

Openbaar Eindrapport

PREFAB - Pre-mounted Renewable Energy Façades for cost-effective Buildings



TNO 2023 R10395 – 9 februari 2023
**PREFAB - Pre-mounted Renewable Energy
Façades for cost-effective Buildings**

Openbaar Eindrapport

Auteurs	Corry de Keizer Menno van den Donker, Maarten Dörenkämper, Marloes van Heteren, Jeroen Maas, Roel Pronk, Gerrit Jan van Riesen, Simona Villa, Menno Zonderland
Rubricering rapport	TNO Publiek
Rapporttekst	TNO Publiek
Oplage	online
Aantal pagina's	24 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	0
Projectnaam	PREFAB
Projectnummer	060.34506

Het project PREFAB is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat en het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, Nationale regelingen EZK- en LNV-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.

Alle rechten voorbehouden

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

© 2023 TNO

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave	3
1 Samenvatting	4
2 Inleiding en doelstelling	5
3 Ontwerp en specificatie	6
3.1 Houtskeletbouw gevelement	8
3.2 Aluminium prefab vliesgevel	10
3.3 Composiet geveldelen	12
4 Veldtest	13
4.1 Specificaties PV modules	13
4.1.1 Meettechniek en elektrische aansluiting	13
4.2 Resultaten veldtest	14
5 Systemmodellering	20
5.1 Modellering energieopbrengst met BIGEYE	20
5.2 Gevel Scan App en kosten	21
6 Conclusie en aanbevelingen	23
7 Publicaties en contactgegevens	24
7.1 Publicaties	24
7.2 Contactgegevens	24

1 Samenvatting

Voor de grootschalige opwekking van zonne-energie, die nodig is voor de energietransitie, is veel ruimte nodig. Zonnestroomsystemen kunnen goed geïntegreerd worden in gebouwen. Met name voor hoogbouw is het integreren van zonnestroomsystemen in de gevel belangrijk, omdat het dakoppervlak te klein is om aan de gebouwgebonden energievraag te voldoen. Prefab bouwtechnieken spelen een grote rol bij nieuwbouw en grootschalige renovatie.

In het PREFAB project is door de verschillende projectpartners gewerkt aan het ontwikkelen van innovatieve technologieën om gekleurde esthetische zonnepanelen te integreren in prefab gevelelementen. Er is een demonstrator ontworpen, gebouwd en geïnstalleerd. Het ontwerp is gebaseerd op twee typen Prefab bouwsystemen; een aluminium gevelsysteem en een houten gevelsysteem. Vervolgens zijn er diverse PV-gevelelementen toegevoegd; kristallijn silicium PV panelen met gekleurd glas en gekleurde folie, composiet cassettes met geïntegreerde kristallijn silicium PV panelen en composiet elementen met geïntegreerde dunne film PV-folie.



Figuur 1: PREFAB demonstrator

De PREFAB demonstrator is op de onderzoekslocatie SolarBEAT geïnstalleerd en één jaar lang gemonitord. De systemen zijn daarnaast uitgebreid gekarakteriseerd en gemodelleerd en is er een rekentool ontwikkeld.

We concluderen dat we een nieuw product hebben ontwikkeld inclusief zonne-energie technologie, productontwerp, fabricagetools, rekentools en met een beproefd prototype.

2 Inleiding en doelstelling

Voor de grootschalige opwekking van zonne-energie, die nodig is voor de energietransitie, is veel ruimte nodig. Zonnestroomsystemen kunnen goed geïntegreerd worden in bijvoorbeeld gebouwen (daken, gevels) of in infrastructuur. Met name voor hoge gebouwen is het integreren van zonnestroomsystemen in de gevel belangrijk, omdat het dakoppervlak te beperkt is om aan de gebouwgebonden energievraag te voldoen. Volgens het rapport 'Ruimtelijk potentieel van zonnestroom in Nederland' is er een potentieel van 660 km² voor de integratie van zonne-energie in de gevel. Daarmee zou jaarlijks 32 TWh zonnestroom geproduceerd kunnen worden, wat ongeveer 30% van de Nederlandse elektriciteitsvraag is.

Bij prefab of geprefabriceerd bouwen worden bouwelementen in een werkplaats of fabriek geassembleerd. Prefab bouwen speelt een steeds grotere rol in de bouw. Prefab bouwen met zonnestroompanelen (PV) is een veelbelovende bouwtechniek. De besparingen zitten met name in het vermijden van installatiekosten voor zonnepanelen en een verminderd materiaalgebruik. Naast de kostenvoordelen is er meer ontwerpvrijheid en een betere kwaliteitsborging mogelijk wanneer het bouwdeel in een geconditioneerde ruimte wordt geassembleerd. Daarnaast zijn er minder transportbewegingen rond de bouwplaats en daardoor lagere lokale CO₂-emissies. Er zijn de komende jaren grote uitdagingen om gevels van zonnepanelen te voorzien. De integratie van zonnepanelen in een prefab element kan eraan bijdragen dat gevels sneller voor het opwekken van zonnestroom kunnen worden gebruikt, met name voor hoogbouw.

Het PREFAB project heeft tot doel om een zonne-energie gevel te ontwikkelen die goedkoop stroom kan leveren en tegelijkertijd aan esthetische en andere bouweisen zal voldoen. Het innovatieve aspect hierbij is dat we het gehele gevel-element inclusief zonnepanelen, bedrading en aansluiting van tevoren aanbrengen in een prefab element. Om dit te kunnen bewerkstelligen werken we aan deel-innovaties op het gebied van berekeningen, montagetechnieken, bedradingstechnieken en installatietechnieken

In het PREFAB project is door de verschillende projectpartners gewerkt aan het ontwikkelen van innovatieve technologieën om gekleurde esthetische zonnepanelen te integreren in prefab gevelelementen. Verschillende innovatieve technieken met betrekking tot maat, vorm, kleur en transparantie van de zonnepanelen zijn onderzocht en toegepast in een aantal prototypes. De demonstrator bestaat uit modules met verschillende PV celtechnologieën, verschillende kleur- en verpakkingstechnieken en assemblagemethoden. De PREFAB demonstrator is op de buitenonderzoekslocatie SolarBEAT geïnstalleerd en 1 jaar lang gemonitord. De systemen zijn uitgebreid gekarakteriseerd en gemodelleerd.

Het consortium bestond uit Emergo, Flexipol, Novasole, Sanko Solar, SCX Solar, Solarix, TGM en TNO (penvoerder).

