

TNO 2024 R11369 – 31 mei 2023
Openbaar Eindrapport DEI+ project HTC5

TSE

Auteurs	Wim Soppe, Bart van de Vorst, Monique van den Nieuwenhof, Roland Valckenborg, Dorrit Roosen (TNO) Jeroen Maas (Flexipol) Tom Sengers (HTCE) Margaret de Boer (VDLW) Rhona Disveld (INBO)
Rubricering verslag	TNO Public
Titel	Openbaar Eindrapport DEI+ project HTC5
Verslagtekst	TNO Public
Aantal pagina's	24
Aantal bijlagen	1
Opdrachtgever	RVO
Projectnaam	DEI+ project HTC 5
Projectnummer	DEI721009

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 Inleiding	4
2 Aanpak	5
2.1 Ontwerp	5
2.1.1 Vorm en Kleur	5
2.1.2 Elektrisch ontwerp	6
2.1.3 Finaal gevelontwerp	7
2.2 Vergunningen	8
2.3 Fabricage van de gevelelementen	8
2.4 Testen van de gevelelementen	9
2.5 Installatie van de gevelelementen	11
2.6 Monitoring	12
3 Resultaten	15
3.1 Analyse totaal systeem per dag (AC)	15
3.2 Analyse per gevel per dag (DC)	16
3.3 Analyse per gevel per maand (DC)	16
3.4 Omvormerefficiëntie (DC -> AC) per uur	17
3.5 Analyse per element per dag	19
3.6 Analyse per element voor het complete jaar	20
3.7 Stabiliteit	21
3.8 Conclusie performance	22
4 Disseminatie	23
5 Conclusies	24
5.1 Disseminatie	24
5.2 Vervolg	25

1 Inleiding

Aardgasvrije wijken en gebouwen vragen om lokale opwekking van duurzame elektrische energie om bijvoorbeeld met warmtepompen in de warmtevraag te kunnen voorzien. Voor kantoor- en andere utiliteitsgebouwen is het daarvoor wenselijk dat ook de gevels kunnen worden ingezet voor opwekking van zonnestroom.

Integratie van zonnepanelen in gevels vindt echter nu nog te weinig plaats vanwege de beperkingen in uitvoeringsvormen. Gevelelementen die nu commercieel beschikbaar zijn kunnen gevarieerd worden in kleur en afmeting maar hebben nog altijd een vlak oppervlak. Om de esthetische waarde van de gevels te vergroten zijn vaak gevelelementen met een textuur gewenst en dit project wilde daarin voorzien.

Het doel van het project was om een fabricageproces te ontwikkelen van getextureerde gevelelementen met PV op basis van composieten. Het moest een generiek fabricageproces worden waarmee oneindig veel structuren met willekeurige kleuren kunnen worden gemaakt. Het gebouw HTC 5 diende voor een eerste demonstratie van dit concept. Een deel van de gevel, met een oppervlak van 60 vierkante meter is daarbij voorzien van deze nieuwe PV-gevelelementen.

2 Aanpak

2.1 Ontwerp

Het project is begonnen met het opstellen van een pakket van eisen. In dit pakket van eisen is een onderscheid gemaakt tussen “must have” en “should have” en “could have” eisen. De harde eisen (must have) met betrekking tot de panelen waren:

De zonnecellen in de elementen moeten direct zonlicht kunnen ontvangen.

- *In de elementen moeten de PV-cellen, conform huidig principe, geïntegreerd worden. Het ontwerp zal hierop aan moeten sluiten.*
 - *De oppervlaktes van de panelen zijn vlak (zonder reliëf) en van standaard Flexipol-zijdegls.*
- *Productontwerp moet lossend uit de mal zijn.*
 - *De elementen moeten van glasvezelversterkte polyester worden gemaakt.*
 - *De gevelelementen moeten met Resin Transfer Moulding (RTM) gemaakt kunnen worden.*
- *De elementen moeten aan de achterzijde een kleine ruimte bieden aan de elektronische apparatuur (junction box; ca. 150 x 150 x 30 mm).*
 - *Elk PV-element krijgt een eigen junction box.*
- *Elementen moeten worden opgehangen tussen de 2,5 en 13 m1 +P.*
 - *Elementen moeten minimaal aan een brandvertragende eis van klasse D, s3 voldoen.*
- *De elementen moeten van montagepunten zijn voorzien.*
- *Panelen moeten statisch voldoen aan de geldende normen voor weers- en windinvloeden.*
 - *De elementen moeten constructief een levensduur van 50 jaar hebben.*
- *De te gebruiken zonnecellen moeten een rendement hebben van boven de 16%.*
- *Elektrische veiligheid: het paneel moet voldoen aan de relevante bestaande eisen, zowel voor de bouw als voor PV-panelen.*
 - *Hechting junction box moet elektrisch veilig zijn.*
 - *Doorslagveiligheid van de PV-elementen moet worden bereikt door de elektrisch isolatie die polyester geeft.*
- *De demo moet een eye-catcher zijn en de mogelijkheden van 3-D gekromde gevelelementen demonstreren. De zonnecellen moeten daarom 3-D gekromd kunnen worden.*

2.1.1 Vorm en Kleur

Vervolgens zijn een aantal brainstormsessies gehouden om de vorm en de kleur van de gevelelementen te bepalen. Inbo heeft drie ontwerpvarianten gemaakt (zie onderstaande figuur). Het consortium heeft de middelste van de drie gekozen voor het uiteindelijke

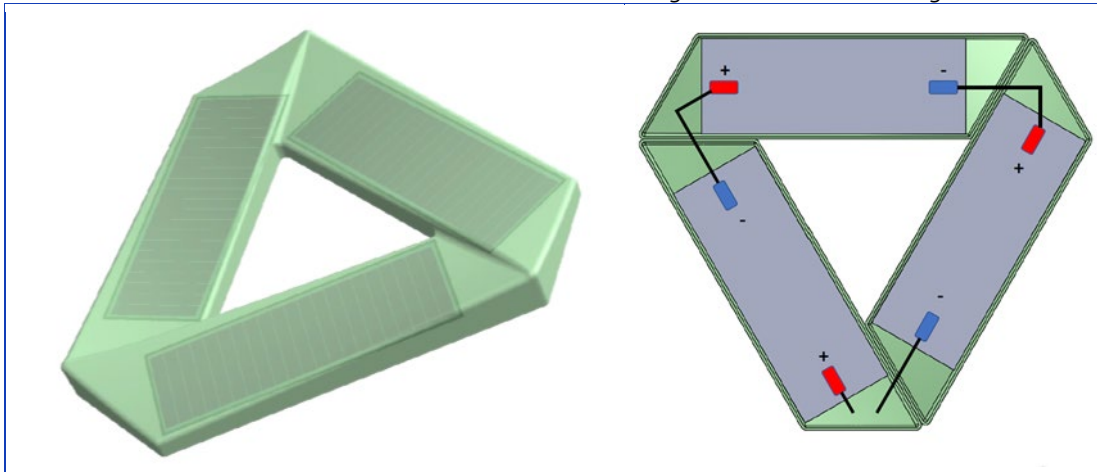
ontwerp. De elementen zouden hierbij in verschillende variëteiten groen moeten worden uitgevoerd.



Figuur 1: Drie ontwerpvarianten voor de gevelelementen.

2.1.2 Elektrisch ontwerp

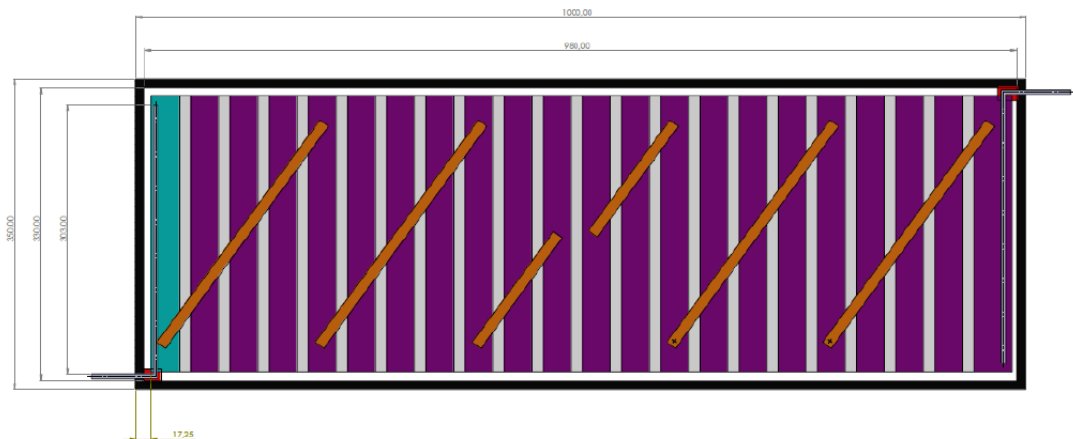
Het geselecteerde ontwerp bestaat uit driehoeken met getordeerde benen. (zie Figuur 2). In elk been wordt een PV-module aangebracht, bestaande uit een reeks in serie geschakelde CIGS-cellen van MiaSolé. De drie modules worden in elk gevelement in serie geschakeld.



