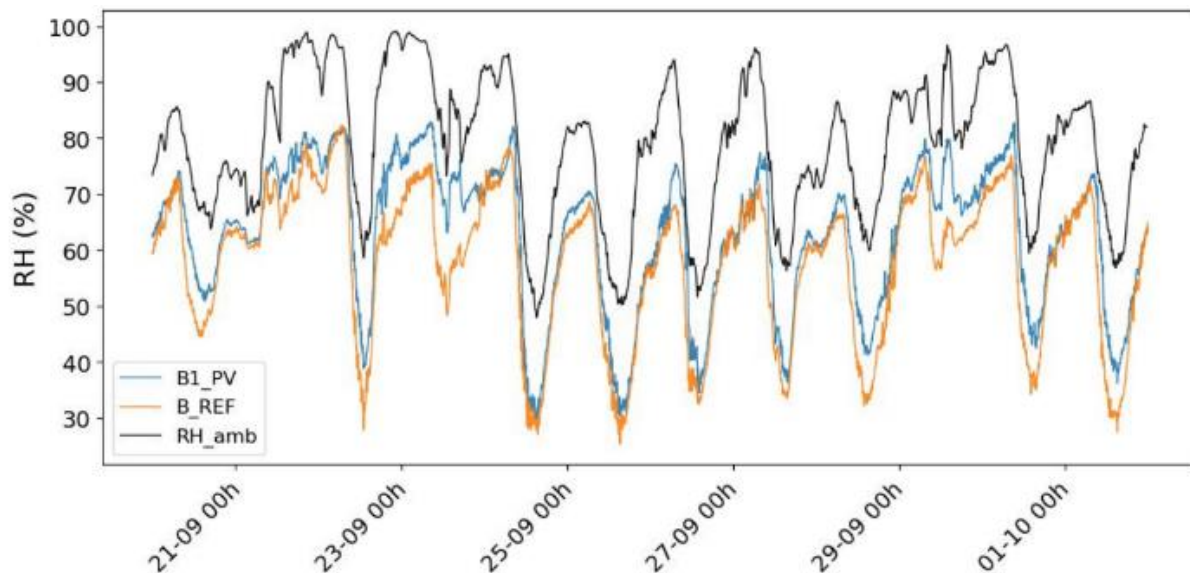
Gemiddeld genomen is de relatieve luchtvochtigheid over de hele periode tussen de 1% tot 20% hoger in absolute waarde in het PV-dak dan in het referentie dak. Relatief komt dat neer op een verschil van 40% tussen de daken. Wel is het zo dat de sensoren allemaal net ander gedrag vertonen, en dat het verschil het sterkst is in de bovenste sensoren.



Figuur 3.17 | Verschil (relatief) in relatieve luchtvochtigheid ten opzichte van temperatuurverschil sensor C2 PV - C2 REF.







Figuur 3.18 | De relatieve luchtvochtigheid van 20 september tot 2 oktober.

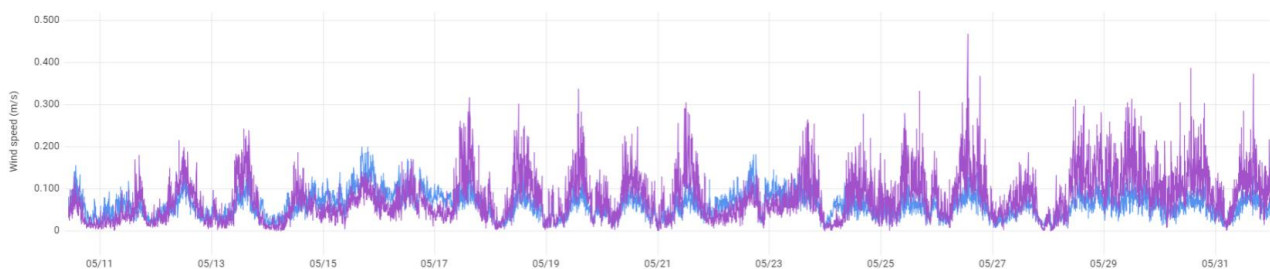
### 3.4 Luchtstroom

De luchtstroom onder het dak kan een effect hebben op het microklimaat van het dak. Daarom zijn de windsnelheid en windrichting bepaald middels de DeltaOhm sensoren. Opvallend is dat er zelfs binnen 1 zijde van het dak, dus binnen de PV of de REF zijde, al onderlinge verschillen zijn in luchtsnelheid en richting. De zijde van het dak waar de wind op dat moment vandaan komt ervaart de snelste luchtstroom. Om de vergelijking tussen de PV-zijde en de Referentiezijde zo gelijk mogelijk te maken is hoofdzakelijk naar sensoren B1\_PV en B1\_REF gekeken. Dat zijn de middelste

sensoren op elke zijde, om de effecten van de vele malen sterkere wind op een zijde waar de wind vandaan komt te beperkt.