3 Ontwerp en specificatie

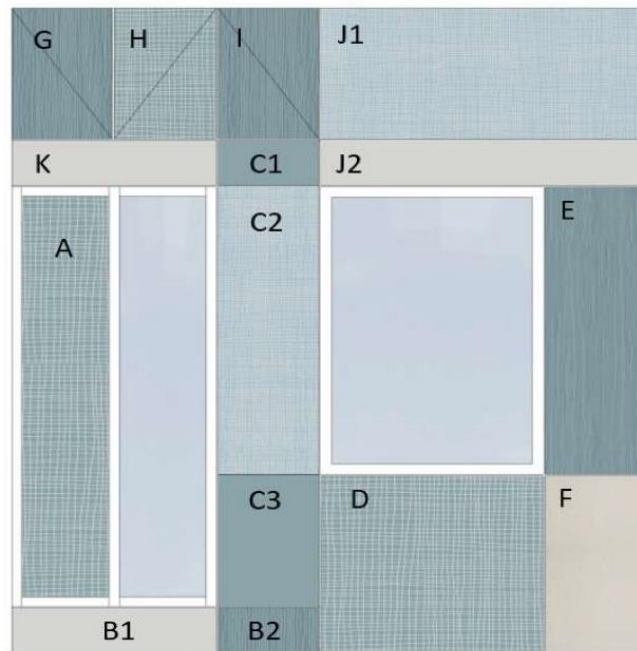
Het PREFAB consortium heeft in meerdere vergaderingen de specificaties voor de prototypes en het project verzameld. Op basis van de specificaties en na meerdere feedbackrondes heeft Solarix een ontwerp gemaakt. Het ontwerp is gebaseerd op 2 typen Prefab bouwsystemen; een aluminium gevelsysteem (TGM) en een houten gevelsysteem (EMERGO). Vervolgens zijn er diverse PV-gevelelementen toegevoegd; kristallijn PV panelen met gekleurd glas en gekleurde folie, composiet cassetes met geïntegreerde kristallijn PV panelen en composiet elementen met geïntegreerde PV-folie. Daarnaast zijn zonneramen door Sanko Solar en bekabelingsgoten door SCX Solar onderdeel van de opstelling. De zonnepanelen werden ingebracht door Solarix en TNO.

In het programma van eisen stonden de volgende eisen (selectie):

-) Breedte van het element is een veelvoud van 1,80 m, een standaardmaat in de bouw
-) Prefab verdiepingshoge elementen
-) Meerdere opties voor kleurtechnieken, bevestigingsmethoden en type PV-technologie
-) Temperatuurmetingen zijn belangrijk
-) Composiet als drager voor PV-folie, maar ook voor kristallijn PV-paneel
-) Blinde bevestiging, de bevestiging is niet zichtbaar en frameloze panelen
-) Integraal aantrekkelijk ontwerp
-) Zo duurzaam mogelijk



Figuur 2: Het ontwerp is gebaseerd op 2 typen Prefab bouwsystemen; een aluminium gevelsysteem (links) en een houten gevelsysteem (rechts). Vervolgens zijn er diverse PV-gevelelementen toegevoegd: kristallijn PV panelen met gekleurd glas (linksonder) en gekleurde folie (rechtsonder), composiet cassetes met geïntegreerde kristallijn PV panelen (midden) en composiet elementen met geïntegreerde PV-folie.(linksboven)



Figuur 3: PV modules en composiet

Het prototype staat afgebeeld in Figuur 2 en 3 en bestaat uit de volgende componenten:

- A. Glas-glas monokristallijn silicium (cSi) paneel met keramisch geprinte inkt
- B. B1: Composiet sierpaneel met biovezel en reliëf
B2: Composiet sierpaneel met glas-folie paneel zonder PV met keramische print
- C. C1, C2, C3: 1 composiet paneel
C2: glas-backsheet mono kristallijn silicium paneel met keramische print
- D. Glas-glas mono-cSi paneel met gekleurde en gepatroneerde folie
- E. Glas-glas mono-cSi paneel met gekleurde en gepatroneerde folie
- F. Eternit paneel (geen PV)
- G. Composiet paneel met geïntegreerde CIGS laminaten (PV folie), aan de voorzijde is achteraf een geprinte folie aangebracht
- H. Composiet paneel met geïntegreerde CIGS laminaten, aan de voorzijde is achteraf een geprinte folie aangebracht
- I. Composiet paneel met geïntegreerde CIGS laminaat, Aan de voorzijde is de gelcoat vervangen voor geprinte folie in het proces. De PV-folie wordt geknikt in de mal
- J. J1-J2 is 1 composiet element op waterbasis
J1 is een glas-backsheet monokristallijn paneel met metal wrap through (MWT) cellen, de glasplaat aan de voorkant heeft keramisch geprinte inkt.
J2 is een sierpaneel met reliëf
- K. Composiet sierpaneel met biovezel en reliëf
- L. en S2: Twee PV ramen op basis van CdTe- dunnefilm-zonnepanelen

De technische specificaties van de PV panelen staan in paragraaf 4.1.

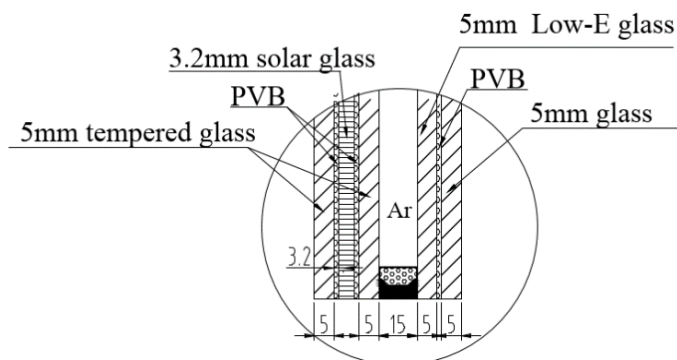
3.1 Houtskeletbouw gevelelement

Het prefab houtskeletbouw (hsb) element is gedetailleerd, geproduceerd en gemonteerd door Emergo. In het hsb element is een kozijn met PV-glas geïntegreerd (zie figuur 4). De toepassing zal in de eerste plaats zijn voor woningbouw tot 15 meter hoog in de Nederlandse markt.



Figuur 4: Hsb element tijdens productie en montage van PV-raam

De opbouw van dit door Sanko Solar geleverde PV raam wordt weergegeven in figuur 5. Van de dunne film (CdTe) in het raam is de actieve laag gedeeltelijk verwijderd, waardoor smalle zonnecelstrips ontstaan. Dit resulteert in een semitransparant raam. Van binnenuit is het resultaat dat als door een zonnebril naar buiten gekeken wordt. Voor kantoortoepassing zou dit glas een geschikte en acceptabele oplossing kunnen zijn met name aan de zuidgevel. Het glas is als een traditionele ruit in het kozijn gemonteerd, waarbij er een boring aangebracht is waar de PV-kabels doorgevoerd zijn. Het element is verpakt en getransporteerd naar Eindhoven. Daar is het met een kraan op de SolarBEAT onderzoekslocatie gemonteerd (Figuur 6). De montage van de PV-panelen is vanwege de latere levering op locatie gedaan.