Figuur 2: links 3D aanzicht van de gevelelementen; rechts: serieschakeling van de PV-modules.

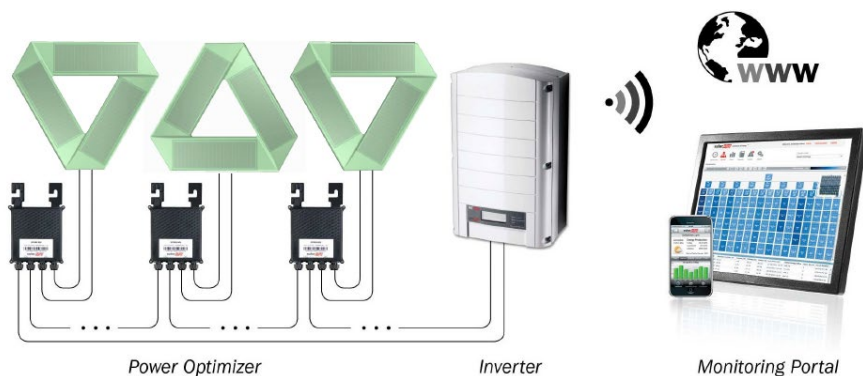
Vervolgens is er een elektrisch ontwerp gemaakt voor de PV modules. Er is voor gekozen om modules van $100 \times 35 \text{ cm}^2$ te gebruiken. Elke module bestaat uit 21 in serie geschakelde cellen. De drie modules in elk gevelement worden in serie geschakeld. Met een rendement

van 17% levert dit een theoretisch maximaal vermogen van 145 Wp per element op. De V_{oc} van elk element is 42,4 V en de I_{sc} is 4,7 A. Het zogenaamde stringen van cellen tot PV modules zou met een efficiëntie van ongeveer 90% mogelijk moeten zijn. Dus is het verwachte vermogen van een element ~130 Wp.



Figuur 3: achteraanzicht van de PV modules bestaande uit 21 in serie geschakelde cellen. De bruine streken bevatten bypass diodes.

Alle gevelelementen worden aangesloten op één string. Omdat gedurende de dag de zoninstraling op de oostzijde nogal verschilt van die op de zuidzijde wordt elk element voorzien van een Power Optimizer. De omvormer wordt geplaatst binnen in gebouw HTC5 en is voorzien van een vaste internetverbinding zodat de monitoring op afstand kan plaatsvinden.



Figuur 4: Schematisch overzicht van de stringconfiguratie van de gevelelementen.

2.1.3 Finaal gevelontwerp

De keuze voor de 100x35 cm² afmetingen van de PV modules bepaalde ook de uiteindelijke afmetingen van de gevelelementen en het aantal elementen dat op de beschikbare ruimte (tussen 2,5 m en 13 m hoogte) aan de gevel geplaatst zou kunnen worden. Het finale gevelontwerp omvatte 29 actieve panelen plus één dummy aan de oostzijde en 15 actieve panelen plus twee dummies aan de zuidzijde. Het geheel wordt gecompliceerd met één dummy paneel op de hoek. De dummy panelen aan de oost- en zuidzijde hangen

beneden 2,5 dan wel boven 13 m vanaf de grond. Om veiligheidsredenen mogen daar geen actieve panelen geplaatst worden.

Na uitvoerig overleg tussen HTCE, Flexipol en INBO is er voor gekozen om de gevelelementen direct in de muur te schroeven in plaats van een minder esthetische rail constructie toe te passen.

Flexipol heeft hiervoor een installatieplan gemaakt en dat is door bouwkundige experts van HTCE beoordeeld en goedgekeurd.

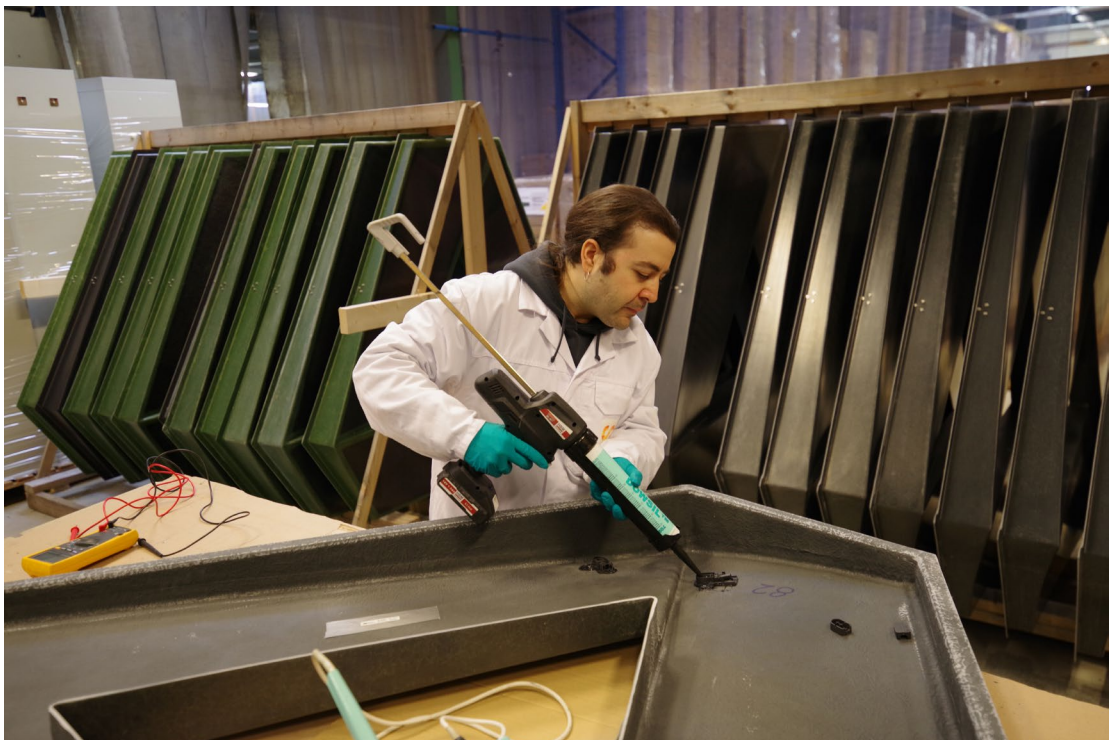
2.2 Vergunningen

Voor de installatie van de gevelelementen was een omgevingsvergunning van de gemeente Eindhoven vereist. Deze is door HTCE aangevraagd en op 12 december 2022 goedgekeurd.

2.3 Fabricage van de gevelelementen

De fabricage van de gevelelementen bestond uit meerdere stappen:

1. Fabricage van de PV-modules. De PV-modules zijn samen door TNO en het bedrijf VDLW gemaakt. Voor elke module werden 21 cellen in serie geschakeld en voorzien van bypass diodes en een vocht barriere folie.
2. Bij Flexipol werden de PV-modules vervolgens tussen gekleurde composietlagen geïnjecteerd, in een mal met de 3-dimensionale driehoek vorm.
3. De gevelelementen zijn vervolgens naar TNO (Petten) gestuurd waar het vermogen van elk paneel is gemeten met een flashtester.
4. Aanbrengen van de junction boxes, verbindingskabels en Power Optimizers (TNO-Eindhoven).



Figuur 5: plaatsen van de junction boxes.

2.4 Testen van de gevelelementen

Alle gevelelementen met PV zijn getest met een flashtester om het vermogen van elk element te bepalen. Er zijn 46 elementen gemaakt en alle voldeden aan de gestelde vermogenseisen. De aperture area efficiency varieerde tussen 13,8% en 15,5% met een gemiddelde waarde van 14,9%. Dit betekent dat de epoxy laag waarin de PV module is ingegoten tot een relatief rendementsverlies van ongeveer 10% heeft geleid.

Eén gevelelement is onderworpen aan een versnelde verouderingstest in een Damp Heat (DH) kamer.

