

TNO PUBLIEK

TNO-rapport R11739

R11739

BIPVPOD2 Openbaar Eindrapport

High Tech Campus 21
5656 AE Eindhoven

www.tno.nl

T +31 88 866 54 43

Datum 7 oktober 2021

Auteur(s)

Exemplaarnummer

Oplage

Aantal pagina's 33 (incl. bijlagen)

Aantal bijlagen

Opdrachtgever

Projectnaam BIPVPOD2

Projectnummer TEUE318007

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2021 TNO

TNO PUBLIEK

Contents

1	Inleiding	3
1.1	Project gegevens	3
1.2	Uitgangspunten.....	3
1.3	Doelstelling	4
1.4	Samenwerkende partijen.....	5
2	Resultaten en knelpunten.....	6
2.1	Back-end samples alle resultaten (D1.1, D1.2, D1.3, D4.1, D4.2, D4.3)	6
2.2	Prototype PV-panelen voor de test site (D1.4).....	7
2.3	Kleur middels Interference Filter (D2.1)	7
2.4	Kleur toepassing (D2.2)	7
2.5	Optical testing (hoekafhankelijk, spectraal, transmissie en reflectie) (D2.3).....	8
2.6	Kleur veroudering (D2.4)	10
2.7	Test site (D3.1)	12
2.7.1	Schuindak systeem LOCI van Rebor BV	12
2.7.2	Gevel systeem ZigZag van Wallvision BV.....	13
2.8	Eerste resultaten veldtest (D3.2)	14
2.8.1	Schuindak systeem	14
2.8.2	ZigZag gevel systeem	15
2.9	Resultaten compleet jaar veldtesten (D3.3)	16
2.9.1	Schuindak systeem	16
2.9.2	ZigZag gevel systeem Instraling	18
2.9.3	ZigZag gevel systeem Elektrische Opbrengst.....	21
2.10	Knelpunt: Ontwikkeling hoekafhankelijke Reflectie & Transmissie meetapparaat.....	24
2.11	Knelpunt: Inverter kan MPP niet altijd vinden.....	24
2.12	Knelpunt: Levering dunne-film PV-panelen lastig (COVID19)	25
3	Bijdrage aan doelstelling	26
4	Spin off (en vervolg)	27
4.1	OMT Solutions BV	27
4.2	Rebor BV	27
4.3	Wallvision BV	27
5	Openbare kennisverspreiding	28
6	Rapport Beschikbaarheid	29
7	Contactpersonen	30
8	Conclusies en aanbevelingen	31
8.1	Conclusies	31
8.2	Aanbevelingen	32
8.3	Dankwoord.....	32
9	Appendix: Format Openbaar Eindrapport volgens RVO	33

1 Inleiding

1.1 Project gegevens

- Project nummer: TEUE318007
- Project titel: 'Building Integrated Photovoltaic panels on Demand 2 (BIPVPOD2)'
- Project duur: van 1 maart 2019 t/m 28 augustus 2021, is 2.5 jaar

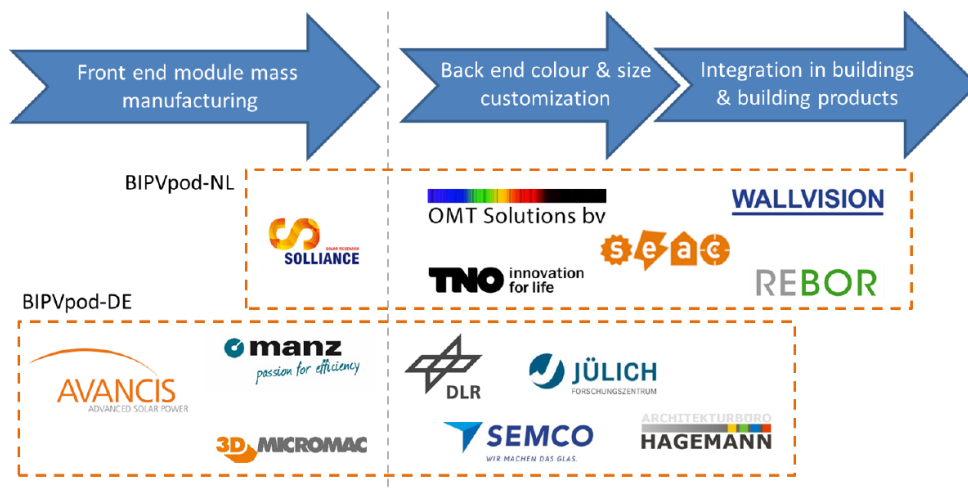


Figuur 1: ZigZag façade systeem met gekleurde dunne-film PV modules in alle delen van de ZigZag. Experimentele opstelling op huisje 2 van SolarBEAT.

1.2 Uitgangspunten

Vanuit de markt is er veel behoefte aan zonnepanelen die custom-made (op maat) gemaakt kunnen worden, en daarmee esthetisch mooi geïntegreerd kunnen worden in gebouwen. Kleur is daarbij een belangrijk aspect. Met de verdergaande integratie van PV in de gebouwde omgeving komt er ook steeds meer aandacht voor de robuustheid t.a.v. de functionaliteit (elektrische opbrengst), de bouwkundige (mechanische) sterkte en de esthetiek (kleur stabiliteit).

Er bestaat een internationale samenwerking, genaamd Solar ERA-NET. Zie Figuur 2 voor een overzicht van alle partijen die aan de Nederlandse en aan de Duitse kant van BIPVPOD hebben meegewerkt. Binnen het Nederlandse BIPVPOD2 wordt er voorgebouwd op de kennis en prototypes uit het eerdere BIPVPOD1-project. Twee demonstrators op een afmeting van orde grootte 10 à 25 m² laten zien hoe het 'Panel On Demand' (=POD) t.a.v. afmeting en kleur uitpakt. Daarbij is er ook veel aandacht besteed aan de kleurperceptie en de elektrische opbrengst als functie van de hoek van lichtinval.



Figuur 2: Er is samenwerking geweest tussen het Duitse en Nederlandse BIPVPOD middels het internationale initiatief Solar ERA-NET.

1.3 Doelstelling

Het doel van het project is om een technologie te ontwikkelen waarbij lage kosten dunne-film PV panelen gebruikt worden om custom-made op gebouwen te kunnen worden toegepast. Custom-made slaat dan op specifieke afmeting op maat en vrijheid in kleur keuze voor de eindklant. Bovendien zal het effect van partiële beschaduwing tot een minimum beperkt worden gehouden door gebruik te maken van dunne-film PV-technologie. Deze toepassing komt dan beschikbaar voor zowel het schuine dak, als voor de gevel.



Figuur 3: Rebor schuin dak systeem met gekleurde dunne-film PV modules. Experimentele opstelling op huisje 1 van SolarBEAT.

1.4 Samenwerkende partijen

Penvoerder en projectleider: TNO (Solliance): www.tno.nl/zon

Project Partners:

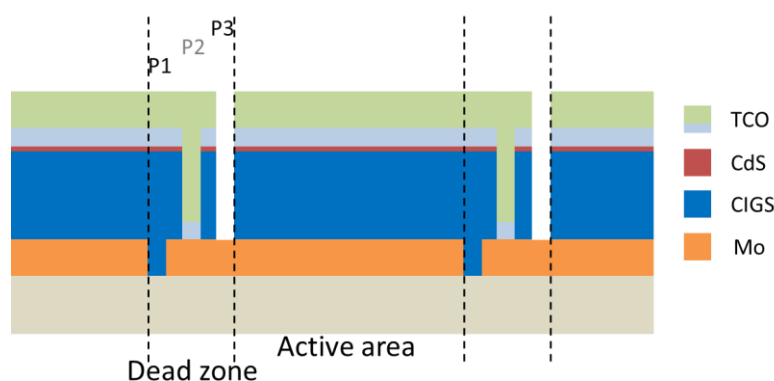
- OMT Solutions BV: <https://omtsolutions.com/>
- Rebor BV: <https://www.loci-zonnepanelendak.nl/nl/>
- Wallvision BV: <https://zigzagsolar.nl/>

2 Resultaten en knelpunten

De behaalde resultaten worden hieronder gepresenteerd. Tussen haakjes de referentie naar de Deliverable(s) vanuit het projectplan.

2.1 Back-end samples alle resultaten (D1.1, D1.2, D1.3, D4.1, D4.2, D4.3)

De centrale onderzoeksvraag voor dit WP (met deliverables) was het onderzoek naar de degradatiemechanismen die ten grondslag liggen aan de veroudering die onder sommige condities waargenomen wordt in de versnelde levensduurtesten. Hierbij is gefocust op de invloed van de interconnectie in dunne film CIGS modules. In Figuur 4 is de opbouw te zien van een klassieke manier om een cellen in dunne film PV-paneel te 'interconnecten' (via P1 P2 P3). Met deze methode zal de eindgebruiker niet in staat zijn om het device achteraf op maat te maken, zeker niet als de gewenste vorm afwijkt van een vierkant of rechthoek.



Figuur 4: Definities van P1 P2 P3 aan de hand van lay-out van een klassieke manier om cellen binnen een PV-paneel te aan elkaar te verbinden ('interconnectie').

Bij de *back-end interconnect* aanpak worden alle scribes en verbindingen pas gemaakt nadat het device geassembleerd is. Hiermee kan er dus wel een Paneel Op Maat ('POD') gemaakt worden, waarbij het interconnect patroon pas als laatste stap wordt aangebracht. Dit kan er ook voor zorgen dat het niet werkzame gebied ("Dead zone") in een module kleiner wordt, zodat de opbrengst zal toenemen. In deze studie is er gekeken naar *full back-end interconnect*, en een tussenvorm, *semi-back-end interconnect*, die wordt gebruikt als een tussenstap. (vandaar series 2 en series 3).

Binnen BIPVpod 2 zijn drie series van experimenten uitgevoerd, waarbij is gekeken naar het degradatiegedrag van niet-beschermde PV panelen. Op deze manier kon worden bepaald welke materialen of interface de 'zwakste schakels' zijn in een relatief kort tijdsbestek. De drie series zijn uitgevoerd met de volgende modules:

- Series 1: drie 10 cm x 10 cm modules met semi-back-end interconnection
- Series 2: zes 30 cm x 30 cm modules met full back-end interconnection
- Series 3: zes 30 cm x 30 cm modules met semi-back-end interconnection

De eerste series van drie niet-ingepakte modules van 10 cm x 10 cm met semi-back-end interconnect zijn gedegradeerd in een damp heat test (85°C/85 % relatieve vochtigheid). Deze test is de meest gebruikte test in de solar PV industrie om versneld verouderingsprocessen te simuleren/opleggen die overeen komen met de complete levensduur van een PV paneel. Na 400 uur blootstelling aan deze zeer zware condities (voor een niet-ingepakte modules) konden diverse degradatiemechanismen onderscheiden en

begrepen worden. Alleen de cracks in de P1 vereisen nog een verdere studie. Alle andere faalmechanismen zijn bekend vanuit de klassieke P1 P2 P3 interconnect en daarom niet specifiek relevant voor de back-end interconnectie-ontwikkeling.

De tweede serie was bedoeld om op grotere schaal zowel semi- als full- back end interconnect degradatie mechanismes te onderzoeken. Van de 12 samples uit series 2 en 3 was er 1 kapot na depositie. De overige 11 functioneerden; echter met een veel lagere efficiëntie dan kan worden begrepen. In de damp heat vervolgstap (waar de samples zonder verpakking aan werden blootgesteld) ging de degradatie snel. De exacte reden hiervoor is onduidelijk, maar is waarschijnlijk wel gecorreleerd aan de afwijkingen in het basismateriaal, die mogelijk ook een rol speelden in de initiële lage efficiëntie. Het onderzoek hiernaar loopt verder in een ander project. Ten slotte dient men zich te realiseren dat een volledig beschermde PV-module veel langer zou meegaan in deze levensduurtest, maar dat was niet het doel van dit onderzoeksprogramma.