Figuur 5: Opbouw van toegepast PV-glas



Figuur 6: Installatie van het hsb-element met geïntegreerd PV-raam

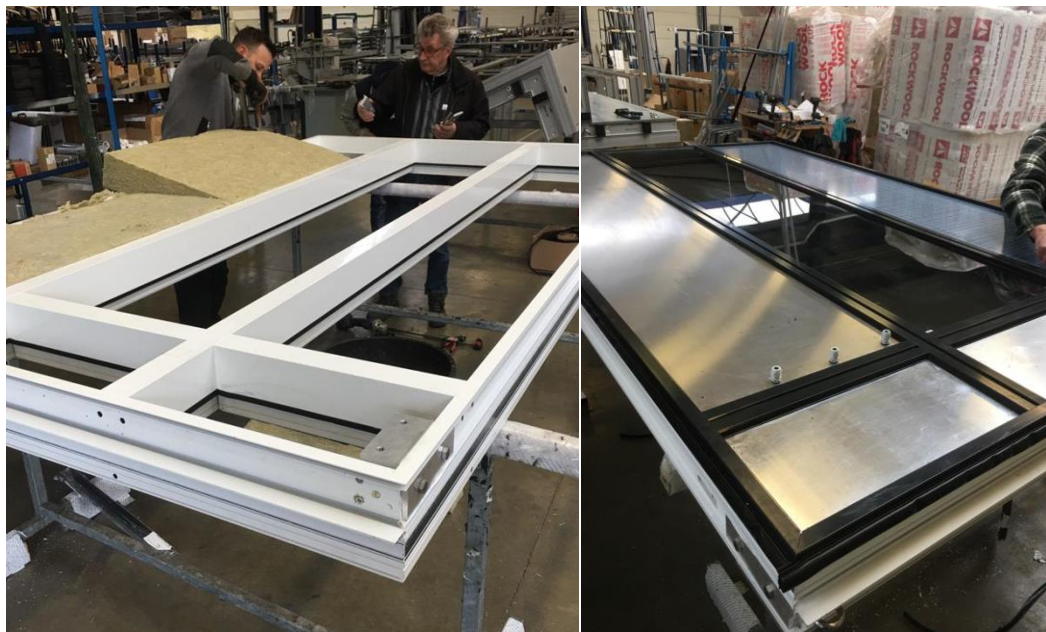
Daarnaast zijn er door Emergo twee verschillende type bevestigingsmethoden uitgewerkt voor de montage van deze frame-loze PV-panelen aan een houtskelet gevelement. Er is een rekenmodel ontwikkeld voor de hyperelastische lijmverbinding die wordt toegepast. Hiermee kunnen de faalcriteria en veiligheidsfactor bepaald worden, waarmee de bevestiging en lijmoppervlak gedimensioneerd kunnen worden op basis van de geveltoepassing en de afmetingen van het PV-paneel.

3.2 Aluminium prefab vliesgevel

Het aluminium prefab vliesgevelelement is gedetailleerd, geproduceerd en gemonteerd door TGM. Het is met name ontworpen voor commerciële en residentiële hoogbouw. Het element is volledig geassembleerd in de werkplaats en is vanuit een kraan gemonteerd.

Speciale aandacht ging uit naar de elektrische doorvoer. In hoogbouw torens is er een zeer grote winddruk en dienen alle doorvoeren zeer robuust en waterdicht te zijn. Daarnaast hebben we in het ontwerp een duidelijke scheiding tussen de gevel installatie en de E-installatie aan kunnen brengen. Dit betekent dat het gevel-element met niet verbonden connectoren aan de binnenzijde wordt opgeleverd. Een E-installeteur kan vervolgens vanaf de binnenzijde de zonnepanelen in serie schakelen of van micro-omvormers voorzien. De elektrische kabels en/of micro-omvormers worden onzichtbaar weggeleid door een aluminium goot.

In Figuur 7 staan enkele foto's van de productie van het element in de werkplaats. Achterop het element is een kabelgoot gemonteerd voor het doorvoeren van de kabels. Achterop het element zijn montageankers gemonteerd die gebruikt worden voor een snelle onsite montage.



Figuur 7: Montage van het prefab element

Figuur 8 toont enkele foto's van de installatie van het element op SolarBEAT. De montage van het element was snel gebeurd. Voor de elektronische aansluiting zijn wel enkele leerpunten geïdentificeerd.

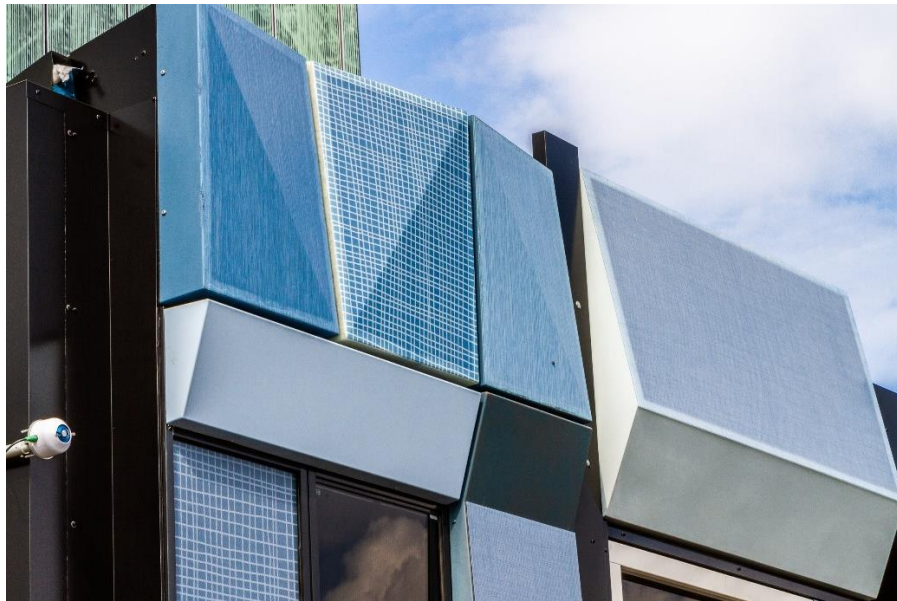


Figuur 8: Installatie van het prefab gevelement

3.3 Composiet geveldelen

De composiet elementen zijn door Flexipol geproduceerd. Binnen het PREFAB project zijn verschillende innovaties verder uitgewerkt met betrekking tot:

- › het proces om PV folie in het composiet te verwerken
- › het gewenste uiterlijk van het ontwerp, bijvoorbeeld kleur
- › composiet als drager voor kristallijne PV-panelen
- › blind bevestigen op HSB en vliesgevel systemen



Figuur 9: Drie composiet elementen met geïntegreerde PV folie (links), composiet element op waterbasis met een glas-folie PV paneel.