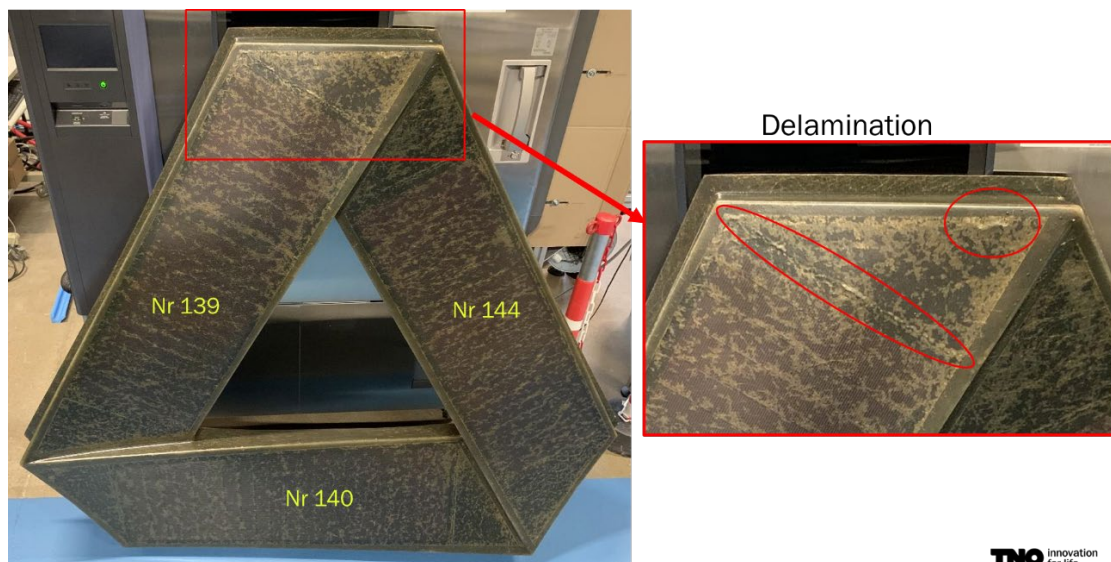


Figuur 6: Gevelelement in Damp Heat kamer.

Na 500 uur DH trad er duidelijke visuele degradatie op door intrusie van vocht in de epoxy. De PV modules vertoonden slechts geringe degradatie; voornamelijk stroomverlies doordat de epoxylaag minder transparant geworden was. De meetresultaten staan in onderstaande tabel.

Tabel 1: Performance van de drie modules in het gevelement dat is getest in DH.

Sample code	139			140			144		
Time (h)	0	377	500	0	377	500	0	377	500
Irr. (W/m2)	973	971	971	973	971	971	973	971	971
Area (cm2)	2850	2850	2850	2850	2850	2850	2850	2850	2850
Voc (V)	15,2	15,1	14,9	15,2	15,2	15,0	15,2	15,2	15,0
Isc (A)	4,0	3,8	3,7	4,1	3,8	3,7	4,1	3,8	3,7
Jsc (A/cm2)	0,0014	0,0013	0,0013	0,0014	0,0013	0,0013	0,0014	0,0013	0,0013
Pmax (W)	45,1	40,8	38,5	45,4	42,3	39,8	45,7	41,8	39,1
Vmp (V)	12,3	12,0	11,8	12,3	12,3	12,0	12,3	12,2	11,8
Imp (A)	3,7	3,4	3,3	3,7	3,4	3,3	3,7	3,4	3,3
Eff (%)	15,8	14,3	13,5	15,9	14,8	14,0	16,0	14,7	13,7
Rseries (KOhms.cm2)	1,4	1,6	1,7	1,3	1,5	1,6	1,3	1,6	1,7
Rsh-L (Ohms.cm2)	353063	738457	829013	92116	454454	134262	288091	192977	367784
Rsh-D (Ohms.cm2)	8323832	13708878	9871281	6324330	8297457	8211122	7102468	10394068	15087674
FF (%)	73,5	71,7	70,9	72,8	72,7	71,6	72,8	71,8	71,0



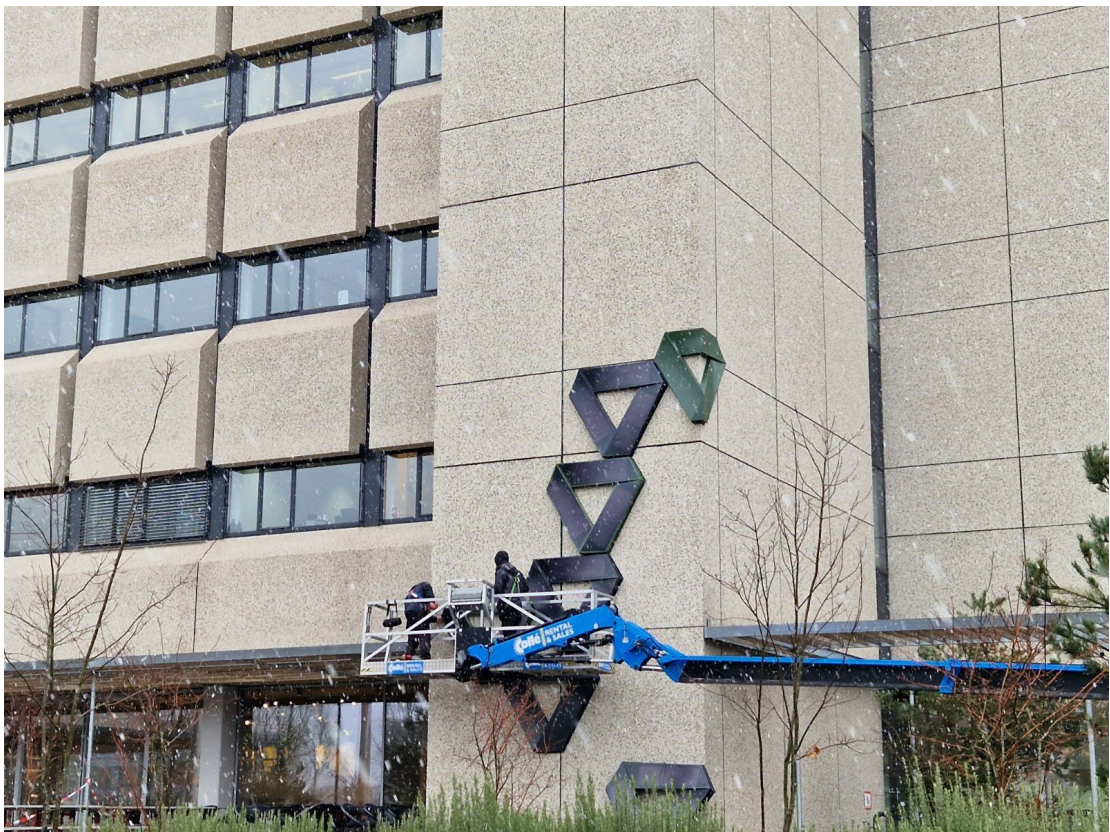
Figuur 7: Gevelement na 500 uur DH.

Een ander gevelement is in augustus 2022 geplaatst op de westgevel van HTC5 om de visuele beleving ervan te kunnen ervaren. Dit element is in het begin van 2023 weer verwijderd.



Figuur 8: Dummy paneel aan de westgevel van HTC 5.

2.5 Installatie van de gevelelementen



Figuur 9: installatiewerkzaamheden op 6 maart 2023.

Op maandag 6 maart is de installatie van de gevelelementen begonnen. Helaas waren de weersomstandigheden die week erg slecht. Toch kon de mechanische installatie in drie dagen worden afgerond. Tijdens de installatie bleek dat een aantal PowerOptimizers niet op een handige plek in het element zaten. Op locatie zijn die PO's op een andere positie op het element vastgezet.

De elektrische aansluiting vond enkele weken later plaats. Daarbij kwam in eerste instantie aan het licht dat de string ergens een onderbreking had.

Op 7 april is daarom m.b.v. een hoogwerker een inspectie uitgevoerd en het bleek dat de verbinding tussen de oost- en de zuidgevel via het hoekelement niet goed was. Deze verbinding is toen hersteld, maar daarmee werkte het systeem nog steeds niet.

Op 30 mei is er een nieuwe inspectie uitgevoerd, met specialisten van SolarEdge en Soltronergy en toen bleek dat de PO van een element op de oostgevel niet goed was aangesloten. String en module aansluiting waren verwisseld, met als gevolg dat de totale stroom van de string door de PO ging. Deze verwisseling van stringkabel met modulekabel kon gebeuren doordat SolarEdge recent de kabellengtes heeft aangepast. Het is te verwachten dat deze fout in het veld (wereldwijd!) vaker kan gaan gebeuren. Uiteindelijk was de samenwerking met SolarEdge in deze troubleshooting een grote win-win. Wij hebben de fout met de kabelverwisseling ontdekt. En SolarEdge heeft snelle feedback uit het veld op deze productwijziging en overweegt nu de kabels in een volgende model PO anders te gaan configureren om dit soort fouten te voorkomen.