#### 3.4.1 Referentie versus PV-panelen

In figuur 3.19 is een overzicht van 20 dagen windsnelheidsmetingen van de referentiezijde en de PV-zijde weergegeven. De verschillen in windsnelheid zijn kleiner dan de nauwkeurigheid van de sensoren; er is geen waarneembaar verschil in windsnelheid onder de dakpannen tussen beide situaties.



Figuur 3.19 | De 5 minuten gemiddelde windsnelheid gemeten in sensoren B1\_PV (paars) en B1\_REF (blauw) over een periode van 20 dagen in mei in meter per seconde.



## 4 Discussie

De aanwezigheid van PV-zonnepanelen op een niet-geïsoleerd dak met standaard dakpannen brengt veranderingen van de temperatuur onder de dakpannen met zich mee. Gedurende de dag blijft de temperatuur van een dak met zonnepanelen lager dan een dak zonder zonnepanelen (tot 15-20 °C), en gedurende de nacht blijft de temperatuur krap hoger in een dak met zonnepanelen (tot 2-3 °C). Gepaard aan de lagere temperatuur in het dak met de PV-panelen is een lichtelijk verhoogde relatieve luchtvochtigheid waargenomen (tussen 1% en 20% absolute relatieve luchtvochtigheid). Er is geen waarneembaar verschil gevonden in luchtverplaatsing onder het dak tussen de twee situaties. De sensors die meer richting de dakrand gepositioneerd zaten geven een afwijking in luchttemperatuur onder het dak die afhankelijk is van windsnelheid maar vooral de richting van de wind.

Omdat er een significant verschil is waargenomen tussen de temperatuur van de daken in beide situaties is het aannemelijk dat gebouwbewonende vleermuizen de verschillen in omstandigheden ook kunnen waarnemen. Dan is de vraag op welke tijden van het jaar dit eventueel van invloed is, bijvoorbeeld op koudere dagen kan een koeler dak ongeschikt zijn omdat net dat beetje warmte van de zon op het dak mist, of wellicht zijn reguliere daken zonder PV-panelen in hoog zomer wel te extreem warm (naderen de 45-50 °C) en biedt het koelere deel juist een extra optie bij extreem warme temperaturen? Uiteindelijk zijn gebouwbewonende vleermuizen erg warmte minnende soorten en wellicht zoeken de dieren juist de extreem warme delen op. Vervolgonderzoek om na te gaan waar de voorkeuren van gebouw bewonende vleermuizen liggen wat betreft het microklimaat van daken zou licht kunnen scheppen op de impact op vleermuispopulaties wanneer woningen op grote schaal worden voorzien van PV-panelen.



## 5 Literatuurlijst

### 5.1 Literatuur

- [1] CBS, „Hernieuwbare energie in Nederland 2021,” Centraal bureau voor de Statistiek, Den Haag, 2021.
- [2] NOS, „Nederland Europees koploper zonnepanelen, maar hoe kan het beter?,” 03 08 2022. [Online]. Available: <https://nos.nl/l/2439211>.
- [3] Ecorys, „Economische gevolgen Flora- en faunawet,” Ecorys, Rotterdam, 2016.
- [4] E. Korsten en M. Schillemans, „Na-isolatie en vleermuizen: een tragedie in de spouw,” 06 Augustus 2020. [Online]. Available: <https://www.zoogdiervereniging.nl/actueel/nieuws/na-isolatie-en-vleermuizen-een-tragedie-de-spouw>.
- [5] A. Haarsma en T. Molenaar, „De meervleermuis in Noordwest-Overijssel, In het kader van de zesjaarlijkse monitoring. Rapport RA19143-01,” Regelink Ecologie & Landschap, Wageningen, 2020.
- [6] Schillemans, M.J., Haarsma, A.-J., Janssen, R. Jansen, E.A. & H.J.G.A. Limpens, „Advies agendabepaling monitoring en onderzoek aan vleermuizen in het kader van de energietransitie,” Zoogdiervereniging, Nijmegen, 2021.
- [7] M. Krijn, M.J. Epe, H.J.G.A. Limpens, J. Louwe Kooijmans, H. Visser, „Effecten van energetische verbetering van woningen op beschermde gebouwbewonende soorten. A&W-rapport 20-280,” Altenburg & Wymenga ecologisch onderzoek, Feanwâlden, 2021.
- [8] Dorenbosch, M. & M.A. Karels, „Temperatuurverschillen in de broedruimte van de huismus onder daken. Wat is het temperatuurverschil onder de dakpannen op geïsoleerde en ongeïsoleerde daken? Rapport 23-004.,” Waardenburg Ecology, Culemborg, 2023.