In figuur 9 worden links de drie 3D composietelementen met geïntegreerde PV folie weergegeven. Flexipol heeft samen met TNO gekeken naar hoe flexibele zonnecellen goed geïntegreerd kunnen worden in een composiet gevelmateriaal. Een uitdaging is daarbij dat de voor- en achterfolie van het huidige PV laminaat zeer inert zijn en dat het daardoor niet goed hecht. Een oplossing is om het PV laminaat qua grootte te laten aansluiten bij de malgrootte. Voor dit project is er voor gekozen om de injectie over de korte kant van het paneel te doen met een injectieleiding en een afzuigleiding over de hele zijde. Voor grotere panelen is het mogelijk om in het PV laminaten ‘gaten’ te maken op positie van de injectiepunten en, of afzuigpunten. TNO-Solliance heeft hiervoor een testfolie gemaakt en hieruit blijkt dat er voldoende mogelijkheden zijn om sparingen in de cel-lay-out te creëren. Bij de linker twee panelen uit figuur 2.9, is de gekleurde folie achteraf aangebracht. Bij het rechter paneel, is de gelcoat vervangen door een bedrukte gekleurde folie in het productieproces.

Daarnaast is in de proefopstelling gewerkt aan duurzamere composietpanelen op waterbasis en met biovezel. Ook zijn verschillende opties voor bevestiging op een vliesgevel of op een houtskeletbouwelement. Blinde bevestiging is een goede optie. Verder zijn composiet panelen met kristallijn silicium PV op een composiet als drager gemonteerd. Dit heeft, zeker als prefab optie, goed gefunctioneerd en biedt mogelijkheden voor de toekomst.

4 Veldtest

4.1 Specificaties PV modules

De specificaties van de PV modules die in het PREFAB prototype geïntegreerd zijn, worden weergegeven in tabel 1.

Tabel 1: Specificatie van PV module karakteristieken, vanwege incorrecte initiële testen zijn de waarden voor modules A en C2 afgeleid uit de meetdata van de veldtest.

Panel	Cell-type	Color technology	Pmpp (W)	Module Area (m ²)	Cell Area (m ²)	Area Fill Factor (%)	Module Efficiency (%)
A*	c-Si	Ceramic ink on glass	143.5	1.41	1.10	78	10.1
C2*	c-Si	Ceramic ink on glass	114.4	1.11	0.81	73	10.3
D	c-Si	Printed foil	107.9	1.47	1.17	80	7.3
E	c-Si	Printed foil	48.5	0.85	0.54	63	5.7
G	CIGS	Printed foil	27.3	0.48	0.29	61	5.7
H	CIGS	Printed foil	33.7	0.53	0.33	63	6.3
I	CIGS	Printed foil	21.7	0.48	0.29	61	4.5
J1	c-Si (MWT)	Ceramic ink on glass	165.0	1.55	1.22	79	10.6

De module-efficiëntie is lager dan die van standaard panelen door het gebruik van kleur, maar ook door het soms lagere aandeel van de module die gevuld is met cellen (zie de 'area fill factor'). Dat komt omdat de cellen, welke een standaardgrootte hebben, qua formaat niet precies passen binnen de ruimte van het prefab element. De efficiëntie per m² celoppervlak liggen tussen de 7,4 en 10,1% voor de CIGS panelen, 9 tot 9,2% voor de c-Si panelen met folie en tussen de 13 en 14,1% voor de c-Si panelen met keramische inkt. Daarbij is het relevant dat niet alleen de methode anders is, maar ook de kleuren zelf.

4.1.1 Meettechniek en elektrische aansluiting

De PV-modules worden in maximum power point gehouden en op het elektriciteitsnet aangesloten met behulp van DC-DC power optimizers en een omvormer van SolarEdge. Voor elke module (behalve module E) worden de DC-stroom, de DC-spanning en het DC-vermogen gemeten met een AcuDC 243 power analyser die tussen de power optimizer en de PV-module is geïnstalleerd. Module E wordt gemeten met een IV tracer. Aan de achterzijde van elke PV module is minimaal één T-type thermokoppel gemonteerd om de temperatuur van het PV paneel te meten. Bij de composietpanelen (G, H, I) zijn de thermokoppels in de composietstructuur gelamineerd. Schaduw wordt geanalyseerd met webcamsbeelden van de opstelling.

De zoninstraling in het vlak van de gevel wordt gemeten met twee EKO MS80 pyranometers, die op twee verschillende hoogten aan de westzijde van de demonstrator zijn gemonteerd

(zie figuur 2.2). De zoninstraling wordt ook op verschillende hoogtes gemeten door 8 fotodiodes (EKO ML-01) die geïnstalleerd zijn in het midden van de opstelling. Globale horizontale, diffuse en directe instraling wordt gemeten door het Solar Measurement Station op SolarBEAT. Ook worden verschillende meteorologische parameters, zoals omgevingstemperatuur, windsnelheid, windrichting, luchtdruk en hoeveelheid neerslag gemeten. Dagelijks worden alle gemeten gegevens met een tijdsresolutie van 1 minuut geüpload naar een SQL-database.

4.2 Resultaten veldtest

Opstartfase en datafiltering

De PV modules zijn elektrisch aangesloten in juni 2021. Bij het opstarten waren er een aantal problemen.



Figuur 10: Schaduw in de ochtend (links) en middag (rechts) van 17 april 2022

Verschillende modules van het prototype zien schaduw in de ochtend of middag door de ZigZag opstelling aan de oostkant, door de uitstekende delen van het prototype en bij zeer laagstaande zon door andere dummy gebouwtjes op SolarBEAT (zie figuur 10). Schaduw is een feit in veel gebouwgeïntegreerde opstellingen.

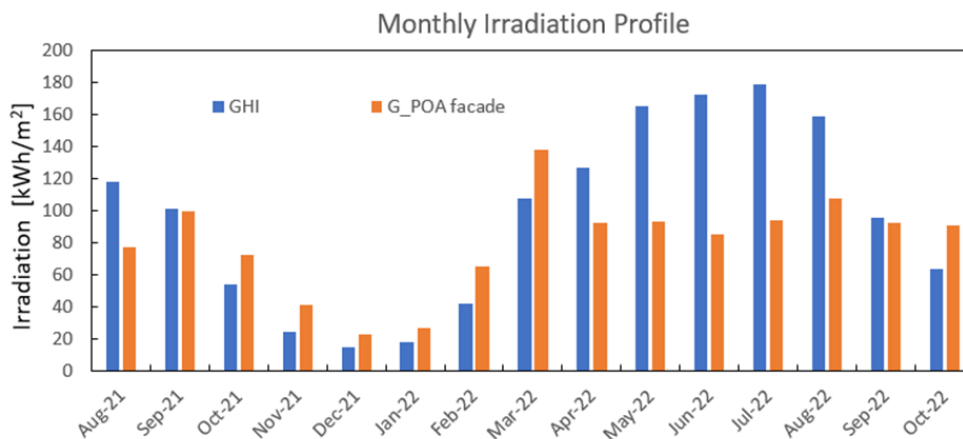
Om bij de analyse van de performance een eerlijke vergelijking te kunnen maken wordt de performancedata als volgt gefilterd:

- › Schaduw: De azimuthoek van de zon moet tussen 130° en 242° liggen (met 180° als zuiden) en de hellingshoek van de zon is hoger dan 14° .
- › Voltage blocking: de uitgangsspanning van de power optimizer moet lager zijn dan 78V (bij 80V treedt voltage blocking op).
- › Alle modules moeten functioneren, de modules met een laag nominaal vermogen starten soms later op.