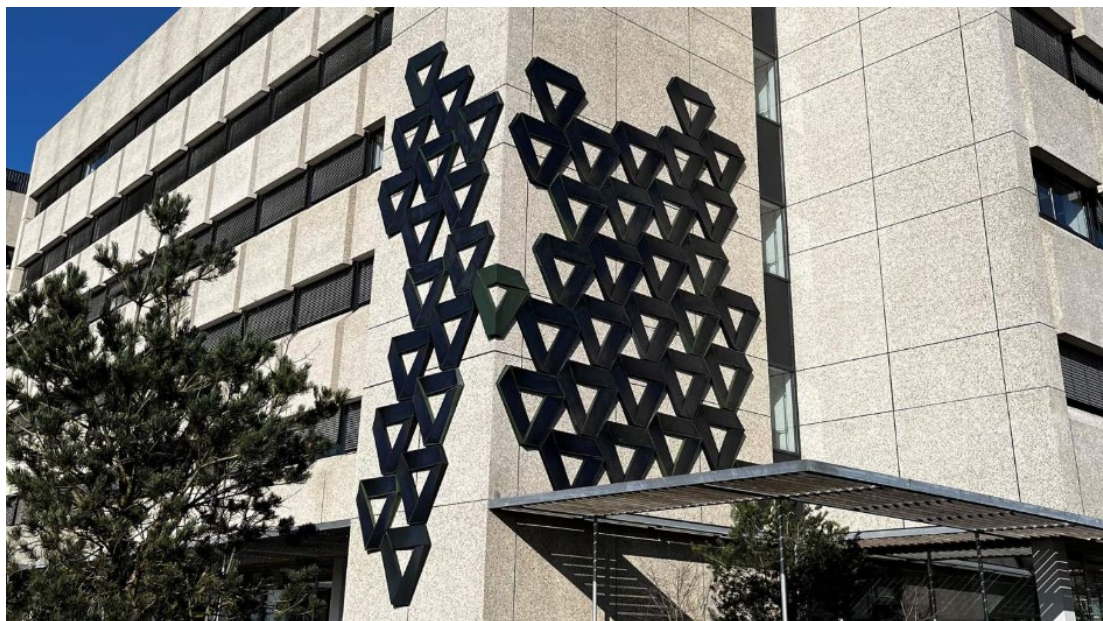
In conclusie, deze foutief aangesloten PO is vernieuwd, de aansluiting is correct gemaakt en sindsdien werkt het systeem zonder problemen.



Figuur 10: feestelijke ingebruikname van het systeem (achter vlnr: Bart vd Vorst (TNO), Roland Valckenborg (TNO), Jeroen Maas (Flexipol), Rhona Disveld(INBO); voor vlnr: Corry de Keizer (TNO), Lenneke Sloof (TNO), Wim Soppe (TNO), Margaret de Boer (VDLW), Monique vd Nieuwenhof (TNO)).

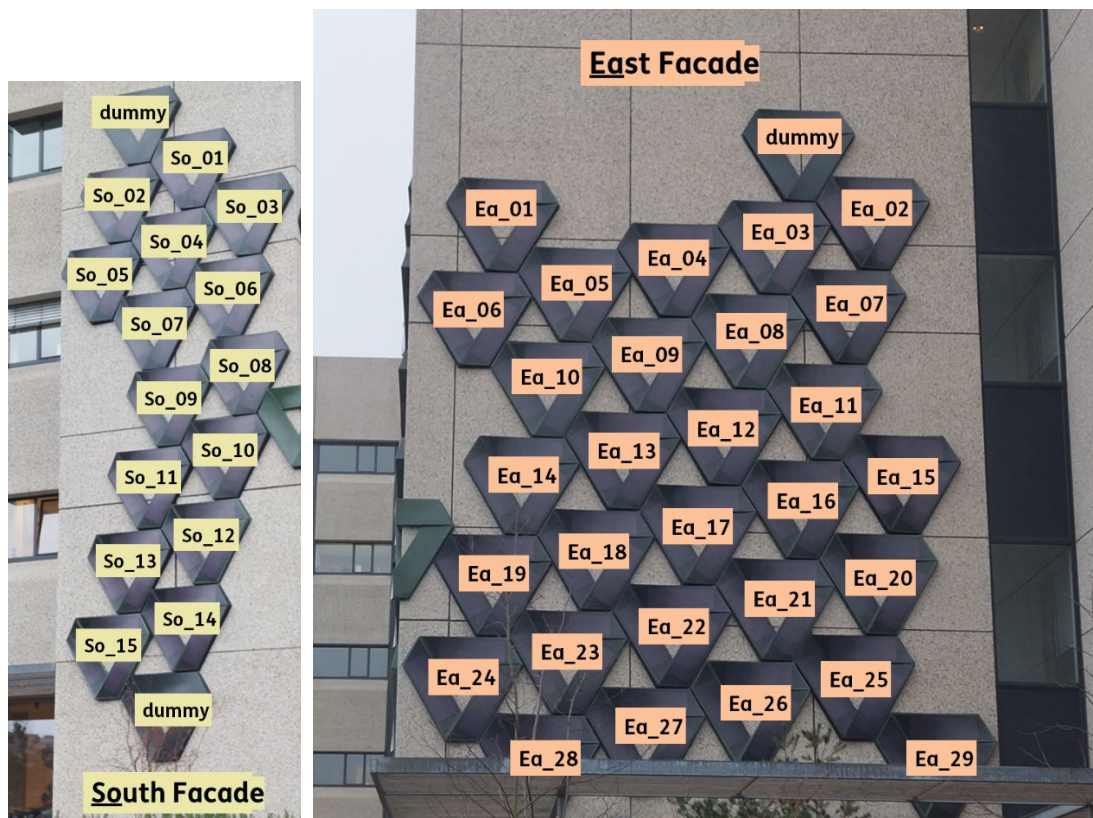
2.6 Monitoring

Om de outdoor monitoring goed te kunnen uitvoeren, dient er een zorgvuldige administratie plaats te vinden van welke PV-modules er in welk gevelement zitten, van de koppeling van een gevelement met zijn eigen PO, en van de uiteindelijke mapping van de SolarEdge monitoring methode met een nieuw label waarmee de analyse kan plaatsvinden.



Figuur 11: Totaaloverzicht van alle PV-modules.

Het voert te ver om hier alle technische details van het labelen te gaan behandelen. Zie in Appendix X.1 t/m X.3 de figuren en tabellen waarmee alle details zijn vastgelegd. Voor de verdere analyse gebruiken we dan een label met het format 'So_xx' hetgeen staat voor SouthFacade element xx en 'Ea_yy' hetgeen staat voor EastFacade element yy.



Figuur 12: Labeling voor verdere analyse van de outdoor monitoring.

Voor de meting van de zonne-instraling maken we gebruik van zogenaamde pyranometers op de TNO outdoor research facility SolarBEAT¹. Omdat deze research facility hemelsbreed slechts 5 km verwijderd is van de HTC5 gevel kunnen we gebruik maken van deze hoogkwalitatieve zonne-instralings metingen. Het tijdsverschil van bewolking op SolarBEAT en HTC5 is dusdanig klein (orde paar minuten) dat dit weg middelt bij de gehanteerde tijdsresolutie van de analyse van 1 uur.

Voor de opbrengst resultaten maken we gebruik van de SolarEdge (SE) monitoring. De meetnauwkeurigheid van +/- 2.5% is ruim voldoende om deze gevels nauwkeurig te kunnen bemeten. Omdat we met de SE-API de meetdata van elke individuele PO (en daarmee dus elk individueel gevelelement) binnenhalen, kunnen we de data een slag dieper analyseren dan met de standaard monitoring van SolarEdge (<https://www.solaredge.com/nl/producten/software/monitoring>).

Het meetjaar loopt van 1 juni 2023 t/m 31 mei 2024.

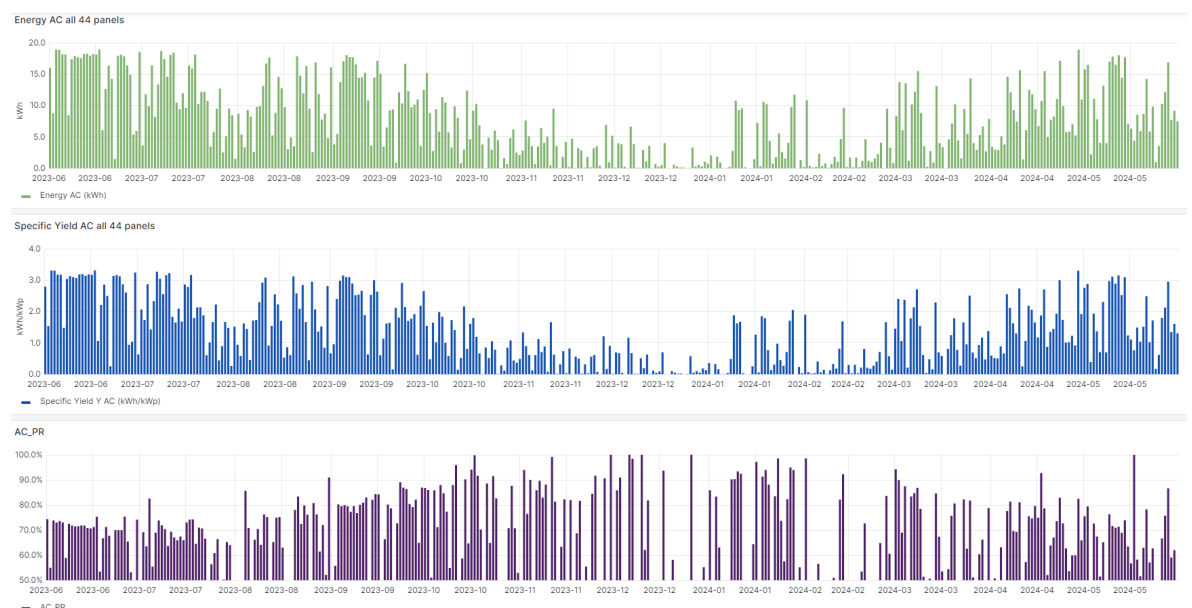
¹ www.tno.nl/solarbeat

3 Resultaten

De monitoring van de meetresultaten leidt tot de volgende analyses.