2.2 Prototype PV-panelen voor de test site (D1.4)

In de loop van het project is besloten om de gekleurde dunne-film CIGS PV-panelen te betrekken via externe partijen. Dat ging niet helemaal soepel vanwege COVID19; meer daarover verderop bij de paragraaf over knelpunten. Maar uiteindelijk hebben zowel Wallvision als Rebor hun eigen systeem zodanig kunnen aanpassen, dat de PV-panelen van de externe partijen toch goed geïntegreerd zijn. Concreet zijn dit:

- Gevel: ZigZag systeem van Wallvision BV met CIGS-panelen van NICE Solar.
- Schuin dak: LOCI-systeem van Rebor BV met CIGS-panelen van Avancis.

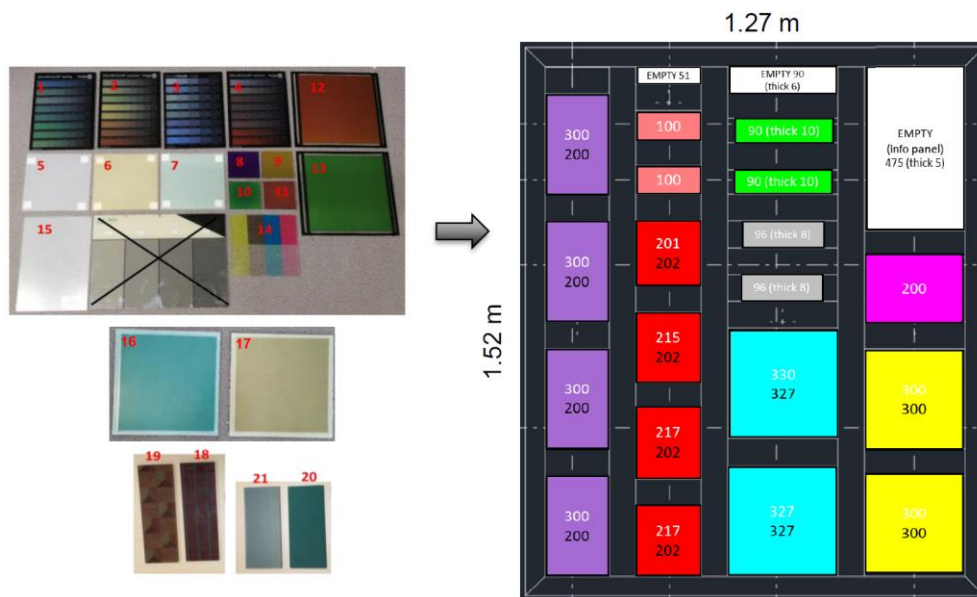
2.3 Kleur middels Interference Filter (D2.1)

Interference filtering is één van de vele manier om kleur te geven aan een PV-paneel. Deze techniek wordt toegepast in de samples van DLR (Duitse project partner) die nog een laag TRL hebben en voornamelijk academische resultaten opleveren. Maar ook de commerciële PV-panelen van Avancis die toegepast worden in het schuine dak systeem van Rebor maken gebruik van deze manier van kleuring. Helaas zijn de Avancis PV-panelen net te groot voor het nieuw ontwikkelde meetapparaat van OMT Solutions. Maar de mini-panelen van DLT passen er wel in, en zijn dus ook spectraal en hoek-afhankelijk doorgemeten.

2.4 Kleur toepassing (D2.2)

Een indrukwekkende verzameling samples zijn bij elkaar gezocht (en gekocht). Het TRL-niveau verschilt van lage TRL voor samples waaraan nog academisch onderzoek verricht wordt (zoals de technologie van DLR) tot aan de allerhoogste TRL voor samples die gewoon op de markt verkrijgbaar zijn, en dus ook alle reguliere keuringstesten (IEC 61215) doorstaan hebben. Sommige samples hebben we moeten kopen. Andere samples werden ons gratis beschikbaar gesteld nadat we hadden uitgelegd wat onze plannen er mee zijn. Alle samples zullen verwerkt worden in een demonstrator met lay-out zoals in Figuur 5 weergegeven. Deze demonstrator zal mobiel worden, zodat hij meegenomen kan worden naar beurzen en shows (zodra COVID19 dat weer toelaat). Tot het zover is – en ook tussentijds – zal de demonstrator neergezet worden in de ontvangsthallen van het ‘Solliance-gebouw’¹ waar normaalgesproken veel bezoekers langskomen van bedrijven geïnteresseerd in BIPV product ontwikkeling.

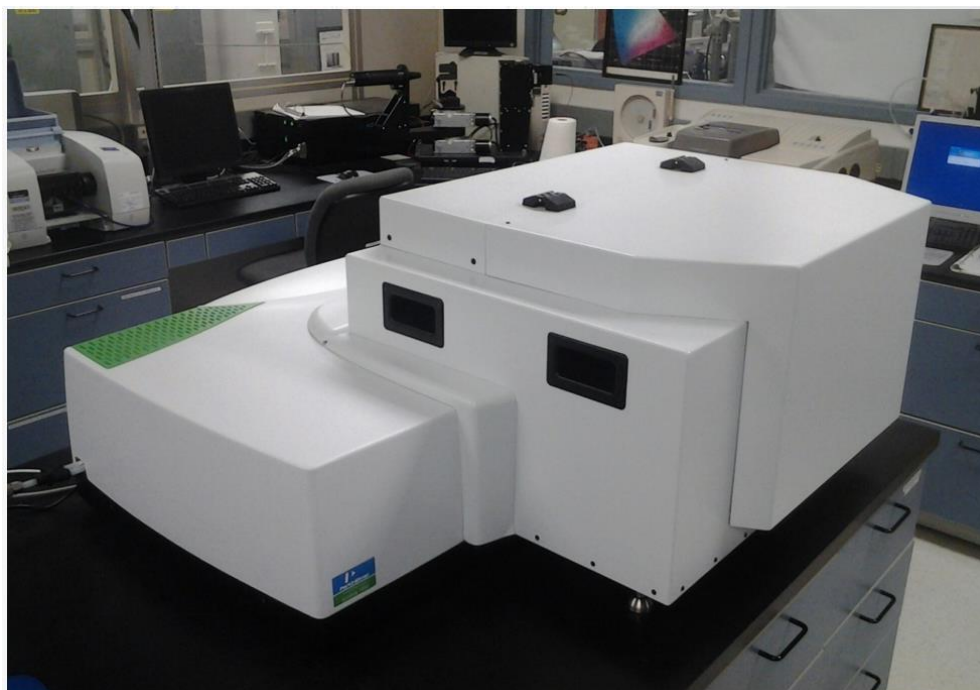
¹ High Tech Campus 21, 5656 AE Eindhoven



Figuur 5: Links: een foto van alle verzamelde samples. Rechts: de indeling in de demonstrator

2.5 Optical testing (hoekafhankelijk, spectraal, transmissie en reflectie) (D2.3)

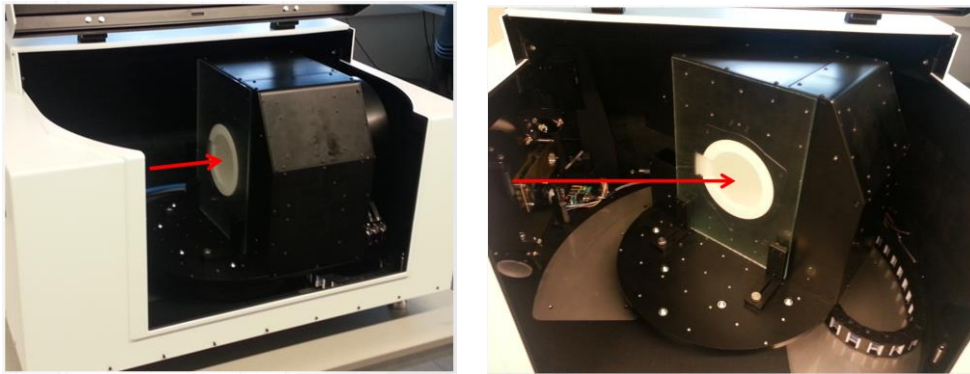
Dit is een erg belangrijke deliverable van het project aangezien het optisch testen alleen maar gedaan kan worden door de nieuw-ontwikkelde apparatuur van OMT Solutions BV. (In het projectplan wordt D2.3 beschreven door taken T2.4 en T2.5). Zie Figuur 6 voor het uiteindelijk ontwikkelde meetapparaat, dat straks in de markt gezet zal gaan worden als de VL270DRT geautomatiseerde 'Directional Transmittance and Reflectance'.



Figuur 6: De VL270DRT geautomatiseerde 'Directional Transmittance and Reflectance' opstelling.

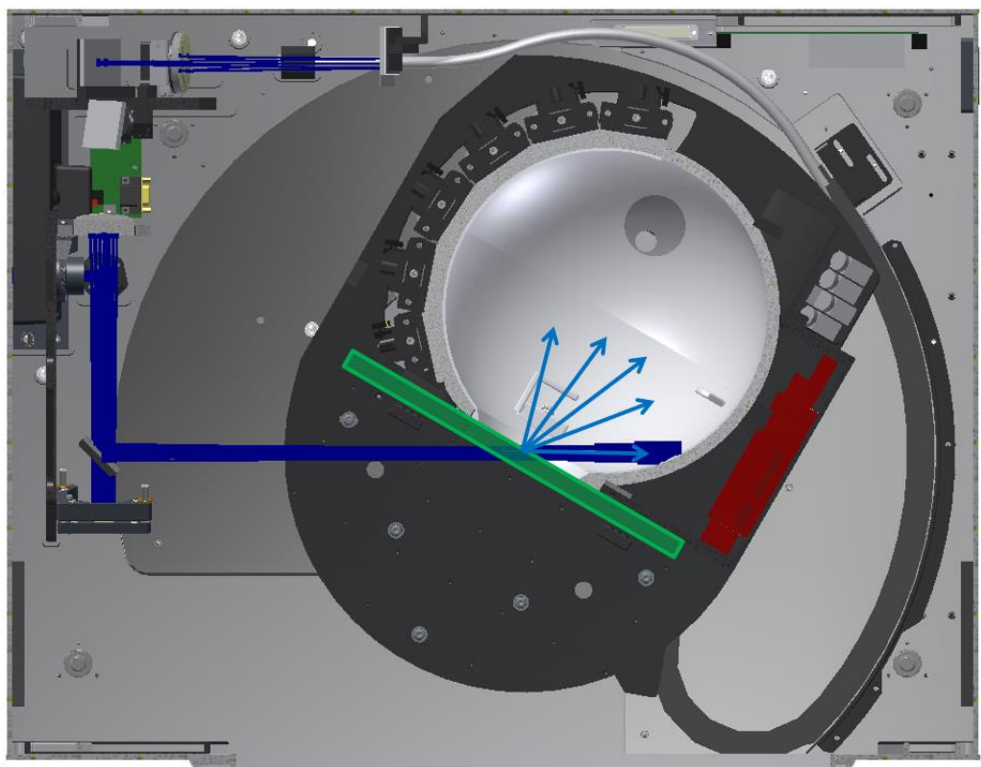
Binnen de VLT270DRT zijn er diverse configuraties mogelijk van licht bron en ontvangende detector. Deze worden allemaal automatisch goed ingesteld door de software. In Figuur 7 is duidelijk te zien hoe de lichtbundel (rode pijl) door het sample (glasplaatje in dit geval) heen

gaat en bemeten wordt door de 'integrating sphere' achter het sample. Op het linker plaatje gebeurt dat loodrecht en bij het rechter plaatje onder een hoek van 60°.