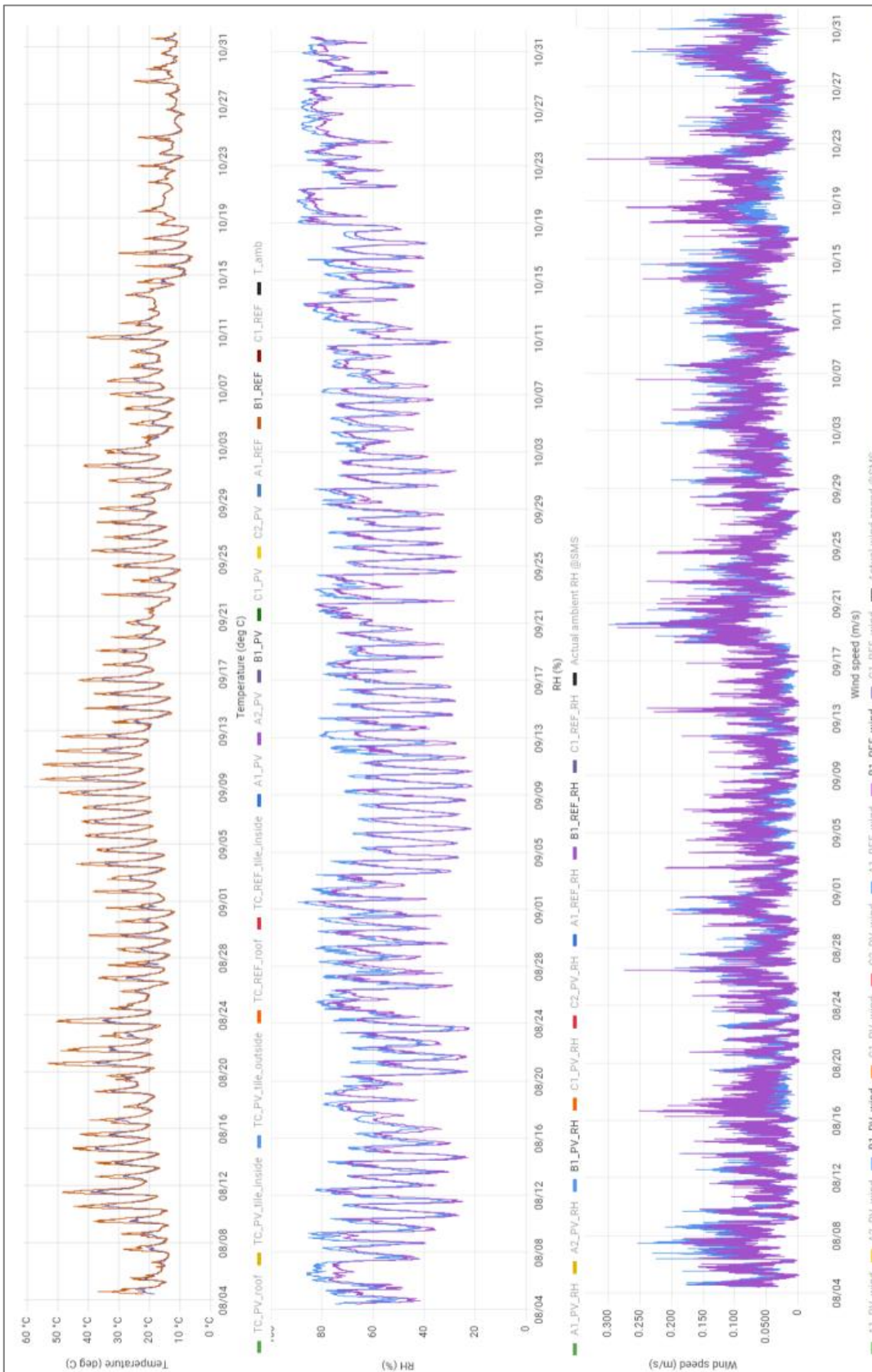
### 5.2 Websites

DeltaOhm manual via:

[https://www.senseca.com/fileadmin/GhmProduct/PDF/Datenblatt/en/ghm\\_HD2903T\\_en\\_datasheet.pdf](https://www.senseca.com/fileadmin/GhmProduct/PDF/Datenblatt/en/ghm_HD2903T_en_datasheet.pdf)



