

# Eindrapportage PV OpMaat: Zonneceltechnologie op maat voor grootschalige gebouwintegratie



© Heijmans



# Eindrapportage PV OpMaat: Zonneceltechnologie op maat voor grootschalige gebouwintegratie



© Vincent Knoops

## Inhoudsopgave

### Voorwoord

2

### Overzicht en resultaten

3

De betekenis van Opmaat

3

De doelstelling: Op maat

3

Grensoverschrijdende samenwerking: de partners

4

Concrete resultaten

6

### Werkpakket 2: Communicatie

8

Nederlandse taalverschillen

8

Interactie verbeteren

8

Brede communicatie van demonstratie projecten

9

Creatieve communicatie

9

Technologie uitwisseling

9

Media en documentatie

10

### Werkpakket 3: PV materialen en productie van de toekomst

11

Niet-transparante CIGS PV modules op glas of staal

11

Semi transparante CIGS PV

11

Perovskiet PV

12

Optimalisatie elektrische schakeling

12

### Werkpakket 4: Maatgesneden producten en elektronica

14

Elektronica voor demonstratie doorzichtige PV in ramen

14

Elektronica voor pastorij-raam demonstratie

14

### Werkpakket 5: Geïntegreerde PV in bouwcomponenten

16

Inleiding

16

Demo 1: PV ter vervanging van asbestdaken

17

Demo 2: Semi-transparante dunne-film BIPV in ramen

20

Demo 3A: Composiet design gevelpaneel

22

Demo 3B: PV gevel demonstrator

24

### Werkpakket 6: Betrouwbaarheid en levensduur

27

Twee veel gebruikte testen

27

Metten met dezelfde maat: onderlinge kalibratie

27

Versnelde evaluatie door versnelde testen

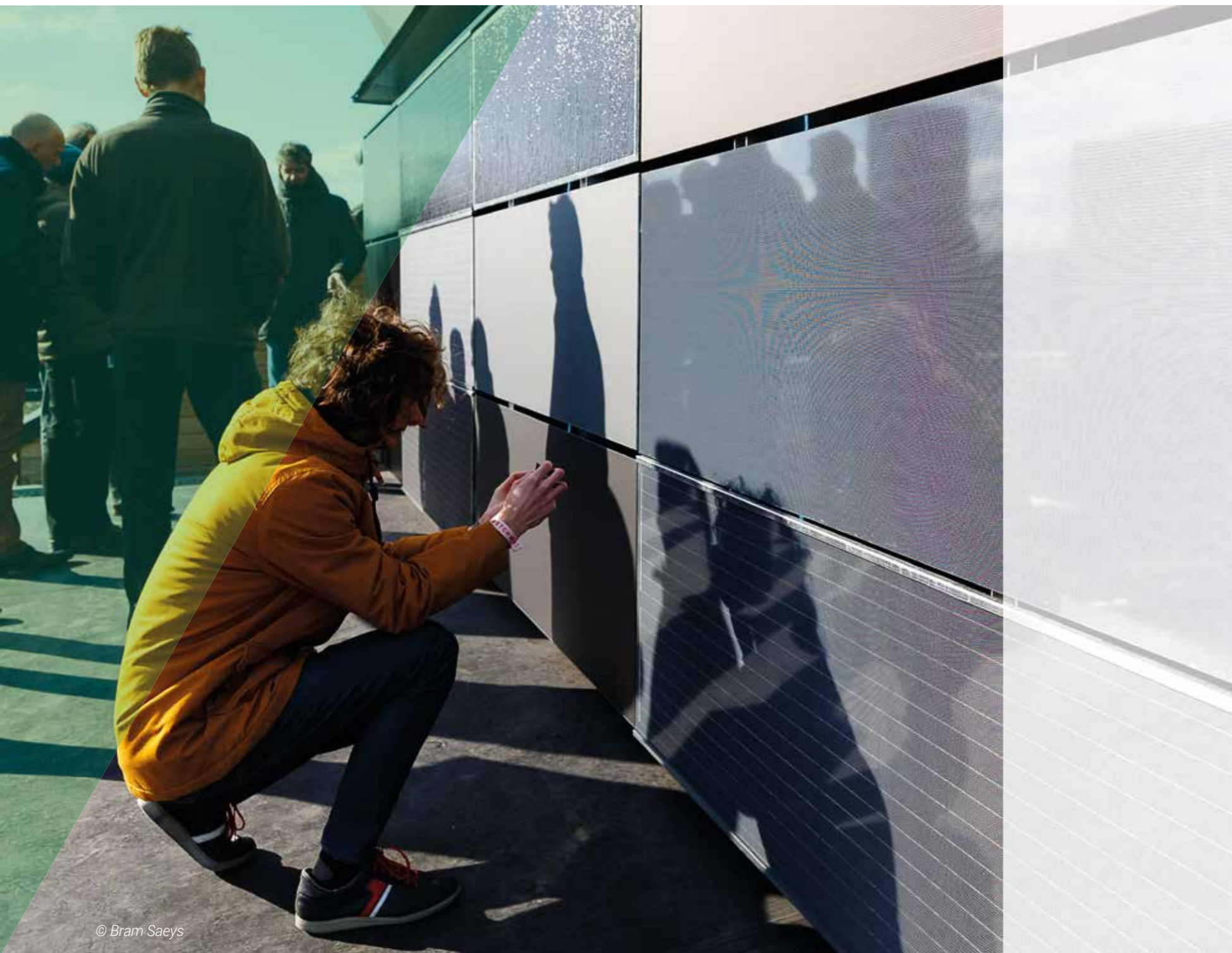
28

Simulatie van elektrische spanningen en stromen

28

### Publicaties

30



© Bram Saeys

## Voorwoord

Zonnecellen bewegen niet en maken geen geluid. Mede daardoor zijn zonnecellen als stille kracht tot een icoon van duurzame energieopwekking geworden met een breed draagvlak onder de bevolking. Maar in de ontwikkeling van zonnecellen zit juist steeds meer beweging en volop muziek. Hun toepassing zal in de komende decennia nog enorm gaan groeien en zou zelfs onze voornaamste bron van energie kunnen worden. Uiteindelijk zal het voor elk geproduceerd of gebouwd oppervlak mogelijk worden om zonnestroom op te wekken. De kunst zal zijn om de techniek naadloos te integreren en daarmee onzichtbaar te maken, of juist op een prettige manier bij te laten dragen aan onze omgeving. Met de juiste maat, vorm, textuur en kleur.

Deze brochure geeft u een overzicht van de resultaten van ruim drie jaar werk aan het verbeteren van de toepasbaarheid van zonnecellen voor duurzame energieopwekking in de gebouwde omgeving. Dit werk vond plaats in het kader van het Interreg Vlaanderen-Nederland project "PV OpMaat" met financiële ondersteuning van de Europese Unie, de provincies Noord Brabant, Vlaams Brabant, Nederlands en Belgisch Limburg, en het Nederlandse ministerie van EZK. Het is uitgevoerd met bijdragen van meer dan honderd bedrijven (een deel daarvan ook financieel ondersteund) en zeven kennisinstellingen van drie verschillende nationaliteiten.

De onderdelen van het project vormden daarbij een zichzelf verbeterende kringloop langs de waardeketen. Er is nieuwe technologie ontwikkeld, in op maat gemaakte toepassing gedemonstreerd, op kwaliteit en levensduur getest, en daarop weer verbeterd op basis van wensen van gebruikers en nieuwe technologische ontwikkeling. Op elk van deze aspecten zijn aansprekende resultaten behaald.

De timing van het project was goed gekozen. De wereldwijde PV industrie is juist deze jaren een nieuwe fase in gegaan. Het is voor veel huizen en kantoorgebouwen goedkoper om zelf elektriciteit op te wekken in plaats van elektriciteit in te kopen. Gezaghebbende scenario's zoals de 'Bloomberg NEF New Energy Outlook' (2018) voorzien dat in 2050 ongeveer 50% van de wereldwijde elektriciteitsopwekking afkomstig kan zijn van zonne- en windenergie. Als gevolg hiervan zal er een toenemende vraag komen naar geïntegreerde zonnecellen in bouwproducten, met name dak- en gevel elementen. Mede dankzij PV OpMaat zijn bedrijven in techniek en bouw, installateurs en architecten, en onderzoekers in de regio Vlaanderen-Nederland beter gepositioneerd voor deze toekomst.

Van harte nodig ik u uit om in de volgende bladzijden kennis te nemen van de beweging en de muziek in deze grensoverschrijdende samenwerking om de techniek maat, kleur en vorm te geven.

Namens alle partners in PV OpMaat,

Ronn Andriessen  
Directeur Solliance

## Overzicht en resultaten



Sanko Solar, Glas Ceyskens, KU Leuven en Reynaers Aluminium. | © Jonathan Vos

### De betekenis van Opmaat

Een opmaat is een muziekterm waarmee de muzieknoten bedoeld worden die gespeeld worden vóór de eerste beklemtoonde noot van de eerste hele maat. Een bekend voorbeeld is "Happy birthday to you", waar de noten van "Happy" de inleiding vormen tot de eerste maat die met "birthday" begint.

Anders gezegd: de opmaat, dat zijn de inleidende muzieknoten die het oor voorbereiden op de muziek die komen gaat. In de figuurlijke betekenis: het is een relatief klein begin dat grote gevolgen heeft.

En dat is precies wat het Interreg project PV OpMaat bedoelde te zijn. De "happy" opmaat naar grootschalige toepassing van bouw-geïntegreerde zonneceltechnologie. In het engels: BIPV: Building Integrated PhotoVoltaics.

Terugkijkend kunnen we vaststellen dat de start van het project in 2016 goed gekozen was, want in de looptijd van ruim drie jaar is de muziek in PV nu echt losgebarsten. In deze tijd is het geïnstalleerd vermogen in Nederland verdrievoudigd tot meer dan 4 GigaWatt, waarmee het de achterstand op België heeft ingelopen. Na een piek rond 2011 was het installatietempo in België bijna stilgevallen, maar sinds 2015 is ook daar het tempo weer verdrievoudigd. We lopen aan beide kanten van de grens nu meer gelijk op, en ervaren dezelfde kansen en uitdagingen. In 2018 zijn in Nederland voor het eerst grootschalige commerciële PV installaties in het veld gezet, wat met de provinciale verkiezingen bij een toenemend aantal partijen tot een stellingname heeft geleid waarbij de voorkeur wordt gegeven aan installatie van zonnestroom in de gebouwde omgeving, en een wens om het open landschap (en met name de landbouw) te ontzien. In het tweede jaar van PV OpMaat klonken signalen uit de BIPV markt dat voor het eerst een grotere interesse voor in bouwdelen geïntegreerde PV tot

concrete herhalingsopdrachten leidde.

Nu de kostprijs van PV sterk daalt, en de miljoenen panelen alom tegenwoordig zijn, groeit de vraag naar meer esthetische of onzichtbare PV, die zich naadloos laat wegwerken in daken, gevels en vensters van gebouwen.

En net zoals de opmaat het oor voorbereidt op de muziek die komen gaat, zo moeten ook maatvoering, vorm, kleur en textuur het oog voorbereiden op de talloze vierkante kilometers PV die er de komende jaren bij zullen komen. In het project is technologie ontwikkeld en creatief bewerkt in een interactief proces tussen ontwikkelaars en gebruikers. Van het begin van de keten, van high tech installaties om atoomlagen één voor één aan te brengen, via schilders ezels en ervaringswanden langs het creatieve proces, langs testopstellingen en met toevoeging van slimme elektronica, tot aan concrete bouwprojecten aan het eind van de keten.

Het project is met name succesvol geweest door wisselwerkingen tot stand te brengen over de werkgebiedsgrenzen en landsgrenzen heen. Zodat niet alleen technologie ontwikkeld is om zonnepanelen op maat te maken, maar ook duidelijker is geworden welke maat men wil hanteren.