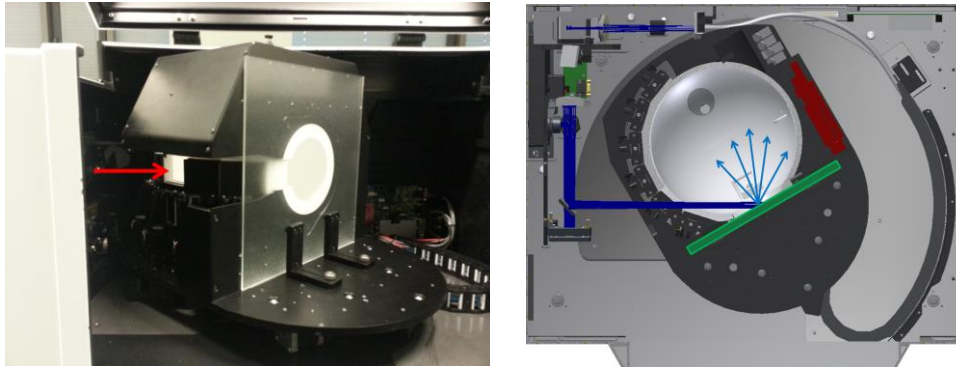
Figuur 7: De interne configuratie wordt ingesteld op basis van de gewenste meting. Links: een transmittance meting onder 0°. Rechts: een transmittance meting onder 60°.

De CAD-tekening laat duidelijk zien hoe het licht in de 'integrating sphere' wordt verspreid naar alle hoeken; zie Figuur 8. In dit geval gaat het licht door een groen sample en verspreid (blauwe pijlen) in alle richtingen. In de 'integrating sphere' is er een kleine opening waarachter een detector is geplaatst. Op deze manier wordt alle transmissie spectraal gemeten, voor een lichtbron onder een specifieke hoek van inval.



Figuur 8: CAD-tekening van transmissie meting onder een hoek van 60° op het sample (groen).

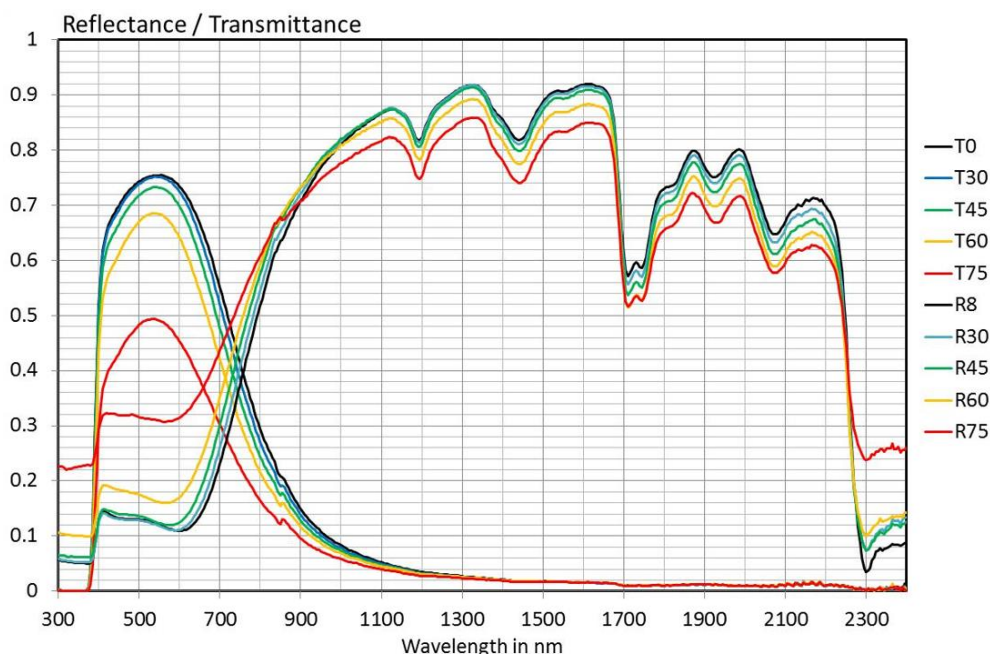
Voor een reflectie meting wordt dezelfde VL270DRT gebruikt, maar nu uiteraard in de andere configuratie. Het licht moet van de 'achterkant' van het sample komen. Maar daar bevindt zich de integrating sphere al. Hoe is dit 'probleem' opgelost?



Figuur 9: Configuratie voor reflectiemetingen (voor 60° hoek van inval). Links: foto laat zien dat er een vierkante opening in de integrating sphere is, waardoor de lichtbundel (rode pijl) het sample van achter kan bereiken. Rechts: CAD-tekening laat zien hoe het gescatterde licht (blauwe pijlen) vervolgens bemeten worden.

Figuur 9 laat duidelijk zien hoe de configuratie voor reflectiemetingen werkt. Het vakmanschap in de ontwikkeling van dit meetapparaat zit in het feit dat het licht goed de achterkant van het sample kan bereiken, maar het gat in de integrating sphere mag ook weer niet te groot zijn, want dat leidt tot signaal verlies. Er kan gekozen worden uit 6 hoeken van inval door de integrating sphere in zijn geheel te roteren.

Voordat de vele sample uit het project bemeten zijn, is er ter referentie ook een spectrale reflectie en transmissie meting gedaan op 'normaal' gecoat glas; zie Figuur 10.



Figuur 10: Reflectie (Rxx) en Transmissie (Txx) metingen aan gecoat glas. Let op: de kleur van de lijn geeft de hoek van inval weer (en niet de spectrale kleur). Voor T en R zijn dezelfde kleuren gebruikt. Dat zou geen probleem voor de interpretatie moeten zijn als men zich realiseert dat glas behoorlijk transparant is in het zichtbare gebied (380-750nm).

2.6 Kleur veroudering (D2.4)

Alhoewel 1 jaar outdoor testing voor verouderingsprocessen niet erg lang is, geeft het toch een waardevol eerste inzicht om de kleurmeting mee te nemen in de outdoor test. De metingen hebben plaatsgevonden op:

- $t=0$, start van de veld test in september 2020
- $t=6$ maanden (M), dit is halverwege de outdoor testing in maart 2021
- $t=10$ M, net voor het einde van het project in juli 2021

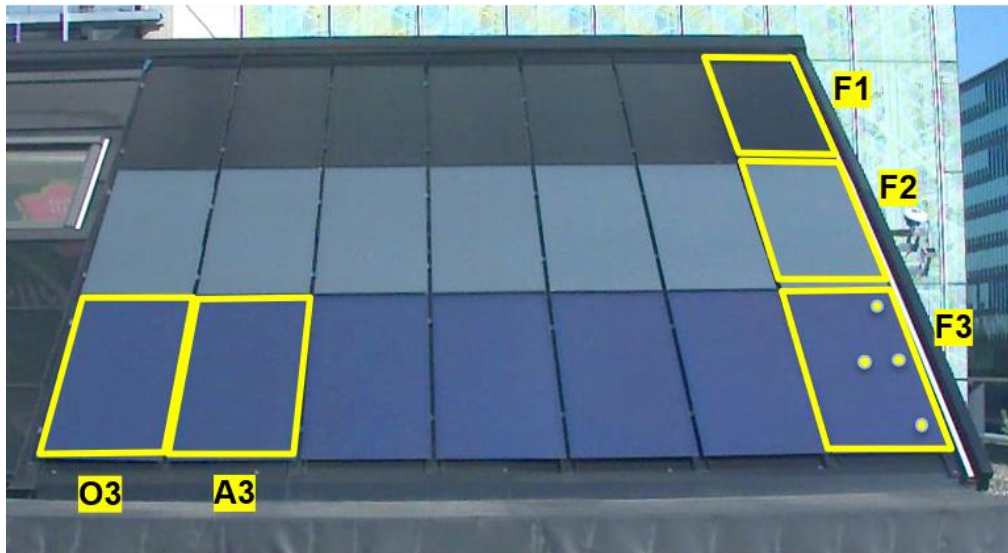


Figuur 11: Kleur meting m.b.v. een colorimeter (van het merk ColorMuse).

De verhouding van de afmeting van de meetspot t.o.v. de gekleurde inkt dots op de PV-panelen van ZigZag Solar is helaas zo ongunstig dat het niet mogelijk is om een reproduceerbare meting te verrichten. Voor de gekleurde PV-panelen van Rebor is dit wél mogelijk. Zie in Figuur 12 de meetposities en de PV-panelen die in dit onderzoek zijn meegenomen. De kleurverschillen zijn in $\Delta E_{2000} = \sim 1$ (max 1.2) na 6 maanden, en ongeveer $\Delta E_{2000} = \sim 2$ tot ~ 4 (met een uitschieter naar max 4.8) na 10 maanden. Dit is lastig met het blote oog waar te nemen, maar toch wel significant meetbaar.

De signalen uit de markt zijn niet eenduidig. Van de ene kant zijn er kritische architecten die vereisen dat de kleurafwijking gedurende de levensduur van een gevel niet meer mag afwijken dan $\Delta E_{2000} < 3$. Van de andere kant lijkt kleurstabiliteit niet altijd een superkritisch criterium voor een façade (zeker niet in het geval van een PV-actieve façade).

Ten slotte moet een stevige disclaimer gegeven worden bij deze kleurmetingen, omdat we nog zeker geen lange-termijn ervaring hebben met dit meetapparaat of andere apparatuur om kleurdegradatie systematisch in kaart te brengen. Meer metingen aan deze PV-panelen en prototypes uit andere projecten zijn zeker nodig voordat er conclusies verbonden kunnen worden aan de gevonden meetresultaten. Bijvoorbeeld is het nog onduidelijk in hoeverre vervuiling een tijdelijk effect op ΔE_{2000} kan hebben. Na een heftige regenbui, zou de kleur weer 'terug kunnen bewegen' naar de kleur coördinaten (L, a, b) zoals gemeten bij de start van de outdoor testing.



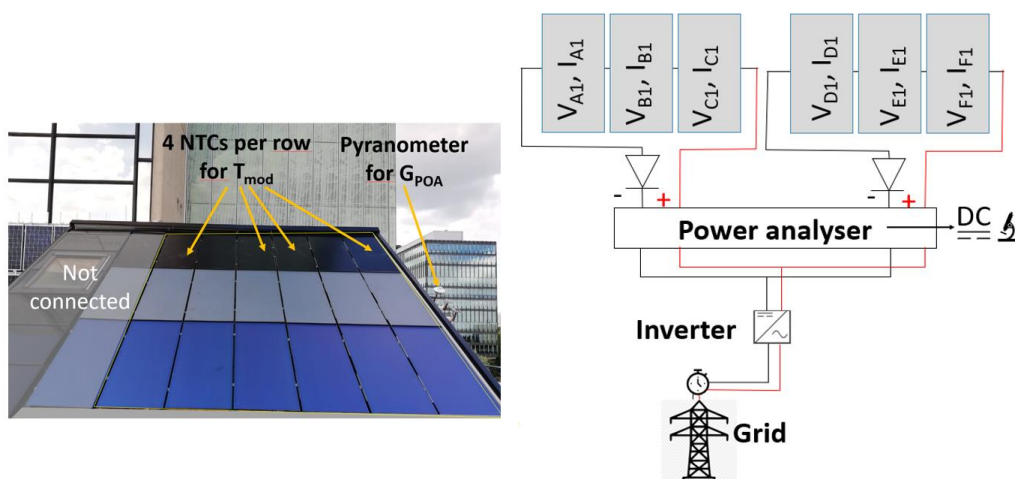
Figuur 12: PV-panelen O3, A3, F1, F2, F3 zijn op kleur bemeten op alle posities, zoals ingetekend voor F3.

2.7 Test site (D3.1)

De outdoor testing heeft plaatsgevonden op Outdoor Solar Research Facility SolarBEAT². Voor beide projectpartners geldt dat zij hun BIPV-systeem hebben moeten aanpassen aan de PV-panelen van de externe partijen.

2.7.1 Schuindak systeem LOCI van Rebor BV

Na de mechanische aanpassingen van het LOCI-systeem moest er natuurlijk ook nog een logische elektrische configuratie gekozen worden. Omdat cSi-panelen nog steeds dominant zijn in de markt, zijn ook (bijna) alle inverters elektrisch ontworpen voor de typische IV-karakteristiek van cSi PV-panelen. Desalniettemin werd een logische configuratie gevonden in een parallelle aansluiting van 3 in-serie geschakelde dunne-film PV-panelen, zie Figuur 13.