Zonne-instraling

Het instralingsprofiel over het jaar is voor een gevel anders dan voor een horizontaal of optimaal hellend vlak. Figuur 10 toont de maandelijks gemeten zoninstraling in de gevel (G_POA) en de maandelijks gemeten globale horizontale instraling (GHI). De hoogste maandelijkse zoninstraling voor de gevel is niet in de zomer, maar juist in de lente en de herfst. In de zomer staat de zon hoog en 's ochtends vroeg, of 's avonds wordt directe

instraling uit het noordoosten of noordwesten niet gezien door de gevel. De jaarlijkse instraling op de zuidgevel was 917 kWh/m² tussen augustus 2021 tot en met juli 2022, dit is ongeveer 18% lager dan de globale horizontale instraling en 27% lager dan de instraling op een 35° geheld dak. Het was een erg zonnig jaar.



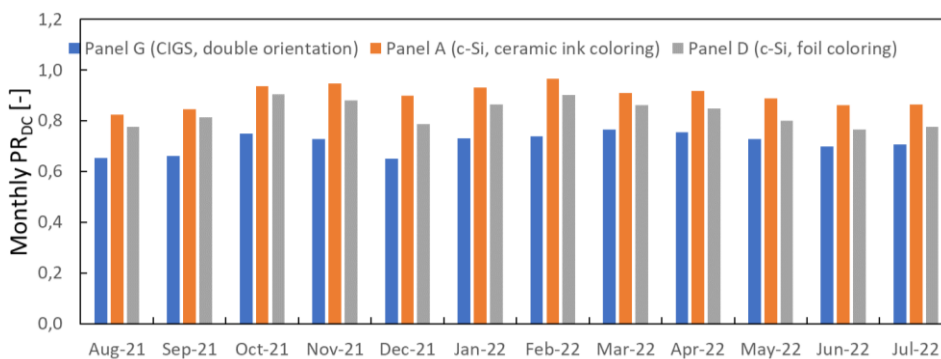
Figuur 11 Maandelijkse horizontale globale instraling (GHI, blauw) en instraling in de gevel (G_POA, oranje)

Performance van de PV modules in het PREFAB prototype

De DC-performance ratio (PR_{DC}) vergelijkt de gemeten opbrengst met de verwachte opbrengst op basis van de standaard testcondities. De PR_{DC} wordt als volgt berekend:

$$PR_{DC} = \frac{E_{DC} \cdot G_{STC}}{P_{STC} \cdot I_{POA}}$$

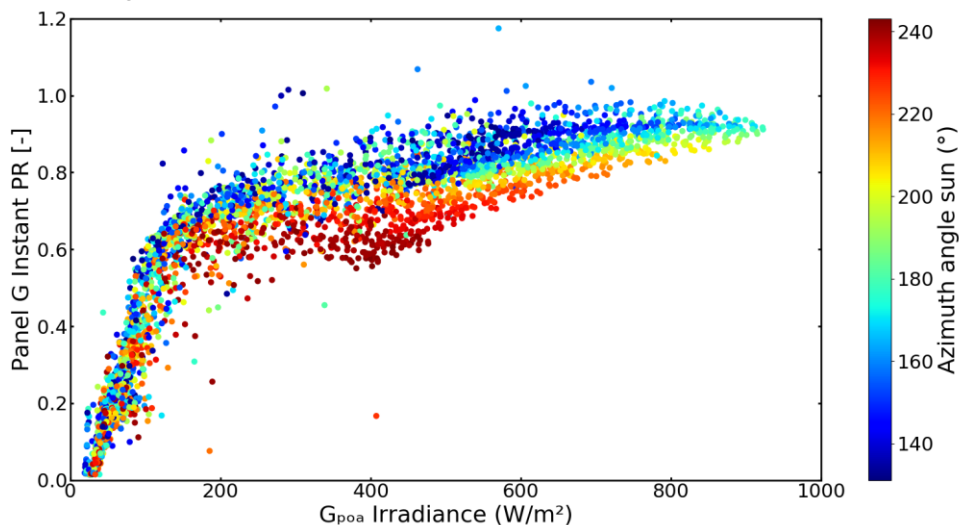
Hierin is E_{DC} (kWh) de DC-energieopbrengst, G_{STC} de instraling onder standaard testcondities (1000 W/m²), P_{STC} het geïnstalleerde DC-vermogen (in W) en I_{POA} de zoninstraling (in kWh/m²).



Figuur 12 Maandelijkse DC-performance ratio voor module A, D en G

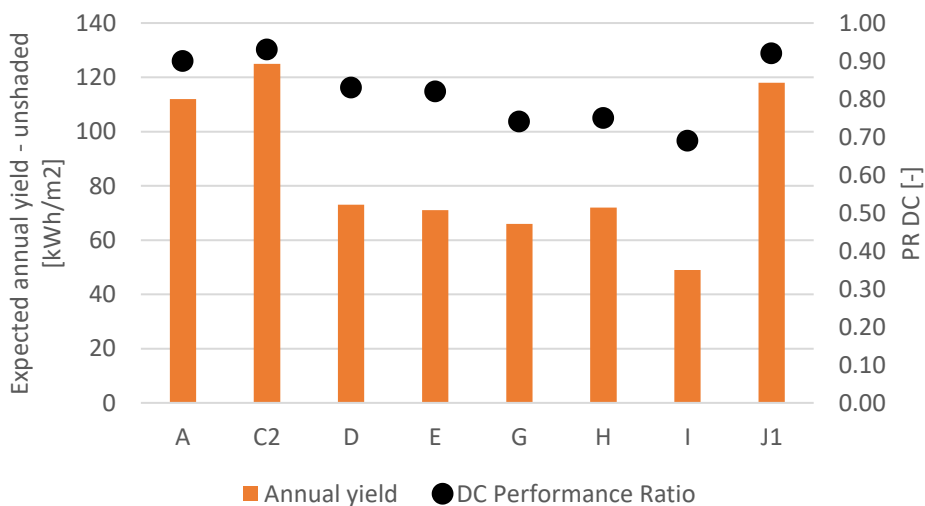
In Figuur 12 worden de maandelijkse DC-performance ratio voor modules A, D en G weergegeven. De performance ratio is iets hoger in de winter en wat lager in de zomer, waarschijnlijk als gevolg van een hogere moduletemperatuur in de zomer. De PR van module D is iets lager dan die van A, maar dit ligt waarschijnlijk binnen de onzekerheidsmarge van het nominale modulevermogen. De lagere performance ratio van de CIGS-modules wordt mede veroorzaakt door een mismatch van instraling, omdat de module in twee vlakken ligt. Module G kijkt gedeeltelijk naar het zuiden en gedeeltelijk wat naar het oosten (170°). Figuur 13 toont de temperatuurgecorrigeerde DC-performance ratio

van module G. Deze toont duidelijk een afhankelijkheid van de azimuthhoek van de directe zoninstraling.