### De doelstelling: Op maat

Op 16 maart 2016 verrichtten de gedeputeerden Anne-Marie Spierings (provincie Noord-Brabant) en Marc Florquin (provincie Vlaams-Brabant) bij Solliance in Eindhoven de formele kick off van het project. Samen knipten zij hierbij een op rol geproduceerde zonnecelfolie op maat. Daarbij was er even een moment van twijfel dat raakte aan de kern van het project: Waar en hoe knippen we hem door? Als we PV op maat kunnen maken, welke maat willen we dan? En zo werd deze officiële openingshandeling zelf ook meteen de opmaat voor een interactieve workshop met de ruim honderd verzamelde aanwezigen uit Nederland en België. >>

## Grensoverschrijdende samenwerking: de partners

### Solliance en SEAC

Solliance is het in 2010 met steun van de provincie Noord Brabant opgerichte samenwerkingsverband op het gebied van dunne film zonneceltechnologie, waarin naast penvoerder TNO, ook de projectpartners imec, ECN, Technische Universiteit Eindhoven, Universiteit Hasselt, en Forschungszentrum Jülich deelnemen. Op de locatie Eindhoven (High Tech Campus) is met name geïnvesteerd in een platform waar samen met machinebouwers uit de regio wordt gewerkt aan nieuwe high-end equipment voor het vervaardigen van dunne film zonnecellen. Deze machines zijn samengebracht voor procesontwikkeling en demonstratie van nieuwe typen zonnecellen, en voor demonstratie van nieuwe methoden voor het op maat integreren van zonnecelmaterialen.

In hetzelfde gebouw is ook SEAC gevestigd, een samenwerkingsverband tussen ECN, Technische Universiteit Eindhoven en TNO dat zich juist richt op evaluatie en toepassing van zonnecellen, met name in geïntegreerde toepassingen in bouw en infrastructuur. Op de campus van TU Eindhoven bevindt zich op het dak van de faculteit Bouwkunde een openlucht testfaciliteit (SolarBeat) voor zonnecellen in daken en gevels.



Start PV OpMaat met Marc Florquin en Anne-Marie Spierings. | © Niels van Loon

### Energyville

PV OpMaat is een project binnen de euregio Vlaanderen-Nederland. Om het grensoverschrijdend karakter te onderstrepen vond een dag na de opening een tweede persmoment plaats waar het project gepresenteerd werd bij IMO-IMOMEC in Hasselt, in aanwezigheid van gedeputeerde Erik Gerits (provincie Belgisch Limburg). Een half jaar later zou namelijk op de Thor Campus in Genk het samenwerkingsverband Energyville van start gaan, waarin onder meer de drie Belgische kennispartners in PV OpMaat (Universiteit Hasselt, imec, KU Leuven) langdurig gaan samenwerken; niet alleen op productie en evaluatie van zonnecelmaterialen, maar vooral ook met bijzondere aandacht voor de gerelateerde elektronica en net-integratie. In het project is deze complementariteit volop benut.

Ook het relatief bescheiden karakter van dit persmoment mag niet misverstaan worden. Enkele maanden daarvoor, bij toeval juist op de dag dat het Comité van Toezicht zijn besluit bekend maakte om PV OpMaat goed te keuren voor ondersteuning (8 december 2015), was er in de aanloop tot het project al een druk bezochte BIPV workshop georganiseerd op de nog niet voltooide campus van Energyville, waarbij ook sprekers namens Solliance en SEAC optraden. Enkele tientallen bedrijven waren daarbij vertegenwoordigd. Het projectplan en de uitnodiging tot deelname zijn daarbij gepresenteerd, en ook toen al heeft een relevante afspiegeling van de doelgroep het glas kunnen heffen bij wijze van opmaat op het mondeling gecommuniceerde besluit; daarmee een voorschot nemend op het latere formele persmoment aan Vlaamse zijde.

### ZUYD Hogeschool en IEA Taskforce 15

In dezelfde periode, waarin het project wel was goedgekeurd maar nog niet formeel van start kon gaan, is het ook bij partner Hogeschool ZUYD (19 januari 2018) tijdens het BIPV



IMDEP symposium gepresenteerd om aan verzamelde bedrijven een uitnodiging te doen tot deelname als "project partner light". Na de formele kick off in Eindhoven en Hasselt hadden daardoor al 127 bedrijven deelgenomen aan kennisoverdracht in het kader van het project, waarvan er 93 actief hadden deelgenomen aan interactieve workshops. Een bereik van "tenminste 100 bedrijven in het werkveld" was in het PV OpMaat projectplan ten doel gesteld, en hiermee bij aanvang al bijna gerealiseerd.

Deelname van Hogeschool ZUYD was van wezenlijk belang voor het project, niet alleen als een van de openlucht testlocaties voor onderzoek, maar juist ook voor het realiseren van een grotere internationale impact. Omdat ZUYD gedurende de looptijd ook voorzitter was van de werkgroep "Task 15: Building Integrated PV" van de International Energy Agency (IEA) konden resultaten en inzichten uit het project ingebracht worden in het ontwikkelen van normen en regelgeving, en in internationale rapporten en overzichten rond BIPV<sup>1,2</sup>. Tevens is het project gepresenteerd op door Task 15 georganiseerde BIPV evenementen op internationale congressen, zoals op de PVSEC in München (2016) en in Brussel (2018).

### Forschungszentrum Jülich

Een derde grensoverschrijdend aspect is gerealiseerd door de deelname van Forschungszentrum Jülich (FZJ); als Duitse partner een "vreemde eend in de bijt" in dit Interreg Vlaanderen-Nederland project. De uitnodiging tot deelname volgde uit een bezoek van Noord-Rijn-Westfalen minister Schwall-Düren, en Commissaris van de Koning Wim van de Donk

en gedeputeerde Bert Pauli van de provincie Noord Brabant aan Solliance (22 januari 2015), waarbij de expliciete wens tot bredere onderlinge samenwerking in het kader Interreg VA programma was uitgesproken. Met name de bijzondere expertise van FZJ in gedetailleerde analyse van dunne film PV is een waardevolle complementaire bijdrage aan het project gebleken, en heeft onder meer geleid tot publicaties van "round robin" experimenten die tot betere reproduceerbaarheid van dezelfde typen metingen op verschillende locaties leiden. In termen van het project: "in alle labs met dezelfde maat meten".



### Private partners via project partner light (PPL)

De instructiebijeenkomst met vertegenwoordigers van Interreg en alle zeven kennispartners vond plaats bij aanvang van het project op 21 januari 2016 in Eindhoven. De formele start met brede uitnodiging aan het bedrijfsleven en andere private partners om tot het project toe te treden als "project partner light" vond niet alleen plaats via de hierboven genoemde >>

<sup>1</sup> Eindrapportage IEA-PVPS Task 15: BIPV research teams & BIPV R&D facilities An international mapping, second version (2018)

<sup>2</sup> IEA-PVPS Task 15: Coloured BIPV: Market, Research and Development (2019)

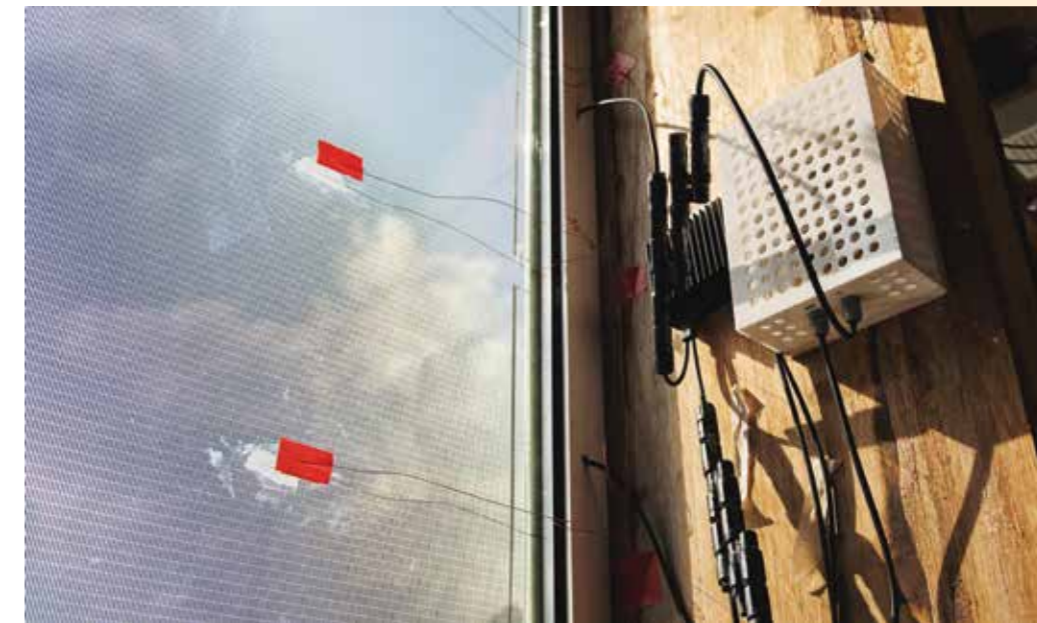
workshops en seminars, maar ook met gerichte mailings aan enkele honderden private partijen, publicaties in vakbladen, en persberichten aan redacties van algemene pers en aan het werkgebied gerelateerde websites. Uit deze brede benadering zijn in de loop van het project een vijftiental partijen actief geweest met financiële ondersteuning in het kader van het project. Deze PPL's hebben een doorslaggevende rol gespeeld bij de demonstratieprojecten van drie typen bouw-geïntegreerde PV in werkpakket 5, en zijn daarmee ook het belangrijkste gezicht van het project in de communicatie naar de buitenwereld; zo ook in dit rapport. Bij die verschillende demo's worden de PPL's nader geïntroduceerd.

### Concrete resultaten

De samenwerking tussen de private partijen en de kennisinstellingen hebben langs de hele keten concrete resultaten en successen opgeleverd: van kleinschalige demonstraties van nieuwe zonnecel technologie en elektronica, tot realisatie van complete PV-geïntegreerde gevels in gebouwen. Een lijst van publicaties in vakbladen en wetenschappelijke literatuur is vermeld aan het eind van dit rapport.

Voor twee soorten dunne-film zonnecellen (CIGS en Perovskiet) is met nieuw ontwikkelde technologie gedemonstreerd dat het zowel op maat gemaakt kan worden als doorzichtig, en dat de elektrische eigenschappen niet alleen door het op maat maken gevarieerd kunnen worden, maar dat de verschillende eenheden met op maat gemaakte elektronica ook weer tot één geheel samengevoegd kunnen worden om stroom te leveren bij een gecontroleerde spanning. Dit is gedemonstreerd met een uit proefstukken samengesteld pastorij-raam.

Op basis van al commercieel verkrijgbare zonnecelmaterialen (CIGS en CdTe) zijn samen met architecten en installateurs nieuwe manieren gedemonstreerd om zonnegevels en lichtgewicht PV-daken te maken: ingewerkt in isolerende gevels voor energie-neutrale woningbouw of gecombineerd met LED-verlichting voor commerciële gebouwen, in golvende (asbest vervangende) daken, of in dubbel glas voor veranda's en overkappingen. Er zijn



Dubbel glas facades met transparante PV (Sanko Solar, Glas Ceyskens en Reynaers Aluminium).

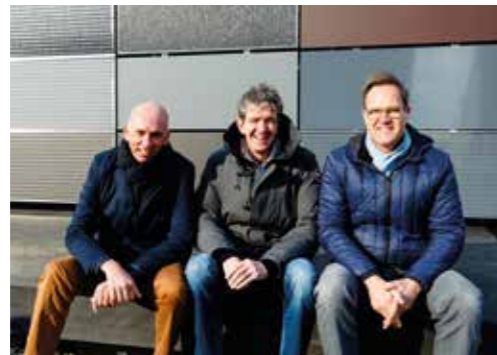
demonstratoren gerealiseerd waar het publiek ofwel eerst aan voorbijliep omdat men niet meer herkende dat het een PV product betrof (zoals marmer structuren of vrij vormgegeven gekleurde kunststof composieten), ofwel langdurig bij stil bleef staan vanwege de creatieve uitstraling (zoals een metershoge Mona Lisa, of een gekromd PV paneel met gekleurde LEDs).