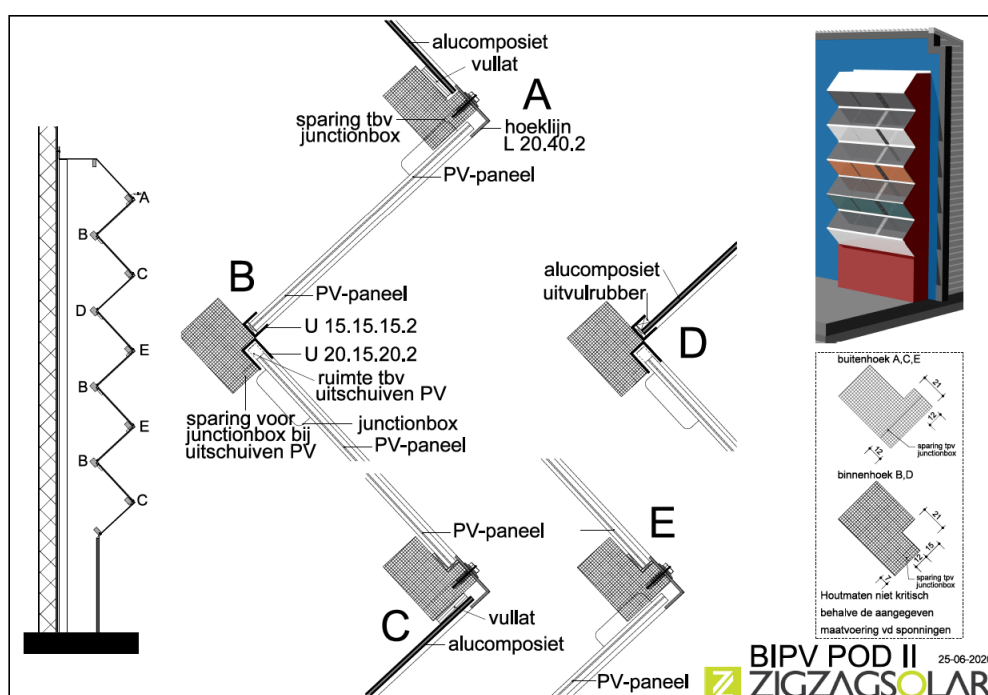
Figuur 13: Links de uiteindelijke lay-out met 3 rijen en 7 kolommen. Temperatuur sensoren van het type NTC zijn geplaatst op 4 PV-panelen per rij (zie oranje pijlen). Rechts: de elektrische configuratie van rij 1; rij 2 en rij 3 zijn identiek geconfigureerd.

² <https://www.tno.nl/nl/aandachtsgebieden/energietransitie/roadmaps/hernieuwbare-elektriciteit/zonne-energie/zonne-energie-nederland/testfaciliteit-bipv/>

De gekozen inverter is een Goodwe GW700XS. Omdat de gerapporteerde opbrengsten (via een monitoring portal op het internet) in principe slechts indicatief zijn, hebben we onafhankelijk van de inverter een gekalibreerde Power Analyser (Yokogawa WT500) gebruikt om de DC stroom en spanning te meten.

2.7.2 Gevel systeem ZigZag van Wallvision BV

Na enkele iteratieslagen lukte het Wallvision om met de maten van de externe leverancier van dunne-film PV-panelen de opstelling op SolarBEAT te ontwerpen. Zie Figuur 14 voor slechts een deel van de complete CAD-tekeningen set. Omdat we in dit project ook PV-actieve panelen hebben in de naar beneden gerichte delen van de ZigZag-gevel, is het erg belangrijk om de lokale zonne-instraling in kaart te brengen en te begrijpen. Vanuit het eerdere BIPVPOD1-project is duidelijk dat de instralingsverdeling in het ZigZag-systeem uiterst complex is, en bovendien afhankelijk van de omringende bebouwing³. De PV-actieve gekleurde panelen reflecteren een deel van de instraling ook weer op de PV-actieve panelen in de opwaarts gerichte PV-panelen.



Figuur 14: Deel van de CAD-tekeningen set waarin de inklemming van de PV-panelen duidelijk zichtbaar is.

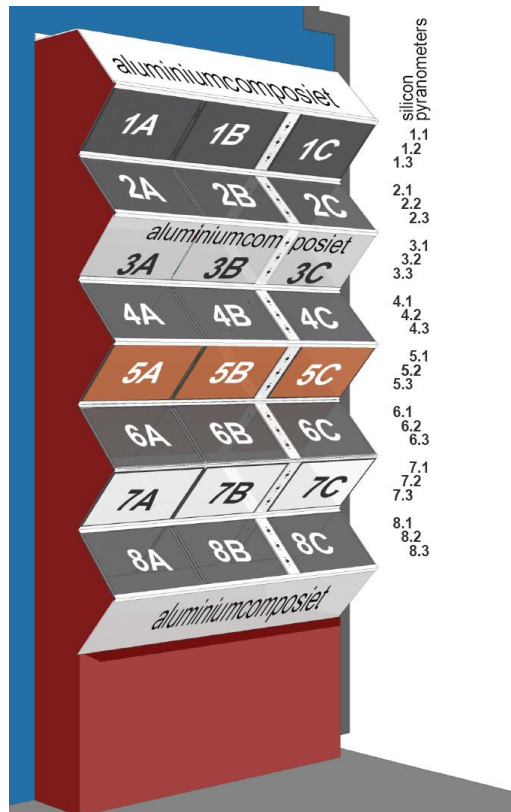
Omdat de instraling zo cruciaal is, is er besloten tot veel meer sensoren dan gebruikelijk. Dat is mogelijk gebleken door gebruik te maken van gekalibreerde photodiodes, die in nauwkeurigheid nauwelijks onderdoen voor secondary standard pyranometers. In Figuur 15 is het overzicht van de complete opstelling gegeven, met zowel de labels voor de PV-panelen als ook de labels van de photodiodes. Het gebruikte type photodiode is een EKO ML-01⁴, die door de fabrikant aangeduid wordt als een 'silicon pyranometer'. Deze marketingnaam kan tot verwarring leiden; het fysische principe van deze sensor is een photodiode. Het grote voordeel van deze sensor is zijn kleine afmeting waardoor hij naadloos in de mock-up verwerkt kan worden om de lokale instraling te meten en daarbij zelf geen (of nauwelijks) verstoringen veroorzaakt op de lichthuishouding in het ZigZag-systeem.

³ Bovenop de gebruikelijke afhankelijkheid van plek van installatie (Eindhoven) en kompas-oriëntatie (puur zuid) die voor alle PV-systemen cruciaal is.

⁴ <https://eko-eu.com/products/solar-energy/si-pyranometers/ml-01-si-pyranometer>

Verder is er nog een secondary standard pyranometer geïnstalleerd in het verticale vlak voor het meten van de zogenaamde Global Vertical Irradiance (GVI).

De elektrische configuratie is gedaan middels een IV-tracer op elk PV-paneel. De gekozen meetfrequentie is elke 5 minuten, hetgeen uit vorige projecten gebleken is voldoende te zijn voor dit soort onderzoek.

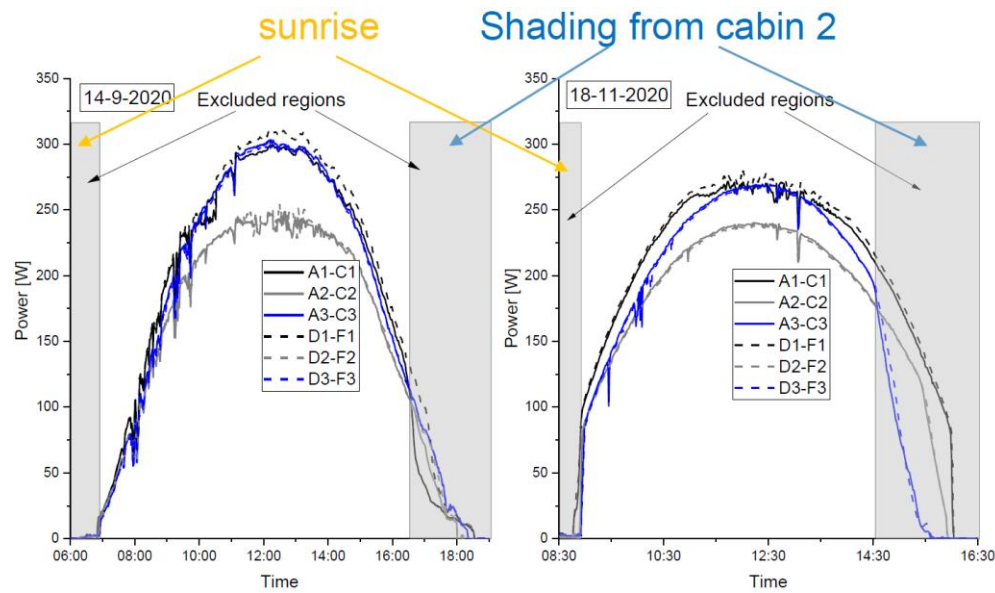


Figuur 15: PV-panelen zijn gelabeld 1A, 1B, ... tot 8C naar analogie van een Excel spreadsheet in het geval je van buitenaf tegen de demonstrator kijkt. De photodiodes zijn genummerd van 1.1, 1.2, ... tot 8.3. Let op dat voor de naar-beneden gerichte vlakken dit een andere impact heeft dan voor de naar-boven gerichte vlakken. Meer uitleg hierover in de tekst.

2.8 Eerste resultaten veldtest (D3.2)

2.8.1 Schuindak systeem

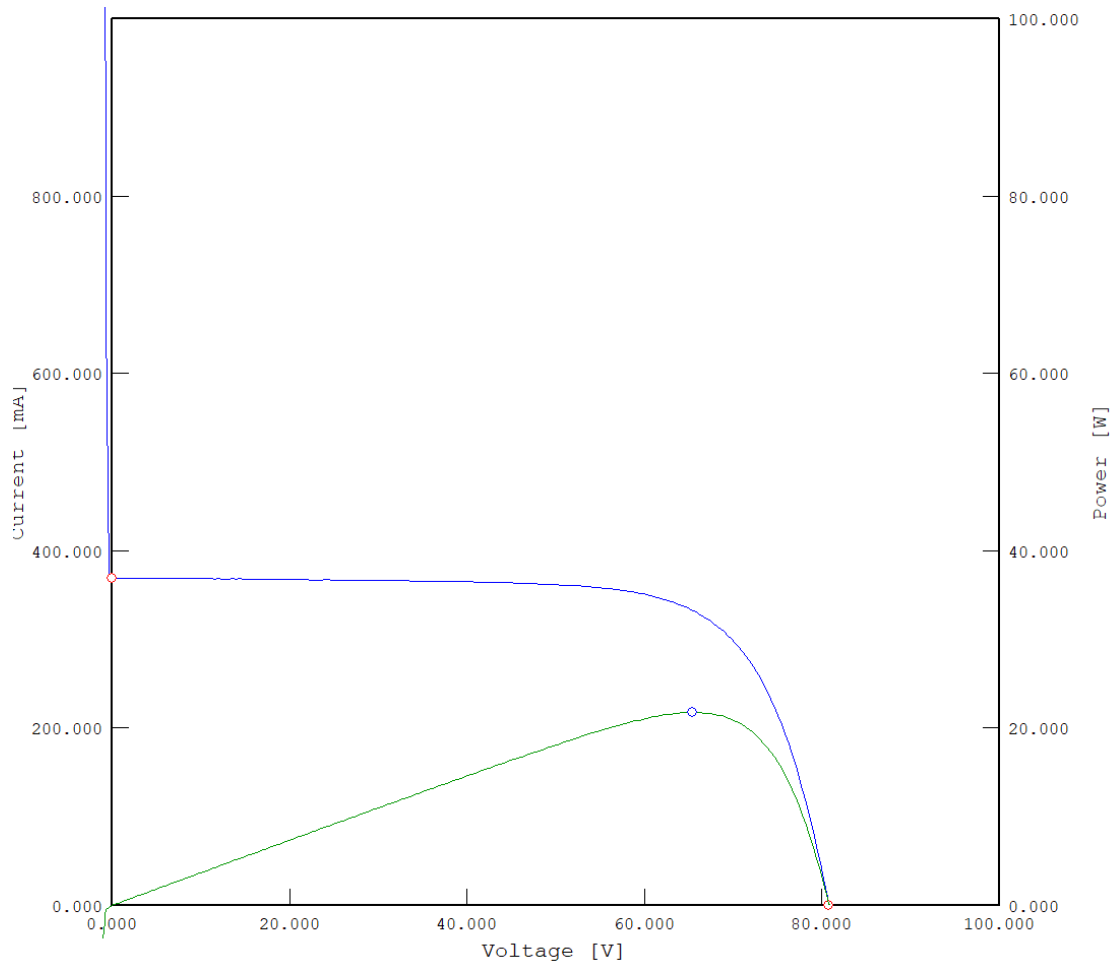
Na de gebruikelijke kinderziektes in de eerste dagen van outdoor testing, was er een continue datastroom op gang vanaf de eerste week van september 2020. Het DC vermogen is geplot in Figuur 16 voor twee typische dagen. Voor alle dagen geldt dat er altijd in de ochtend een tijdsperiode is voordat de zon in de gevel schijnt. In deze periode is de zogenaamde V_{OC} van de PV-panelen zo laag dat de inverter geen MPP kan vinden. Idem voor de late avond. Echter, bovenop dit bekende effect zien we in Figuur 16 een dalende trend in sommige namiddagen. Dit wordt veroorzaakt door de schaduw van huisje nr.2 dat direct ten westen van huisje nr.1 zijn schaduw werpt. Omdat het exacte moment van schaduw varieert per rij (en dus per kleur: zwart, grijs, blauw) hebben we besloten om deze periode ook uit te sluiten in de zuivere analyse van de vergelijking.