# Bijlage A. Meetwaarden gehele periode

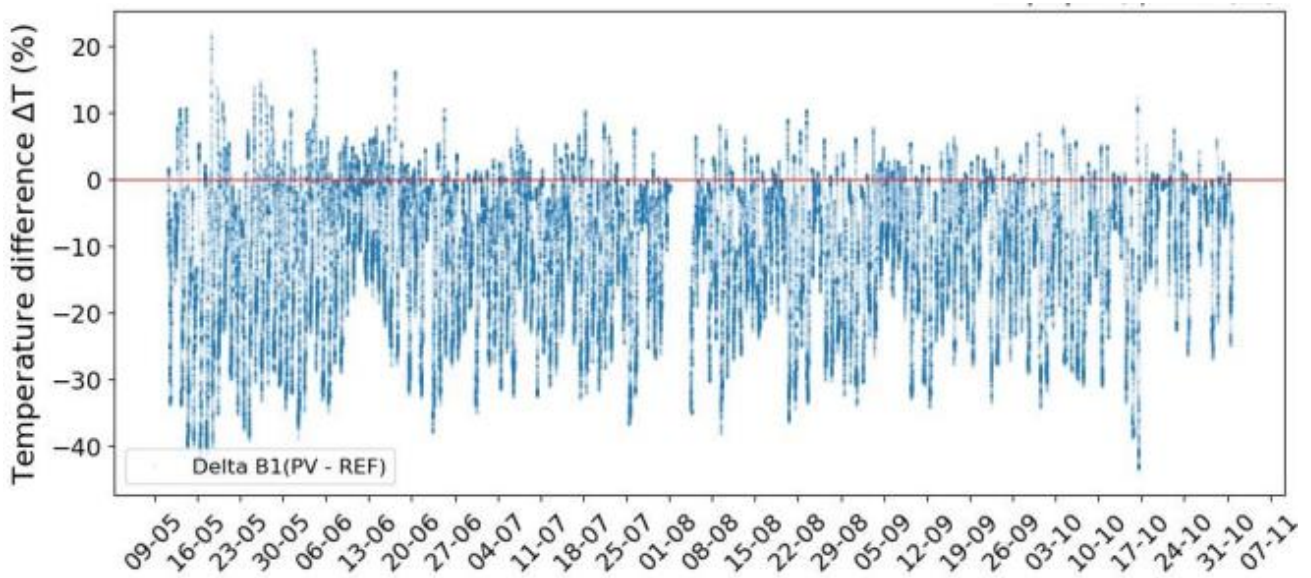


Figuur A.1 | Overzicht meetwaarden over gehele onderzoeksperiode.