Figuur 13 Temperatuurgecorrigeerde 30-minuten gemiddelde PR_{DC} waarden voor module G versus de instraling in het vlak. De kleur geeft de azimuthhoek van de zon weer.

Figuur 14 toont de DC-performance ratio en de jaarlijks verwachte DC-opbrengst voor een onbeschaduwde situatie in kWh per m² celoppervlak. De modules met een keramische inktkleuring laten een hogere berekende jaaropbrengst zien als gevolg van een hoger piekvermogen en een hogere performance ratio. De verwachte DC-opbrengst voor de onbeschaduwde situatie wordt berekend door het nominale vermogen voor elke module (W/m²) te vermenigvuldigen met de performance ratio en de jaarlijkse zoninstraling.



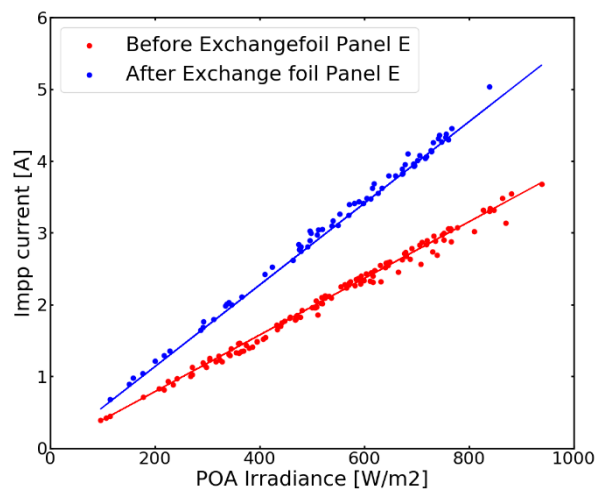
Figuur 14 Verwachte jaarlijkse opbrengst in kWh/m² (oranje balk) en DC performance ratio (zwarte punt) voor de verschillende modules.

Vervangen van de folie van paneel E

In oktober 2022 is de folie van paneel E vervangen door een nieuwe folie, die transparanter zou moeten zijn en daardoor tot een hogere opbrengst kan genereren. Tegelijkertijd is de folie van paneel D verwijderd. Dit experiment laat ook zien dat de folie vervangen kan worden. Figuur 16 laat een grote verbetering zien in opbrengst, waardoor het vermogensverlies van de kleurenfolie in dezelfde range komt als het vermogensverlies door een keramische inktprint. .



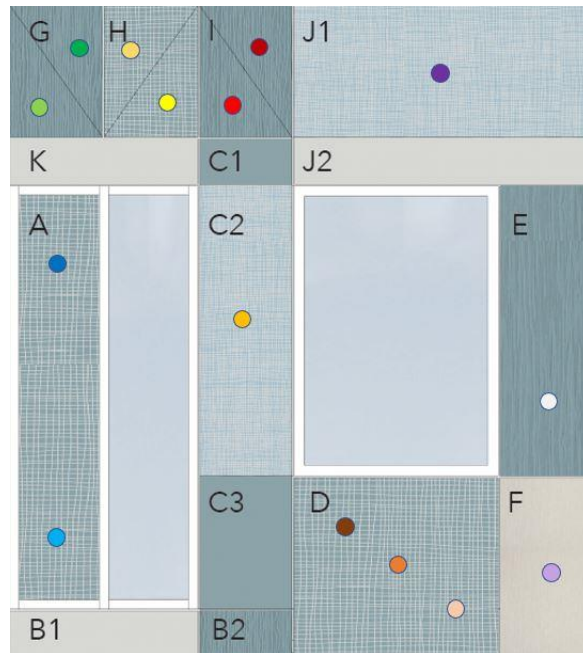
Figuur 15 Paneel E voor en na het vervangen van de gekleurde folie



Figuur 16 Temperatuurgecorrigeerde stroom in het maximum power point (I_{mpp}) voor en na het vervangen van de folie van module E als functie van instraling.

Temperatuurgedrag van de PV modules:

Het is belangrijk om informatie te hebben over de temperaturen in de zonnepanelen die in de PREFAB prototypes geïntegreerd zijn. Daarvoor zijn op verschillende locaties in de PV module thermokoppels geplaatst (zie figuur 17). De thermokoppels zijn met aluminiumtape achter op panelen A, C2, E en D geplakt. Bij modules G, H en I zijn deze meegelamineerd in het composiet. Alleen bij module J1, is de thermokoppel achterop het composiet geplaatst, deze geeft daarom een lagere temperatuur dan die van de module.



Figuur 17 Locatie van temperatuurmetingen achter de PV modules

Om het temperatuurgedrag te evalueren, wordt in Tabel 3 de instralingsgewogen gemiddelde temperatuur (T_{IWAT}) en de hoogst gemeten temperatuur tijdens de veldtest weergegeven. De T_{IWAT} wordt als volgt berekend:

$$T_{IWAT} = \frac{\sum(G_{POA} \cdot T_{mod})}{\sum G_{POA}}$$

Met G_{POA} instraling in het vlak, en T_{mod} de moduletemperatuur.

De hoogst gemeten temperatuur tijdens de veldtest was van module A met bijna 65°C. Dit is lager dan de temperaturen van standaard panelen in een hellend vlak. Een reden daarvoor is dat de instraling in een gevelvlak lager is in de zomer dan een hellend vlak, daarnaast wordt een deel van het zonlicht gereflecteerd door de keramische inkt.

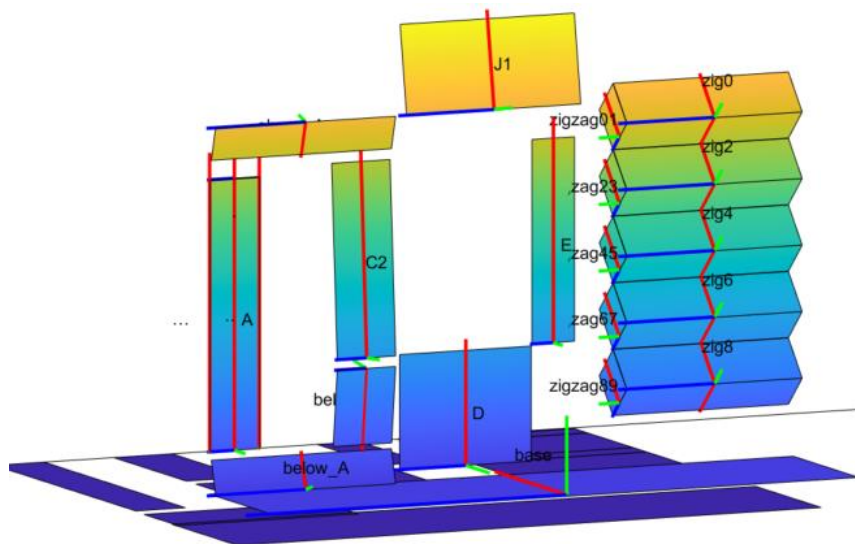
Tabel 2 IWAT en hoogst gemeten temperatuur van de temperatuursensoren