Figuur 16: DC Vermogen als een functie van tijdstip van de dag. Links voor 14 sept. 2020 en Rechts voor 18 nov. 2020. Doorgetrokken lijnen zijn de strings van A,B,C; onderbroken lijnen zijn de strings van D,E,F.

2.8.2 ZigZag gevel systeem

De eerste resultaten waar we met spanning naar uitkeken waren de IV-curves. Vanuit eerdere projecten weten we dat een ZigZag-systeem met cSi PV-panelen veel last heeft van de schaduw die veroorzaakt wordt door het systeem zelf voor de periode waarin de zon hoger in de lucht staat dan de hoek van de neerwaarts gerichte platen (en dat kan best een lange periode zijn, afhankelijk van de exact gekozen geometrie). Ook zagen we eerder dat dunne-film dit effect in potentie niet heeft. Echter, we wisten niet zeker of de dunne-film PV-panelen van de huidige externe leverancier dezelfde goede schaduw mitigatie hebben als gezien in BIPVPOD1.



Figuur 17: IV-curve van paneel 2B voor 2 september 2020.

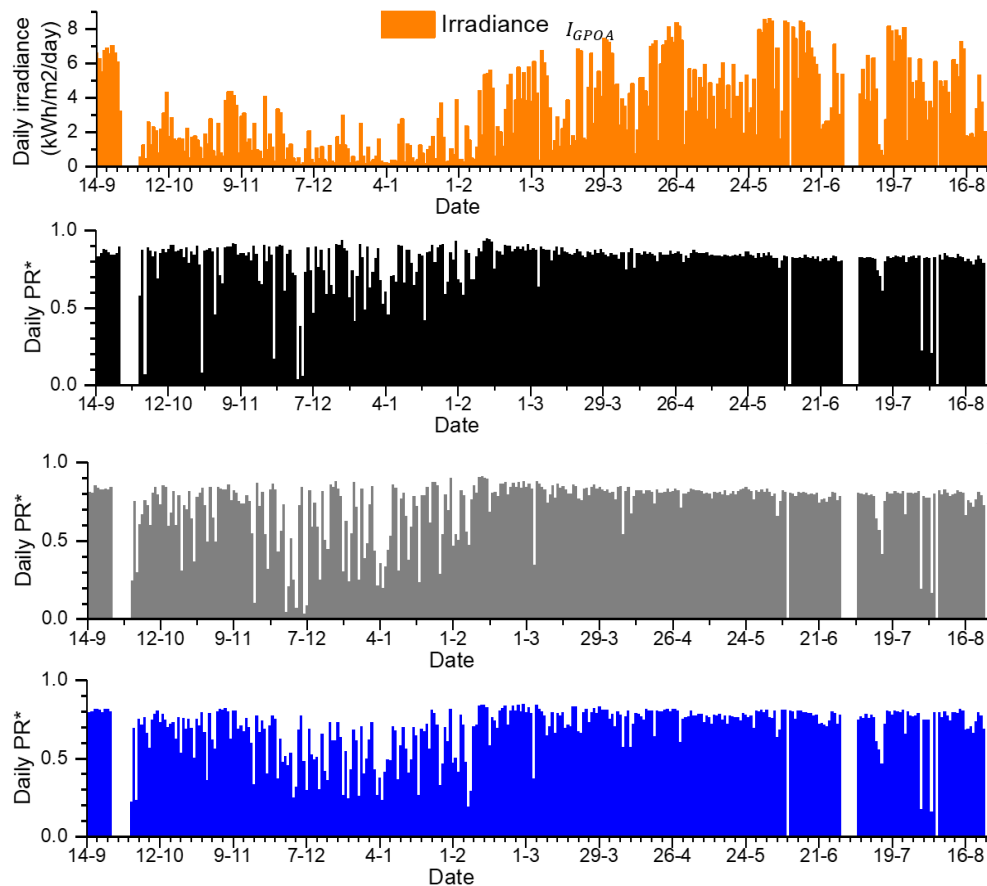
Zoals te zien in Figuur 17 is de IV-curve inderdaad erg smooth, terwijl de zonnehoogte op 2 september 2020 in het middaguur klimt tot 49°. Gedurende het hele jaar zijn we deze IV-curves blijven bekijken, en ook later in juni 2021 met extreem hoge zonnehoogte blijven de IV-curves smooth.

2.9 Resultaten compleet jaar veldtesten (D3.3)

2.9.1 *Schuindak systeem*

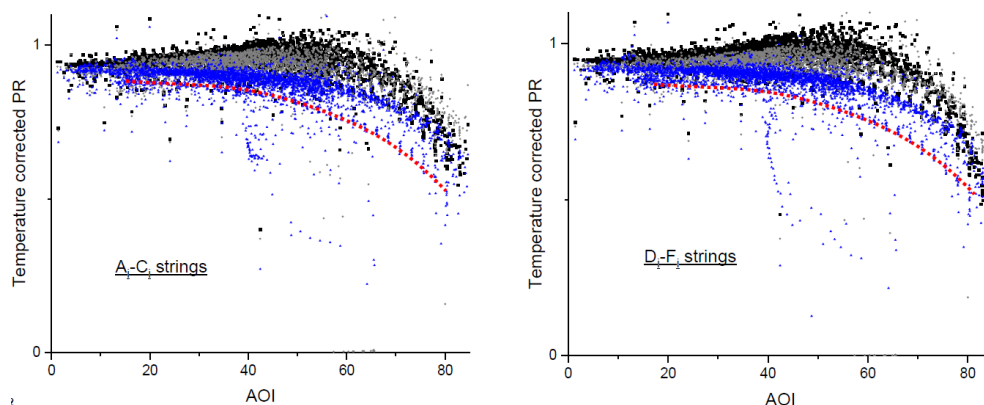
In dit project zijn we specifiek geïnteresseerd in het eventuele effect van de hoek van inval tussen de stand van de zon en de normaalhoek van het zonnepaneel, die in de vakliteratuur wordt gedefinieerd als Angle-Of-Incidence (AOI). Dit effect is echter minder groot dan het effect van instraling en PV-paneel temperatuur. Daarom zullen eerst de afhankelijkheden van instraling, G_{POA} , en PV-paneel temperatuur, T_{mod} , verdisconteerd worden. Het voert te ver om de complete analyse hier te rapporteren. Maar de geïnteresseerde lezer kan op het internet veel vakliteratuur hierover vinden⁵. We gaan met onze analyse daarom verder met de temperatuur gecorrigeerde Performance Ratio die wordt afgekort tot PR^* . Alle dagelijkse PR^* waarden zijn weergegeven in Figuur 18.

⁵ Aanrader: 'Weather-Corrected Performance Ratio (NREL/TP-5200-57991)' van NREL; openbaar te downloaden op <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/57991.pdf>



Figuur 18: Boven: dagelijkse instraling in het vlak van de panelen. Daaronder de temperatuur gecorrigeerde Performance Ratio (PR*) voor achtereenvolgens de zwarte, grijze, en blauwe panelen van DEF-strings.

In Figuur 18 zien we twee data gaps in de meetdata van een compleet jaar: het eerste gat in de 3^e week van september 2020 en het tweede gat in juni 2021. We hebben besloten om geen interpolaties toe te passen, omdat het effect van deze missende data verwaarloosbaar is, én omdat interpolaties vaak leiden tot onzekerheden in de getrokken conclusies. Het meest opvallende van resultaat van Figuur 18 is het feit dat er in de late herfst 2020 en winter 20/21 veel dagen zijn met een PR* die behoorlijk veel lager is dan het vlakke niveau van de rest van het jaar. Omdat PR* een relatieve parameter is, dient men zich te realiseren dat het effect van deze lage PR* op de totale opbrengst van een compleet jaar (gelukkig) beperkt is. Echter, voor onze onderzoeksvraag is deze observatie zeer belangrijk. Als vervolgstap onderzoeken we de PR* als functie van AOI.



Figuur 19: PR* als functie van AOI voor de ABC-strings (links) en voor de DEF-strings (rechts). Alleen meetpunten in de schaduwvrije periode zijn meegenomen.

Na slimme filtering (op basis van schaduwvrije periode) is het mogelijk gebleken om alle datapunten van een vol jaar te plotten in Figuur 19. We zien een opvallend effect. Bij zeer lage AOI, d.w.z. bij een bijna loodrechte hoek van inval van de zon op het PV-paneel presteren de zwarte, grijze en blauwe PV-panelen identiek. Dat zou ook bijna niet anders kunnen, aangezien hun rated power bij Standard Test Conditions (STC) gemeten en gedeclareerd is bij een loodrecht geplaatste lamp boven het PV-paneel. Maar als de AOI toeneemt, zoals bij alle echte installatie in de praktijk, gaan de verschillend gekleurde PV-panelen van elkaar afwijken, waarbij de blauwe het meest afwijkt van de zwarte; hetgeen een PV-paneel zonder coating is. Ook nu geldt weer dat het effect sterk vergroot wordt weergegeven door naar PR* te kijken. Immers bij hoge AOI (vanaf ~50°) zal de instraling lang niet meer zo sterk zijn als bij de lagere AOI. Bij zeer hoge AOI (> ~65°) is er alleen nog maar sprake van opbrengsten in de vroege ochtend en late namiddag/avond.

Uiteindelijk zijn de ontwikkelaar Rebor BV en de potentiële eindklanten natuurlijk ook geïnteresseerd in de volle jaar opbrengst. Deze zijn samengevat in de tabel van Figuur 20.

name	Uncoated ^a	Grey ^a	Blue ^a
Rated power (kWp)	0.417	0.355	0.410
Yield (kWh/year) ^b	424	347	383
Specific yield (kWh/kWp/year) ^b	1017	978	935
Roof specific yield (kWh/m ² /year) ^{b,c}	131	108	119

Figuur 20: Tabel met geaggregeerde data voor het complete jaar. a: alleen de DEF-strings zijn gebruikt omdat deze nauwelijks last hadden van de schaduw van huisje nr.2; b: 356 dagen i.p.v. precies een jaar, vanwege de data gaten; c: echte vierkante meters van het gebruikte dakoppervlak, inclusief een 10mm ruimte tussen de PV-panelen naar alle zijden.