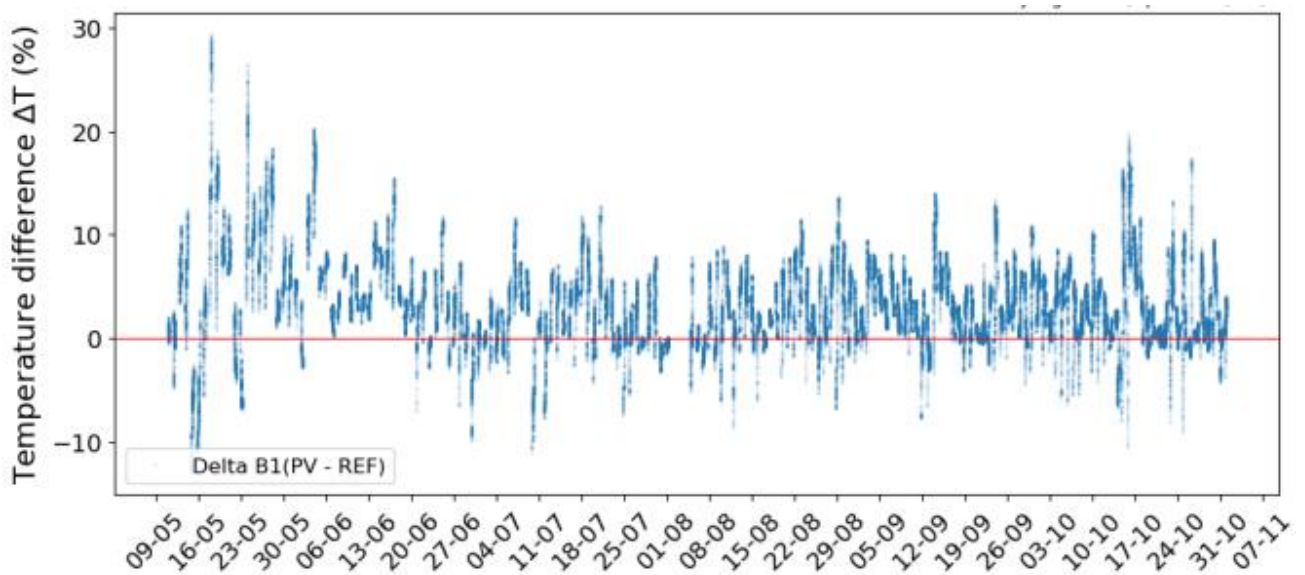




## Bijlage B. Verschil in luchttemperatuur



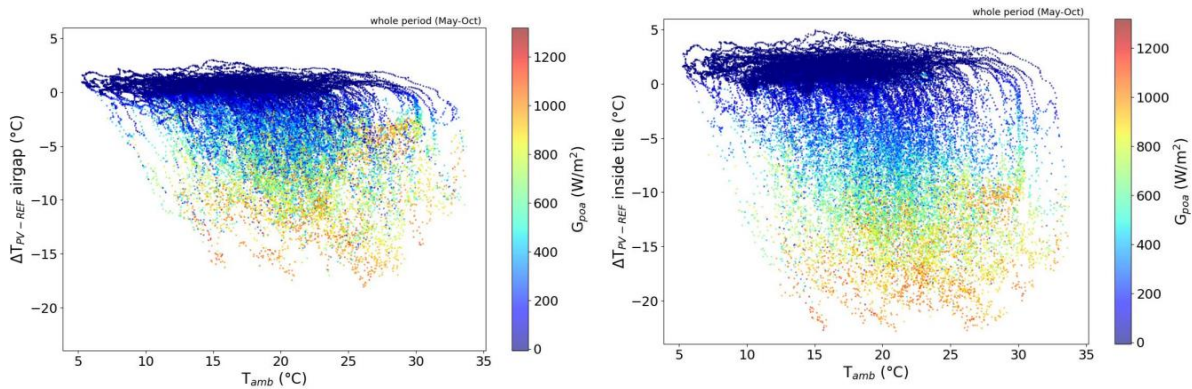
Figuur B.1 | Het relatieve verschil in luchttemperaturen (in % op de Y-as) tussen de sensor onder het referentie dak (B1 REF) en onder de PV-panelen (B1 PV) met de dagen op de X-as gedurende de dag. Dag =  $G_{poa} > 10 \text{ W/m}^2$ .



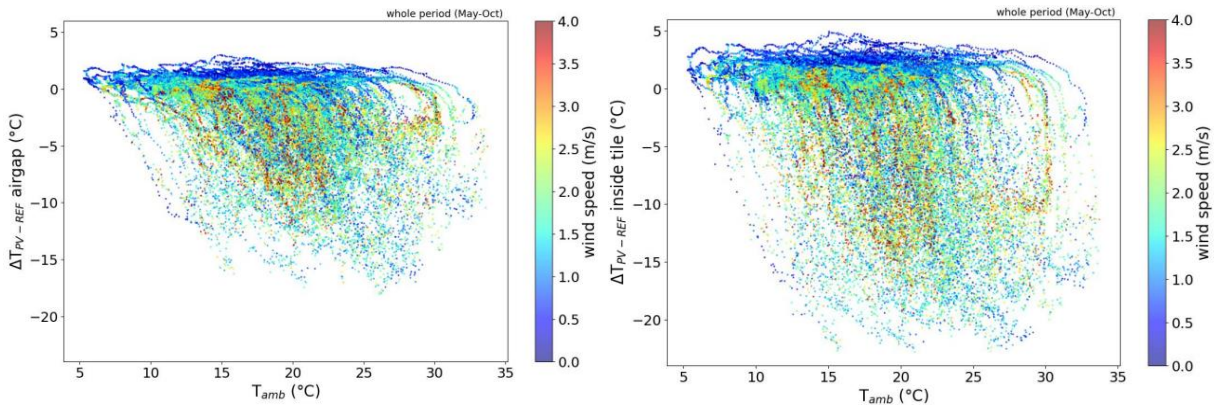
Figuur B.2 | Het verschil in luchttemperaturen (in % op de Y-as) tussen de sensor onder het referentie dak (B1 REF) en onder de PV-panelen (B1 PV) met de dagen op de X-as gedurende de nacht. Nacht =  $G_{poa} < 0 \text{ W/m}^2$ .