Temperatuursensor	IWAT (°C)	Hoogst gemeten temperatuur tijdens veldtest(°C)
G_Top	41	63.4
G_Bottom	36	57.6
H_Top	40	64.8
H_Bottom	38	59.0
I_Top	39	60.0
I_Bottom	38	59.1
J1	29	46.4
C2	40	62.6
A_Top	42	64.9
A_Bottom	42	64.3
E	40	60.6
D_Top_Left	40	63.0
D_Middle	40	61.4
D_Bottom_right	40	61.0
F	37	56.2

5 Systemmodellering

5.1 Modelling energieopbrengst met BIGEYE

De energieopbrengst wordt gemodelleerd met BIGEYE, een bij TNO ontwikkelde software. De PREFAB modules worden zo gedetailleerd mogelijk gemodelleerd. De geometrie van de opstelling wordt op basis van de geometrie van de echte demonstrator op SolarBEAT nagebouwd, rekening houdend met alle relevante schaduwbronnen. Het effect van zelfbeschaduwing (van de constructie zelf) wordt ook geëvalueerd. Het model kan zo gevalideerd worden met behulp van de veldtestdata. Vervolgens zijn typische meteorologische jaargegevens gebruikt om de jaarlijkse opbrengst van het PREFAB gevelement in de huidige configuratie te berekenen.

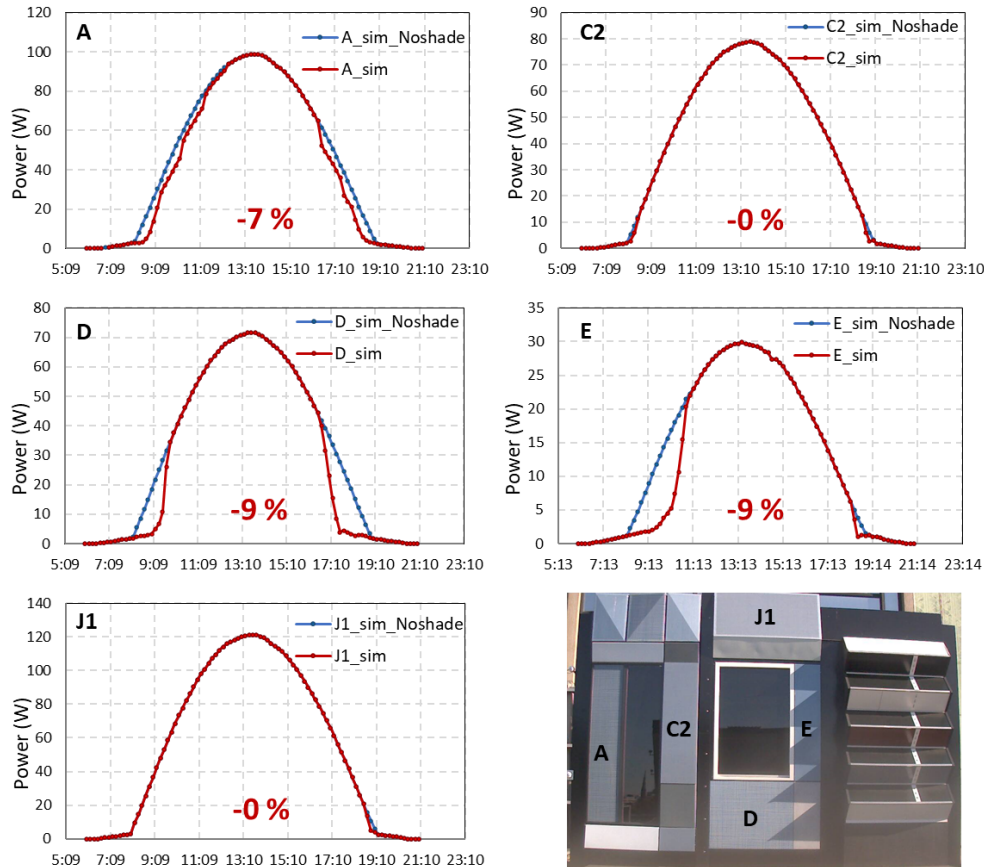


Figuur 18 BIGEYE geometrie van de PREFAB PV modules en de ZigZag opstelling

In het PREFAB modelleerwerk bleek de realisatie van het geometriebestand het meest uitdagende deel te zijn. Om rekening te houden met de wederzijdse beschaduwing was het belangrijk om niet alleen de PV-modules, maar ook alle dummy panelen nauwkeurig te reproduceren. Figuur 18 toont de gemodelleerde geometrie van het systeem in BIGEYE, met zowel de PV-actieve elementen (A, C2, D, E en J1) als de dummy-elementen. De modules G, H en I zijn niet gemodelleerd.

De module is gevalideerd door het gemeten en gesimuleerde vermogen te vergelijken voor verschillende zonnige en bewolkte dagen in verschillende seizoenen. Met BIGEYE kan het geproduceerde vermogen met en zonder schaduw vergeleken worden, zo kan men zien hoe de schaduw de opbrengst beïnvloed. Voor een zonnige dag wordt dit vergeleken in Figuur 219. Voor elke module wordt het geproduceerde vermogen gesimuleerd inclusief de schaduwbronnen (rode curve) en zonder schaduw (blauwe curve). Te zien is dat op deze zonnige dag de modules D en E het meest onder de schaduw te lijden hebben, met een verlies van meer dan 9%. In dit geval komt de schaduw vooral van de zigzagstructuur ten oosten van de PREFAB opstelling, zoals te zien op de webcamfoto. Module A laat een verlies

van 7% zien (voor deze dag) dat wordt toegeschreven aan de eigen profielen en het dummy-paneel erboven. De modules C2 en J1 daarentegen, die niet verticaal maar licht naar de hemel gekanteld zijn (respectievelijk 3° en 5°), hebben geen last van schaduw.