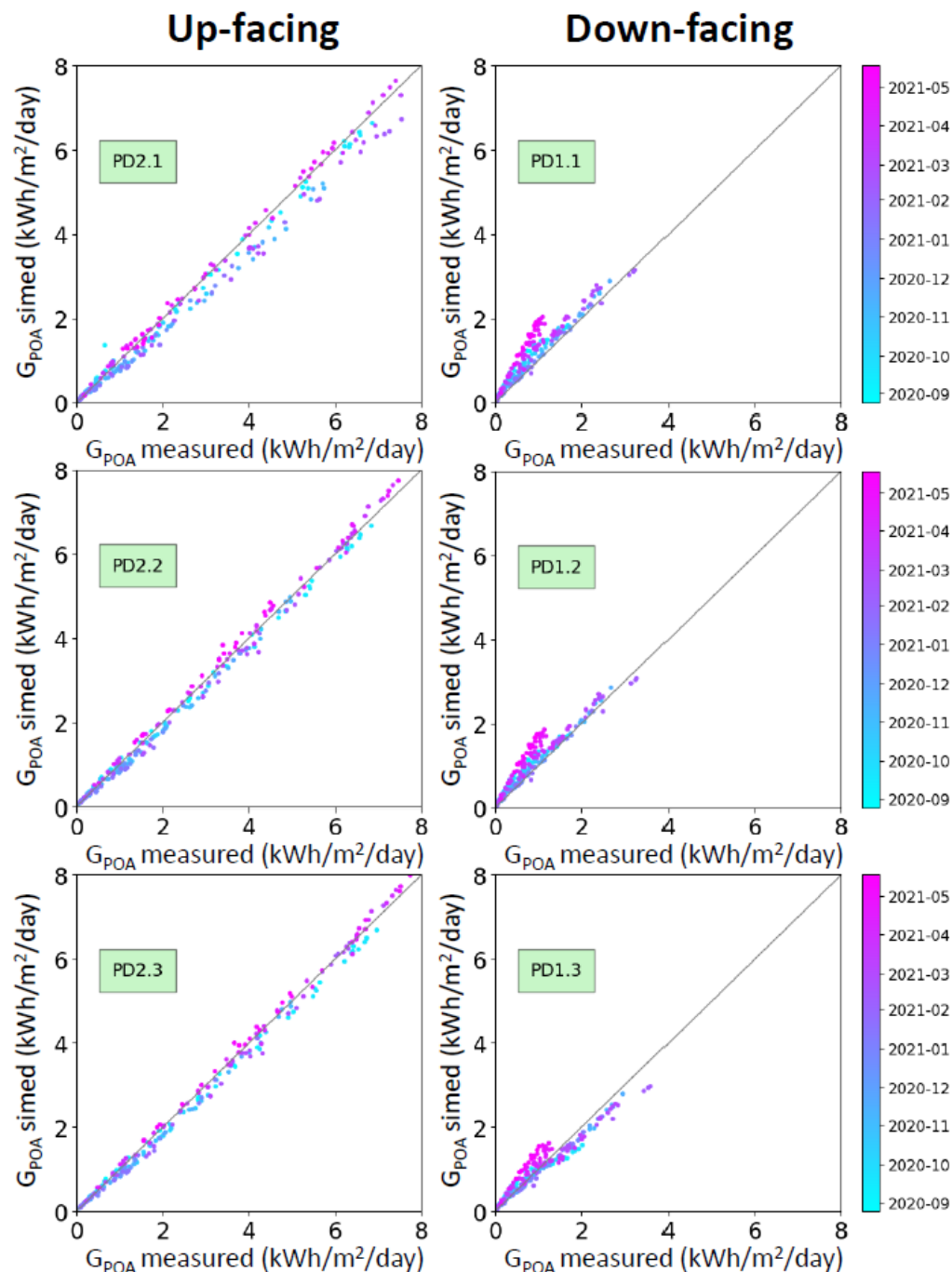
De specifieke opbrengst van de 3^e rij is per definitie gelijk aan de opgewekte kWh per kWp (van de name plate rating onder STC) per jaar. Echter, stakeholders uit de bouw zullen veel eerder willen weten wat dit betekent voor de opbrengst per dakoppervlak. Vandaar dat deze extra parameter op de 4^e rij is uitgerekend, waarbij er rekening is gehouden met een realistische tussenruimte tussen de PV-panelen die nooit tegen elkaar aan geïnstalleerd kunnen worden.

Het wekt geen verbazing dat de zwarte panelen, zonder enige coating de beste opbrengst geven. Wél verbazing wekt het feit dat de blauwe panelen het beter doen dan de grijze. Dit kan begrepen worden vanuit het feit dat deze specifieke blauwe panelen geassembleerd zijn bovenop een basis PV-technologie die net iets meer rendement geeft dan de gebruikte PV-technologie voor de grijze PV-panelen. Als we hiervoor verdisconteren (zie 1^e rij) dan is de eindconclusie dat de grijze kleur gepaard gaat met een -4% opbrengst t.o.v. ongecoat zwart (berekend via specific yield: 978/1017). En de blauwe kleur gaat gepaard met een -8% opbrengst t.o.v. ongecoat zwart (berekend via specific yield: 935/1017). Het is uiteindelijk aan de eindklant om zelf te bepalen of deze 'verliezen' opwegen tegen de esthetiek van de kleur. Als we het vergelijken met typische verliezen voor andere kleur-technieken voor PV-panelen, dan kunnen we stellen dat dit zeker goede resultaten zijn.

2.9.2 ZigZag gevel systeem Instraling

Zoals eerder vermeldt is de instraling in het ZigZag-systeem van cruciaal belang in de analyse van de elektrische performance. Deze instraling is uitvoerig gemodelleerd binnen het project en gevalideerd met de meetresultaten van alle PhotoDiodes (PDs). Ter illustratie de

up-facing PD's van rij 2 (links) en de down-facing PD's van rij 1 (rechts) color scatter plotted in Figuur 21.



Figuur 21: Gesimuleerde versus gemeten irradiation over een dag. Color plotted met de datum. Links: 3 PDs van rij 2 die up-facing zijn en daarom in range tot 8 kWh/m²/dag kunnen opleveren. Rechts: 3 PDs van rij 1 die down-facing zijn en daarom een beperktere range tot 3 kWh/m²/dag opleveren.

Het is algemeen bekend dat het gemakkelijker is om de instraling in een schuin vlak te modelleren dan de instraling in een verticale gevel. Dat komt omdat de reflecties ('albedo' genoemd in de vakliteratuur) van de grond en omgeving een grotere invloed hebben bij gevels, maar ook variabler van karakter zijn. De naar beneden gerichte vlakken van het ZigZag-systeem zijn hierin nog extremer afhankelijk van deze reflecties. Dit komt terug in de correlatie tussen simulatie en meting, zoals te zien in Figuur 21.

De modelleer inspanning is met vele iteraties gepaard gegaan, totdat er op een gegeven moment geconcludeerd is dat de voorspellende waarde van het model goed genoeg is voor het doel waarvoor het model ontwikkeld is, namelijk het doorrekenen van de verwachte jaaropbrengsten voor een ZigZag-systeem met een bepaalde configuratie op een bepaalde plek op de wereld geïnstalleerd met een bepaalde oriëntatie naar de zon.

Spectral effects OFF					Spectral effects ON				
	PDx.1	PDx.2	PDx.3	PDx.Avg		PDx.1	PDx.2	PDx.3	PDx.Avg
row1	0.901	0.927	0.942	0.92	row1	0.921	0.944	0.958	0.94
row2	0.989	0.995	0.996	0.99	row2	0.988	0.995	0.996	0.99
row3	0.947	0.948	0.938	0.94	row3	0.952	0.955	0.949	0.95
row4	0.993	0.997	0.996	1.00	row4	0.992	0.997	0.996	0.99
row5	0.945	0.958	0.935	0.95	row5	0.960	0.971	0.949	0.96
row6	0.981	0.996	0.996	0.99	row6	0.980	0.996	0.996	0.99
row7	0.964	0.965	0.942	0.96	row7	0.976	0.976	0.957	0.97
row8	0.994	0.997	0.996	1.00	row8	0.993	0.997	0.996	1.00
average:	0.96	0.97	0.97	0.97	average:	0.97	0.98	0.97	0.97

Figuur 22: Tabel met de kwaliteit van de fit (R2-waarde) voor het geval dat de spectrale gegevens uit het meetapparaat van OMT gemiddeld zijn (links: Spectral effect OFF) en voor het geval dat de complete spectrale respons in de modellering is meegenomen (rechts: Spectral effects ON).

Nadat het model 'bevroren' is, hebben we een finale check/validatie van het model gedaan aan de hand van alle meetdata van het complete jaar van alle 24 PDs. Zie de twee tabellen in Figuur 22. Waarbij er in de rechter tabel gerekend is met de complete spectrale curve gemeten met het nieuwe apparaat van OMT en in de linker tabel slechts gerekend met een gemiddelde reflectie coëfficiënt. Een vergelijking tussen links en rechts laat zien dat het voor de instraling niet uitmaakt hoe de spectrale info wordt meegenomen. Verder is te zien dat de R2 voor de up-facing delen 0.99 of 1.00 is (extreem goede fit!) en voor de down-facing delen varieert tussen de 0.92 en 0.97 (acceptabel goede fit).

De datastroom voor de instralingssensoren was extreem goed gedurende het meetjaar van 26 augustus 2020 t/m 25 augustus 2021, namelijk 99.94 %. Dat betekent dat de gemeten totale instraling (zonder enige vorm van interpolaties of correcties) interessant is om te bekijken. In deze analyse is de ruwe meetdata van kWh/m2 omgerekend naar kWh/m2_facade hetgeen betekent per vierkante meter gevel die bezet wordt door dat deel van het ZigZag-systeem waarin de PD geïnstalleerd is onder een hoek. Dat is geen sinecure gezien het feit dat de ZigZag-cassettes niet symmetrisch zijn uitgevoerd. Daarom zijn alle tussenberekeningen meerdere keren gecheckt; eerst door collega's en later in consortium meetings. De tabel met de uiteindelijke jaarlijkse sommen, per m2 façade is te zien in Figuur 23.

	PD x.avg	kWh/m2	PD x.avg	kWh/m2_facade	irradiance per part (down-facing or up-facing decomposition)				boost-factor with respect to Cabin2	
					total cassette	name of cassette	per m2 cassette			
1	306.8	kWh/m2	458.0	kWh/m2_facade	130.1 kWh					
2	991.0	kWh/m2	1369.4	kWh/m2_facade	451.9 kWh	582.0 kWh	black boost	947.8 kWh/m2_facade	122%	
3	293.7	kWh/m2	438.5	kWh/m2_facade	0.0 kWh					
4	1038.6	kWh/m2	1435.2	kWh/m2_facade	473.6 kWh	473.6 kWh	classical ZigZag	771.4 kWh/m2_facade	99%	
5	278.0	kWh/m2	415.0	kWh/m2_facade	117.9 kWh					
6	964.2	kWh/m2	1332.4	kWh/m2_facade	439.7 kWh	557.6 kWh	brown boost	908.1 kWh/m2_facade	117%	
7	267.0	kWh/m2	398.7	kWh/m2_facade	113.2 kWh					
8	938.7	kWh/m2	1297.1	kWh/m2_facade	428.0 kWh	541.3 kWh	grey boost	881.6 kWh/m2_facade	113%	
Cabin2	778.2	kWh/m2	778.2	kWh/m2_facade				778.2		

Figuur 23: In de kolommen van links naar rechts de stap van kWh/m2 (in het vlak van de PV-panelen) naar de stap van kWh/m2_facade naar de stap van per strekkende meter ZigZag. Uiteindelijk gedeeld

door de instraling in het verticale vlak (778.2 kWh/m²/jaar) geeft de boost-factor in de meest rechtse kolom.