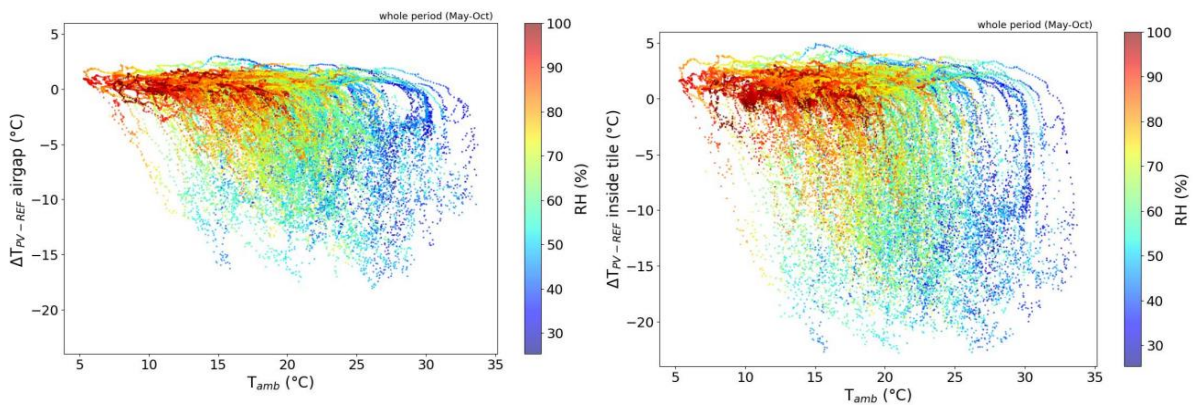
# Bijlage C. Overige figuren



**Figuur C.1 |** Het verschil (in C°) in luchttemperaturen (links) en oppervlakte temperaturen (rechts) tussen de sensor onder het referentie dak (B1 REF) en onder de PV-panelen (B1 PV) op de Y-as met de ambient temperatuur op de x-as en in kleur de bestralingssterkte op het vlak ( $G_{poa}$  in W/m<sup>2</sup>).

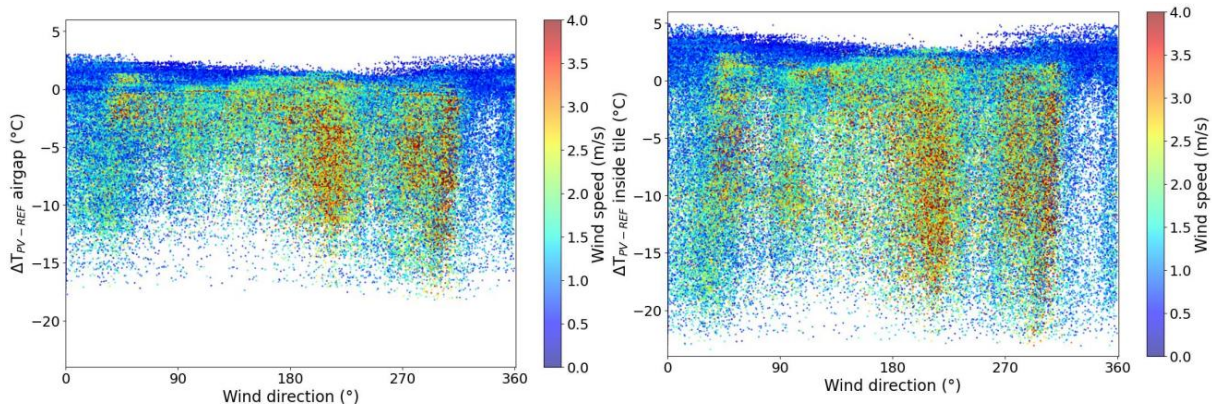


**Figuur C.2 |** Het verschil (in C°) in luchttemperaturen (links) en oppervlakte temperaturen (rechts) tussen de sensor onder het referentie dak (B1 REF) en onder de PV-panelen (B1 PV) op de Y-as met de ambient temperatuur op de x-as en in kleur de windsnelheid in (m/s).

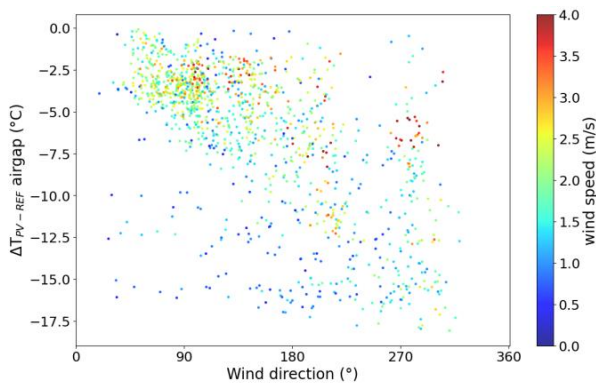


**Figuur C.3 |** Het verschil (in C°) in luchttemperaturen (links) en oppervlakte temperaturen (rechts) tussen de sensor onder het referentie dak (B1 REF) en onder de PV-panelen (B1 PV) op de Y-as met de ambient temperatuur op de x-as en in kleur de relatieve luchtvochtigheid (%).