3.1 Analyse totaal systeem per dag (AC)

In eerste instantie is het interessant om de totale opbrengst van het complete systeem per dag te bekijken. Er zijn dan drie grafieken van belang, zie Figuur 13. In de eerste grafiek plotten we de AC energie [kWh] die er per dag ingevoerd wordt in het elektriciteitsgrid (in gebouw HTC5). In de volgende grafiek delen we dat door de constante factor van de totale capaciteit R . De flash-data uit de Appendix opgeteld voor alle 44 elementen geeft $R=5756$ Wp. Dit levert de zogenaamde specific yield $Y=E/R$ met dimensie [kWh/kWp]. Uiteindelijk delen we deze specific yield per dag door de zonne-instraling per dag (niet in de grafiek weergegeven). Dat levert de zogenaamde Performance Ratio, PR. Van de PR (voor AC energie) geldt dat deze alleen 100% kan zijn als de temperatuur van de zonnepanelen altijd 25 °C zou blijven (onmogelijk) en als de omvormer alle DC-stroom perfect in AC-stroom zou omzetten (onmogelijk). Onder installateurs en vakgenoten wordt er voor het klimaat van Nederland voor een onbeschaduwde opstelling meestal een vuistregel gehanteerd dat de $AC_PR \approx 80\%$.



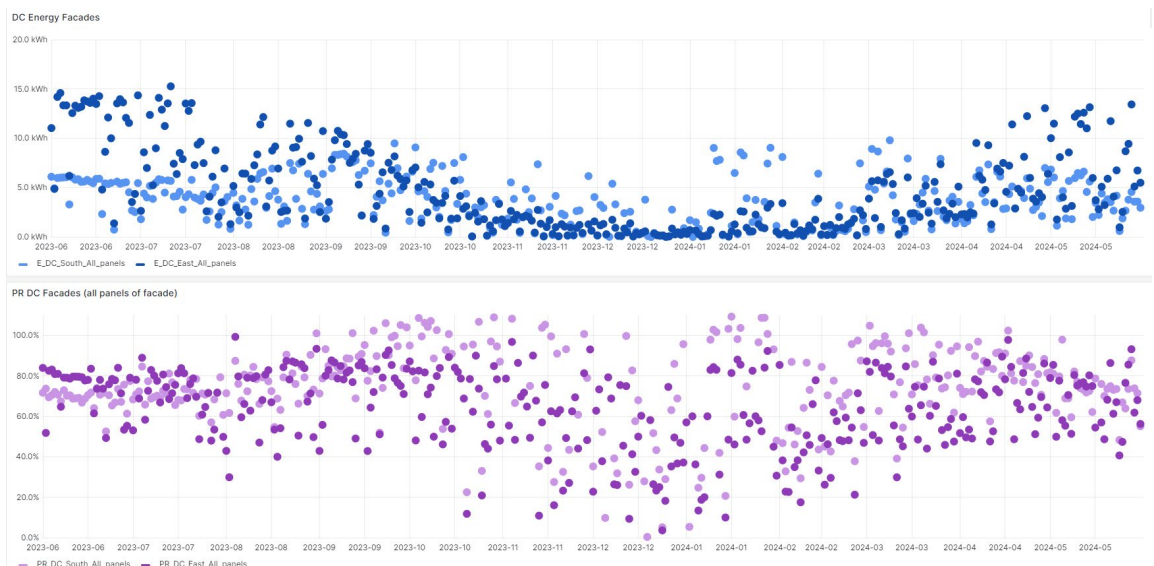
Figuur 13: Dagelijkse AC Energie en Performance Ratio, PR, van het complete systeem. Top: E [kWh]; midden: specific yield Y [kWh/kWp]; onder: PR [%]. Zie tekst voor meer uitleg.

In Figuur 13 zien we duidelijk de fluctuerende dagelijkse hoeveelheid zonne-instraling, maar ook de seizoentrend. Let op: we zijn begonnen en geëindigd in het voorjaar. De winter (2023/2024) zit dus midden in de tijdslijn. Voor de winter geldt dat er in absolute zin (E en Y) de laagste opbrengsten zijn, echter in PR (onderste grafiek) worden hier de hoogste waarden afgelezen vanwege de koude dagen. Waarom niet alle koude dagen tot $PR \approx 100\%$ leiden zal verderop in de tekst blijken.

3.2 Analyse per gevel per dag (DC)

In bovenstaande Figuur 13 is de bijdrage vanuit alle elementen weergegeven, terwijl de zonne-instraling op de zuid- en oostgevel zeer verschillend zijn. Daarom plotten we nu een vergelijkbare figuur voor de zuid en oost gevelelementen separaat. We laten de grafiek van de specifieke opbrengst (Energie gedeeld door de power capaciteit per gevel) weg, omdat deze slechts een tussen stap is naar de PR.

Voor een goede vergelijking zou een analyse van AC-energie het meest logisch zijn. Dit is echter per definitie onmogelijk. Immers alle gevelelementen (alle PO's) zitten in één DC-string in serie en komen als geheel op de DC-input stekker van de omvormer uit. We kunnen dus alleen de DC opbrengsten per gevel analyseren, maar dit is zeker interessant!



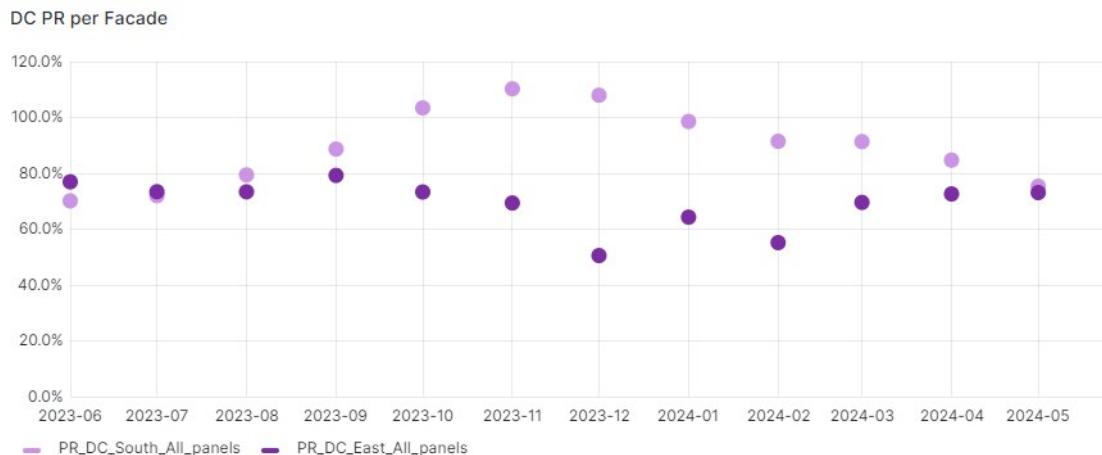
Figuur 14: Dagelijkse DC Energie en Performance Ratio, PR per gevel. Top: E [kWh]; onder: PR [%]. Zie tekst voor meer uitleg.

De topgrafiek van Figuur 14 laat duidelijk zien dat de totale opbrengst van de zuidgevel altijd lager is dan de oostgevel (m.u.v. een paar dagen in de winter). Dit is gemakkelijk te verklaren door het feit dat er in de oostgevel ongeveer twee keer zoveel gevelelementen zitten dan in de zuidgevel (29 vs 15).

In de onderste grafiek van Figuur 14 is zijn de resultaten van de PR gecorrigeerd voor het absolute vermogen weergegeven. Nu zien we dat de beide gevels ongeveer hetzelfde presteren. Vanwege de dagelijkse weersfluctuaties zit er veel ruis in deze resultaten; dit is gebruikelijk voor een PR-analyse en is ook altijd groter in de winter dan in de overige maanden.

3.3 Analyse per gevel per maand (DC)

Om beter de seizoentrend te analyseren is het handiger om de maandsommen te evalueren.