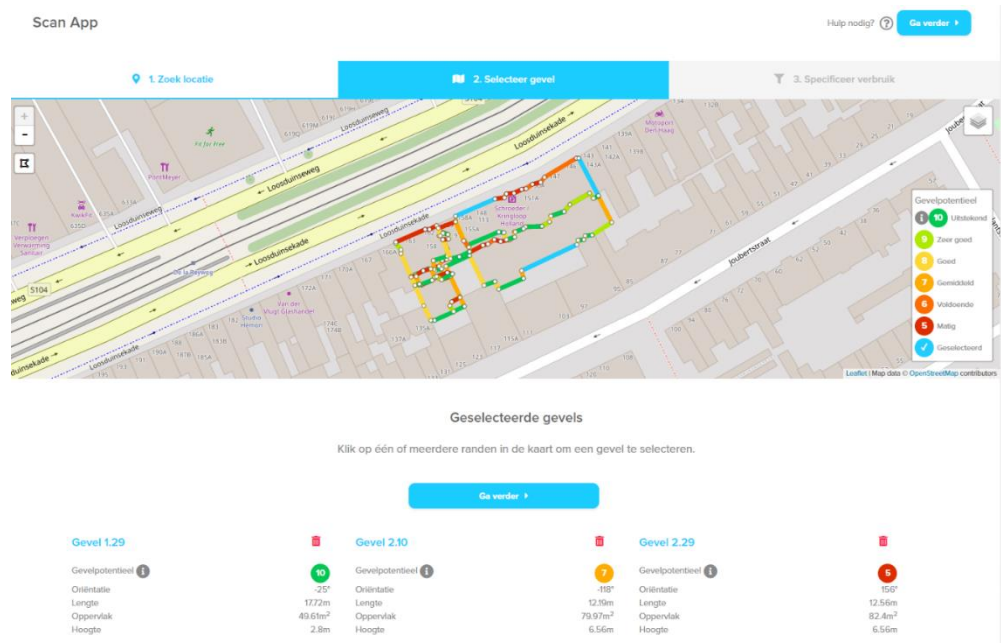


Figuur 19 BIGEYE simulaties met en zonder schaduw voor een zonnige dag (17 april 2022)

5.2 Gevel Scan App en kosten

Hoofddoel van de ontwikkeling van de Gevel Scan App was om bij architecten, project ontwikkelaars en vastgoed eigenaren snel en eenvoudig bewustzijn te creëren over het energie besparingspotentieel van de PREFAB gevel elementen op bestaande, maar ook nieuwe gebouwen. Secundair doel was om dit bewustzijn ook visueel te ondersteunen met automatisch gegenereerde 3D afbeeldingen van de gebouwen waarop de PREFAB gevel elementen zijn toegepast.

Om dit doel te bewerkstelligen heeft Novasole de functionaliteiten van haar bestaande Scan App uitgebreid om naast daken nu ook gevels op hun besparingspotentieel te kunnen scannen. Concreet betekent dit dat na de invoer van ieder gewenst adres de gevel delen van bestaande gebouwen geselecteerd of voor nieuwbouw ingetekend kunnen worden. Onderstaand treft u een screenshot van deze stap.



Figuur 20 Gevel Scan App - Screenshot

In één oogopslag en zonder voorkennis is direct inzichtelijk wat de eigenschappen en het besparingspotentieel van de gevels zijn. Na selectie van de gewenste gevels en evt. invoer van het elektriciteitsverbruik in het gebouw wordt direct berekend welke jaarlijkse en totale besparing met de PREFAB gevel elementen bewerkstelligd kunnen worden. Na het achterlaten van de contactgegevens is direct een mooi rapport te downloaden, waarin alle resultaten van de scan en aanvullende informatie nog eens overzichtelijk gepresenteerd worden.

Voor de toepassing van PV panelen in gevels kunnen we op basis van de m², de oriëntatie en het geïnstalleerd vermogens (Wp) per oriëntatie goed uitrekenen wat de potentiële energie-opbrengst is. Dit kunnen we dan vergelijken met de kosten en een terugverdientijd uitrekenen.

De conclusies uit onze analyse met betrekking tot de businesscase van geprefabriceerde gevelelementen is als volgt.

- › Bij geprefabriceerde gevelelementen kun je eenvoudiger uitgaan van standaard en repeterende maatvoering
- › De PV panelen vervangen een ander esthetisch buitenblad (eternit, aluminium, natuursteen, baksteen etc.)
- › Door de montage en E-installatie al voor te bereiden of deels uit te voeren in de fabriek kan een (kosten) efficiëntieslag gemaakt worden op deze kostenposten.

6 Conclusie en aanbevelingen

In het PREFAB project is door de verschillende projectpartners gewerkt aan het ontwikkelen van innovatieve technologieën om gekleurde esthetische zonnepanelen te integreren in prefab gevelelementen. Er is een demonstrator ontworpen, gebouwd en geïnstalleerd. Het ontwerp is gebaseerd op 2 typen Prefab bouwsystemen; een aluminium gevelsysteem en een houten gevelsysteem. Vervolgens zijn er diverse PV-gevelelementen toegevoegd; kristallijn PV panelen met gekleurd glas en gekleurde folie, composiet cassettes met geïntegreerde kristallijn PV panelen en composiet elementen met geïntegreerde dunne film PV-folie (op twee vlakken). Het prototype is op SolarBEAT geïnstalleerd en uitgebreid geanalyseerd en gemodelleerd. Met dit type product wordt een groot potentieel oppervlak voor de opwekking van duurzame energie in de dichtbevolkte stad ontsloten.

Het PREFAB prototype wordt esthetisch positief beoordeeld door bezoekers aan de veldtestlocatie. De zonne-energie opbrengst voor de bemeten gekleurde modules is tot 125 kWh per vierkante meter celoppervlak op de zuidgevel. De opbrengst was hoger voor de modules met keramisch geprinte inkt, dan de modules waarop een kleurfolie was aangebracht. Een verbeterde kleurfolie verhoogde de opbrengst aanzienlijk in vergelijking met de originele kleurfolie. De hoogst gemeten moduletemperaturen waren 65°C.

We concluderen dat we een nieuw product hebben ontwikkeld inclusief zonne-energie technologie, productontwerp, fabricagetools, rekentools en met een beproefd prototype.

7 Publicaties en contactgegevens

7.1 Publicaties

We hebben deelgenomen aan diverse evenementen ter kennisverspreiding. Er zijn presentaties gegeven op de SundayNL (2022), de EU-PVSEC (2021) en de Eurosun conferentie. Er is een paper geschreven voor de proceedings van de Eurosun conferentie (publicatie 2023). Daarnaast hebben we diverse bezoekers rondgeleid op SolarBEAT.

- › Prefabricated Renewable Energy Façades For Cost-Effective Buildings (Prefab), Corry de Keizer, Maarten Dörenkämper and Simona Villa, Eurosun conferentie, Kassel, presentatie (september 2022) en publicatie (in 2023)
- › PREFAB zonne-energie gevels, presentatie door Corry de Keizer op Sunday NL op 8 juni 2022 in Bussum
- › Prefabricated Renewable Energy Façades for Cost-Effective Buildings (PREFAB), presentatie door Simona Villa op de PVSEC conferentie, 8 september 2021, online

7.2 Contactgegevens

Voor meer informatie over dit project kunt u contact opnemen met Corry de Keizer (corry.dekeizer@tno.nl) of met één van de contacten bij de projectpartners.

Energy & Materials Transition

High Tech Campus 21
5656 AE Eindhoven
www.tno.nl

TNO innovation
for life