Zowel in het laboratorium als in de open lucht is er gemeten aan de opbrengst en levensduur van PV in bouw delen, en een beter inzicht verkregen in de invloed die het kleuren of decoreren van een zonnepaneel, of het optreden van schaduwvorming of opwarming hierop heeft. De in de volgende hoofdstukken beschreven demonstratoren zijn in verschillende stadia van marktintroductie; in alle gevallen heeft PV OpMaat bijgedragen ofwel aan hun ontwikkeling,

ofwel aan het valideren en onderbouwen van hun betrouwbaarheid en hun product prestatie.

Ambitie van het project was om niet alleen een technologische stap voorwaarts te maken, maar ook bij te dragen aan het tot stand komen van een blijvende structuurversterking en samenwerking op het gebied van bouw geïntegreerde duurzame energie opwekking. Belangrijke cross-overs waren in dit verband de samenwerking met parallel lopende projecten zoals het ERANET project "BIPV Panel On Demand" (commerciële BIPV demoprojecten op basis van aanpassing van reeds op de markt beschikbare modules), het Interreg Vlaanderen-Nederland project DEMI MORE (verduurzamen van cultureel erfgoed) en vooral ook het OPZuid project "Werkelijk bouwen aan BIPV". Complementair aan de technologie ontwikkeling in PV OpMaat, richt dit laatste project zich met name op het versnellen van het proces van innovatie naar marktacceptatie in het hele bouw-ecosysteem. Niet alleen in gezamenlijke workshops en beurspresentaties, maar ook via samenwerking op organisatorisch niveau is bijgedragen aan het oprichten van BIPV Nederland ([www.bipvnederland.nl](http://www.bipvnederland.nl)). Hiermee is in deze branche een samenwerkingsverband tot stand gebracht dat de regionale infrastructuur en nationale consortia blijvend zal versterken.

Isolerende gevels geïntegreerd met decoratieve PV (TGM, NB Architecten en EigenEnergie.net)



Reinier Bosch met Solarix paneel. | © Bram Saeys

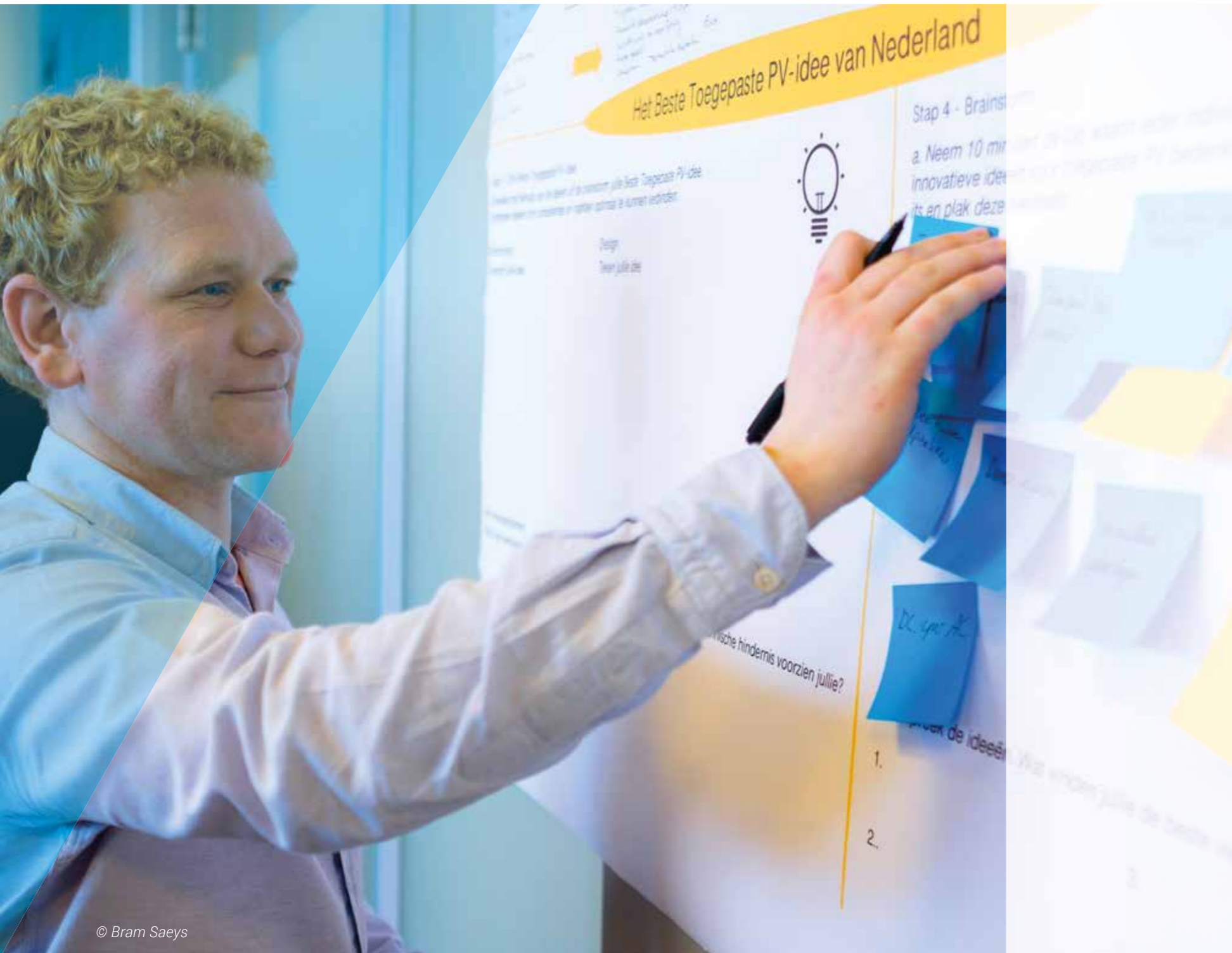


Decoratieve PV gevels met geïntegreerde LED verlichting (Solarix, Cube Architecten, Flexipol, Sorba en SCX Solar).



Lichtgewicht golfdaken met geïntegreerde PV (Eternit, HyET, Sorba, SGS Intron, Weijland Technologies, Zuyd Hogeschool).

## Werkpakket 2: Communicatie



© Bram Saeyns

### Nederlandse taalverschillen

Elk project binnen Interreg Vlaanderen-Nederland brengt een verrijking van de persoonlijke taalschat. Ook na jaren van samenwerking blijft de onderlinge Vlaams-Nederlandse communicatie vol van momenten met vrolijke verbazing en onverwachte misverstanden door verschillen in woordgebruik, toonzetting en redeneertrant.

Het PV OpMaat project heeft zich echter niet alleen ten doel gesteld om bruggen te slaan voor communicatie over de landsgrenzen, maar ook over de grenzen tussen verschillende gebieden in de waardeketen. Mensen in de ontwikkeling van dunne film zonnecelmaterialen, fabrikanten, installateurs, bouwbedrijven, architecten en gebouweigenaren spreken elk een eigen taaljargon en redeneren vanuit verschillende gezichtspunten. Het versnellen van de energietransitie door opwekking van elektrische energie op maat te integreren in de gebouwde omgeving zou daarmee nodeloos vertraagd kunnen worden door een Babylonische spraakverwarring.

### Interactie verbeteren

Naast de technologie ontwikkeling en het realiseren van toepassingen is daarom een belang-

rijk deel van het project gericht geweest op communicatie. Een van de belangrijkste doelen was daarbij om een actieve wisselwerking op gang te brengen. Enerzijds door mogelijke gebruikers op nieuwe ideeën te brengen door te tonen wat er technisch gerealiseerd zou kunnen worden, en anderzijds door producenten en onderzoekers hun productontwikkeling te laten richten op aspecten die werkelijk het verschil maken om de grootschalige integratie van zonnestroom te versnellen.

Tijdens het kick-off seminar hebben bijna 100 deelnemers van meer dan 40 partijen langs de hele waardeketen aan zo'n wisselwerking deelgenomen in een creatieve workshop, en in de eerste maanden van het project zijn meer dan 100 bedrijven geconsulteerd en geïnformeerd over de status van BIPV. Dit heeft onder andere bijgedragen aan een (kosten)technisch overzicht "De prijs van BIPV in Nederland" ([www.seac.cc/wp-content/uploads/2016/12/BIPV-prijsstudie-2016.pdf](http://www.seac.cc/wp-content/uploads/2016/12/BIPV-prijsstudie-2016.pdf)).

Tevens is er is een rondgang gemaakt langs architecten om wensen, kansen en hindernissen rond BIPV te inventariseren, is er in de ontvangsthuis van Solliance een ervaringswand >>



ingericht en zijn (in samenwerking met NB Architecten in Best) inspiratiezuilen geplaatst om te laten voelen en zien wat er aan vrije vormgeving van PV realiseerbaar is, en is er bijvoorbeeld ook een animatie (Visie op BIPV) op YouTube geplaatst ([www.youtube.com/watch?v=uNOHBvmFOCo](http://www.youtube.com/watch?v=uNOHBvmFOCo)).

### Brede communicatie van demonstratie projecten

Op basis van deze wisselwerking zijn een aantal demonstratie projecten gedefinieerd. In de loop van het project zijn partijen uit de hele waardeketen toegetreden tot deze demonstratie werkgroepen om nieuwe integratievormen van PV als bouwcomponenten te realiseren en te beproeven. En op basis van dergelijke componenten zijn inmiddels ook werkelijk bouwprojecten gerealiseerd.

Deze demonstratie elementen waren niet alleen op testlocaties en op de gerealiseerde gebouwen door bezoekers te bezichtigen, maar ze zijn ook op een tiental beurzen getoond, zowel nationaal (Solar Solutions, Energiebeurs, Gevelbeurs, Intersolutions, Sunday, publieksdagen) als internationaal (EU PVSEC, Designbeurs in AbuDabi). Ook hiermee is de communicatie dus vanuit zeer uiteenlopende invalshoeken aangegaan, door te spreiden over beurzen rond zonnecellen, energie, design, bouw en installatie.

### Creatieve communicatie

De gekozen demonstratie projecten waren niet alleen van belang voor het vergroten van de technologische en bouwkundige inzetbaarheid van PV in de gebouwde omgeving, maar juist ook op het communiceren van aansprekende voorbeelden om enthousiasme en de creativiteit van de mogelijke gebruikers aan te wakkeren. Een metershoog PV gevelement met daarop Da Vinci's Mona Lisa, gemarmerde PV panelen geïntegreerd in een isolatiegevel, getextureerde kunststof gevelementen met geïntegreerde PV en LED-verlichting als kunst-

stukken, gebogen PV bouwdeelen uit helder transparante kunststof, golvende lichtgewicht PV daken, isolerende beglazing met doorzichtige PV: dat alles wekte vaak eerst verbazing ("Is dit echt een zonnepaneel?") en vervolgens zakelijke interesse.

Samen met Berenschot en Holland Solar, in een gemeenschappelijke workshop met het OP Zuid project "Werkelijk bouwen aan BIPV", zijn nog meer van van dit soort aansprekende voorbeelden gepresenteerd, en is de vraag gesteld: "Welke kansen zien we nu met deze technologie, en wat weerhoudt of hindert ons nog om het grootschalig te gaan toepassen?" Uitgedaagd door architect Harold van de Ven als discussieleider ("Alles wat we nodig hebben is er nu; we moeten het gewoon gaan doen") ontstond er een levendige uitwisseling van ideeën die in groepen zijn uitgewerkt en vastgelegd, en waarvan de beste bekroond werd met een prijs.

Het project is ook ingebracht in communicatie op een meer politiek niveau. In het kader van de landelijke verkiezingen is door BNR radio een verkiezingsdebat uitgezonden vanuit het Solliance gebouw. Voorafgaand aan het debat was er een seminar met bijdragen uit het project, en aanwezigen konden tijdens het debat vragen inbrengen.