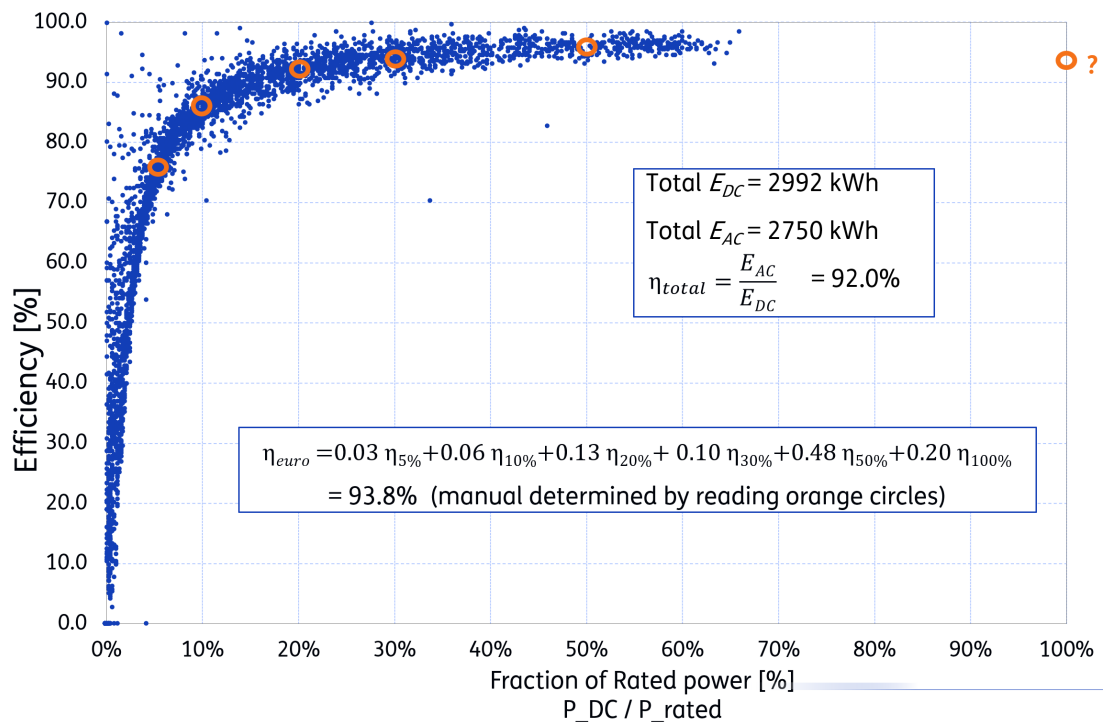


Figuur 15: Performance Ratio PR (DC) als functie van maand per gevel.

Nu zien we in Figuur 15 een duidelijke seizoentrend die voor de oostgevel anders uitpakt dan de zuidgevel. In het algemeen zullen PV-systemen in de wintermaanden een hogere PR hebben dan in zomermaanden, vanwege de lagere temperaturen. De curve van de zuidgevel volgt dus de verwachting. Waarbij verder opgemerkt kan worden dat een absoluut niveau van PR boven de 100% voor de milde winter 2023/2024 vrij hoog is. Dit betekent dat de gevelelementen goed geventileerd zijn; beter geventileerd dan voor de meer standaard dakinstallaties. De lagere PR van de oostgevel zou veroorzaakt kunnen zijn door de efficiëntie van de DC->AC omzetting, zie volgende paragraaf.

3.4 Omvormerefficiëntie (DC -> AC) per uur

Normaal zal men voor de efficiëntie van de omvormer (van de omzetting van DC naar AC) slechts gebruik maken van de datasheet van de leverancier. Echter, omdat we in deze installatie een zeer gedetailleerde datastroom hebben, kunnen we de zogenaamde omvormer efficiency curve ook zelf bepalen. Hiervoor delen we voor elk uur de som van de DC opbrengsten, P_{DC} , (van de 44 elementen) door de totale AC opbrengst als y-as. En op de x-as zetten we de fractie van deze P_{DC} t.o.v. het nominale vermogen. Het nominale vermogen van de omvormer voor deze opstelling, $P_{rated} = 5000$ Wp. Zie Figuur 16 voor alle 8760 uren van het gemeten jaar.



Figuur 16: Efficiency := P_{AC}/P_{DC} als functie van fractie van P_{DC} t.o.v. nominaal vermogen P_{rated} . Elk uur van het meetjaar is een meetpunt. Voor uitleg van legenda's, zie tekst.

De vorm van de blauwe meetpunten in Figuur 16 is min-of-meer standaard voor PV-omvormers. Voor de lagere vermogens (<10% t.o.v. nominaal vermogen) is er een sterk afvallende trend; voor het grootste deel van de vermogens (tussen 10% en 90% t.o.v. nominaal) is er een plateau; en voor de hogere vermogens (>90% t.o.v. nominaal) valt de curve weer licht af. Dit laatste deel van de curve hebben we niet kunnen meten.

In de bovenste legenda staan de totale hoeveelheid energie voor het complete systeem voor het complete meetjaar. Dat zijn resp. voor de DC Energie 2992 kWh en voor de AC Energie 2750 kWh. Een totaal meetjaar efficiëntie, η_{total} , van 92.0% volgt dan uit de deling van deze twee parameters. Omdat deze η_{total} afhankelijk is van de specifieke installatie kan deze niet door de fabrikant gespecificeerd worden in de datasheet. Vroeger gaf de fabrikant slechts de maximale efficiëntie. Echter daar kun je in de praktijk ook niet veel mee, want dan weet je alleen de top van het plateau van Figuur 16, hetgeen slechts voor enkele uren van het complete jaar zal gelden. En daarom is er de zogenaamde Euro efficiëntie geïntroduceerd, η_{Euro} . De definitie hiervan staat in de onderste legenda. De weegfactoren zijn door de internationale IEC-commissie bepaald als zijnde de best mogelijke representatie van de hoeveelheid uren (fractioneel) die het systeem in een bepaalde toestand is. Gebruik makend van deze definitie lezen we nu (handmatig) met de oranje cirkels de efficiëntie af. Voor de η_{100} hebben we geen enkel meetpunt (hetgeen ook logisch is want dit komt theoretisch nooit voor in de gevel van HTC5), maar schatten we op de plek van de meest rechtse oranje cirkel. Daaruit komt dan een $\eta_{Euro} = 94\%$, waarbij de foutenmarge lastig in te schatten is vanwege het handmatig uitlezen van de afzonderlijke η 's. De datasheet van SolarEdge vermeldt $\eta_{Euro} = 97.3\%$. Gezien de beperkte nauwkeurigheden die leiden tot 1 getal voor een compleet jaar, mogen deze resultaten gezien worden als goed met elkaar in overeenstemming.

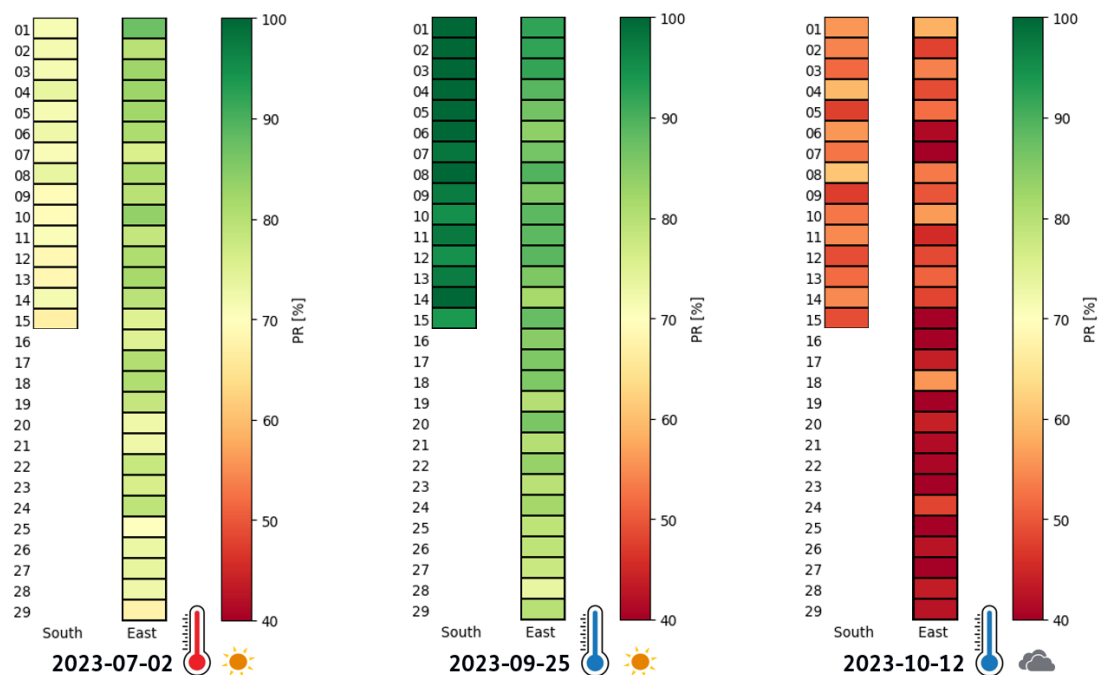
Tot slot dient er opgemerkt te worden dat de gebruikte SE-omvormer 5000 (Wp) eigenlijk te groot gedimensioneerd is. Waardoor dus onze meetpunten te veel in het linker werkgebied van de omvormer terecht komen. Dit is echter een bewuste keuze geweest. Immers, we willen geen meetpunten missen vanwege potentieel clippen van het DC-vermogen. Daarbovenop is ook de keuze voor een type SE-PO S440 per gevel element bewust genomen. Hierdoor zijn we in staat om per element de opbrengst te meten en analyseren. Voor de zeer lage zonne-instralingsdagen zal er dus een vermogen uit de PV-modules komen die relatief erg laag is gegeven het bereik waarvoor de PO ontworpen is.