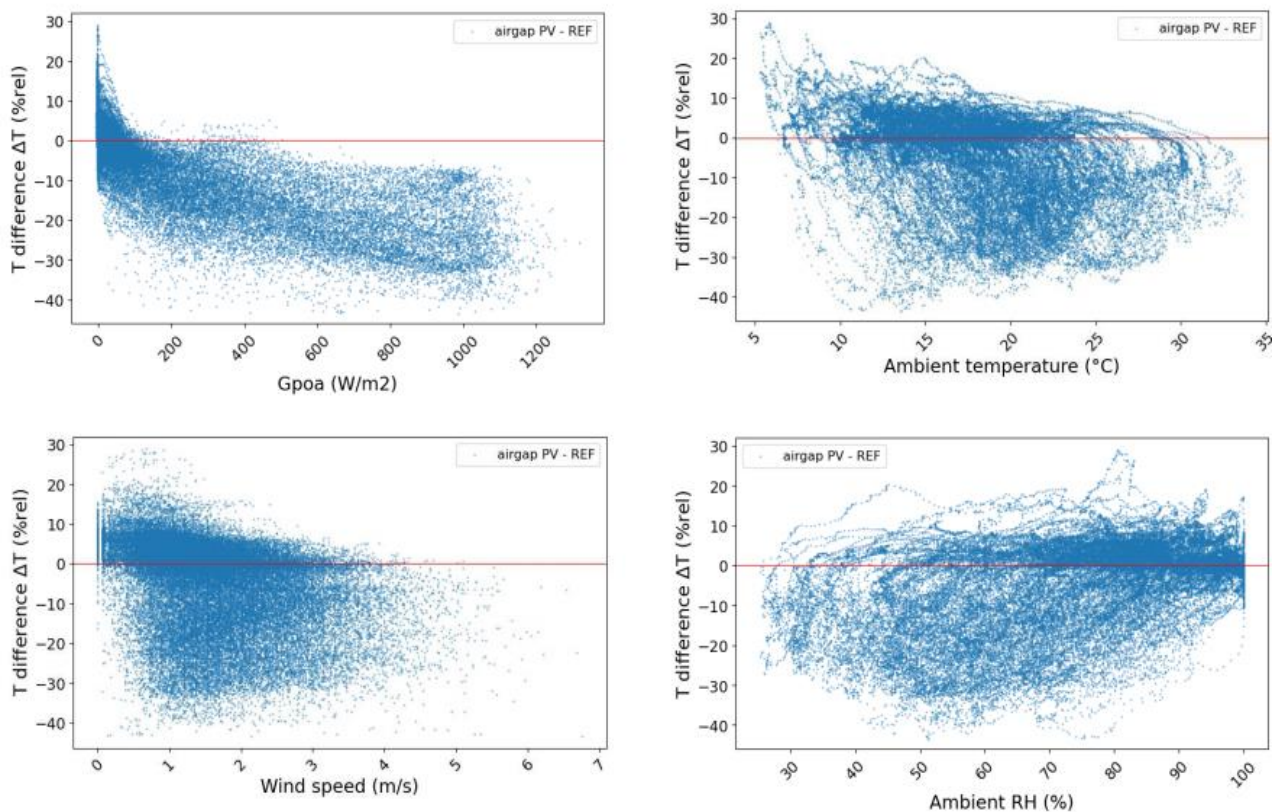
**Figuur C.4 |** Het verschil (in C°) in luchttemperaturen (links) en oppervlakte temperaturen (rechts) tussen de sensor onder het referentie dak (B1 REF) en onder de PV-panelen (B1 PV) op de Y-as met de windrichting op de x-as (90° = oost, 180° = zuid, 270° = west, 360° = noord) en in kleur de windsnelheid (in m/s).



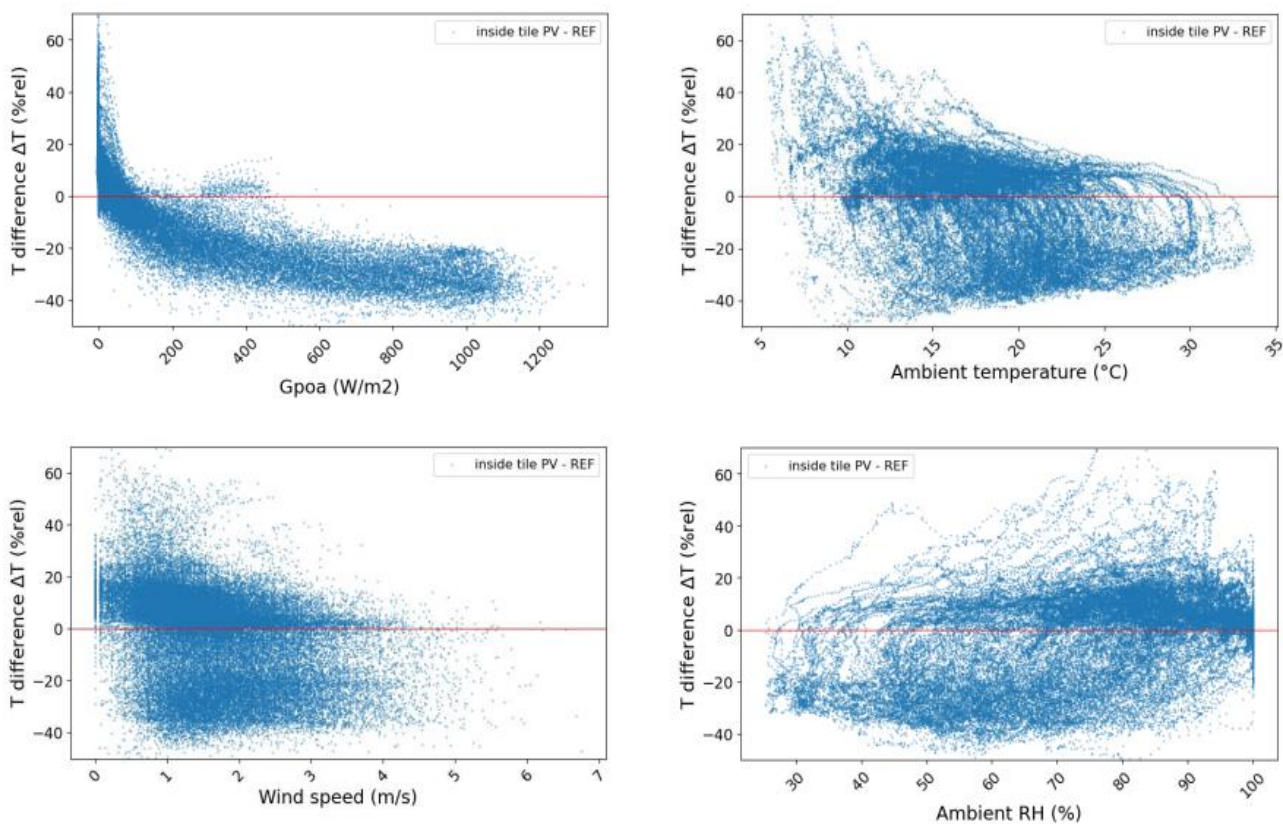
**Figuur C.5 |** Het verschil in luchttemperaturen (in C° op de Y-as) tussen de sensor onder het referentie dak (B1 REF) en onder de PV-panelen (B1 PV) met de windrichting op de x-as (90° = oost, 180° = zuid, 270° = west, 360° = noord) en in kleur de windsnelheid (in m/s). Deze data zijn gefilterd op  $G_{poa} > 50 \text{ W/m}^2$ , diffuse reflectie van  $< 20\%$  (enkel overdag op zonnige momenten) met enkel data van de laatste drie maanden (aug-sept-okt) met 5 minuten data resampling.







**Figuur C.6 |** Het verschil in oppervlaktetemperaturen (in  $^{\circ}\text{C}$  op de Y-as) tussen de sensor aan de binnenzijde van de dakpan onder het referentie dak (B1 REF) en onder de PV-panelen (B1 PV) en op de X-as vier verschillende variabelen:  $G_{\text{poa}}$  (in  $\text{W}/\text{m}^2$ ), ambiante temperatuur (in  $^{\circ}\text{C}$ ), windsnelheid (in  $\text{m}/\text{s}$ ) en ambiante relatieve luchtvochtigheid (in %).



**Figuur C.7 |** Het verschil in luchttemperaturen (in  $^{\circ}\text{C}$  op de Y-as) tussen de sensor onder het referentie dak (B1 REF) en onder de PV-panelen (B1 PV) en op de X-as vier verschillende variabelen:  $G_{\text{poa}}$  (in  $\text{W}/\text{m}^2$ ), ambiante temperatuur (in  $^{\circ}\text{C}$ ), windsnelheid (in  $\text{m}/\text{s}$ ) en ambiante relatieve luchtvochtigheid (in %).