### Technologie uitwisseling

Samenwerking en uitwisseling van ideeën, onderzoeksresultaten en geproduceerde demonstratoren vond plaats op verschillende niveaus, en op al deze niveaus waren de groepen grensoverschrijdend samengesteld. Samenkomsten vonden plaats per demonstrator werkgroep, in samenkomsten van betrokken kennisinstellingen en bedrijven. Elke 6 maanden kwamen alle werkgroepen op een consortiumvergadering bijeen, op wisselende plaatsen te gast bij een van de deelnemende partijen waarbij een rondleiding langs de faciliteiten ter plekke een vast onderdeel vormde. Diverse seminars,

workshops en open publieksdagen hebben plaatsgevonden rond specifieke technologie onderwerpen. Zo was er een workshop "BIPV Power Electronics" in Genk, een seminar "BIPV voor asbestvervangende daken in de agrarische sector" in Heerlen, en een kraam op de "Dag van de Wetenschap" voor algemeen publiek in Leuven. Middels een tiental lezingen en posters zijn projectresultaten gepresenteerd op internationale congressen.

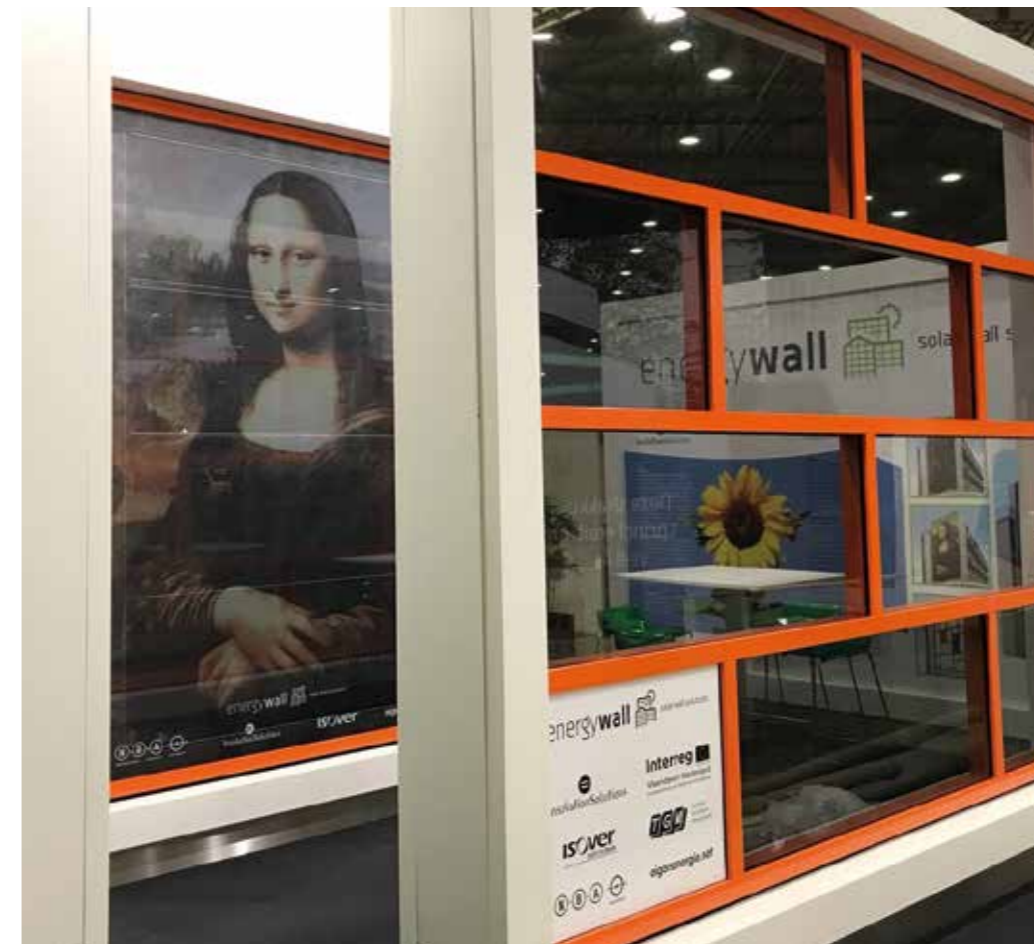
### Media en documentatie

Bekendmaking en vastlegging van projectresultaten heeft tevens plaatsgevonden in een twintigtal artikelen in technische (Solar Magazine, Uneto VNI, De Architect) en wetenschappelijke tijdschriften en congres proceedings.

Via de PV OpMaat website ([www.pvopmaat.nl](http://www.pvopmaat.nl)) zijn nieuwsberichten en verslagen van bijeenkomsten beschikbaar gemaakt. Deze nieuws-

berichten zijn ook gericht verspreid aan enkele honderden redacties van kranten, magazines en websites, en daarop veelvuldig opgenomen door tal van media.

Samenvattend hebben 14 bedrijven en 8 kennisinstellingen als projectpartners samengewerkt, hebben een kleine 200 bedrijven actief deelgenomen aan project workshops en seminars, zijn via beurspresentaties vele honderden mensen mondeling over het project en de demonstrators geïnformeerd, zijn vele duizenden professioneel betrokken lezers bereikt met artikelen in gedrukte magazines, en tienduizenden via berichten op websites voor doelgroepen langs de waardeketen.





## Werkpakket 3: PV materialen en productie van de toekomst



In dit werkpakket is door partners van Solliance (TNO, ECN, TU/e, imec, UHasselt) gewerkt aan het ontwikkelen van dunne film PV (in tegenstelling tot de huidige plakken silicium gebaseerde PV) waarbij het onderzoek zich met name richt op opschaalbare productie processen zoals roll-to-roll en sheet-to-sheet processen, waarin materialen op grote lengte of in afzonderlijke elementen aan de lopende band vervaardigd worden. Deze processen zijn gericht op het leveren van flexibele en rigide halffabricaten, die voor een breed spectrum van toepassingen 'op maat' kunnen worden gemaakt. De zonnecelmaterialen waar Solliance binnen dit project aan gewerkt heeft zijn  $\text{CuInGaSe}_2$  (CIGS) en Perovskieten (PSC). Dit onderdeel van het PV OpMaat onderzoek heeft onder andere geresulteerd in een demonstratie pastorij-raam waar de technologieën die in dit hoofdstuk zijn beschreven zijn samen gebracht.

Met de verschillende materialen is in het PV OpMaat project ingezet op drie verschillende toepassingen, te weten: niet-transparante zonnecellen, semi-transparante zonnecellen en gekleurde zonnecellen. Ook is er gewerkt aan innovatieve elektrische schakelingen. Hieronder wordt op elk van deze onderdelen iets verder ingegaan.

### Niet-transparante CIGS PV modules op glas of staal

CIGS bezit enkele unieke eigenschappen waardoor het uitermate geschikt is om op maat gemaakte producten te vervaardigen:

- De omzetting van zonlicht naar elektriciteit (efficiency) is ten opzichte van andere dunne film PV materialen relatief hoog.
- De  $\text{CO}_2$  footprint van CIGS is extreem laag.
- CIGS wordt nu al op industrieel relevante schaal geproduceerd zowel op glas als op flexibele folies (polyimide en roestvast staal folies), en dit volume neemt in een zeer snel tempo toe.
- Visueel is CIGS een materiaal dat esthetisch mooi is door het volledig zwarte oppervlak.

- CIGS is stabiel met een goede prestatie bij diffuus licht waardoor het materiaal uitermate geschikt is in Nederland waar het aandeel diffuus licht hoog is (van 20% bij wolkeloze hemel tot 100% bij bewolking).

De toepassing van op CIGS gebaseerde PV producten neemt als gevolg hiervan in snel tempo toe.

Het onderzoek bij Solliance heeft zich met name gericht op het optimaliseren van het productieproces met als doel het materiaal beter integreerbaar te maken bij een lager prijsniveau. Hiertoe is gebruik gemaakt van een CIGS pilot productielijn bij Solliance waarmee tot een maximum van  $30 \times 30 \text{ cm}^2$  minimodules op glas en folies zijn vervaardigd.

### Semi transparante CIGS PV

Vooraf in kantoorgebouwen wordt veel glas als façade element toegepast. Dit is een gevolg van het prijsniveau en de uitstraling van een glazen façade. Op veel plaatsen in de façade is een 100% doorzicht niet noodzakelijk en vaak zelfs niet gewenst. Glas is semitransparant te maken door het gedeeltelijk van CIGS te voorzien. Daarmee kan tevens een esthetisch mooie gevel worden gerealiseerd waar een goed evenwicht wordt gevonden tussen het opwekken van elektriciteit en voldoende licht inval in het gebouw.

Bij Solliance is in PV OpMaat met name gewerkt aan laser gebaseerde technieken om een semi transparante CIGS ruit te realiseren.

### Perovskiet PV

Perovskiet (PSC) is een ander zonnecel materiaal waar door de partners van Solliance aan wordt gewerkt. Perovskiet is een materiaal in opkomst dat zowel op rigide materialen als op folies kan worden aangebracht. Daarbij zijn zowel de materiaalkosten als de fabricage kosten laag. Eén van de voordelen van perovskiet als materiaal is het eenvoudig kunnen sturen >>

## Werkpakket 4: Maatgesneden producten en elektronica

van kleur. In nog geen 10 jaar is dit materiaal ontwikkeld met eigenschappen die zich kunnen meten met de andere PV materialen op het gebied van prestatie.

Door de projectpartners TNO, ECN, imec en TU/e is met name gewerkt aan roll-to-roll en sheet-to-sheet processen van dit materiaal om de eigenschappen van het materiaal verder te verbeteren.

### Optimalisatie van elektrische schakeling

Eén van de uitdagingen bij het 'op maat' produceren van PV producten is de elektrische schakeling die er voor moet zorgen dat elektrische verliezen worden geminimaliseerd. Gangbaar wordt bij dunne film PV gebruik gemaakt van een zogenaamde monolithische interconnectie waarbij tijdens het fabricage proces op drie momenten een onderbreking van het materiaal wordt aangebracht. Dit wordt zowel voor CIGS als PSC toegepast, waarbij gebruik gemaakt wordt van lasertechnologie. Het nadeel van deze fabricage in drie afzonderlijke stappen is dat de afmetingen van het eindproduct vast liggen en afwijkende maten moeilijk zijn te produceren.

Bij Solliance wordt gewerkt aan een alternatief productieproces waarbij de monolithische interconnectie als laatste stap in één keer wordt aangebracht waardoor een volledig digitale technologie kan worden gerealiseerd en afwijkende afmetingen eenvoudig kunnen worden geproduceerd. Naast laserproces stappen zijn er print technieken noodzakelijk om langs deze weg de elektrische schakelingen te realiseren. Binnen het PV OpMaat project is deze technologie verder ontwikkeld.



Binnen werkpakket 4 is gewerkt aan twee taken:

- Vervaardiging van een BIPV-productdemonstratie met commercieel beschikbare PV-materialen (geleverd door partner light-bedrijven).
- Vervaardiging van een zonnecelmodule op basis van ondoorzichtige, semi-transparante en gekleurde PV-materialen afkomstig uit het PV OpMaat onderzoekswerk dat plaatsvond in werkpakket 3.

### Elektronica voor demonstratie doorzichtige PV in ramen

Voor de BIPV-productdemonstratie met semi-transparante commercieel beschikbare zonnepanelen als raamelement bij de KU Leuven was elektronica voor optimale vermogensomzetting (een power optimizer) nodig die eigenlijk niet geleverd wordt door de huidige zonnepaneel industrie. Omzetters (converters) die specifiek zijn ontworpen voor dunne film PV-technologie van de markt zijn momenteel afwezig. Daar de in de handel verkrijgbare converters of power optimizers niet kunnen omgaan met de grotere spanningen (tot 130 Volt) die gegenereerd kunnen worden door dunne filmpanelen op koude dagen, was er een 'op maat' gemaakte oplossing nodig.

Door de verwachte hoeveelheid schaduw op de gevel, in vergelijking met traditionele daksystemen, is er besloten een DC-DC converter met maximale power tracking voor

elk raam te installeren. Daarbij is gekozen voor een standaard PowerEdge P405 power optimizer, hoewel deze ontworpen is voor kristallijn silicium PV.