Dat laatste geeft dan ook de uiteindelijke verklaring voor de relatief lage PR van de elementen op de oostgevel in de winter. Voor bewolkte winterse dagen is de zonne-instraling op de zuidgevel nog enigszins prima gezien de positie in de efficiëntie curve. Terwijl de zonne-instraling op de oostgevel zodanig laag is, dat de omzettings-efficiëntie in het zeer lage efficiëntie deel ($P_{DC} < 5\%$ t.o.v. nominaal) van die curve zit.

Het is goed om te realiseren dat deze net-niet-optimale systeemdimensionering het gevolg is van de bewuste keuze om elk gevel element afzonderlijk te kunnen bemeten en clipping ten alle tijden te willen voorkomen. Voor een commerciële installatie kan men eenvoudigweg 2 of zelfs 3 gevelelementen elektrisch parallel aansluiten op 1 PO. Daarmee verlies je dan de mogelijkheid van monitoring per element, maar zal je een iets betere systeem efficiëntie krijgen. Verwacht echter geen wonderen, want je bent dan dus voornamelijk bezig om de efficiëntie van de oostgevel voor de wintermaanden terug te brengen naar die van de zuidgevel. En qua absolute kWh-en zijn die dagelijkse opbrengsten beperkt.

3.5 Analyse per element per dag

Omdat deze twee gevels het hele jaar door schaduvrij blijven, zijn dit fantastische systemen om nog een niveau dieper te analyseren. We hebben gekeken naar de PR per uur per element. Vanwege de grote hoeveelheid data is dit alleen nog maar te visualiseren met filmpjes waarbij de uurlijkse PR in een 'color map' als slide-show voorbijkomt. Deze filmpjes hebben een grillig karakter en zijn lastig te duiden vanwege de weersinvloeden. Maar de PR 'color map' per dag laat wel mooie resultaten zien. In de volgende figuur nemen we achtereenvolgens een warme zomerse dag met zon (2 juli 2023), een frissere herfst dag met zon (25 september 2023) en een bewolkte herfst dag (12 oktober 2023).

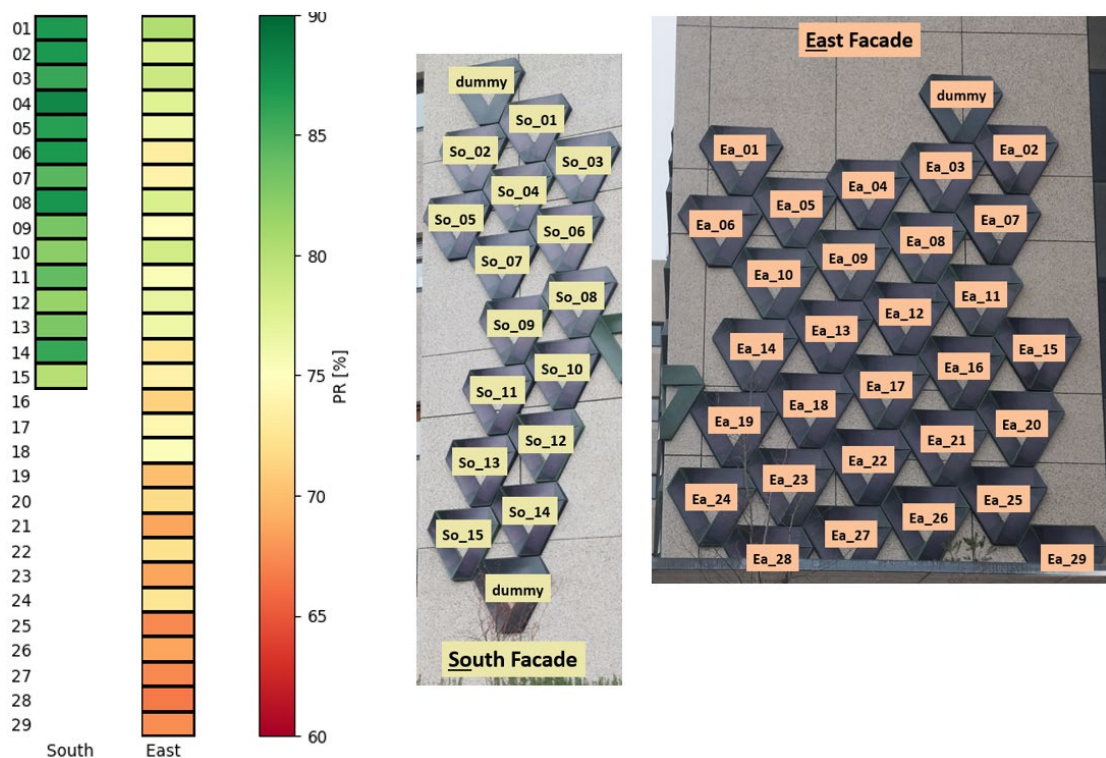


Figuur 17: PR color map voor 3 verschillende dagen; van links naar rechts: zonnig op warme dag, zonnig op frissere dag, bewolkte frisse dag. Let op: de elementen zijn met hun label van boven naar beneden schematisch weergegeven, waardoor het lijkt dat het onderste element van de zuidgevel op dezelfde hoogte hangt als het middelste element van de oostgevel; dit is uiteraard een artefact van de methode van weergave.

Uit Figuur 17 kunnen we een aantal observaties halen. Ten eerste zijn de kleuren van de zuidgevel bijna altijd meer naar het groen verschoven dan de kleuren van de oostgevel. Dit komt overeen met het feit dat de elementen op de zuidgevel bijna altijd net iets beter in de efficiency curve van de PO zitten; het gaat over kleine verschillen. Ten tweede zien we in de vergelijking van de 2 zonnige dagen dat op de frissere dag alle elementen een betere PR laten zien dan de warme zomerse dag. Dit is het overduidelijke temperatuureffect dat altijd in een PV-systeem analyse naar boven komt. Ten derde zien we op de bewolkte herfstdag zeer lage PR's. Er is gekozen voor een dag met een zeer laag zonne-instralingsniveau om het effect zo duidelijk mogelijk naar voren te laten komen. De verklaring is gegeven in de vorige paragraaf over de efficiëntie van de omvormer en PO's. Ten vierde, lijkt het erop dat hoe hoger in de gevel, hoe beter de PR, ongeacht of het in de zuid- of oostgevel is. In de volgende paragraaf wordt dit vermoeden nader onderzocht.

3.6 Analyse per element voor het complete jaar

De PR 'color map' kan ook gecomponeerd worden voor alle 8760 meetpunten per element. Dat geeft ons de jaargemiddelde PR per element.



Figuur 18: DC_PR 'color map' per element. Voor gemak van aflezing is de element labeling aan de rechterzijde nogmaals weergegeven. Element So_15 zit dus op dezelfde hoogte in de gevel als elementen Ea_28 en Ea_29.

Het vermoeden dat hogere elementen een betere PR hebben dan de lagere elementen wordt hiermee bevestigd. Waarom zou dit zo zijn? Hiervoor hebben we ook nog een temperatuuranalyse per element op basis van het voltage van elk gevelelement uitgevoerd. De hoofdconclusie van deze analyse is, dat we geen significant temperatuurverschil kunnen zien tussen de afzonderlijke elementen. Blijkbaar is de mechanische constructie dusdanig open, dat de wind alle elementen op een ongeveer vergelijkbare manier koelt.

Daarmee blijft er nog één mogelijke verklaring over voor de hogere PR voor de hogere gevelelement: dat er hoog in de gevel net iets meer zonne-instraling is dan lager in de gevel. Om deze hypothese te toetsen hebben we nog een kort literatuuronderzoek gedaan. Voor zover wij weten zijn geen onderzoeken gedaan waarbij de hoeveel zonne-instraling op meerdere plekken in de gevel gemeten is met pyranometers. Wél bestaat er literatuur over simulaties van zonne-instraling in gevels. En die laten inderdaad zien dat de hoeveelheid zonne-instraling toeneemt naarmate je hoger in de gevel komt, hoewel dit subtiele effecten zijn. Hiermee kunnen we dus de kleine correlatie tussen PR en hoogte in de gevel, van Figuur 18 verklaren.

3.7 Stabiliteit

In een test van 1 jaar is het onmogelijk om de kleine lange termijn degradatie-effecten te kunnen meten zoals die door de indoor klimaatkamer metingen aan individuele elementen (zie paragraaf 2.4) zijn voorspeld. Echter andersom is het wél zo, dat bij andere projecten van TNO (o.a. op tno.nl/solarbeat) snelle degradatie van de performance terug te zien was in de PR-grafiek van het eerste jaar.