Na alle tussenstappen kan men in de meest rechtse kolom van in Figuur 23 de boost-factor aflezen. Deze is gedefinieerd als de verhouding tussen de instraling per strekkende meter ZigZag-cassette en de verticale instraling die ook het volle jaar gemeten is. Concluderend hieruit:

- ZigZag met standaard (zwarte) CGIS heeft een boost-factor van $948 / 778 = 122\%$. Dus een +22% extra instraling over het complete jaar.
- Klassieke ZigZag (rij 3 en rij 4) zonder PV: 99%; hetgeen te verklaren is in het feit dat de instraling op de down-facing platen niet meegerekend wordt; immers deze fotonen worden niet omgezet naar elektriciteit.
- ZigZag-systeem met bruine CIGS PV (rij 5 en rij 6): 117%.
- ZigZag-systeem met grijze CIGS PV (rij 7 en rij 8): 113%.

Dit zijn zeer mooie resultaten! De additionele instraling kan begrepen worden vanuit het feit dat een ZigZag-systeem uit de gevel steekt. Deze extra ruimte lijkt niet veel, maar repeteert zich wel over de hele gevel en kan daarom toch een significante meeropbrengst in zonneinstraling opleveren. Het effect is boven verwachting hoog, en lijkt ook nooit eerder in de literatuur gerapporteerd op deze wijze ondersteund met hoge kwaliteit instralingsdata.

2.9.3 *ZigZag gevel systeem Elektrische Opbrengst*

De gebruikte IV-tracer had net iets meer last van onvoorziene data gaps, maar noteert op het eind van het jaar een uptime van 95.3%, hetgeen nog steeds erg hoog is. Ook hiervoor besluiten we geen interpolaties of correcties toe te passen. We prefereren een analyse van de volle jaar sommen, met daarbij in het achterhoofd dat we ongeveer 5% van de opbrengst gemist hebben. De gepresenteerde data zijn daarmee een ondergrens.



Figuur 24: Dagelijkse opbrengst [kWh/m²_facade] voor alle rijen. De up-facing rijen (met even nummers) zijn geplott in blauw, maar hebben in de opstelling een zwarte kleur. Alle andere kleuren in deze plots zijn gelijk aan de echte kleuren van de PV-panelen. De legenda van rij 3 is wél afgebeeld, maar deze rij produceert geen elektriciteit want bevat een niet PV-actieve plaat.

Figuur 24 geeft voor elke dag de som van de opbrengst voor het PV-paneel uit kolom B van alle rijen. Er is ook een analyse gedaan op de kolommen A en C. Hieruit blijkt dat de verschillen tussen kolommen A, B, en C minimaal zijn en waarschijnlijk veroorzaakt door zeer kleine verschillen in reflectie ('albedo'). Voor de eindconclusies zijn deze verschillen totaal niet relevant. Het valt op dat de blauwe histogrammen duidelijk de hoofdmoot van de opbrengst leveren. Dit is te begrijpen (na analyse) vanuit vier feiten:

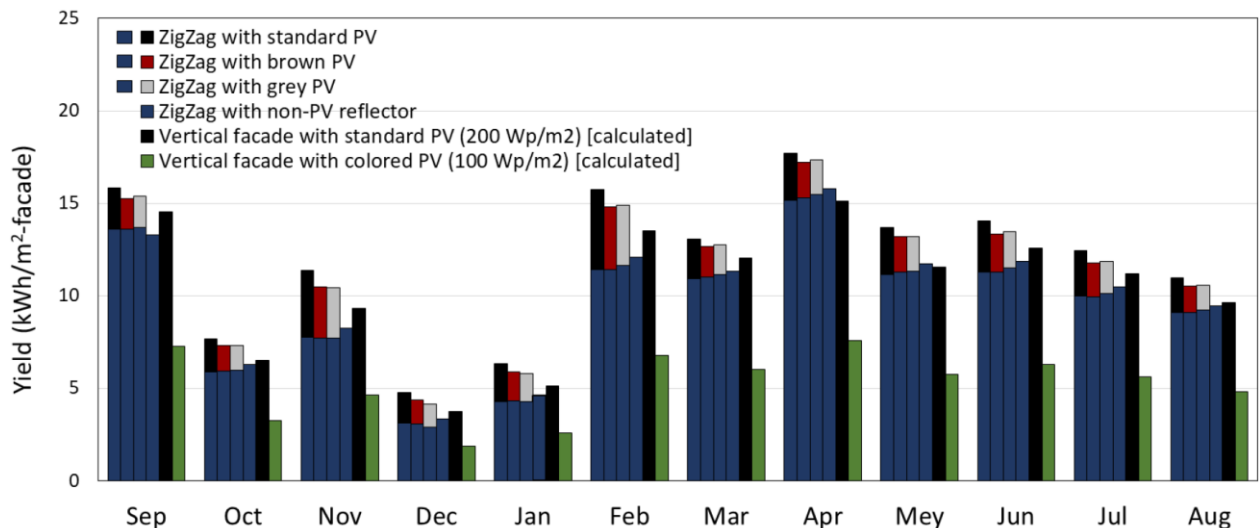
- de zwarte CIGS PV-panelen hebben een hogere rated power dan de gekleurde varianten
- de instraling in de up-facing delen van het ZigZag-systeem is orde grootte 3x groter dan in het down-facing deel (zie 3^e kolom in Figuur 23)
- de PR van de up-facing delen is zeer goed in vergelijking met verticale systemen vanwege het koelende effect van de ZigZag-cassettes
- de PR van de down-facing delen is matig, vanwege de ongunstige hoeken van inval (AOI) voor grote delen van het jaar

Na de grondige analyse van de onderliggende feiten, is ook voor het ZigZag gevel systeem voor de eindklant van belang wat het nu oplevert met vierkante meter gevel. Daarbij maken we een vergelijking met een virtueel verticaal systeem. DISCLAIMER: dit verticale systeem is nooit geïnstalleerd geweest. Maar het is wel relatief eenvoudig om de opbrengst van een dergelijk systeem te voorspellen op basis van de gemeten instraling in het verticale vlak (GVI) en een aangenomen PR van 85%. Verder doen we de aanname dat er geen tussenruimte tussen de PV-panelen van het virtuele systeem nodig is. Voor de rated power nemen we twee niveaus:

- 100 Wp/m² (met kleur groen in onderstaande grafiek van Figuur 25, maar kan elke kleur representeren, ook wit bijvoorbeeld).
- 200 Wp/m² voor een marktconforme full-black cSi PV-paneel op dit moment (zomer 2021).

(Bijna) alle commercieel verkrijgbare PV-panelen vallen in deze range. Bovendien is het gemakkelijk om te rekenen voor een specifiek ander PV-paneel. Stel bijvoorbeeld dat een alternatief PV-paneel een rated power heeft van 165 Wp/m², dan kan men de berekende opbrengst van het 100 Wp/m² referentie PV-paneel vermenigvuldigen met een factor 1.65.

NOGMAALS: de hieronder gepresenteerde volle jaar opbrengsten voor een verticaal PV-systeem ter referentie zijn op basis van berekening. Dat gezegd hebbende, zie Figuur 25 voor de maandelijkse opbrengsten van de vier ZigZag-systemen in de outdoor testing van BIPVPOD2 en de berekende opbrengsten van de twee referentie systemen.



Figuur 25: Maandelijkse opbrengsten van de vier gemeten ZigZag-systemen [kWh/m²_facade] en de twee berekende opbrengsten van de referentie systemen.

Zoals te zien is het een nek-aan-nek race tussen de ZigZag systemen en de verticale systemen. Van de ene kant geeft de full-black cSi PV-gevel structureel meer opbrengst dan de klassieke ZigZag zonder PV in de down-facing. Echter een ZigZag-gevel heeft de esthetiek van de gekleurde down-facing delen. Op die manier bezien, is een vergelijking met een gekleurde PV-gevel eerlijker. En in die vergelijking presteert het klassieke ZigZag-systeem veel meer dan elk gekleurd PV-paneel in de markt op dit moment (!).

De PV-actieve down-facing delen zijn procentueel wellicht een lichte tegenvaller. Maar ze maken wel het verschil in deze nek-aan-nek race. Het valt te zien in Figuur 25 dat elk ZigZag-systeem met PV-actieve down-facing delen meer opbrengt dan de beste full black PV-gevel als referentie. Een record dat bij aanvang van dit project niet voorzien was! Het is verleidelijk om een wereld record te claimen. Maar dat blijft tricky. Immers de exacte hoeveelheid zonne-instraling in het ZigZag-systeem is afhankelijk van locatie van installatie en oriëntatie. Het zou dus kunnen dat er specifieke oriëntaties en/of locaties zijn waarbij de full-black referentie net meer opbrengt dan ZigZag. Maar zelfs als dat zo is, dan nog heeft de eindklant van een ZigZag-gevel de kleurkeuze vrijheid, terwijl full-black altijd zwart is.

2.10 Knelpunt: Ontwikkeling hoekafhankelijke Reflectie & Transmissie meetapparaat

Voor de ontwikkeling van het hoekafhankelijke Reflectie & Transmissie meetapparaat van OMT bleek de grootste uitdaging te zitten in de inhomogeniteiten van de integrating sphere. Voor dit technisch knelpunt is een work-around gevonden door gebruik te maken van een extra referentie meting aan een gekalibreerd spiegelplaatje, voor elke hoek van inval. Het nadeel is uiteraard de extra meettijd die dit met zich meebrengt. OMT zal blijven werken aan de optimalisatie van de integrating sphere om deze extra kalibratie stap er hopelijk uit te krijgen.

2.11 Knelpunt: Inverter kan MPP niet altijd vinden

In de eerste weken van de outdoor testing (herfst 2020) zagen we bij 1 v.d. 3 inverters af-en-toe afwijkend gedrag in de ochtend: de inverter kon het MPP gedurende de hele ochtend niet vinden, terwijl de overige 2 inverters dat wél konden. Dat betekent dus ook geen opbrengst in het geval van een commerciële installatie (!) Rebor BV heeft contact gezocht met Goodwe en de situatie voorgelegd. Daarop heeft Goodwe een software update uitgevoerd op hun inverters, waarna we dit probleem nooit meer terug gezien hebben.

2.12 Knelpunt: Levering dunne-film PV-panelen lastig (COVID19)

In eerste instantie wilden we rond eind 2019 een duidelijk overzicht hebben van alle dunne-film PV-panelen die zouden kunnen worden gebruikt in het project. Op dat moment begon de uitbraak van COVID in Azië en kregen we moeilijk contact, laat staan concrete offertes aangeboden (terwijl we via het grote netwerk van Rebor BV weten welke leveranciers dunne-film CIGS en CdTe PV-panelen in hun aanbod hebben).

Daarna richtten we ons aandacht op Europese CIGS leveranciers. Die contacten kregen we wél, maar deze bedrijven kregen in het voorjaar van 2020 ook last van gesloten fabrieken. Gelukkig kwam er een versoepeling in juli 2020, waarin we de veldtest (WP3) konden installeren. Met de ambitie om 1 vol jaar outdoor testing te kunnen doen, is daarop een projectverlenging aangevraagd tot eind zomer 2021. RVO had begrip voor deze situatie en heeft deze projectverlenging geaccepteerd.

3 Bijdrage aan doelstelling

Het project focus op programma lijn 3 'Multifunctionele componenten (MFB)' van de TKI Urban Energy regeling (binnen de topsector energie).

Multifunctional components (MFB)	Multifunctional components for commercial buildings	X
	Multifunctional components for housing	X
	MFA for civil engineering infrastructure elements	
	Trials innovative multi-purpose building elements	X

BIPVPOD 2 adresseert deze doelstellingen op de volgende wijze:

- 1) De esthetische waarde van het PV-systeem is verbeterd t.o.v. reguliere systemen, doordat er geen zichtbaar contrast is tussen de individuele cellen. Voor de ZigZag-gevel zijn sowieso alleen maar de gekleurde naar beneden gericht delen zichtbaar. De plateau's met PV naar boven gericht blijven altijd uit het zicht. Bovendien geeft het meer vrijheid voor de architect.
- 2) Er zal PV toegepast gaan worden op plekken op het dak en in de gevel die anders buiten beschouwing zouden blijven. De dunne-film technologie heeft goede schaduw mitigerende eigenschappen is gebleken uit eerdere projecten. Dit is voor de ZigZag-applicatie cruciaal. Maar ook voor de toepassing op het schuine dak in de buurt van schoorstenen, dakkapellen, etc. van belang.
- 3) Dunne-film BIPV heeft een veelbelovende toekomst wat betreft kosten. Helaas moeten we nu op het eind van het project concluderen dat de dominante cSi-technologie vanwege het enorme schaalgrootte voordeel toch nog steeds goedkoper is dan dunne-film PV. Het is lastig in te schatten wanneer deze vicieuze cirkel doorbroken gaat worden. Bij een gelijk marktvolume zou dunne-film goedkoper zijn dan cSi. De crux zit in het woord 'zou'.