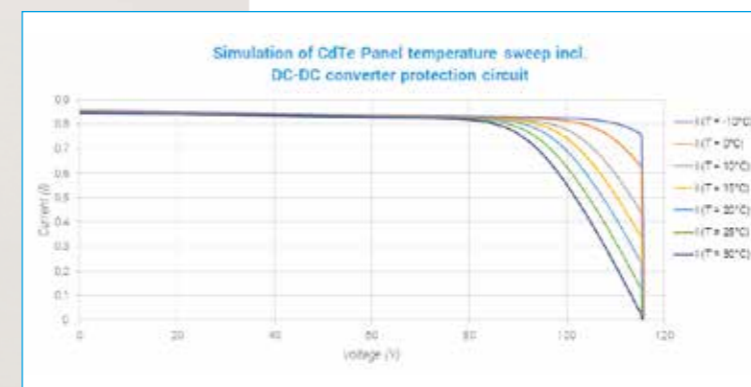
Om de power-optimizer te beschermen tegen de hoge spanningen zijn beveiligingen in de elektrische circuits ingebouwd in de vorm van parallel schakelingen met de power optimizer. Bij die schakelingen is gebruik gemaakt van Zener diodes die activeren bij meer dan 118 V. De elektrische spanning van het PV paneel wordt daarbij tijdelijk in het elektrische circuit gedissipeerd in plaats van de power optimizers te overbelasten en wellicht te beschadigen.

In de grafiek hieronder is te zien dat de IV-curve wordt afgebroken boven het maximale spanningspunt tot temperaturen van -10 °C. Wel moet worden opgemerkt dat deze oplossing redelijk duur is en in de toekomst zal moeten worden vervangen door op maat gemaakte converters.

### Elektronica voor pastorijs-raam demonstratie

Binnen PV OpMaat is met de nieuwe zonnecelmaterialen die resulteerden uit het experimentele werk in werkpakket 3 een pastorijs-raam demonstratiemodel gemaakt in werkpakket 4. Het verdelen van het glazen vlak stelde ons in staat om PV-modules van verschillende afmetingen te combineren in één BIPV-demonstrator op ware grootte. Er is uiteindelijk gekozen voor twee ondoorzichtige en één semi-transparante perovskiet modules, allen met een actief zonneceloppervlak van 10x10 cm<sup>2</sup>. Daarbij is een van de twee ondoorzichtige modules bedekt met een groene folie om deze van kleur te voorzien. Naast de perovskiet modules zijn drie identieke ondoorzichtige CIGS modules geplaatst, allen met een actief oppervlak van 20x20 cm<sup>2</sup>.

De ondoorzichtige en gekleurde modules van perovskiet vertoonden een initiële efficiëntie >>



van ~ 10% onder standaard test condities, terwijl de semi-transparante module slechts ~ 1% efficiëntie bereikte onder standaard test condities. Hierbij moet opgemerkt worden dat de semi-transparante module slechts een allereerst geproduceerd exemplaar was.

De drie CIGS modules vertoonden een initiële efficiëntie van ongeveer 5% onder standaard test condities.

Om zowel de perovskiet als CIGS submodules elektrisch te verbinden met de vermogenselektronica zijn drie technieken onderzocht door Universiteit Hasselt: ultrasoon verbinden, ultrasoon solderen en het gebruiken van elektrische tapes. Voor deze demonstrator was ultrasoon solderen de meest praktische optie vanwege de eenvoud van het systeem.

Omdat standaard vermogenselektronica vaak niet geschikt is voor dunne film zonnecellen heeft met Taylor Technologies Holding BV ontwikkeling plaatsgevonden van op maat gemaakte vermogenselektronica en is deze ook daadwerkelijk vervaardigd voor de raamdemonstratie. De ontwikkelde vermogenselektronica bevatte een maximale powerpoint-tracker (MPPT) met ingebouwde DC-DC-converter.

Om de flexibiliteit van deze aanpak te tonen, hebben we gekozen voor één 24 Volt-uitgangsbuss voor alle verschillende PV technologieën in de vensterdemo. Daartoe is elke submodule verbonden met één MPPT / DC-DC-omzetter van Taylor en de uitgang met de uitvoerbuss. Om het elektrische circuit te sluiten is een aansluitdoos van KS Terminal gebruikt samen met de outputkabels (inclusief de MC4-connectoren).

Met deze informatie werd vervolgens contact gelegd met Glas Ceyskens Group om de haalbaarheid te bespreken van de integratie van de zes dunne-film zonnecelmodules in een pastorijs-raamconstructie met dubbele beglazing en een aluminium frame. De submodules van de dunne-film zonnecelmodules zijn op het voorste glas gelijmd met een transparante twee-componenten siliconen die uithardt op kamertemperatuur. Vervolgens werden de bedrading en vermogenselektronica van Taylor ook op het voorglas geplakt. Uiteindelijk heeft Ceyskens hier een dubbele beglazing van gemaakt en een aluminium frame om de dubbele beglazing geplaatst. De plus- en min-terminals worden respectievelijk aan de linker- en rechterkant van de vensterdemonstratie uitgevoerd. Naast het eigenlijke pastorijs-raam bood Ceyskens ook een standaard voor het demonstratiemodel. Het resultaat is een pastorijs-raam demonstrator van 81,4x116,6 cm<sup>2</sup> met dubbele beglazing en een aluminium frame. Het maximale uitgangsvermogen onder standaard test condities is 125 mA bij 24 V.



## Werkpakket 5: Geïntegreerde PV in bouwcomponenten

### Inleiding

Werkpakket 5 had tot doelstelling om, gebruik makend van dunne film PV, geïntegreerde bouwcomponenten te realiseren in een openlucht demonstratie. In het eerste deel van het project is dit specifiek gemaakt door te kijken naar oplossingen voor een dak, een raam en voor gevelconstructies. Dit is vervolgens opgepakt met clusters van project partners light rondom deze oplossingsrichtingen. Buiten het realiseren van de demonstraties, zouden de oplossingen ook een jaar lang gemonitord worden.

Voor de oplossing voor het dak is gekeken naar niet-transparante dunne-film PV producten voor de vervanging van asbestdaken. Deze demo is gerealiseerd in de Wijk van Morgen, te Heerlen. Het consortium is vanuit het project begeleid door Zuyd Hogeschool, die ook verantwoordelijk is voor de testlocatie. Verder zijn als PPL actief betrokken geweest HyET Solar b.v., als leverancier van de dunne film PV, Eternit B.V. als leverancier van golfplaten, SGS Intron, voor de eisen rondom geïntegreerde PV producten, en Weijland Technologies B.V. voor inductieve elektrische overdracht.

Voor de oplossing richting een raam is gewerkt aan semitransparante dunne-film BIPV voor gevels. Deze demo is gerealiseerd op het terrein van KU Leuven, te Leuven. Het consortium is vanuit het project begeleid door KU Leuven. Als PPL zijn binnen deze demo actief betrokken geweest Sanko Solar BV als leverancier van CdTe semi-transparante zonnepanelen, Glas Ceyskens NV, voor de levering van het glas, Reynaers Aluminium NV, voor de levering en samenstelling van de componenten.

De geveloplossingsrichting heeft uiteindelijk twee verschillende consortia, met verschillende oplossingsrichtingen opgeleverd. Beide demo's zijn gerealiseerd op de testlocatie van TU Eindhoven, SolarBEAT, te Eindhoven.

Het ene consortium is vanuit het project begeleid door Solliance. Als PPL zijn binnen de zogenaamde demo 3A actief betrokken geweest architecten van Studio Solarix en Cube architecten, als ontwerper van het gevelpaneel, Flexipol Composites B.V. voor de verwerking van de polymeren, Sorba Projects B.V. voor het opmaat ophangstelsel, en SCX-Solar voor de installatie op de testlocatie.

Het andere gevelconsortium is vanuit het project begeleid door SEAC. Als PPL zijn binnen deze zogenaamde demo 3B actief betrokken geweest EigenEnergie.net B.V. als leverancier van de gebruikte zonnepanelen, NBArchitecten (Best Architecten) B.V. als architect, en TGM Holding BV als gevelbouwer.

Op de volgende pagina's wordt u verder ingelicht over de details van de verschillende demo's.

### Demo 1: PV ter vervanging van asbestdaken

### Achtergrond

In nauwe samenwerking met een groep tot het project toegetrokken bedrijven is voor het eerste demonstratievoorbeeld, een "Niet-transparante demonstrator", gekozen voor de ontwikkeling van een prototype PV-dak ter vervanging van daken waar nu asbest wordt toegepast. In Nederland moeten voor 2024 alle asbest golfplaten van deze daken worden verwijderd en vervangen worden voor alternatieve producten. De provincie Noord-Brabant en Limburg in Nederland vinden het belangrijk dat dit product op de markt komt, om een goede uitvoering te realiseren van hun programma's "Asbest eraf en PV erop". >>

Het PV op Maat werkpakket "Niet-transparante demonstrator" kent twee subdoelen:

1. Het onderzoeken van de werking van golfplaten waar dunne-film geïntegreerde PV-elementen zijn aangebracht. Het demonstreren van de dunne-film geïntegreerde PV-elementen op golfplaten op een schaal van 10-20 m<sup>2</sup>.
2. Het consortium om dit op te bouwen bestaat uit HyET Solar, Eternit, SGS Intron, Solliance, TNO Bouw en Zuyd Hogeschool.

### Beschrijving van demo 1

In demo 1 zijn twee dunne-film technologieën gebruikt voor het integreren van PV-elementen op golfplaten. TNO Solliance heeft de CIGS (Koperindiumgaliumselenide) technologie gebruikt, door MiaSolé modules zodanig aan te passen dat ze op golfplaten toegepast kunnen worden. (Zie Figuur 1, rechts). Door gebrek aan geautomatiseerde tooling (inherent aan het exploratieve karakter van dit project) is dit voornamelijk met handwerk

gerealiseerd. Het gevolg daarvan is dat de samples er minder strak uitzien dan eerdere, kleine proefstukken die voor de duurtesten zijn gebruikt.

De tweede PV technologie die gebruikt is in de demo is dunne film silicium. Hierbij zijn producten van Hyet gebruikt, die Hyet geoptimaliseerd heeft en aangebracht op golfplaten.

In nauw overleg met de partners zijn de volgende deelvragen vastgesteld voor het onderzoek:

1. Wat is de relatieve prestatie van standaard c-silicium en dunne-film producten op dak?
2. Wat is de relatieve prestatie van dunne-film producten op vlak fabricaat en op golfplaten?
3. Hoe gedraagt zich de temperatuur als functie van lichtintensiteit op standaard Eternit plaat?
4. Wat is de relatieve prestatie van de vier bijzondere PV OpMaat-architecturen op golfplaat?

Voor het goed kunnen beantwoorden van deze vragen zijn twee "carports" op de Wijk van

Morgen bij Zuyd Hogeschool ontworpen, die het volgende dak-design hebben (zie Figuur 3) Bij de monitoring carport worden met name de onderzoeksvragen geadresseerd rond de werking van golfplaten waarop dunne-film geïntegreerde PV elementen zijn aangebracht, en bij de demo carport zal met name de demonstratie van de prototypes centraal staan.

In Figuur 4 is de bouw en het eindresultaat van de gerealiseerde demo carport en het monitoringsgebouw weergegeven. In Figuur 5 zijn de beide gerealiseerde carports weergegeven (maart 2019).

In maart 2019 is gestart met het monitoren van de carports onder verschillende openlucht omstandigheden. In een latere publicatie in het kader van PV OpMaat zullen de data gepresenteerd worden.

Figuur 4: Foto's van de plaatsing en realisatie van deze producten op het demogebouw.



Figuur 5 Monitoring en demo carport (maart 2019).

## Demo 2: Semi-transparante dunne-film BIPV in ramen

### Achtergrond

Het doel van demo 2, de "Semi-transparante demonstrator" is het ontwikkelen van een BIPV-prototype voor ramen, waar de esthetiek nog meer centraal staat dan bij daken. Hiertoe is gekozen voor (dubbele of driedubbele) glazen vensters met een dunne-film PV laag die gedeeltelijk doorzichtig is gemaakt, waarvan eigenschappen zoals thermische isolatie, ventilatie en lichtopbrengst in het gebouw bestudeerd zijn. In Nederland en België zijn de afgelopen jaren met name PV-systemen geïnstalleerd op daken, en is de aandacht voor gevels beperkter geweest. De reden hiervoor is dat bij gevels enerzijds de elektriciteit opbrengst per geïnstalleerd vermogen (Wp) lager is en er anderzijds hogere eisen zijn ten aanzien van de esthetiek. De verwachting is echter dat ook in gevels en vensters het aandeel van PV-installaties de komende vijf jaar sterk gaat stijgen omdat de verhouding tussen opbrengst en kosten steeds voordeliger wordt. Een van de manieren om de opbrengst te verhogen is om de koeling van de PV-elementen te verbeteren (zonnecellen hebben onder gelijke belichting minder energieverlies bij lagere temperatuur). De mogelijkheid is verkend om dit zonder beduidende kostenverhoging te realiseren met een betere ventilatie.

Demo 2 "Semi-transparante demonstrator" kent twee subdoelen, namelijk:

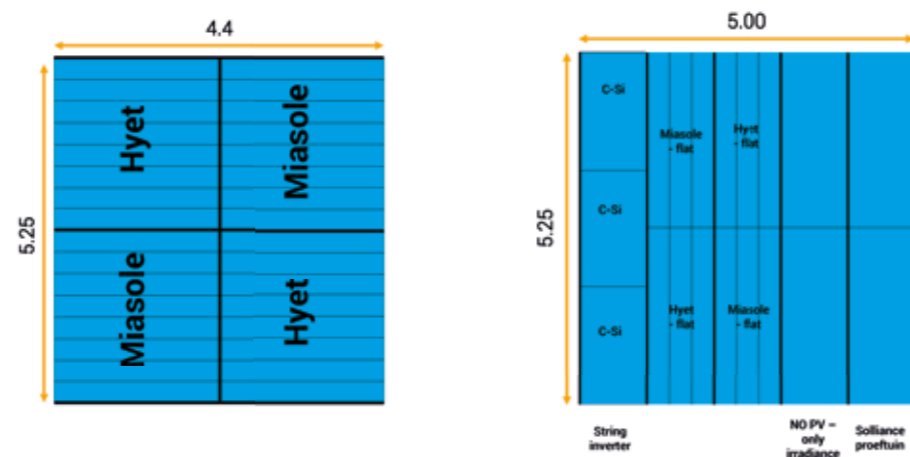
1. Het onderzoeken van de werking van gevels waarin lichtdoorlatende dunne-film geïntegreerde PV-elementen zijn aangebracht.
2. Het demonstreren van de lichtdoorlatende dunne-film geïntegreerde PV-gevel op een schaal van 10-20 m<sup>2</sup>.

In deze demo zijn panelen met een verschillende mate van ventilatie vergeleken. >>

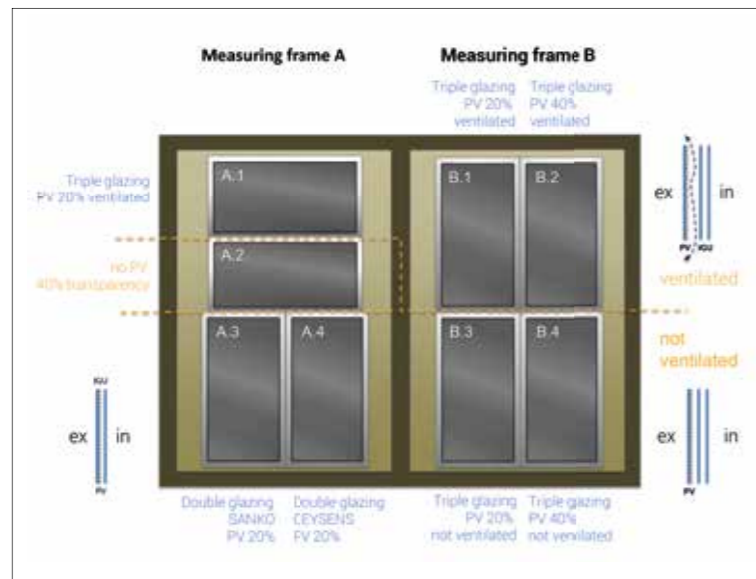
Figuur 1 en 2: HyET en MiaSolé modules geïntegreerd op golfplaten en op vlakke platen van Eternit.



Figuur 3: Dakschema van monitoring carport (a) en de PV OpMaat-demo carport (b).



Figuur 6:  
Demonstrator semi-transparante dunne film  
BIPV: schema van de meetopstelling.



Hiertoe is een consortium samengesteld met als partners universiteit Hasselt, Katholieke Universiteit Leuven, EnergyVille, Sanko Solar, Glas Ceyssens en Reynaers Aluminium.

### Beschrijving en monitoring van demo 2

De semi-transparante BIPV-opstelling bestaat uit een opstelling die door de KU Leuven is ontworpen op de testlocatie in Heverlee, België. Figuur 6 toont een afbeelding van de gerealiseerde installatie. De demo bestaat uit zeven verschillend uitgevoerde semi-transparante fotovoltaïsche vensters op basis van CdTe dunne-filmtechnologie en een normaal venster ter vergelijking. Deze opstelling kwam tot stand door een samenwerking tussen Universiteiten (UHasselt, KU Leuven), onderzoeksinstituten (EnergyVille), en Sanko Solar, die de semi-transparante panelen leverde, Glas Ceyssens die de beglazing fabriceerde en Reynaers Aluminium die het frame ontwikkelde en installeerde. In het tweede kwartaal van 2017 is de demonstratiegevel opgebouwd. Vervolgens is in juli 2017 het monitoringssysteem gerealiseerd dat de elektrische en thermische metingen uitvoert.



© Jonathan Vos

Het monitoren van de semi-transparante BIPV-opstelling is gestart op 19 juli 2017. Het monitoren gebeurt door de stroomsterkte, voltage en het vermogen bij Maximum Power Point elke 5 minuten te meten via een SolarEdge-omvormer. Voor elk geventileerd paneel werden drie of zes thermokoppels (afhankelijk van de oriëntatie) in de geventileerde spouwen van de beglazing geplaatst. Eveneens werden drie of zes thermokoppels (afhankelijk van de oriëntatie) op het binnen oppervlak van het glas geplaatst.

Een statistische analyse van de resultaten laat geen duidelijk verschil zien van energieopbrengst als functie van ventilatie. Er zijn kleine verschillen zichtbaar tussen de verschillende panelen. Voor CdTe technologie is de spanning/temperatuur coëfficiënt ongeveer  $-0.2\%/^{\circ}\text{C}$  (twee keer zo laag als de waarde

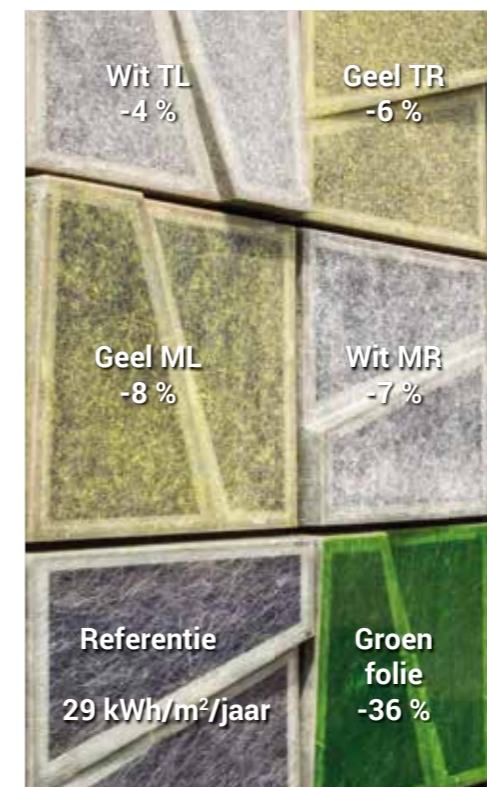
van  $-0.42\%/^{\circ}\text{C}$  voor kristallijn Si zonnecellen). Dat wil zeggen dat CdTe uit zichzelf minder gevoelig is voor variaties in temperatuur dan Si zonnellen. En daardoor is het effect van koeling door ventilatie wel waarneembaar, maar minder groot.

### Demo 3A: Composiet design gevelpaneel

Binnen PV OpMaat is een nieuw type lichtgewicht design gevelpaneel ontwikkeld. Uniek element in dit prototype is dat de dunne-film CIGS zonnecellen zijn verwerkt in een composieten draagstructuur. Door het lage gewicht van dit type paneel is het relatief eenvoudig te bevestigen aan een gevel. Daarnaast is het paneel van hoge esthetische waarde. Een consortium van bedrijven heeft hier aan bij gedragen. Studio Solarix was verantwoordelijk voor het ontwerp van de panelen. Solliance heeft de op maat gemaakte modules geleverd die door Flexipol zijn verwerkt in de gevelpanelen. Sorba ontwikkelde een speciaal ophangstelsel en SCX-Solar heeft de installatie uitgevoerd op de testlocatie "SolarBEAT" in Eindhoven, waar deze op een zuidgeoriënteerd façade is bevestigd.

Om tot werkende en reproduceerbare panelen te komen is eerst onderzocht hoe de zonnecellen konden worden verwerkt in het composietmateriaal. Met name de warmte die vrijkomt bij het uitharden van de harsen bleek een negatieve invloed te kunnen hebben op de kwaliteit van de zonnecellen. Door het productieproces iets aan te passen is dit opgelost, met als resultaat dat de verwerkte cellen nagenoeg geen efficiëntieverlies meer lieten zien. >>

Figuur 7: DC Opbrengst van elk type paneel per vierkante meter façade. Verliezen van de gekleurde panelen zijn uitgedrukt t.o.v. het ongekleurde referentiepaneel linksonder.

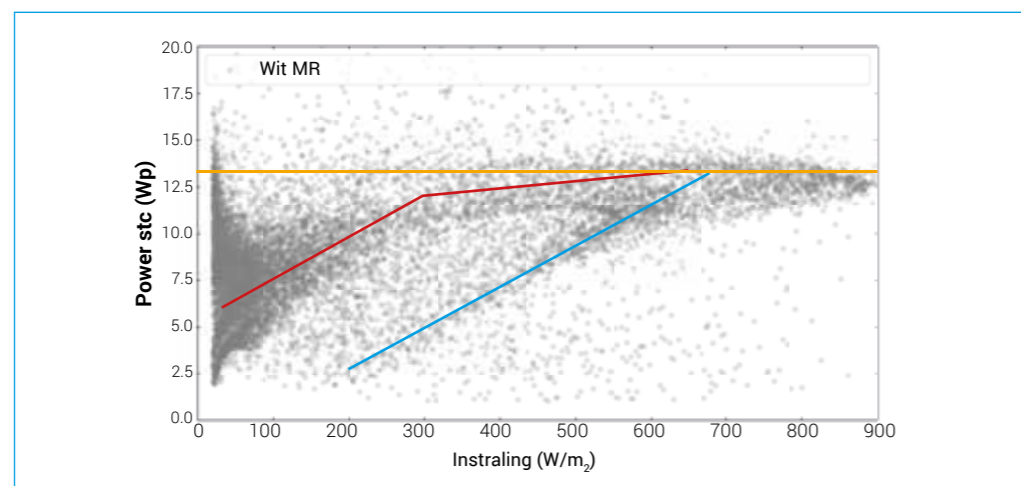


Om de levensduur van de panelen af te kunnen schatten zijn de proefstukken in een versnelde levensduurtest geplaatst. De resultaten hiervan waren zeer bemoedigend: de geteste samples voldoen aan de gestelde eis, waarbij er minimale degradatie mag optreden onder zware test-omstandigheden van 85°C en 85% relatieve luchtvochtigheid, gedurende 1000 uur.

Daarnaast is gekeken wat de invloed van verschillende kleurmethoden is op de werking en opbrengst van de cellen. Hiervoor zijn een groot aantal samples gemaakt die met en zonder kleuring zijn gemeten in een zonnemodule. Folies bleken in alle gevallen een (te) grote invloed te hebben op de efficiëntie. Verrassend genoeg, bleek een van de methoden die vanuit een designoogpunt het meest aansprak het minste verlies op te leveren. Bij deze methode zit de kleur in een willekeurig patroon, een soort marmerlook, in een van de lagen van het composiet verwerkt. Op basis van de bevindingen is uiteindelijk een ontwerp gemaakt voor de panelen. Op basis van dit ontwerp en de beschikbare elektronische infrastructuur op de testlocatie is vervolgens een design voor de zonnemodules gemaakt. Dit was extra uitdagend omdat het ontwerp van de panelen intrinsiek selectieve beschaduwing van de cellen met zich meebrengt. Iets dat een grote invloed op de levensduur van de cellen kan hebben.

Binnen het project zijn uiteindelijk 16 modules gemaakt die verwerkt zijn in 8 panelen. Hierbij is gevarieerd in kleurstelling en kleurmethode. Voor de kleur is gekozen voor de bovengenoemde marmerlook in wit en geel. Als referentie is een egaal gekleurde folie en een paneel zonder extra kleur gemaakt. 6 van deze panelen zijn samengevoegd met het ophangsysteem tot een gevelement dat in één keer geïnstalleerd kon worden op de openlucht testlocatie "SolarBEAT". Na realisatie van de elektrische installatie kon worden begonnen met het monitoren van de panelen door SEAC.

In de foto van de opstelling (figuur 7) zijn de gerealiseerde opbrengsten van elk paneel aangegeven. Het ongekleurde referentiepaneel links onder in de opstelling, heeft een DC jaaropbrengst van 29 kWh per vierkante meter gevel. Het paneel rechtsonder is voorzien van een transparante folie aan de voorzijde van het paneel. Deze kleurmethode blijkt (evenals is geconstateerd op celniveau) ook op module-niveau niet effectief, daar meer dan een derde van de opbrengst verloren gaat. Door een laag van het composiet te kleuren (geel of wit) is de opbrengst zo'n 5% lager ten opzichte van het referentiepaneel. Door het specifieke design van de panelen, waarbij een helft van de panelen ietwat uitsteekt, is een andere verliesfactor de zelfbeschaduwing van de panelen. In figuur 8 is dit effect voor paneel ("Wit MR") waar te



Figuur 8: Invloed van intrinsieke beschaduwing op de performance van een paneel, met daarbij een aantal getekende lijnen, welke als gids voor de ogen dienen.

nemen. Hierbij is voor elk gemeten vermogen gedurende het jaar, het bijbehorende datapunt onder "Standaard Test Condities (STC)" berekend. Dat wil zeggen dat het vermogen is gecorrigeerd voor instraling en temperatuur. Idealiter kan men een rechte lijn verwachten, wanneer deze datapunten worden weergegeven als functie van de instraling, zie de getekende gele lijn in figuur 8. In de daadwerkelijke data is er een verlies, doordat de panelen niet optimaal presteren onder lage lichtcondities (rode lijn). De blauwe lijn is het gevolg van beschaduwing van paneel "Wit TL" op paneel "Wit MR." Dit probleem kan in de nieuwere versie van dit product deels worden ondervangen door het plaatsen van meer zogenaamde bypass-diodes. Ook kan de vermogensdichtheid van het paneel worden vergroot door het plaatsen van meer cellen.

### Demo 3B: PV gevel demonstrator

Zonnepanelen installeren binnen de gebouwde omgeving heeft als groot voordeel dat duurzaam opgewekte elektriciteit binnen dezelfde omgeving wordt geconsumeerd, wat ervoor zorgt dat het stroomnet minder wordt belast. Daarbij komt dat zonnepanelen steeds efficiënter worden en de kosten al jaren dalen. Het wordt hierdoor steeds zinvoller om zonnepanelen, behalve op daken, ook in gevels van gebouwen te installeren. Tot dusver was een grote "show-stopper" dat architecten weinig keuze hadden in de kleur en het motief van de panelen. Binnen het project PV opMaat hebben de bedrijven EigenEnergie, TGM en NBArchitecten een PV-gevel ontwikkeld, waarbij er gebruik is gemaakt van panelen met verschillende kleuren en motieven. Deze kleuren zijn op twee verschillende manieren aangebracht: de eerste methode is door het voorzijde glas te bedrukken met gekleurde stippen, de andere methode

is om een met stippen gekleurde folie aan te brengen (dit kan ook worden aangebracht na installatie van de panelen op locatie). Daarnaast zijn er panelen voorzien van esthetisch glas met een textuur. Tenslotte zijn er ook twee verschillende PV-technologieën getest; monokristallijn Si en dunne-film CIGS. Na een half jaar meten zijn de gekleurde en getextureerde c-Si panelen vervangen door andere c-Si panelen, waarbij de "busbars" (zichtbare dikke metalen strips aan de voorzijde van de c-Si zonnecellen) zwart zijn gekleurd en het voorzijde glas voorzien is van een motief (rode baksteen, zwarte steen, en een 3D-effect). Ook deze motieven zijn gerealiseerd door het glas te voorzien van gedrukte stippen. Deze PV-gevel is op het zuiden gericht geïnstalleerd op de outdoor test-locatie "SolarBEAT", waar deze door SEAC meer dan een jaar is gemonitord om de prestaties van de panelen met hoge esthetische waarde in kaart te brengen.

In figuur 9 is een foto van de opstelling te zien met daarin de DC opbrengsten van elk paneel. Te zien is dat een conventioneel c-Si paneel in het verticale vlak 136 kWh per vierkante meter per jaar opbrengt en een CIGS paneel 89 kWh per vierkante meter per jaar. Door de panelen grijs te kleuren is de opbrengst ongeveer 10% lager, hierbij is er weinig verschil geconstateerd tussen de verschillende kleuringstechnieken. >>

Getextureerd glas c-Si +2 %	Getextureerd glas CIGS +0 %	Roodgekleurd glas CIGS -17 %
Grijsgekleurd glas c-Si -10 %	Grijsgekleurd glas c-Si -9 %	Grijze folie CIGS -9 %
Conventioneel c-Si Referentie 136 kWh/m <sup>2</sup> /jaar	Conventioneel CIGS Referentie 89 kWh/m <sup>2</sup> /jaar	Grijze folie c-Si -7 %

Figuur 9: DC Opbrengst van elk type paneel per vierkante meter façade. Verliezen en extra opbrengsten van de gekleurde en getextureerde panelen zijn uitgedrukt t.o.v. de referentie panelen van CIGS en c-Si links onder.

Het roodgekleurde CIGS paneel heeft een > 17% lagere opbrengst t.o.v. het referentiepaneel. Door het voorzide glas te voorzien van een esthetische textuur is er zowel bij het CIGS als het c-Si paneel geen verlies geobserveerd.



Figuur 10: DC Opbrengst van de tweede serie c-Si panelen, waarbij de panelen zijn voorzien van een motief en de "busbars" zwart zijn gekleurd.

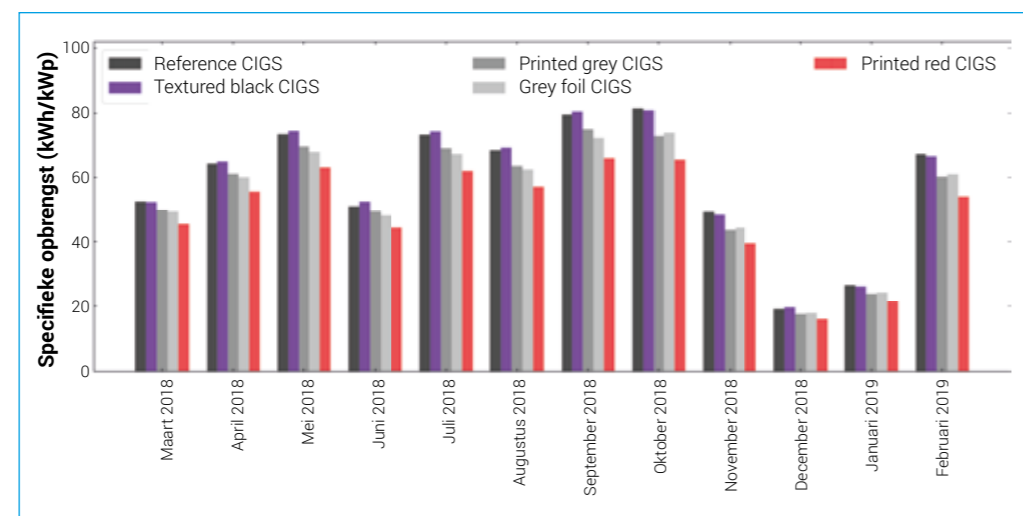
In figuur 10 is een foto van de opstelling te zien, nadat de c-Si panelen zijn vervangen door nieuwe c-Si panelen met een motief. De busbars zijn hierbij zwart gekleurd, en er is gebruik gemaakt van dikker voorzide glas vergeleken met het 1e c-Si referentiepaneel, wat er mede voor zorgt dat de DC opbrengst van het referentiepaneel met 115 kWh/m<sup>2</sup>/jaar ietwat lager is dan het c-Si referentiepaneel zonder gekleurde busbars. Bij deze panelen is nauwelijks nog te zien dat het om zonnepanelen gaat.

De verliezen van het "Zwarte steen" paneel, "Rode baksteen" paneel en het "3D grijs paneel" zijn respectievelijk 18%, 14% en 8% t.o.v. het referentiepaneel. Voor alle gekleurde panelen geldt dat het oppervlakte voor 30% bedekt is met gekleurde stippen. De opbrengstverliezen zijn aanzienlijk lager.

Het overgrote deel van de metingen heeft plaatsgevonden in 2018, dit jaar is uitzonderlijk zonnig geweest. Verder zal een DC opbrengst van de panelen bijna altijd geconverteerd worden naar AC om te koppelen aan het grid. Deze DC->AC conversie gaat in een moderne omvormer met een typische efficiëntie van 95%. Voor een typische opbrengstinschatting is het raadzaam om een marge van 15% te gebruiken t.o.v. de waardes uit figuur 9 en 10.

Tenslotte kan in figuur 11 het opbrengst profiel van op het zuiden gerichte zonnepanelen in het verticale vlak worden gevonden. Door de verticale oriëntatie, is het opbrengstprofiel gedurende het jaar aanzienlijk vlakker, dan een vergelijkbaar schuin dak-systeem.

Figuur 11: Specifieke opbrengst van de CIGS panelen gedurende een volledig jaar.



Nul Op de Meter (NOM-)appartementencomplex De Willem en De Zwijger in Best (Woonstichting 'thuis)  
Ontwerp: NB Architecten | Realisatie: BAM | Zwarte gevel uit CIGS-panelen: EigenEnergie.net  
Door Cobouw verkozen tot meest duurzame bouwproject van 2018.





## Werkpakket 6: Betrouwbaarheid en levensduur

Voordat fotovoltaïsche (PV) panelen op de markt komen, worden deze grondig getest zowel in demonstratie opstellingen als in levensduurtesten. In het PV OpMaat project werden laboratorium levensduurtesten gebruikt om de voor integratie van de PV panelen in bouwelementen gebruikte processen te controleren.

### Twee veel gebruikte testen

Meestal worden twee soorten testen gebruikt om de levensduur van PV panelen te kwantificeren. De bedoeling van deze testen is om de monsters versneld te degraderen. Op basis van gekalibreerde modellen kan men dan de levensduur van de PV panelen in reële omstandigheden schatten.

De ene test is de zogenaamde temperatuurramp test. Dit is een test om het effect van mechanische spanning ten gevolge van de thermische uitzettingen van de verschillende materiaallagen te bestuderen. Hierbij wordt een PV paneel in een temperatuur gecontroleerde kamer gebracht. De monsters ondergaan een temperatuur cyclus tussen  $-40^{\circ}\text{C}$  tot  $85^{\circ}\text{C}$  met een op- en neergaande snelheid van  $100^{\circ}\text{C}/\text{h}$  en een stabiele temperatuur op de pieken en de dalen gedurende 10 minuten. Dat betekent dat een cyclus ongeveer drie uur duurt. Een sample komt goed door de test als hij tenminste 200 cycles heeft doorstaan, waarbij er geen schade (in dit geval onthechting van de PV modules) zichtbaar is en het paneel nog een efficiency heeft van ten minste 80% van de initiële waarde.

De andere test is de zogenaamde waterdamp test. Deze test meet hoeveel water kan diffunderen in de lagen en meet dus de waterdampdichtheid van de encapsulatie van de PV modules. Deze 'Damp Heat' test vindt plaats in een klimaatkast. Hierbij wordt de temperatuur in de kast op  $85^{\circ}\text{C}$  gehouden bij een luchtvochtigheid van 85% RH. Een sample komt goed door de test als de efficiëntie na 1000 uur nog ten minste 80% van de initiële waarde is.

### Meten met dezelfde maat: onderlinge kalibratie

Vier laboratoria van de partners van Solliance hebben de beschikking over deze test opstellingen: TNO, Hogeschool Zuyd, imec/imomec en FZ Jülich. Om te zorgen dat we correct vergelijkingen kunnen maken tussen deze labo's, was de eerste taak in dit onderzoek om een cross kalibratie te maken van deze meetopstellingen bij de verschillende instituten. Hiervoor werd bij TNO een aantal CIGS cellen opgemeten en uitgekozen, die dezelfde eigenschappen hadden. Deze werden vervolgens verdeeld over de vier test opstellingen van de verschillende labo's. Er werden waterdamp levensduurtesten gedaan. Bij drie laboratoria was de levensduur binnen de aanvaardbare marge ongeveer gelijk. Maar in het laboratorium van FZ Jülich leken de samples veel sneller te degraderen dan bij de andere drie.

Na een zoektocht van een heel aantal maanden werd vastgesteld dat de manier van waterdamp inbrengen in de opstelling van FZ Jülich condens veroorzaakte in de klimaatkast, wat de effectieve waterdampconcentratie veel te hoog maakte. Ook bleek de sensor van die meetopstelling foutief te meten. Na reparatie van deze opstelling werd een levensduur op de samples gemeten, gelijkaardig aan wat de overige labo's vonden. Dit was een belangrijke bijdrage om te zorgen dat levensduurmetingen in de labo's van Solliance nu en in de toekomst met elkaar vergeleken kunnen worden.

### Versnelde evaluatie door versnelde testen

Bij verschillende trajecten in PV OpMaat om PV panelen in bouwelementen te integreren zijn levensduurtesten ingezet om keuzes te maken of te evalueren. Hieronder een aantal voorbeeld resultaten die het nut van het gebruik van de klimaatkamers aantonen. Voor het integreren van flexibele PV halfproducten op golfplattendaken werd door de versnelde levensduurtesten aangetoond >>



dat voor een bepaald halffabricaat de gekozen verlijming voldoende goed bleek te werken en voor een ander halffabricaat de verlijming moest verbeterd worden. Ook de keuze van de encapsulant en het encapsulatie proces werd door de testen versneld geëvalueerd.

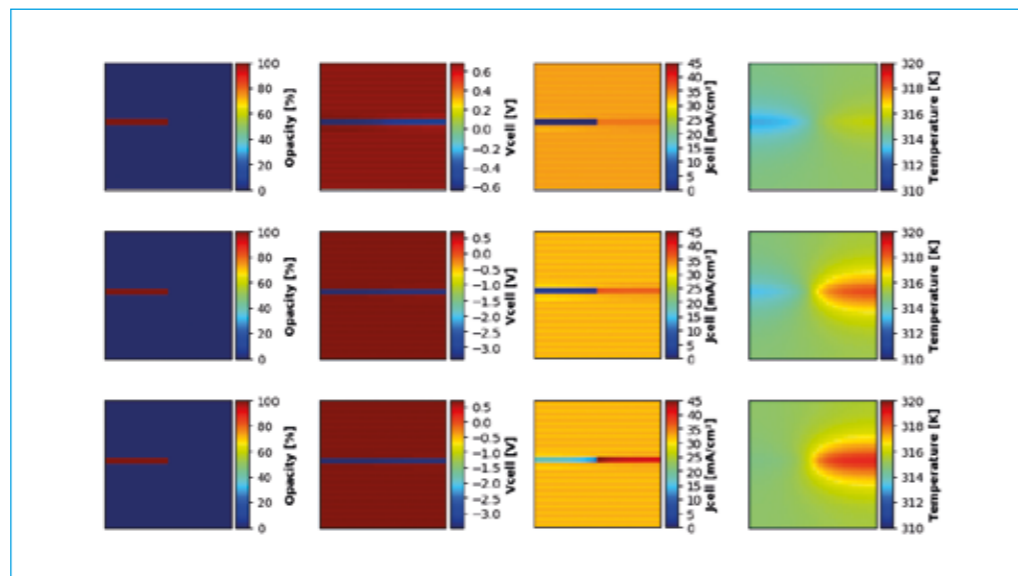
Voor de gekleurde PV panelen werden stalen vergeleken met en zonder aanbrengen van de kleur. In de versnelde levensduurtest bleek het kleuren van de panelen geen invloed te hebben op de levensduur van het PV paneel. Wel werd het belang van een goede vocht-dichte encapsulatie nogmaals aangetoond en kon de juiste encapsulatie techniek gekozen worden op basis van versnelde evaluatie in versnelde levensduurtesten.

Om de elektriciteit opgewekt door de PV panelen buiten het bouwelement te brengen, dienen contacten en bedrading in het bouwelement te worden voorzien. Een cruciaal element is de elektrische verbinding van deze draden met het PV paneel. Voor CIGS PV panelen werden drie verbindingstechnieken onderzocht. Een op basis van een elektrisch geleidende verlijming op

aluminium tape, een op basis van een gelaste verbinding tussen Molybdeen en aluminium tape en een op basis van een soldeerverbinding. Bij de verlijmde verbinding bleek het elektrisch contact te snel te degraderen. De twee andere verbindingen werden op basis van de versnelde levensduurtest voldoende goed bevonden om te gebruiken voor demonstratie panelen.

### Simulatie van elektrische spanningen en stromen

In dit werkpakket werd ook een simulatie programma ontwikkeld dat intern de elektrische spanningen en stromen kan simuleren en zo de invloed van bepaalde defecten op de levensduur kan verklaren. Een belangrijk degradatie fenomeen in PV panelen is de zogenaamde 'reverse bias degradation'. Deze treedt op als een cel van het PV paneel volledige of gedeeltelijk wordt beschaduwd. Afhankelijk van de eigenschappen van de lagen in het paneel kan dit zelfs leiden tot het volledig kortsluiten van het PV paneel. In bijgaande figuur, kan men een simulatie van dit effect zien voor drie PV panelen met een verschillende shunt weerstand (Rsh).



## Publicaties

Publicaties in vakbladen en wetenschappelijke tijdschriften, met expliciete verwijzing naar het project en haar financiers:

1. In-situ monitoring of the accelerated performance degradation of solar cells and modules: a case study for vCu(In,Ga)Se<sub>2</sub> solar cells; Mirjam Theelen, Klaas Bakker, Henk Steijvers, Stefan Roest, Peter Hielkema, Nicolas Barreau, Erik Haverkamp
2. Eternit: Golfplaten integreren met zonnecellen, Solar Magazine oktober 2017
3. Interlaboratory comparison of photovoltaic performance measurements using CIGS solar cells; G. Soares, M. Theelen, D. Roosen (Solliance), M. Daenen, J. Carolus, M. Meuris (IMO-IMOMEC, UHasselt), T. Birrenbach, A. Gerber, A. Wrigley (FZ Juelich); IEEE 978-1, 5090-6641-4/17 (2017)
4. "Up-scalable sheet-to-sheet production of high efficiency perovskite module and solar cells on 6-in. substrate using slot die coating" F. Di Giacomo, S. Shanmugama, H. Fledderus, B.J. Bruijners, W.J.H. Verhees, M.S. Dorenkamper, S.C. Veenstra, W. Qiu, R. Gehlhaar, T. Merckx, T. Aernouts, Ronn Andriessen, Yulia Galagan, Solar Energy Materials and Solar Cells (2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2017.11.010>
5. "In 2018 duizenden vierkante meters verkopen", Solar Magazine december 2017
6. "Opbrengstverlies door temperatuurstijging halveren", Tijdschrift Uneto VNI, januari 2018
7. Elke gevel van PV voorzien zonder concessies aan ontwerp van architect, Solar Magazine maart 2018
8. Energywall: Gekleurde en gestructureerde PV gevel; De Architect, maart 2018
9. Een architect wil variatie in kleuren, Solar Magazine juni 2018
10. "Outdoor characterization of colored and textured prototype PV facade elements", Chris Tzikas, Roland Valckenborg, Menno van den Donker, Ádám Bognár, David Duque Lozano, Roel Loonen, Jan Hensen, Wiep Folkerts, Proceedings 35th EU PVSEC 2018 page 1468-1471
11. "Proposing an electro-thermal spice model to investigate the effect of partial shading on CIGS PV modules", J. Carolus, Z. Purohit, T. Vandenbergh, M. Meuris, B. Tripathi and M. Daenen, Proceedings 35th EUPVSEC 2018 page 1343-1345
12. "Modeling Reflected Irradiance in Urban Environments – A Case Study for Simulation-Based Measurement Quality Control for an Outdoor PV Test Site", Adám Bognár, Roel Loonen, Roland Valckenborg, Jan Hensen – Proceedings 35th EU PVSEC 2018 page 1672-1675
13. 'Identifying local PV shading based on power data and regional irradiance measurements' - A. Bognar (TUE) et al. Solar Energy 174 (2018) page 1068-1077
14. (in voorbereiding) 'Performance assessment of rooftop PV by grey-box modelling with site-specific model-fitting' - Journal article, A. Bognar (TUE) et al.
15. "Zonne-energie onzichtbaar opwekken is de toekomst", Marc Florquin, Marc Meuris, Publiereportage Zonne-energie Rondom Vlaams Brabant, week45 (november 2018)
16. "In situ monitoring of the accelerated performance degradation of solar cells and modules: A case study for CIGS solar cells", M. Theelen, K. Bakker, H. Steijvers, S. Roest, P. Hielkema, N. Barreau, E. Haverkamp, Journal of Visualized Experiments e55897, doi:10.3791/55897 (March 2018)
17. (ingediend) "Towards ultra-thin CIGS solar cells: back contact engineering for highly reflective HfNx layer integration", M. Simor, S. Karwal, J. Niemela, A. Bracesco, M. Dorenkamper, M. Theelen, W. Kessels, H. Linden, M. Creatore, Energy Materials and Solar Cells
18. 'Potentie van miljoenen vierkante meters op agrarische daken', Solar Magazine, maart 2019.

Voor meer informatie: [www.pvopmaat.nl](http://www.pvopmaat.nl) | [info@solliance.eu](mailto:info@solliance.eu)

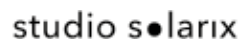
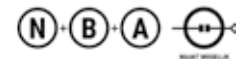
**De keten van activiteiten  
binnen PV OpMaat**



PV OpMaat is uitgevoerd door:



De volgende bedrijven hebben deelgenomen aan PV OpMaat:




PV OpMaat is gerealiseerd met ondersteuning van:



Provincie Noord-Brabant



provincie limburg 



Ministerium für Wirtschaft, Energie, Industrie, Mittelstand und Handwerk des Landes Nordrhein-Westfalen



Ministerie van Economische Zaken en Klimaat



**Interreg** EUROPESE UNIE  
Vlaanderen-Nederland  
Europees Fonds voor Regionale Ontwikkeling