Daarmee kunnen we dus concluderen dat de meetresultaten van het 1^e jaar van dit project op HTC5, geen enkel teken van versnelde degradatie laten zien.

Het is de ambitie van TNO om de overall performance van het systeem de komende jaren in de gaten te blijven houden. Met een relatief kleine inspanning (na het projecteerde) kan er dan toch scherp gemonitord blijven worden op eventuele degradatie. Een degradatie van ongeveer 0.5% tot 1.0% per jaar is gebruikelijk voor alle PV-technologieën. Het mag duidelijk zijn dat we pas na ongeveer 5 à 10 jaren meetdata hierover statistisch verantwoorde conclusies kunnen trekken.

3.8 Conclusie performance

- De totale DC opbrengst van het complete systeem over het complete meetjaar van 1 juni 2023 t/m 31 mei 2024 is 2992 kWh.
- De totale AC opbrengst van het complete systeem over diezelfde periode is 2750 kWh.
- Daarmee is de totale DC->AC omvormerefficiëntie 92%.
- Vanuit de omvormerefficiëntie hebben we een η_{Euro} bepaald van 94% die goed overeenkomt met datasheetwaarde van 97%.
- Met gebruikmaking van de zonne-instraling gemeten op het nabije SolarBEAT concluderen we dat er een totale DC PR is geweest van 78% en een totale AC_PR van 71% (tussen deze twee kentallen zit de omvormer efficiëntie).
- Dat de AC_PR van 71% lager uitpakt dan de vuistregel voor het Nederlandse klimaat van ongeveer 80% kunnen we begrijpen uit de achterblijvende efficiëntie van de oostgevel element voornamelijk in de winter.
- Bij een commerciële installatie zal de installateur waarschijnlijk 2 of 3 elementen parallel aansluiten op 1 PO. Daarmee gaat de opbrengst informatie per element ‘verloren’, maar wordt het totale systeem rendement lichtjes verhoogd.
- Voor de som van alle elementen op de zuidgevel geldt een $\text{PR}_{\text{DC}} = 84.5\%$. De AC PR hebben we niet, want de elektronen van de zuidgevel stromen met de elektronen van de oostgevel samen naar dezelfde DC-input connector van de omvormer. Echter als we nu PR_{AC} uitrekenen met $\text{PR}_{\text{AC}} := \text{PR}_{\text{DC}} * \eta_{\text{total}}$, dan vinden we $\text{PR}_{\text{AC}} = 84.5\% * 0.92 = 78\%$ die dus dicht op de marktconforme waarde zit.
- Dankzij de nauwkeurige analyse hebben we een aanwijzing voor het feit dat hogere elementen iets meer zonne-instraling vangen dan lagere elementen. Dit is dan een experimentele validatie van hypothese uit de literatuur gebaseerd op simulaties.
- Er is geen enkele mate van degradatie meetbaar.

4 Disseminatie

- Op 26 april is er vanuit TNO een persbericht over het project verstuurd.
- Op de website van TNO staat sinds 26 april een artikel over het project ([Creatief zonnepanelensysteem als klimop tegen gevel High Tech Campus \(tno.nl\)](#))
Persbericht en TNO publicatie hebben geleid tot een groot aantal (her)publicaties:
 - [Solar Magazine - Project van de week | Zonnepanelen als klimop tegen gevel High Tech Campus](#)
 - [Creatief zonnepanelensysteem als klimop tegen gevel High Tech Campus Eindhoven \(brainporteindhoven.com\)](#)
 - [PV-panelen als klimop tegen gevel High Tech Campus Eindhoven \(installatiejournaal.nl\)](#)
 - [Dit zonnepanelensysteem gaat als een klimop tegen de muur op | Change Inc.](#)
 - [Consortium plaatst zonnepanelen als klimop op gevel van gebouw - Maakindustrie Nieuws](#)
 - [Creatief zonnepanelensysteem als klimop tegen gevel High Tech Campus Eindhoven - etotaal.nl](#)
 - [Solar365 - Gevelmodules creatief zonnepanelensysteem](#)
- Er is een paper geschreven voor Energy & Buildings ([Energy and Buildings | Journal | ScienceDirect.com by Elsevier](#))
- Het project zal worden gepresenteerd op de conferentie Advanced Building Skins (28-29 October 2024, Bern, Switzerland, [Retrofitting the Building Envelope \(abs.green\)](#))

5 Conclusies

Het DEI+ project HTC5 is uitgevoerd in een vruchtbare samenwerking tussen de partners Flexipol, INBO, HTCE, VanderLeege Werkt en TNO. Er is een esthetisch hoogstaand composiet gevelement met PV ontwikkeld waarmee een visueel aantrekkelijke demo op gebouw HTC5 is gerealiseerd.

De inbreng van de projectpartners was in hoge mate complementair: INBO heeft de vormgeving van de gevelementen bepaald; TNO heeft het PV systeem ontworpen (van cell tot aan complete systeem), getest en gemonitord; VDLW heeft de montage van de PV-laminaten uitgevoerd; Flexipol heeft de gevelementen gefabriceerd en op de gevel gemonteerd en HTCE heeft de installatie gefaciliteerd.

De gevelementen hebben tweevoudig gekromde voorvlakken en daarom is er voor gekozen om flexibele dunne film CIGS cellen te gebruiken voor de PV-laminaten. Elk gevelement bevat drie seriegeschakelde PV-laminaten van in totaal 130 Wp en een eigen Power Optimizer. Er is een versnelde degradatietest (500 uur Damp Heat: de helft van tijd die benodigd is voor IEC certificatie) uitgevoerd aan één gevelement, waaruit een functionele degradatie van ongeveer 10% naar voren kwam. Deze degradatie ontstond voornamelijk doordat de epoxy minder transparant werd.

De demo omvat 44 gevelementen en heeft daarmee een nominaal vermogen van 5,7 kWp. Het PV-systeem is een jaarlang intensief gemonitord. De DC jaaropbrengst was 2992 kWh en de AC jaaropbrengst 2750 kWh. Dit is ongeveer de helft van de jaaropbrengst van een 5,7 kWp systeem dat ideaal naar de zon is georiënteerd, maar in lijn met de verwachte opbrengst voor een systeem dat verticaal hangt en voor 2/3 op het oosten is georiënteerd. Met gebruikmaking van de zonne-instraling gemeten op het nabije SolarBEAT concluderen we dat er een totale DC Performance Ratio is geweest van 78% en een totale AC Performance Ratio van 71% (tussen deze twee kentallen zit de omvormer efficiëntie).

Versnelde verouderingstesten die in dit project zijn uitgevoerd aan één gevelement hebben laten zien dat door inwerking van vocht het composietmateriaal optisch minder transparant kan worden waardoor de opbrengst van de ingebouwde PV laminaten kan verminderen. Dit is een lange-termijn effect en was niet significant waarneembaar gedurende het jaar monitoring van het demosysteem.

5.1 Disseminatie

Het project heeft veel positieve publiciteit gekregen.

Onder andere de volgende media hebben aandacht aan het gevelsysteem gewijd:

[Solar Magazine - Project van de week | Zonnepanelen als klimop tegen gevel High Tech Campus](#)

<https://www.installatiejournaal.nl/15635/pv-panelen-als-klimop-tegen-gevel-high-tech-campus-eindhoven>

[Dit zonnepanelensysteem gaat als een klimop tegen de muur op | Change Inc.](#)

Verder is een artikel over het project geaccepteerd voor publicatie in het tijdschrift Energy&Buildings.

Het project zal bovendien gepresenteerd worden op de conferentie Advanced Building Skins 2024 (Oktober 2024 in Bern).

5.2 Vervolg

Het resultaat van het project is dat de firma Flexipol een nieuw product in haar portfolio heeft: gevelpanelen met PV. Voor een grote uitrol van dit nieuwe product moeten er echter nog een tweetal stappen worden gezet:

- 1) De fabricage van de PV laminaten moet worden geautomatiseerd. Dit zal mogelijk zijn als de Mass Customization lijn ([Mass customization lab new generation solar PV | TNO](#)) bij TNO volledig operationeel is.
- 2) De verzekeraarbaarheid van gevelelementen met PV moet worden verbeterd. De brand in de Grenfell Tower in Londen in 2017 heeft – terecht – tot veel meer aandacht geleid voor de brandveiligheid van gevels. De composiet gevelelementen zonder PV van Flexipol zijn gecertificeerd als Brandklasse B en voldoen hiermee aan de eisen van het Bouwbesluit 2012 voor hoogtes > 2,5 m en <13 m. Het PV laminaat valt ook onder Brandklasse B, maar daarmee vallen de gevelelementen met PV niet automatisch onder Brandklasse B. De gevelelementen met PV zullen dus apart gecertificeerd moeten worden om tegemoet te komen aan de eisen van de verzekeraars.