4 Spin off (en vervolg)

4.1 OMT Solutions BV

Voor OMT Solutions BV is er duidelijk sprake van een nieuwe markt van BIPV-gerelateerde vragen. Naarmate architecten (en andere stakeholders in de bouw industrie) steeds kritischer worden t.a.v. de (kleur) perceptie van de eindgebruiker, zal er ook meer behoefte bestaan aan nauwkeurige, kwantitatieve, kleurmetingen voor zowel de transmissie als reflectie componenten. Het meetapparaat dat in dit project is ontwikkeld zal in de markt verschijnen onder de naam VL270DRT.

4.2 Rebor BV

Voor Rebor BV blijft het onduidelijk in hoeverre gekleurde dunne-film PV-panelen ingezet zullen gaan worden in het LOCI-daksysteem. De resultaten t.a.v. Performance Ratio (PR) zijn gewoon goed. De resultaten t.a.v. kleurperceptie zijn super; van alle manieren om kleur te geven aan een PV-paneel blijkt de techniek met interference coloring – zoals in dit project toegepast – de mooiste manier. Echter de beschikbaarheid en prijsstelling van dunne-film blijft ver achter bij cSi PV-panelen. Dat heeft alles te maken met het feit dat ruim meer dan 90% van de markt bestaan uit cSi PV-panelen, waardoor deze vanwege het volume domweg goedkoper aangeboden kunnen worden. Dus wellicht zijn de prototypes uit deze veldtest inzetbaar, maar dat zal dan voorlopig helaas voor een niche-deel v.d. markt zijn die bereid is de ruime meerprijs te betalen.

4.3 Wallvision BV

Voor Wallvision BV geldt t.a.v. gekleurde dunne-film precies dezelfde obstakels als voor Rebor BV: beperkte beschikbaarheid tegen ruime meerprijs in vergelijking met cSi. Echter voor de ZigZag gevel zit er wél een duidelijke meerwaarde aan deze PV-panelen. Ze gaan namelijk perfect om met schaduw, in tegenstelling tot cSi PV-panelen, zoals we zagen in het eerdere project BIPVPOD1. De eindklant krijgt dus niet alleen een mooie uitstraling, maar ook een opbrengst die de hoogst verkrijgbare is. Ook in vergelijking met een verticale gevel, levert dit prototype ZigZag Solar met alle vlakken PV-actief, meer opbrengst. Dit zou wel eens een USP kunnen zijn waarvoor behoorlijk wat klanten bereid zijn te betalen. Zeker naarmate de hoeveel vierkant meters beschikbaar gebouw-gebonden oppervlak schaarser worden. Vooral voor hoogbouw is de huidige BENG3-eis (minimale percentage opgewekte hernieuwbare energie op eigen gebouw = 30% à 50%, afhankelijk van gebouwfunctie) al behoorlijk streng hetgeen naar verwachting tot veel PV op gevels zal leiden.

5 Openbare kennisverspreiding

In de academisch wereld zijn er twee publicaties geweest, beide op de beroemde European PVSEC conferentie tussen van 6 tot 10 september 2021. Vanwege COVID19 was deze conferentie volledig digitaal.

Referenties:

- https://www.eupvsec-planner.com/presentations/c50087/effect_of_incidence_angle_and_coating_colour_on_cigs-modules_performance_in_one_full_year_outdoor_analysis.htm
- https://www.eupvsec-planner.com/presentations/c50308/maximizing_yield_and_aesthetics_of_bipv_facades_the_fully_pv-active_zigzag_structure.htm

6 Rapport Beschikbaarheid

Dit openbare eindrapport is kosteloos als pdf te downloaden op: <https://repository.tno.nl/>

7 Contactpersonen

- OMT Solutions BV: Serge Timmermans, serge.timmermans@omtsolutions.com
- Rebor BV: René Borro, rborro@rebor.nl
- TNO: Roland Valckenborg, roland.valckenborg@tno.nl
- Wallvision BV: Wim van de Wall, wall@wallvision.nl

8 Conclusies en aanbevelingen

8.1 Conclusies

OMT Solutions BV heeft binnen dit project een nieuw meetapparaat kunnen ontwikkelen dat voorziet in de behoefte om snel en efficiënt een gecombineerde transmissie & reflectie meting te kunnen uitvoeren. En dit over het complete spectrum dat voor PV-panelen relevant is. De verwachting is dat de eisen vanuit de bouwindustrie (architecten) t.a.v. kleur specificatie en stabiliteit alleen maar strenger zullen worden. OMT is daarom zeer tevreden dat ze dit nieuwe meetapparaat, de VL270DRT, kunnen inzetten bij kleurmetingen aan BIPV-producten.

Het onderzoek naar semi- en full- back end interconnect heeft meer inzicht gegeven in de faalmechanismen van deze route om tot flexibele PV-panelen te komen. Helaas is laag-TRL onderzoek altijd zeer arbeidsintensief en gaat gepaard met grote risico's. In dit project zijn deze back end interconnect samples nooit op voldoende niveau gekomen om in de outdoor field testing mee te draaien. Gelukkig kon dit ondervangen worden door gekleurde dunne-film CIGS PV-panelen van externe partijen in te kopen. Maar deze zijn dus niet 'Panel On Demand' (POD) t.a.v. afmeting, wél t.a.v. kleur.

Gekleurde PV-panelen zijn uitgebreid in kaart gebracht door samples op te vragen vanuit alle mogelijke technieken om kleur aan een PV-paneel te geven. Deze samples zijn door sommige partijen belangeloos opgestuurd, en door andere voor een acceptabel klein bedrag verkocht aan ons. Alle kleine samples zijn in de nieuwe VL270DRT spectraal doorgemeten onder 5 verschillende hoeken van reflectie. Deze resultaten zijn gebruikt in de modelvorming van de ZigZag-gevel. Nadat alle metingen waren gedaan, zijn de samples opgenomen in een demonstrator die tentoongesteld wordt in het Solliance gebouw op High Tech Campus 21 in Eindhoven. Deze demonstrator is bovendien mobiel en zal ook ingezet gaan worden op beurzen die op dit moment van rapporteren weer mogelijk zullen zijn vanaf najaar 2021.

Het schuin dak systeem van Rebor BV is geadapteerd voor de gekleurde CIGS PV-panelen. Een vol jaar outdoor onderzoek op SolarBEAT heeft veel inzicht gegeven over elektrische opbrengst als functie van hoek van inval van het licht (Angle-Of-Incidence = AOI). De kleine 'verliespost' van een gekleurd PV-paneel t.o.v. een ongecoat zwart paneel lijkt acceptabel. Bovendien is wetenschappelijk begrepen waardoor dit verlies veroorzaakt is.

In het ZigZag gevel systeem van Wallvision is er met gekalibreerde sensoren aangetoond dat er daadwerkelijk meer zonne-instraling 'ingevangen' wordt door de geometrie van de ZigZag. Dat is van de orde +20%, die begrepen kan worden uit het feit dat het ZigZag systeem een ~30 cm uit de gevel steekt, en dat repeterend voor elke ~60 cm gevelhoogte. Een bestaand model voor de instraling is nog verder uitgebreid voor het feit dat de down-facing panelen ook kunnen bestaan uit gekleurde PV-panelen. Ook is de spectrale info uit het meetapparaat van OMT gebruikt om de simulatie te verbeteren. Een validatie van alle 24 photodiodes voor alle metingen van het complete jaar laten zien dat dit model af is: het biedt ruim voldoende voorspellende waarde om voor verschillende configuraties, oriëntaties, en locaties aan te geven wat de te verwachte kWh/m²_facade opbrengst per jaar zal zijn.

De elektrische opbrengst van het ZigZag-systeem is boven verwachting goed; zie Figuur 26. Een gekleurde ZigZag presteert met 137 kWh/m²_facade/jaar meer dan de berekende 132 kWh/m²_facade/jaar voor een full-black cSi PV-gevel. Als er dan zwarte CIGS in de down-facing delen gekozen wordt, is dit met 144 kWh/m²_facade op jaarbasis een absoluut record.

Yearly sums

Measured

■ ■ 144 kWh/m²/year

■ ■ 137 kWh/m²/year

■ ■ 137 kWh/m²/year

■ 119 kWh/m²/year

Calculated

■ 132 kWh/m²/year

■ 66 kWh/m²/year

Figuur 26: Jaarlijkse elektrisch opbrengst in kWh per m² geveloppervlakte. De vier waardes voor de ZigZag-systemen zijn gemeten, de twee waardes voor de verticale PV-gevel systemen zijn berekend. Zie tekst voor achterliggende aannames hierbij.

8.2 Aanbevelingen

De originele projectduur van 2 jaar is bijzonder krap voor een project met de ambitie om samples vanuit laag-TRL onderzoek (in een hightech 'cleanroom-achtig' lab) direct in te zetten in outdoor field testing. Zelfs als er vanuit COVID19 geen vertraging zou zijn geweest, zou het erg lastig zijn geweest om een vol jaar outdoor testing te kunnen uitvoeren. Gelukkig is de projectverlenging met een half jaar extra door RVO goedgekeurd. Als de projectduur (om wat voor reden dan ook) beperkt is tot 2 jaar, dan is het aan te bevelen om focus te hebben op óf een project met laag TRL-onderzoek waaruit dan volledige PV-panelen in een vervolproject worden uitontwikkeld, óf een project met een hoger TRL-onderzoek waarbij PV-panelen van externe partijen worden betrokken. Als men beide aspecten wil meenemen, dan is een projectduur van minimaal 4 jaar realistischer.

8.3 Dankwoord

"Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Nationale regelingen EZ-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland."

9 Appendix: Format Openbaar Eindrapport volgens RVO

Voor dit publiek eindrapport is het vereiste format gedownload van de RVO-website, op 4 Juni 2021. Dat format ziet er als volgt uit:

Openbaar eindrapport

Deadline: binnen drie maanden na afloop van het project
Aantal: 1x, bij voorkeur digitaal aan e-innovatie@rvo.nl

Het openbare eindrapport is bedoeld voor een breder publiek en moet daarom helder en goed leesbaar zijn. Dit rapport zal pas worden gepubliceerd nadat eventuele rechten op de kennis zijn vastgelegd. De publicatiedatum moet op het rapport worden vermeld. Het gaat hierbij uitdrukkelijk niet om de commerciële promotie van de producten of projectresultaten. De aanvrager/het samenwerkingsverband is verantwoordelijk voor de uitgave en is vrij in de keuze van vormgeving van het rapport.

Het openbare eindrapport moet de volgende elementen bevatten en is gesteld in de Nederlandse taal:

- Samenvatting van de uitgangspunten en de doelstelling van het project en de (eventueel) samenwerkende partijen
- Beschrijving van de behaalde resultaten, de knelpunten en het perspectief voor toepassing;
- Beschrijving van de bijdrage van het project aan de doelstellingen van de regeling (duurzame energiehuishouding, versterking van de kennispositie)
- Spin off binnen en buiten de sector
- Overzicht van openbare publicaties over het project en waar deze te vinden of te verkrijgen zijn;
- Vermelding waar en tegen welke prijs meer exemplaren van dit rapport te bestellen zijn;
- Vermelding van contactpersoon (personen) voor meer informatie
- Vermelding van de verkregen subsidie op de volgende manier

Maatwerkbeschikkingen 2012: "Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, voor het TKI >invullen< uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland."

Verlening 2013 en verlening 2014 (tot 10 juli 2014): "Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Subsidieregeling energie en innovatie (SEI), Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland."

Vanaf verlening 2014 (vanaf 11 juli 2014): "Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Nationale regelingen EZ-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland."