

Openbaar Eindrapport ZIEZO

TNO 2025 R10469 – 10 Maart 2025

Openbaar Eindrapport ZIEZO

Auteurs	Roland Valckenborg
Rubricering rapport	TNO Public
Titel	TNO Public
Rapporttekst	TNO Public
Aantal pagina's	36 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	0
Programmanaam	HER+
Projectnaam	ZIEZO
Projectnummer	HER+21-01740618

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.

© 2025 TNO

Dankwoord

Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Klimaat en Groene Groei, Regeling nationale EZK- en LNV-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.

Dit openbaar rapport is tot stand gekomen met de volgende co-auteurs:

- TNO: Simona Villa, Nicolas Guillevin en David Out
- Pilkington: Marcel Ribberink en Christian Eibl
- TU/e: Roel Loonen, Mina Ishac en Mina Pouyanmehr
- W/E Adviseurs: Pieter Nuiten, Tobias Plugge en Anne Offermans

en ook de vele studenten en overige medewerkers bij alle project partners die hier niet bij naam genoemd zijn.

Dank voor jullie bijdrages!

Inhoudsopgave

Contents

Dankwoord.....	3
Afkortingen en begrippen.....	4
1 Samenvatting.....	5
2 Doelstelling project.....	7
2.1 Uitgangspunten.....	7
2.2 Doelstellingen.....	7
3 Resultaten.....	8
3.1 Resultaten WP 1 – Technologieontwikkeling van cel naar prototype.....	8
3.1.1 WP1.1 Optimalisatie van cel snijden en nabewerking.....	8
3.1.2 WP1.2 Ontwikkeling en karakterisering van ~400 cm ² minimodules.....	9
3.1.3 WP1.3 Evaluatie effect reflecterende jaloezieën.....	9
3.1.4 WP1.4 Productie van PV halffabrikaten.....	12
3.2 Resultaten WP 2 – Elektrisch Ontwerp en Programma van Eisen.....	13
3.2.1 WP2.1 Integratie van diodes in laminaat of meerlaags glas.....	13
3.2.2 WP2.2 Plaatsing van Junction box.....	13
3.2.3 WP2.3 Programma van Eisen ZIEZO.....	14
3.3 Resultaten WP3 – Model.....	15
3.3.1 WP3.1 Modelvorming en validatie.....	15
3.3.2 WP3.2 Optimalisatie van ZIEZO concepten.....	16
3.3.3 WP3.3 Integratie BENG 1, 2, 3 en TOjuli.....	18
3.3.4 WP3.4 Ontwikkeling gebruiksvriendelijke tool.....	19
3.4 Resultaten WP4 – Outdoor testing.....	20
3.4.1 WP4.1 Installatie kleine prototypes in SolarBEAT.....	20
3.4.2 WP4.2 Monitoring & Analyse Kleine prototypes.....	21
3.4.3 WP4.3 Assemblage en installatie grote prototypes bij Pilkington Enschede.....	23
3.4.4 WP4.4 Monitoring & Analyse grote prototypes.....	23
3.5 Knelpunten.....	26
3.5.1 Technisch.....	26
3.5.2 Organisatorisch.....	26
3.5.3 Commercieel.....	26
3.6 Doelgroep en Perspectief Toepassing.....	27
4 Outlook en kennisverspreiding.....	28
4.1 Bijdrage aan doelstellingen van HER+.....	28
4.2 Spin off.....	28
4.3 Openbare publicaties.....	28
4.3.1 Presentaties.....	29
4.3.2 Academische publicaties.....	30
4.3.3 Nieuwsberichten publieke media.....	30
4.4 Beschikbaarheid rapport.....	32
4.5 Contactpersonen.....	32
5 Conclusies.....	33

Bijlage A : Referenties	35
Bijlage B : Lay-out Openbaar eindrapport.....	36

Afkortingen en begrippen

In deze tabel volgt een opsomming van technische begrippen, die niet altijd in het Nederlands vertaald kunnen worden, fysische grootheden [met een eventuele eenheid erachter] en afkortingen gebruikt in deze rapportage.

AOI	Angle Of Incidence, oftewel invalshoek tussen zon en PV-paneel
Bifacial	Dubbelzijdig
BIPV	Building Integrated PV
BSDF	Bi-directional Scattering Distribution Function
cSi	crystalline Silicon
CR	Coverage Ratio [%], PV-actieve deel van een PV-paneel
Glare	hinderlijke schittering van zonlicht (vaak bij lage zonnestand)
IBC	Interdigitated Back-Contact = een PV-cell technologie
IGU	Insulating Glazing Unit
Imp, Vmp, Pmp	resp. Stroom (I), Spanning (V) en Vermogen (P) in Maximum Power Point
Jaloezieën	‘Venetian blinds’ in het Engels en veel andere talen. Altijd horizontaal.
JB	Junction Box
LCA	Life Cycle Assessment
MPG	Milieu Prestatie Gebouwen
Perovskiet	nieuwe (dunne film) PV technologie
PERC	Passivated Emitter and Rear Contact = een PV-cell technologie
PO	Power Optimizer
PR	Performance Ratio [%]
PV	PhotoVoltaic = zonne-energie fysica die licht in stroom converteert
striped-cells	gesneden PV cellen die zeer langgerekt zijn, ook wel ‘cellstrips’
SY	Specific Yield [kWh/kWp]
TCPR	Temperature Corrected Performance Ratio [%]
TMY	Typical Meteorological Year
Voc	Open Circuit Voltage [V]
WWR	Window-to-Wall-Ratio

1 Samenvatting



Projecttitel

- Titel: ZIEZO = Zonwering Inclusief Electriciteitsopwekkend Zonneraam
- Nummer: HER+21-01740618 van de regeling Hernieuwbare energietransitie (HER+ 2021).

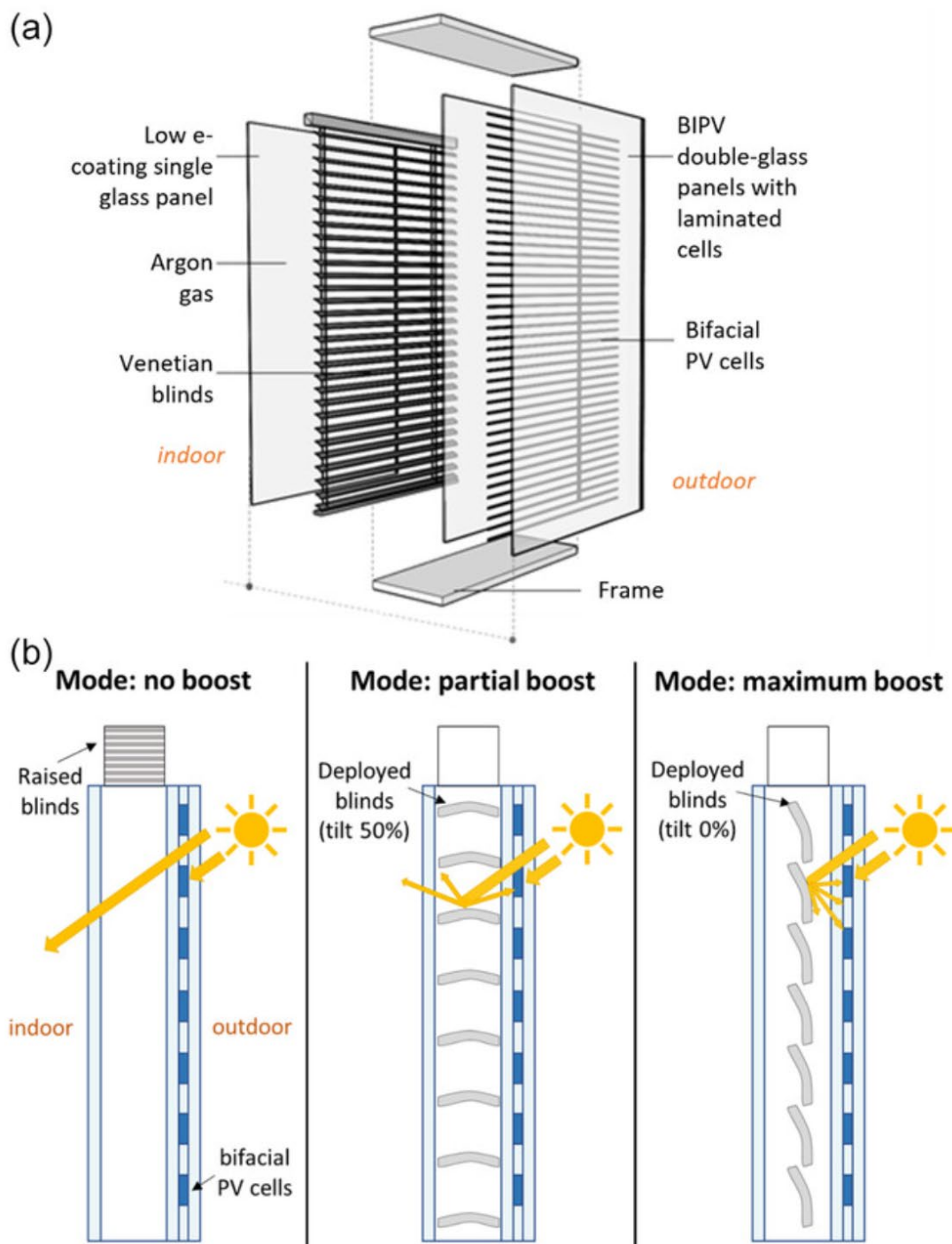
Penvoerder en deelnemers

- Penvoerder: Nederlandse Organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek, TNO
- Deelnemer: Pilkington Nederland B.V., PILK
- Deelnemer: Technische Universiteit Eindhoven, TU/e
- Deelnemer: W/E Adviseurs duurzaam bouwen, W/E

Projectperiode

- Project start: 15 Juni 2022
- Project eind: 15 December 2024
- Project duur: 2.5 jaar = 30 maanden

Principe schets



Figuur 1: (a) Schematische opbouw van een ZIEZO-raam. (b) De drie belangrijkste modes waarin een ZIEZO-raam ingesteld kan zijn; van links naar rechts: de jaloezieën zijn helemaal naar boven opgetrokken in een bak waar ze helemaal uit het zicht zijn; midden: met een horizontale positie zal er al deels reflectie optreden die de zonne-energie (PV) opbrengst enigszins verhoogt; rechts: de maximale boost in PV opbrengst wordt verkregen met jaloezieën naar beneden en de kantenhoek zodanig dat de bolle kant naar buiten staat.

2 Doelstelling project

2.1 Uitgangspunten

Bij strengere eisen voor energieprestatie van gebouwen ontstaat er een markt voor energie-opwekkende ramen, met name voor toepassing in woontorens en kantoren. Het ideale zonneraam is visueel homogeen, kleurneutraal en levert bij voldoende transparantie toch een substantiële energieopbrengst. Echter, een dergelijk zonneraam (m.b.v. van bijvoorbeeld dunnefilm perovskiet PV) is nog niet ver genoeg ontwikkeld, terwijl glasbedrijven zoals Pilkington nu al wel ervaring willen opdoen met producten voor deze markt.

Er bestaat inmiddels een niche markt van zonneramen gebaseerd op cellstrips van kristallijn (cSi) PV in een dubbelglas raam. Echter dit is een statische zonwering die altijd een vast percentage zonlicht tegenhoudt (en omzet in elektriciteit). De eindgebruikers, die werken of wonen achter deze zonneramen willen echter zelf meer controle over de hoeveelheid doorgelaten zonlicht of zonnewarmte. Of ze willen nu nét meer zonwering op hete dagen of bij verblindend licht. Recent is de TOjuli-eis aan het Bouwbesluit (tegenwoordig Bbl) toegevoegd, waarmee een grens wordt gesteld aan het risico op oververhitting van woningen. Doordat zomers heter worden, en gebouwen luchtdichter en beter geïsoleerd, wordt zonwering een steeds belangrijker aandachtspunt.

Het project ZIEZO werkt aan dit complexe probleem van een multiparameter puzzel waarbij een optimum wordt gezocht tussen: voldoende daglicht gedurende het complete jaar, zonnewarmte wanneer nodig (in het stookseizoen), voldoende thermische isolatie (in de winter), blokkeren van hinderlijk licht, en verhogen opbrengst elektriciteit uit de PV cellen. Het project ontwikkelt diverse ZIEZO-prototypes waarmee deze probleemstelling aangepakt wordt.

2.2 Doelstellingen

In dit project combineren we de statische zonwering van PV-cellstrips (Pilkington Sunplus) met de dynamische/flexibele zonwering van jaloezieën die robuust zitten opgesloten tussen twee glasplaten (Pilkington Screenline). Zelfs als we deze ontwikkeling zouden inbouwen op de bestaande monofacial cellstrips zou dit een CO2 besparing opleveren voor de eindgebruiker. Maar we gaan in ZIEZO ook de energieopbrengst een boost geven door deze jaloezieën als ze gesloten zijn (bij hoge instraling) te benutten als reflectoren op de achterzijde van bifacial cellstrips. De cumulatieve CO2-reductie in 2030 levert voldoende besparing op SDE++-uitgaven. Daarbovenop ontwikkelen we een multiparameter model waarmee PV-opwek, binnenklimaat, en CO2-besparing door reductie van warmte- & koude-vraag geoptimaliseerd worden. Dat is niet triviaal, aangezien niet alleen de zonnestand varieert in de loop van de dag en de seizoenen maar ook aan de vraagkant vanuit de gebruik een grote diversiteit zal voorkomen, gebaseerd op bezetting in geval van kantoor (weekend vs. werkdag), voorkómen van hinderlijk licht (glare) en persoonlijke wensen ten aanzien van warmte en licht in de ruimte achter het ZIEZO-raam.

3 Resultaten

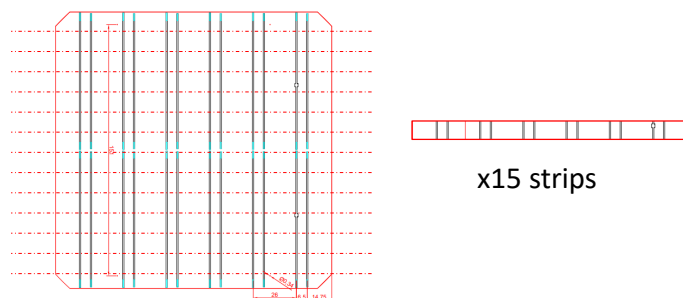
3.1 Resultaten WP 1 – Technologieontwikkeling van cel naar prototype

Dit WP1 heeft gedraaid van M0 tot M12.

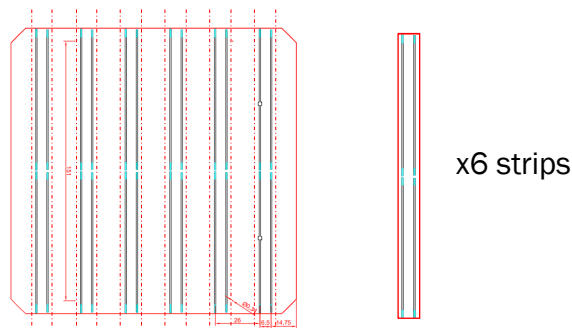
Het doel van WP1 is om een zogenaamd bifaciaal PV-paneel te ontwikkelen voor gebruik in een PV-raam. Bij het kiezen van de beste PV-technologie hebben we rekening gehouden met het feit dat de Interdigitated Back-Contact (IBC) zonneceltechnologie maximale prestaties en flexibiliteit in ontwerp mogelijk maakt. Dit vereist wel een nieuwe manier van module-interconnectie.

3.1.1 WP1.1 Optimalisatie van cel snijden en nabewerking

Eerst was een robuust snijproces van de bifaciale PV-cellen in PV- cellstrips nodig. Twee snijrichtingen werden geëvalueerd: loodrecht op de busbars (C1 snede, zie Figuur 2) en parallel aan de busbars (C2 snede, zie Figuur 3).



Figuur 2: C1 snijrichting: Schematische weergave van de metallisatie lay-out van een IBC zonnecel met zes paar busbars. De laser snijlijnen loodrecht op de busbars worden weergegeven met rode stippellijnen. 15 striped-cells kunnen uit één zonnecel worden gesneden.



Figuur 3: C2 snijrichting: Schematische weergave van de metallisatie lay-out van een IBC zonnecel met zes paar busbars. De laser snijlijnen parallel aan de busbars worden weergegeven in rode stippellijnen. 6 striped-cells kunnen uit één zonnecel worden gesneden.

De elektrische prestaties van de volledige (ongesneden) cellen werden vergeleken met respectievelijk C1 en C2 gesneden IBC zonnecellen. Dit werd gedaan door de IV-curves te meten in een klasse AAA zonn simulator.

Het bleek dat de C1 snijrichting maximaal gebruik van zonnecellen mogelijk maakt, resulterend in 15 cell-stripes per cel, terwijl de C2 snijrichting resulteert in slechts 60% gebruik van de zonnecel. Ten tweede toonde de C1 snijrichting een 0,5% lager efficiëntieverlies in vergelijking met de C2 snijrichting. Het belangrijkste verschil in prestatieverlies is gerelateerd aan het hogere verlies in Voc voor de C2 snede (17mV voor C2 vergeleken met 7mV voor C1). Last but not least, had de C1 snijrichting een hogere bifacialiteit (78,5%) in vergelijking met de C2 snijrichting (68,5%).

Conclusie: De C1 snijrichting werd gekozen voor het produceren van de cell-stripes die nodig zijn voor het assembleren van de bifaciale PV-ramen, vanwege de hogere mono- en bifaciale prestaties en minder snijverliezen.

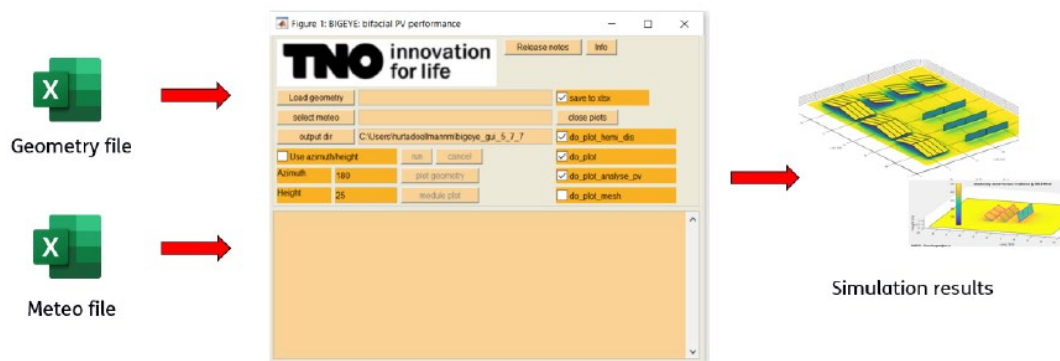
3.1.2 WP1.2 Ontwikkeling en karakterisering van ~400 cm² minimodules

Het doel van dit sub-WP was om een bifaciale interconnectie technologie te ontwikkelen voor back-contact cellen gelamineerd in een glas/glas PV-paneel configuratie. Twee bifaciale back-contact mini-modules (grootte 20 cm x 20 cm) werden succesvol gecreëerd met goede prestaties.

Conclusie: De ontwikkeling van een bifaciale interconnectie technologie was succesvol, waardoor de technologie kon worden opgeschaald naar volledige PV-ramen.

3.1.3 WP1.3 Evaluatie effect reflecterende jaloezieën

De prestaties van de ZIEZO-prototypes uitgerust met bovengenoemde PV-panelen (als semi-fabricaten) en reflecterende jaloezieën werden geanalyseerd door middel van modellering; zie . De belangrijkste onderzoeksvraag was om te evalueren hoe verschillende soorten jaloezieën en kantelhoeken kunnen helpen om de algehele prestaties van het ZIEZO-raam te verbeteren en om de potentiële energiewinsten onder verschillende weersomstandigheden te kwantificeren.



Figuur 4: Het complete simulatie proces en user interface van het door TNO ontwikkelde software pakket BIGEYE.

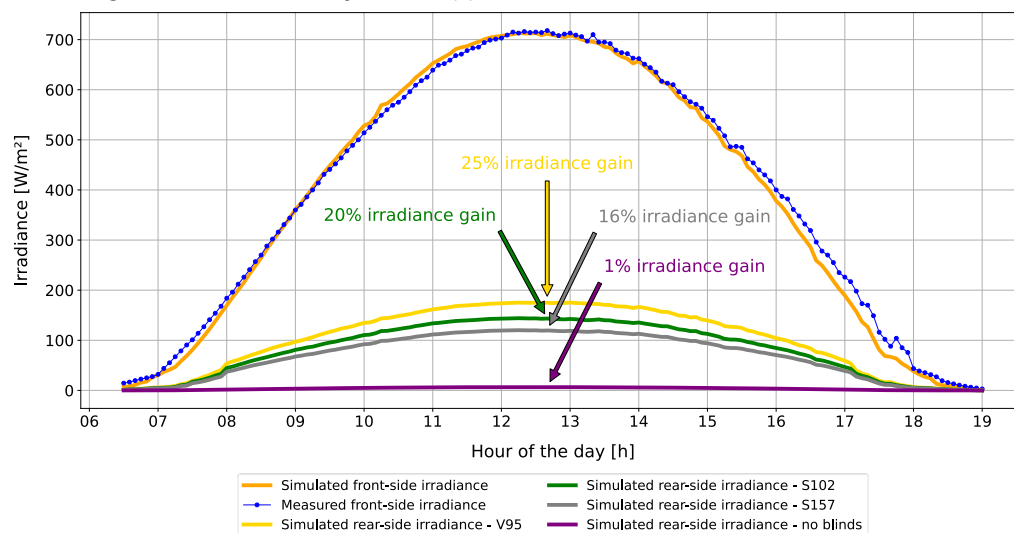
Eerst werd het optische model gevalideerd aan de hand van experimentele gegevens om ervoor te zorgen dat het nauwkeurig de zonne-instraling kon simuleren die aan de voorzijde van het raamvlak word ontvangen. De optische eigenschappen van de jaloezieën zijn ook gedefinieerd, zodat hiermee de instraling vanuit de achterzijde van het PV-paneel kan worden gekwantificeerd.

Daarna werd het elektrische model gevalideerd om ervoor te zorgen dat het model nauwkeurig het elektrische gedrag van de ZIEZO-prototypes in reële operationele omstandigheden kan simuleren, zie Figuur 7. De gevalideerde modellen werden vervolgens gebruikt om het effect van het gebruik van verschillende jaloezie-configuraties op de prestaties van het ZIEZO-raam te testen.

Op deze manier werden drie verschillende soorten jaloezieën (van het Italiaanse merk Pellini) getest:

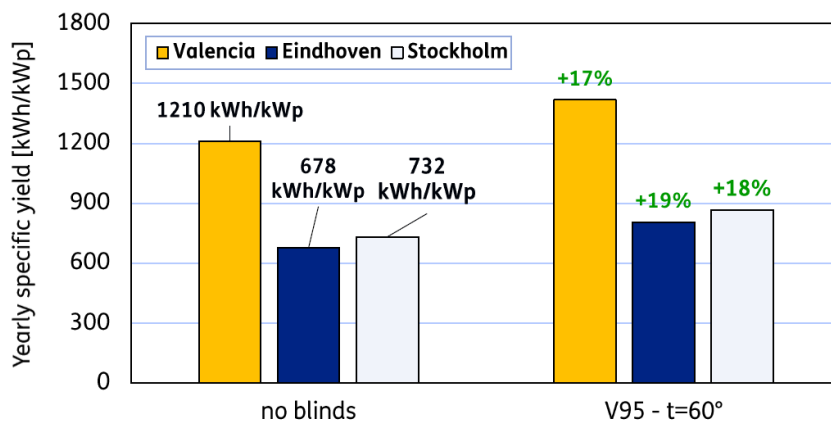
- S157: grijs gekleurd, hoge diffuse reflectie; meest verkocht commercieel
- S102: wit gekleurd, bijna compleet diffuse reflectie
- V95: 'aluminium'-zilver gekleurd; hoge speculaire reflectie (en dus weinig diffuus).

De analyse laat zien dat, wanneer de jaloezieën worden ingezet onder een kantelhoek van 60°, deze soorten jaloezieën kunnen helpen om de instraling aan de achterzijde van het PV-raam met respectievelijk 16%, 20% en 25% te verhogen op een volledig zonnige dag in Eindhoven, zie Figuur 5. De studie toonde ook aan dat jaloezieën die onder een hoek van 60° zijn geplaatst, consequent de grootste absolute boost in temperatuur-gecorrigeerde performance ratio (TCPR) bereiken over een typisch meteorologisch jaar (TMY) in Eindhoven (NL). Op deze manier bleek het V95-jaloezietype onder een kantelhoek van 60° de optimale jaloezieconfiguratie te zijn voor het verbeteren van de prestaties van dit ZIEZO-raam. Additioneel werd een gedetailleerde analyse uitgevoerd om de invloed van aanvullende factoren op de prestaties te onderzoeken, zoals bv de invalshoek (AOI) tussen de zon en de wiskundige normaal van het jaloezieoppervlak.

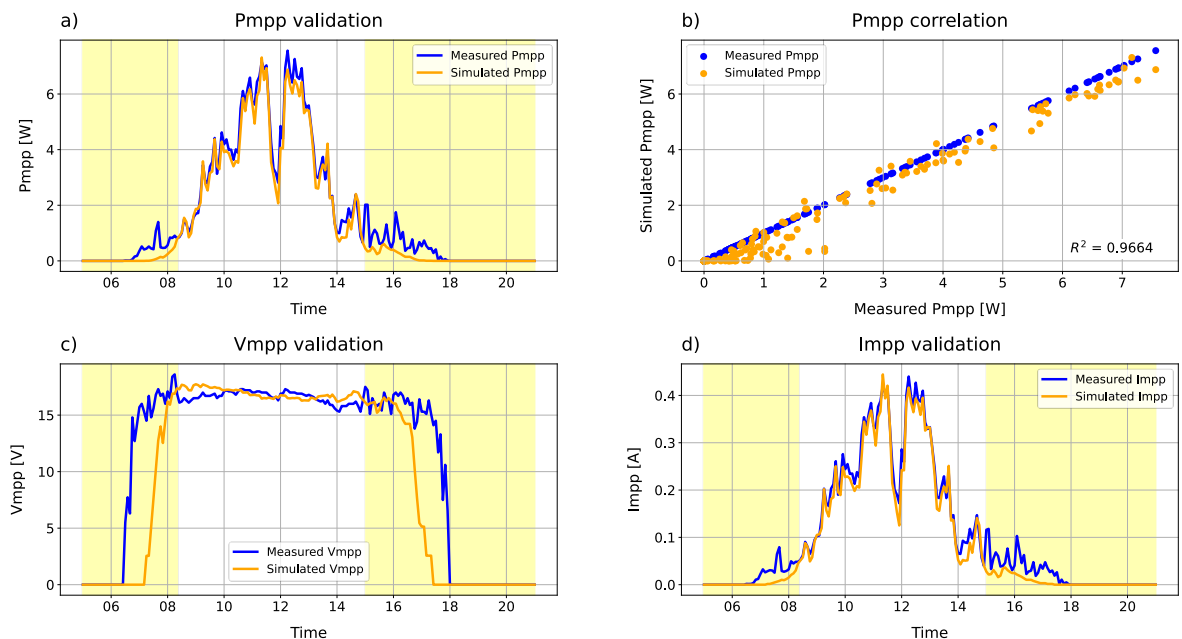


Figuur 5: Vergelijking tussen gemeten (blauw) en gesimuleerde (oranje) instraling aan de voorzijde van het raam op de compleet zonnige dag 8 Sept. 2023. De gesimuleerde instralingwinst aan de achterzijde van het PV-glas voor de drie verschillende types jaloezieën is ook weergegeven (zie legenda) voor een vaste kantelhoek van 60°.

Bovendien is de jaarlijkse specifieke opbrengst (SY) geanalyseerd voor twee andere locaties in Europa: één in het Noorden en één in het Zuiden van Europa. De maximale boost die haalbaar is met de optimale jaloezieconfiguratie, werd vastgesteld op 19% voor een TMY in Eindhoven (NL), 18% in Stockholm (NO) en 17% in Valencia (SP), zie Figuur 6. Het verschil in prestatie tussen deze locaties wordt toegeschreven aan variaties in zowel meteorologische en geografische factoren, zoals i. stand van de zon door het jaar, ii. Fractie diffuus licht t.o.v. totale hoeveelheid licht, en iii. de AOI. Over het algemeen bieden deze modelresultaten waardevolle inzichten in hoe verschillende jaloezieconfiguraties de prestaties van het ZIEZO-raam kunnen verbeteren.



Figuur 6: Jaarlijkse Specific Yield van het ZIEZO-raam voor 3 locaties in Europa. Links de referentie zonder jaloezieën, en rechts de V95-jaloezieën met een vaste kantelhoek van 60°.



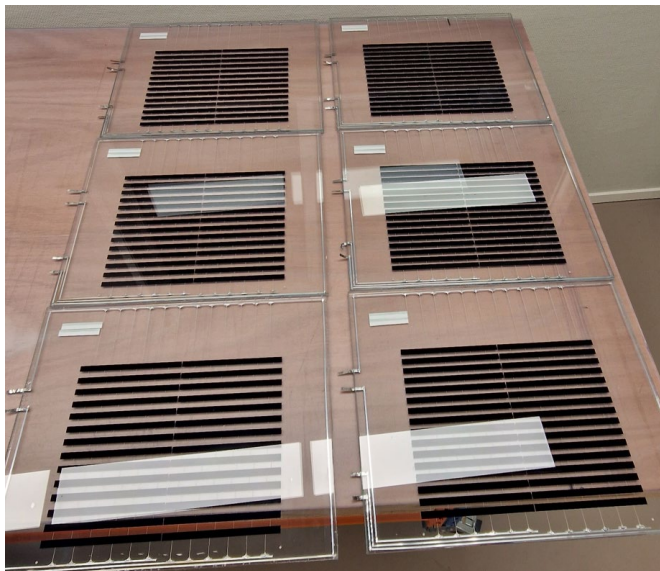
Figuur 7: Voorbeeld van de elektrische validatie voor een willekeurige bewolkte dag (18 Oktober 2023). Op deze dag werden de S102 jaloezieën ingesteld op een kantelhoek van 120°.

Conclusie: Er werd een optisch en elektrisch model gecreëerd en succesvol gevalideerd. Het model maakte het mogelijk om de prestaties en het potentieel van de ZIEZO-ramen te beoordelen bij verschillende systeemconfiguraties, weersomstandigheden en geografische

locaties. De beste configuratie (hoogste prestatieverbetering) voor Nederland is gevonden voor een kantelhoek van 60° met het gebruik van V95 jaloezieën.

3.1.4 WP1.4 Productie van PV halffabrikaten

De PV-panelen voor het ZIEZO-raam zijn in feite halffabrikaten (net zoals gewone glasplaten) omdat ze gebruikt worden als invoer voor de assemblage van isolatieglas (ook wel Insulating Glazing Units, IGUs). Prototypes zijn geproduceerd voor installatie in de SolarBEAT testgevel (WP4.1). Bifaciale back-contact laminaten met 50% en 60% coverage ratio (CR) werden vervaardigd. Dat ging niet vanzelf. Diverse problemen, zoals verkeerde uitlijning, cellbreuk en cellverschuiving tijdens laminering traden op. Dit is uiteraard geen verrassing bij een product ontwikkeling, maar was voorzien in project planning. Uiteindelijk konden dus 6 prototypes gemaakt worden, zie Figuur 8.



Figuur 8: Set van 6 PV-panelen (3 stuks met 50% CR en 3 stuks met 60% CR)

Uit IV-metingen bleek dat de PV-panelen een vermogen hebben dat ongeveer 1 tot 1.5 Watt lager is dan de theoretische voorspelling. Dit kan verklaard worden door de lichtabsorptie in het voorste glas en verlies door de encapsulant. Het PV cel-naar-module verlies in FF was laag, hetgeen aangeeft dat de interconnectie goed gelukt is. Uit elektroluminescentie (EL) beelden konden we defecten zoals falende interconnecties en gebarsten cellen vroegtijdig identificeren.

Conclusie: Het geoptimaliseerde fabricageproces heeft geresulteerd in functioneel goed presterende PV-panelen, die geschikt zijn voor laminatie in ZIEZO-ramen, die vervolgens geïnstalleerd zullen worden in de SolarBEAT testgevel.

3.2 Resultaten WP 2 – Elektrisch Ontwerp en Programma van Eisen

Dit WP2 heeft gedraaid van M3 tot M12.

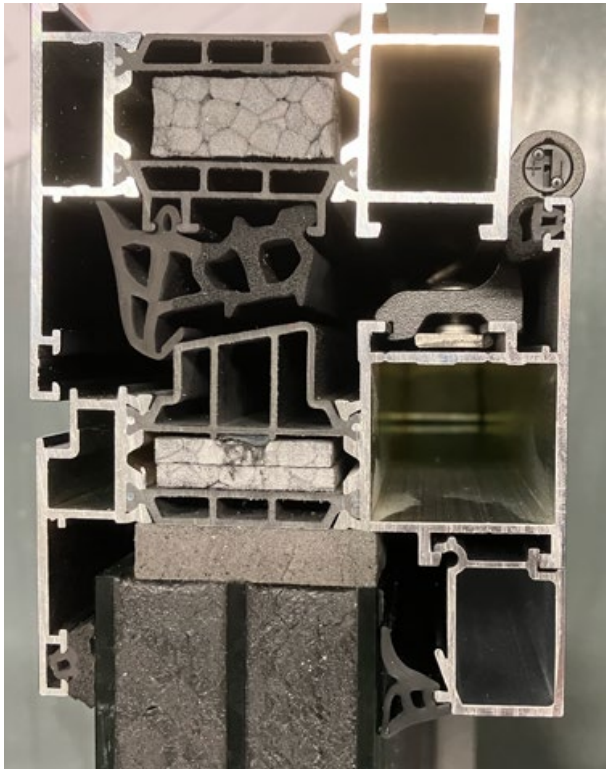
3.2.1 WP2.1 Integratie van diodes in laminaat of meerlaags glas

Bypass-diodes zijn een verplicht onderdeel van zonnepanelen, omdat ze de stroom geleiden wanneer een PV-cel of PV-paneel beschaduwd wordt (of defect raakt). Ze zijn parallel geschakeld met een string van meestal 18 tot 24 cellen in een gewoon PV-paneel. Omdat er in ZIEZO gebruikt wordt gemaakt van cell-stripes, kan deze vuistregel niet zomaar overgenomen worden, maar moet er voor elke configuratie en afmeting doorgerekend worden hoeveel diodes er nodig zijn, en op welke positie in de lay-out. Behalve dat diodes de veiligheid verhogen door "hot spots" te voorkomen, kunnen ze ook de stroomopbrengst van gedeeltelijk beschaduwde panelen verhogen.

Het gebruik van in-laminaat diodes werd geëvalueerd en gezien als een zeer risicovolle stap in het IGU-productieproces. Vanwege de beperkte beschikbaarheid van geschikte diodes, gebrek aan ervaring en hoge technische uitdagingen, werd besloten om de diodes in conventionele side-wing Junction boxes op te nemen.

3.2.2 WP2.2 Plaatsing van Junction box

Het doel van dit onderzoek is om het meest geschikte type en de meest geschikte plek voor de junction box (JB) te vinden. Daarbij willen we de mechanische sterkte van het kozijn niet aantasten, zie Figuur 9. Bovendien dient het ZIEZO raam (met uitstekende Junction box) nog steeds gemakkelijk geïnstalleerd kunnen worden.



Figuur 9: Cross sectie van een regulier triple glazing kozijn (type Aluprof MB 86N in deze foto). Er is duidelijk te zien dat de mechanisch ontwerp weinig plek over laat voor een junction box.

Er werden slechts twee leveranciers van side-wing JB's gevonden die aan de eisen voldeden. Deze twee verschillen slechts enkele millimeters in dikte. Desondanks is de kleinste gekozen vanwege de zeer beperkte ruimte in het raamkozijn. En verder werden er aanpassingen gedaan aan de frameconstructie om de integratie te vergemakkelijken. Tijdens de installatie ontstonden praktische problemen door de stijve solar kabels en de kwetsbaarheid van de JB's. Handmatige montage was vereist en er werden speciale maatregelen genomen om de betrouwbaarheid te waarborgen.

3.2.3 WP2.3 Programma van Eisen ZIEZO

Het Programma van Eisen bevat verschillende Key Performance Indicators (KPI's) die de ontwikkeling van het ZIEZO-product sturen, met de nadruk op visueel comfort, thermisch comfort, luchtkwaliteit en energieprestaties. Gedetailleerde KPI's zijn gegroepeerd in vier primaire categorieën:

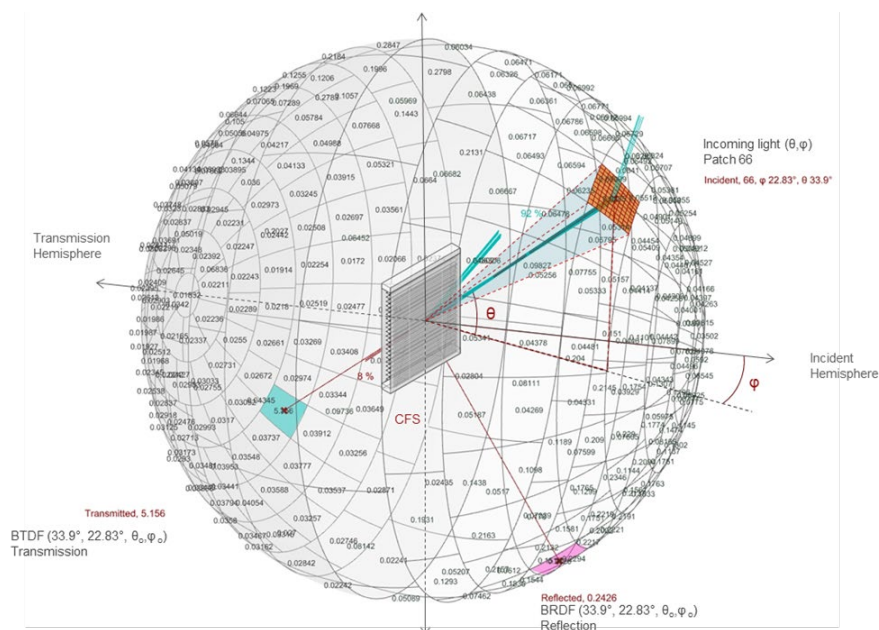
- Visueel Comfort: i. Evaluatie van voldoende daglicht (om het gebruik van elektriciteit voor kunstlicht te voorkomen, zelfs als dit LED's zijn), ii. Voorkomen van hinderlijke schittering, en iii. Voldoende uitzicht op de buitenwereld om het welzijn van de bewoners/werknemers achter de ramen te waarborgen.
- Thermisch Comfort: Beoordeling van de thermische eigenschappen en prestaties van het raam i. tijdens de wintermaanden om extra verwarming te verminderen en ii. tijdens de zomer om extra aircogebruik te verminderen.
- Luchtkwaliteit: Aandacht voor natuurlijke ventilatie om de binnenluchtkwaliteit te verbeteren. Deze KPI kan niet door het ZIEZO-raam zelf beïnvloed worden, maar wel door het complete gevelontwerp met ZIEZO-ramen erin.
- Elektrische Opbrengst: Evaluatie van de verhoogde elektrische prestaties door de combinatie van (reflecterende) jaloezieën en bifaciale PV-panelen.

3.3 Resultaten WP3 – Model

Dit WP3 heeft gedraaid van M0 tot en met M30.

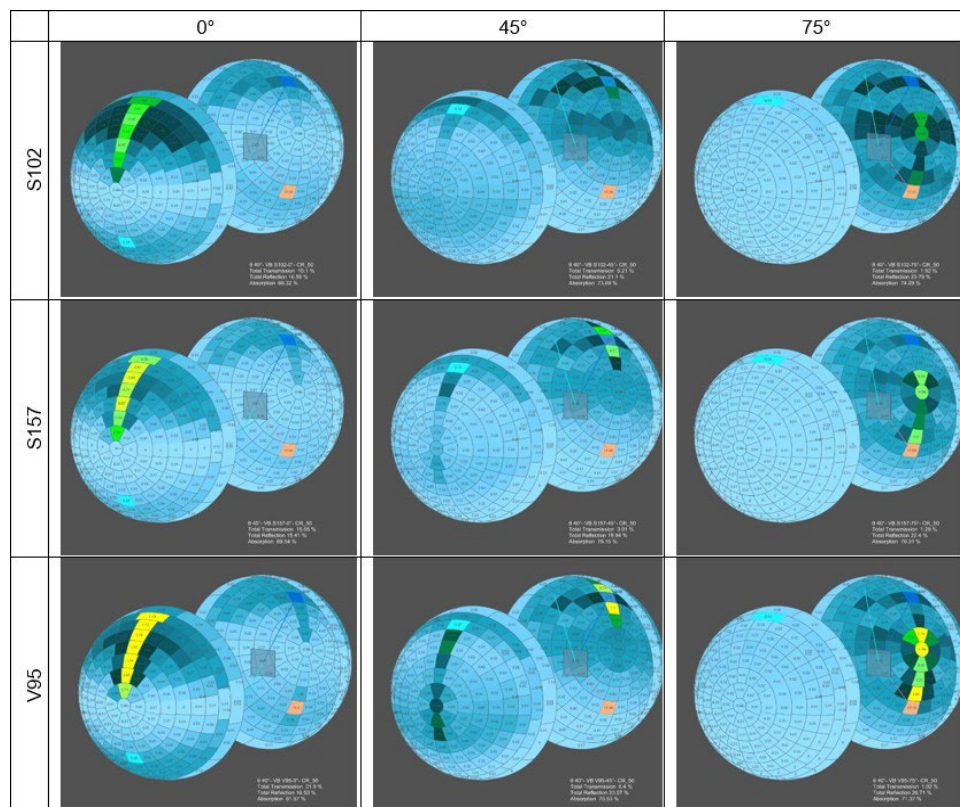
3.3.1 WP3.1 Modelvorming en validatie

Dit werkpakket is gestart met het opzetten van een co-simulatieframework voor het bepalen van de thermische en daglichtprestaties van ZIEZO. De belangrijkste ontwikkelstap zat in het vertalen van het ZIEZO-concept naar een complex fenestration model waarin het optische gedrag (multi-reflecties en hoekafhankelijkheid) correct wordt meegenomen (Figuur 10). De modellen zijn succesvol gevalideerd op basis van metingen in de SolarBEAT opstelling en door te vergelijken met state-of-the-art modellen.



Figuur 10. Voorbeeld van een “bi-directional scattering distribution function” (BSDF) die de hoekafhankelijke lichtdoorlatendheid van ZIEZO beschrijft.

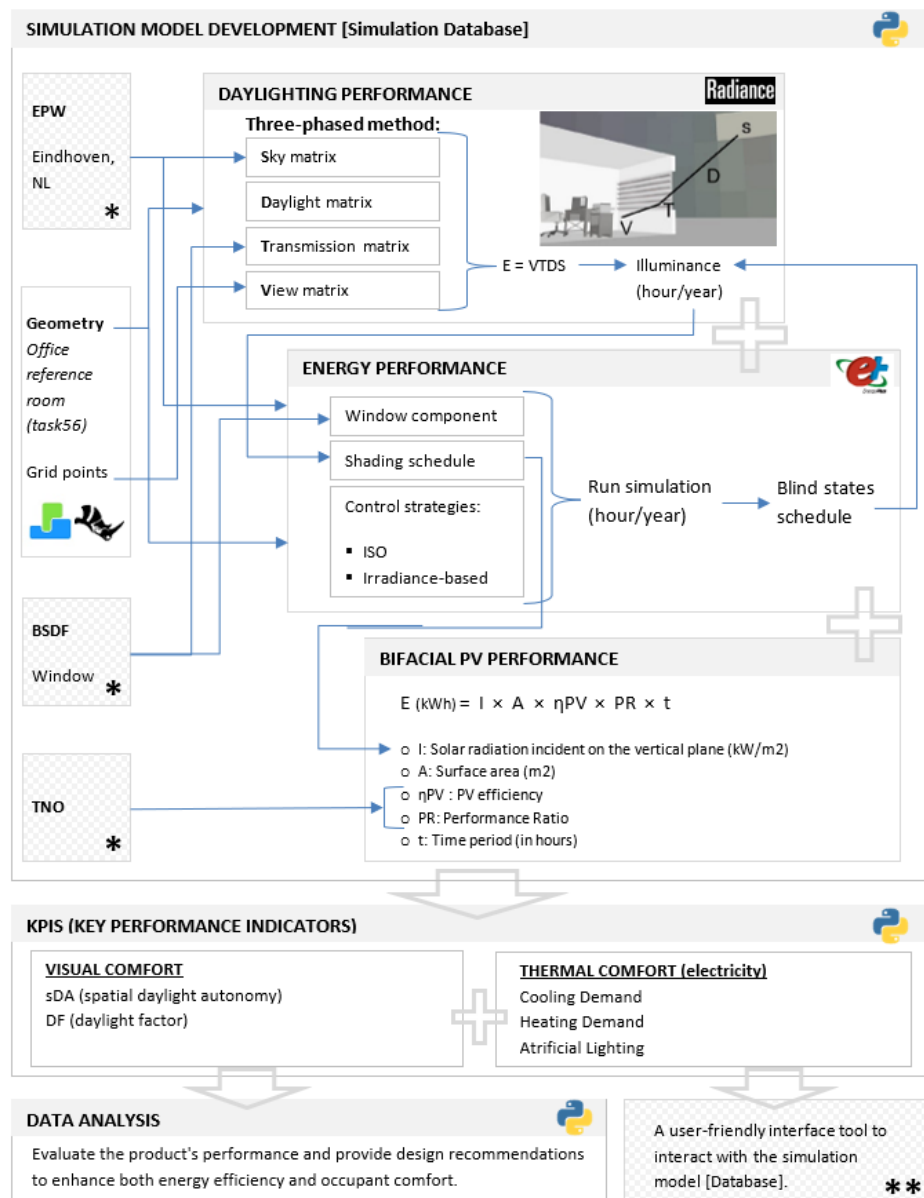
Als onderdeel van WP3.1 is ook een nieuwe interactieve 3D-visualisatie voor BSDF files ontwikkeld. Hiermee wordt op intuïtieve wijze inzicht verkregen in de lichtdoorlatende eigenschappen van ZIEZO. Figuur 11 toont als voorbeeld de BSDF uitvoer voor verschillende varianten van ZIEZO voor drie rotatiehoeken van de jaloezieën en drie jaloezie-typen. Door deze modellen op component-niveau te koppelen aan zone-modellen op gebouwniveau verkrijgen we inzicht in de energiebalans: opwek vs. energievraag voor verwarming, koeling en verlichting en bijbehorende emissies.



Figuur 11. BSDF visualisatie van ZIEZO met PV-cover ratio van 50% voor drie rotatiehoeken van de lamellen en drie lameltypen: S157 (grijs, commercieel het meest verkocht), S102 (wit, hoge diffuse reflectie), V95 (grijs, hoge speculaire reflectie).

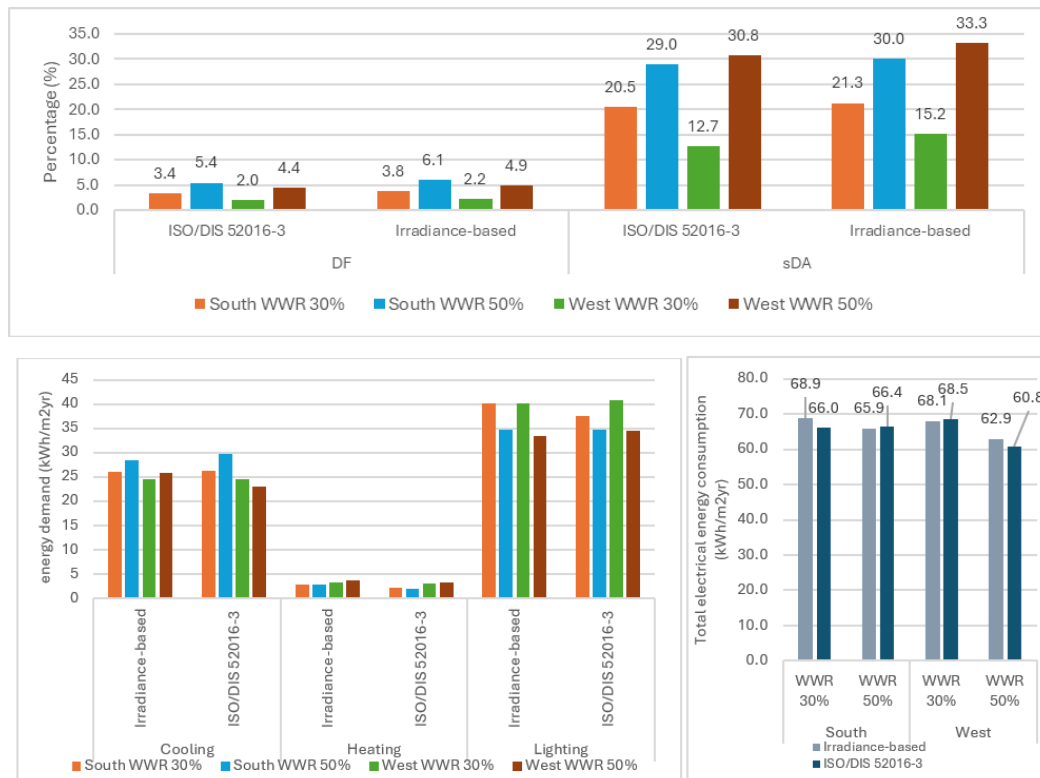
3.3.2 WP3.2 Optimalisatie van ZIEZO concepten

Het in WP3.1 ontwikkelde model (Figuur 12) is vervolgens ingezet om effecten van verschillende ZIEZO varianten op gebouwprestaties te onderzoeken en zo input te geven aan de productontwikkeling.



Figuur 12. Overzicht van modellen op gebouwniveau in EnergyPlus en Radiance

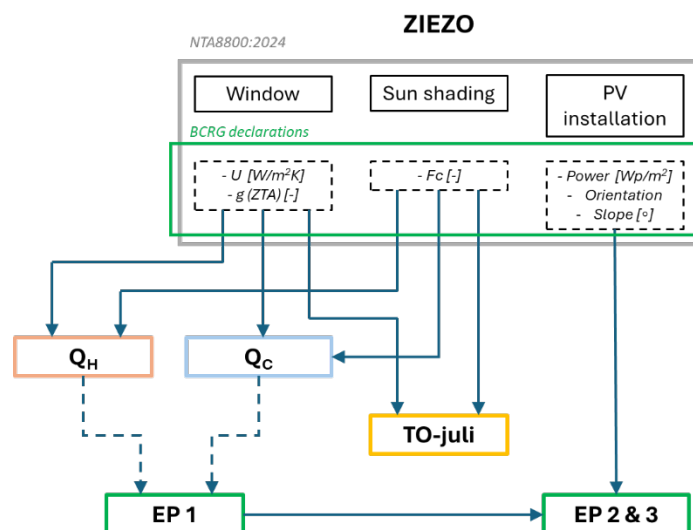
In WP3.2 is een grote verscheidenheid aan combinaties (PV-cover ratio's, glaseigenschappen/coatings en specificaties en aansturing van de jaloezieën) doorgerekend om voor verschillende situaties (bijv. window-to-wall ratio (WWR), geveloriëntatie) telkens een optimale balans te vinden tussen daglichttoetreding en elektriciteitsopbrengst. Als voorbeeld toont Figuur 13 een vergelijking in ZIEZO prestaties (daglicht en energie) voor twee geveloriëntaties en WWRs. Wat duidelijk opvalt is de potentie van ZIEZO om te voorzien in voldoende uitzicht en daglicht tegelijkertijd goed te scoren op energieprestatie. De aansturing van de jaloezieën speelt in deze situatie een beperkte rol in het bepalen van de prestaties van ZIEZO.



Figuur 13. Prestaties van ZIEZO voor een kantoorruimte met Zuid en West oriëntatie met WWR van 30% en 50%. “ISO/DIS” en “Irradiance-based” verwijzen naar twee verschillende regelingen voor de jaloeziën. DF en sDA zijn indicatoren voor het beoordelen van daglichttoetreding.

3.3.3 WP3.3 Integratie BENG 1, 2, 3 en TOjuli

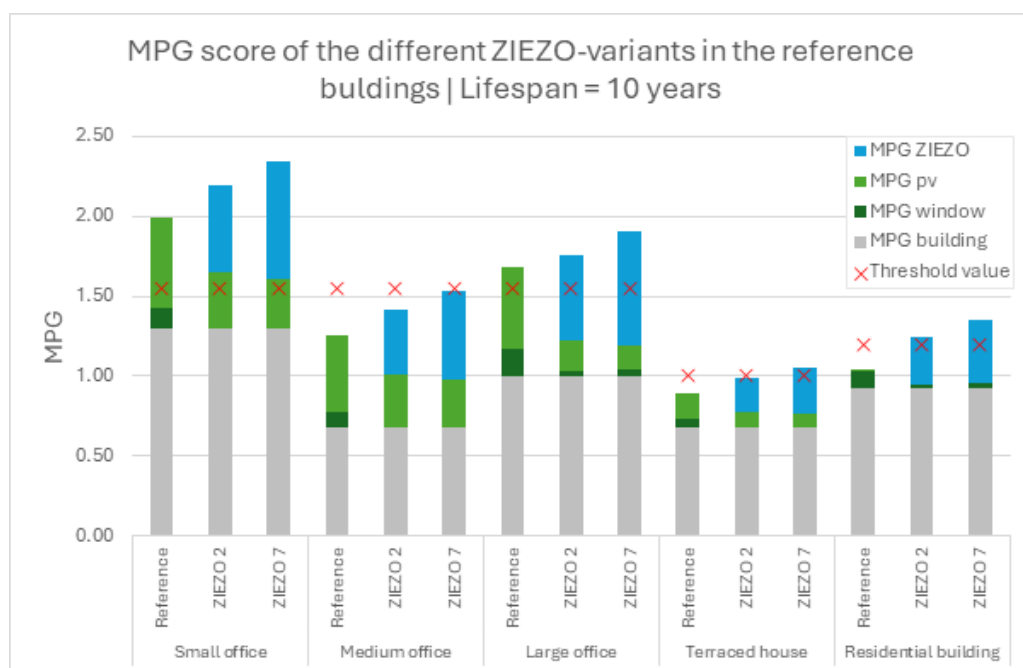
De bepalingmethoden voor de BENG-eisen, TOjuli-eis en MPG voorzien niet standaard in de mogelijkheid een zonneraam in te voeren. In WP3.3 is een voorstel gedaan voor hoe ZIEZO meegenomen zou kunnen worden in NTA 8800, met aandacht voor de opwek van elektriciteit, koude-behoefte en risico op oververhitting (Figuur 14).



Figuur 14. Vertaling van ZIEZO eigenschappen naar NTA8800 rekenmethode

Case studies voor referentiekantoren met meerdere verdiepingen hebben aangetoond dat ZIEZO het mogelijk maakt om te voldoen aan alle BENG eisen, terwijl dit met conventionele beglazing en enkel zonnepanelen op het dak niet mogelijk zou zijn. Deze resultaten wijzen daarom op een kansrijk marktsegment voor ZIEZO.

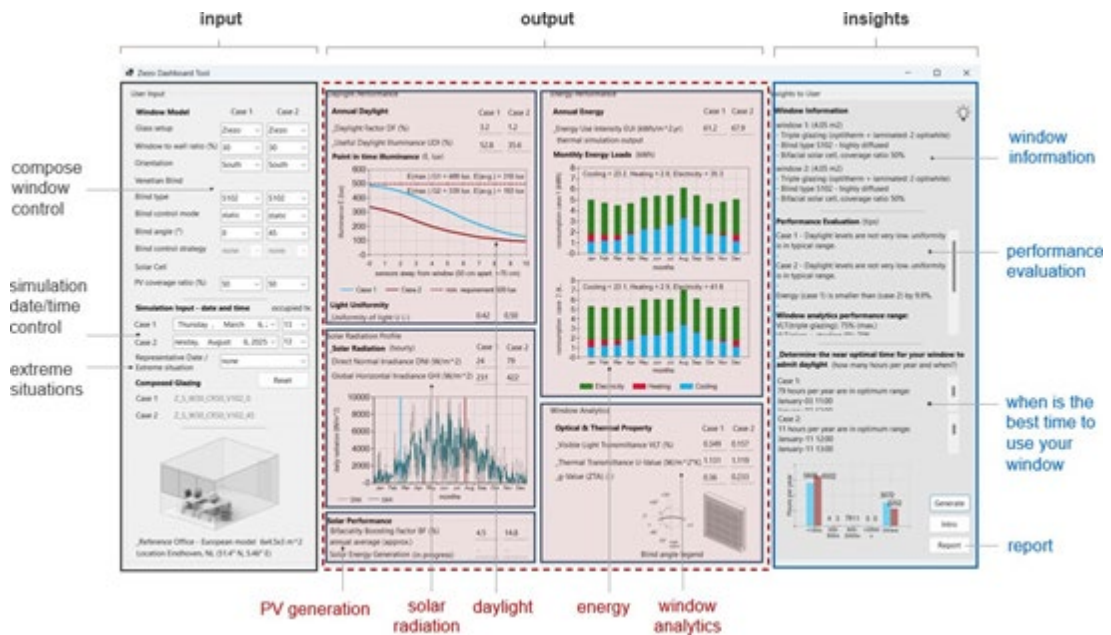
In het tweede deel van WP3.3 is onderzoek gedaan naar de impact van ZIEZO op de MPG-score (Milieu Prestatie Gebouwen). Hoewel beperkingen in de beschikbaarheid van data het lastig maken om complete berekeningen uit te voeren, blijkt uit deze activiteiten dat de milieu-impact van ZIEZO significant is, en dat het voor meerdere gebouwtypen een uitdaging kan worden om te voldoen aan de geldende eisen. In het vervolg is er behoefte aan gedetailleerde LCA studies om de milieu-impact van ZIEZO beter in kaart te brengen. Andere aandachtspunten betreft de recyclingmogelijkheden van ZIEZO en manieren om de levensduur van ZIEZO-componenten te verlengen.



Figuur 15. MPG-score voor verschillende referentiegebouwen met en zonder ZIEZO.

3.3.4 WP3.4 Ontwikkeling gebruiksvriendelijke tool

WP 3.4 heeft een gebruiksvriendelijke softwaretool ontwikkeld die Pilkington helpt bij het overleg met opdrachtgevers, architecten, adviesbureaus, etc. De tool geeft toegang tot een grote database met simulatieresultaten waarin de toepassing van ZIEZO voor een groot aantal cases (klimaat, gebouwtype, oriëntatie, raamgrootte, etc.) ten opzichte van state-of-the-art alternatieven op intuïtieve wijze wordt weergegeven. De tool is tot stand gekomen na het doorlopen van meerdere iteratieve stappen waarin de functionaliteit continue is aangescherpt. De grootste meerwaarde kan worden bereikt door de tool in te zetten in de vroege ontwerpfase, met aandacht voor energieprestaties, daglicht en thermisch comfort. De tool is uitgevoerd als standalone software applicatie, geprogrammeerd in VisualBasic. Figuur 16 geeft een impressie van het eindresultaat.



Figuur 16. Overzicht van de ZIEZO softwaretool

3.4 Resultaten WP4 – Outdoor testing

Dit WP4 heeft gedraaid van M9 tot M30.

3.4.1 WP4.1 Installatie kleine prototypes in SolarBEAT

Bij de outdoor research facility SolarBEAT [1] in Eindhoven zijn 12 kleinschalige ZIEZO-raam prototypes geïnstalleerd in de zuidgevel van een van de testcabines. De totale oppervlakte van elk raam is 600 x 530 mm. Vanwege de grootte van de cell-strips is het PV-actieve deel echter kleiner: 455 x 333 mm.



Figuur 17: Foto van de 12 ZIEZO-prototypes op SolarBEAT, met een zoom naar individuele ramen en de cell-strips.

De PV-ramen op basis van PV-panelen van PERC PV-technologie (door een derde partij) werden geïnstalleerd op 22 juni 2023, en de ramen op basis van IBC PV-technologie (door TNO intern ontwikkeld) werden geïnstalleerd op 7 september 2023. Dit geeft een totale monitoringperiode van 8 september 2023 tot 15 december 2024, dus 15 maanden. Hiermee worden alle seizoenen gedekt hetgeen cruciaal is voor de beoordeling van de prestaties. Naast de twee verschillende leveranciers was er ook een variatie in de dekkingsgraad van het PV-gebied: 50% (bereikt met een cellstrip afstand van 10 mm) en 60% (bereikt met een cellstrip afstand van 7 mm). Ten slotte werden er 3 verschillende soorten jaloezieën gebruikt: S157 (grijs, commercieel het meest verkocht), S102 (wit, hoge diffuse reflectie), V95 (grijs, hoge speculaire reflectie). Dit geeft in totaal $2 \times 2 \times 3 = 12$ verschillende ZIEZO-ramen (zie Figuur 18) die naast elkaar zijn geïnstalleerd om een gelijke bestraling gedurende de volledige meetperiode te garanderen.



	PV cell technology	Coverage Ratio (%)	Venetian blind type
1	IBC	60	S102
2	IBC	60	V95
3	IBC	50	V95
4	IBC	50	S157
5	IBC	60	S157
6	IBC	50	S102
7	PERC	60	S102
8	PERC	60	V95
9	PERC	50	V95
10	PERC	50	S157
11	PERC	60	S157
12	PERC	50	S102

Figuur 18: ZIEZO SolarBEAT labelling en specificatie van prototypes.

De belangrijkste meetapparatuur omvat:

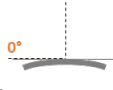
- IV Tracer: EKO MP-160, met een meetfrequentie van elke 2 minuten waarbij een volledige IV-sweep van elk prototype gedurende de hele dag (daglichtperiode) wordt uitgevoerd.
- Pyranometer: secundaire standaard type EKO MS-802, geïnstalleerd in hetzelfde vlak als de ramen.
- Temperatuursensoren in de ZIEZO-ramen: NTC Theben.
- Weerstation: LufftWS600-UMB voor het meten van alle weersomstandigheden.
- Webcam: Voor visuele monitoring van mogelijke schaduwwerking.

3.4.2 WP4.2 Monitoring & Analyse Kleine prototypes

De belangrijkste elektrische performance parameters zijn Specific Yield (SY) en Performance Ratio (PR). Om onderscheid te maken tussen pure stralingseffecten en temperatuureffecten, is ook de temperatuurgecorrigeerde PR (TCPR) berekend. Om het effect van de bifaciale PV-cel opbrengst uit te drukken, was het niet mogelijk om dat te doen ten opzichte van monofacial PV-cellen, omdat deze niet waren geïnstalleerd. Maar met de jaloezieën volledig

omhoog, is er geen reflectie naar de achterkant van de PV-cel. Daarom kan deze situatie met de jaloezieën omhoog als referentiesituatie fungeren.

In het geval dat de jaloezieën volledig naar beneden zijn, is de kanteling van de jaloezieën erg belangrijk voor de hoeveelheid gereflecteerd licht en dus de hoeveelheid extra elektrische energie. De kanteling is een continue instelling van de jaloezieën. Om het onderzoek beheersbaar te houden, zijn er drie vaste instellingen. Let daarbij op dat deze jaloezieën een lichte kromming hebben. Dat geeft de volgende geanalyseerde kantenconfiguraties: bolle zijde naar buiten, horizontaal, en holle zijde naar buiten. Geanalyseerd. Zie onderstaande tabel ter verduidelijking.

Blinds' height [%]	Blinds' tilt [%]	Blinds' tilt in degrees [°] ^{a)}	Description	Schematics
h = 0%	t = n.a.	n.a.	Blinds are not deployed (reference case)	
h = 100%	t = 0%	75° 	Blinds are completely deployed and closed (vertical orientation), with convex side facing outside and upwards	
h = 100%	t = 50%	0° 	Blinds are completely deployed and open (horizontal orientation)	
h = 100%	t = 100%	-75° 	Blinds are completely deployed and closed (vertical orientation), with concave side facing outside and downwards	

Het bleek dat de jaloezieën van het type V95 (meest speculaire reflectie) de hoogste boost in elektriciteit geven, vooral met een kanteling van de bolle zijde naar buiten.

Er zijn zeer veel gedetailleerde inzichten verkregen over de mate van elektriciteits boost afhankelijk van het type jaloezie, de kantenhoek, de weersomstandigheden, en de invloed van de zonnestand door de seizoenen. We hebben besloten om al deze resultaten te publiceren in een open access artikel in het tijdschrift Solar RRL [2]. Dit is dus gratis te downloaden voor iedereen.

In conclusie, de gemeten hoge opbrengsten van de ZIEZO-ramen maken dit product zeer concurrerend op de BIPV-markt. In termen van vermogensdichtheid (> 100 Wp/m²) is dit de hoogste elektrische output die men kan krijgen in het 'translucent' deel van de gevel; het concurreert zelfs met de gekleurde PV-gevelpanelen in het ondoorzichtige deel van de gevel.

3.4.3 WP4.3 Assemblage en installatie grote prototypes bij Pilkington Enschede

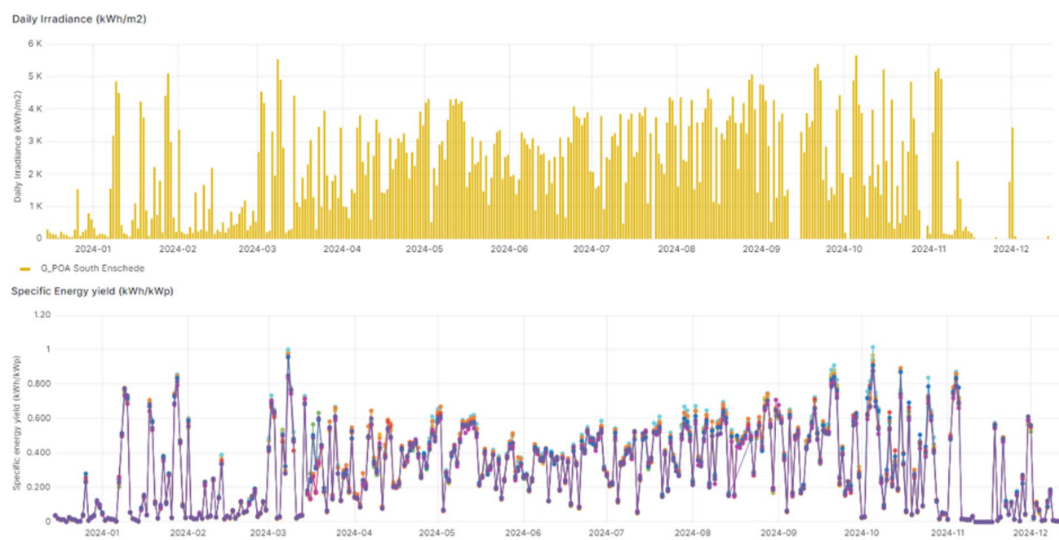
Bij het Pilkington Experience Center in Enschede zijn 8 grote (realistische maten) prototypes ZIEZO-ramen geïnstalleerd in de zuidgevel van het kantoorgebouw. Ook in deze test werden variaties met dekkingsgraden (50% en 60%) en jaloezie types (V95 en S157 jaloezieën) ingebouwd.



Figuur 19: Grote prototypes in de zuidgevel van het Pilkington Experience Center in Enschede. Links: buitenaanzicht, Rechts: binnen aanzicht van kantoordeel achter ramen P1 t/m P6.

3.4.4 WP4.4 Monitoring & Analyse grote prototypes

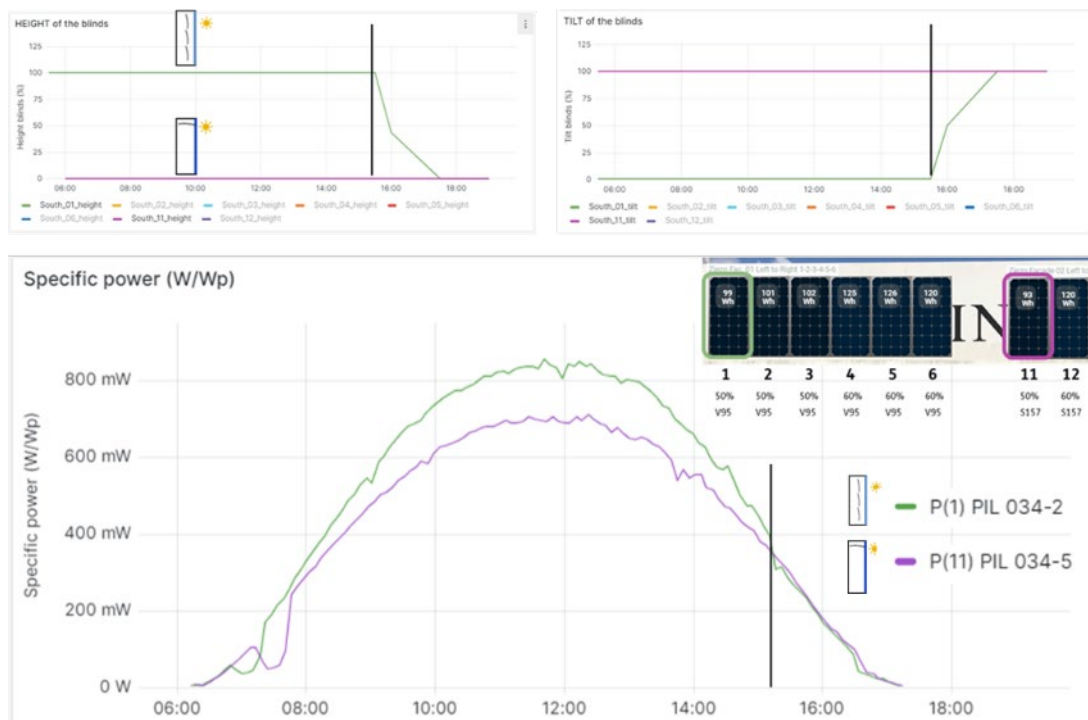
De monitoringperiode was van 15 december 2023 tot 15 december 2024. Dus ook voor deze installatie werd een meetperiode bereikt van een volledig, wat de resultaten en conclusies behoorlijk solide maakt. Zie alle elektriciteitsopbrengst gesommeerd per dag samen met de zonne-instraling in onderstaande grafieken.



Figuur 20: Boven: dagelijkse zonne-instraling [kWh/m²]. Onder: Specific Yield [kWh/kWp].

De belangrijkste bevinding is dat de geobserveerde patronen in elektriciteitsopbrengst (of PR) vergelijkbaar zijn met de resultaten van de kleine prototypes in SolarBEAT. Ook in deze opstelling in Enschede leveren de V95-jaloezieën de hoogste boost.

Ter illustratie hiervan zoomen we in op een willekeurige zonnige dag (8 Maart 2024). We plotten de positie van de jaloezieën en de elektriciteitsopbrengst gedurende die dag voor de ramen P1 en P11 die dezelfde PV-cell coverage van 50% hebben; zie Figuur 21. Achter ramen P11 en P12 zitten geen medewerkers. Daar werden de jaloezieën de gehele dag omhoog gehouden; zie de magenta curves in Figuur 21 voor raam P11. Achter ramen P1 t/m P6 werken personeelsleden die zelf controle hebben over de positie van de jaloezieën. Het is daarom ook wel logisch dat op deze dag met een nog relatief lage zonnestand, de medewerkers ervoor kozen om de jaloezieën naar beneden te doen, zie de groene curves in Figuur 21 voor raam P1. Dan gebeurt er om 15:30 een actie met de jaloezieën: blijkbaar was de zon ver genoeg naar het westen gedraaid en wilden medewerker(s) meer licht of uitzicht naar buiten. De jaloezieën gaan omhoog volgens de sensoren. En we zien dan in de elektriciteitsopbrengst dat ramen P1 en P11 exact hetzelfde opwekken. Dit is geheel naar verwachting. We kunnen in de onderste grafiek van Figuur 21 dus aflezen hoeveel de boost voor raam P1 is geweest. Verder kan het dipje in zowel de groene als magenta curve begrepen worden: dit is de schaduw van het enige object voor de gevel, zijnde een lantaarnpaal. We snappen ook dat de schaduw eerder op raam P1 valt dan op raam P11, omdat de schaduw op deze zuidgevel naar rechts beweegt.



Figuur 21: Vergelijking tussen raam P1 (groen) en P11 (magenta) voor willekeurige dag 8 Maart 2024 die compleet zonnig en wolkeloos was. Bovenste grafieken laten zien dat jaloezieën van P1 om 15:30 omhoog getrokken werden. De onderste grafiek laat de opbrengst van complete dag zien.

De complete analyse van alle dagen van het jaar bevat diverse van deze events die bevestigen dat we een goed begrip hebben van de elektriciteitsopwekking van ZIEZO-ramen.

Over het complete jaar bezien zijn de meest opvallende verschillen tussen SolarBEAT en Enschede niet de trends t.a.v. jaloezie type, CR-van de PV cell-stripes, etc; die trends zijn allen vergelijkbaar. Maar we zien verschillen in de absolute waarden van SY en PR. We denken dat dit een gecombineerd effect is van de volgende drie factoren:

- de bifacialiteitsfactor van de SolarBEAT-prototypes PV-cellen (IBC) is iets hoger dan de grote prototypes PV-cellen (PERC).
- temperatuureffecten: in Enschede wordt een triple glazing IGU met een extra verwarmings glaspaneel gebruikt, wat leidt tot iets hogere temperaturen (gemeten met kleine thermokoppels) in de ruimte binnenin het IGU.
- mogelijke onnauwkeurigheden in de flash test uitgevoerd door de derde partij die de PV-panelen op basis van PERC geleverd heeft.

Al het bovenstaande zijn kleine effecten, maar samen leiden ze tot een significant verschil tussen de SolarBEAT PR-waarden (rond 95-100%) en de Enschede PR-waarden (rond 78-85%).

Ten slotte gaf de volledige jaaranalyse van alle parameters ons ook inzicht in hoe kantoormedewerkers de jaloezieën het hele jaar door gebruiken: 70% van de tijd zijn de jaloezieën volledig omlaag, 27% van de tijd volledig omhoog, en slechts 3% van de tijd in een willekeurige tussenpositie. Bovendien, wanneer de jaloezieën naar beneden zijn, bleek dat de medewerkers de voorkeur geven aan de gesloten positie; dit werd 83% van de tijd gemeten. Voor de resterende 17% van de tijd houden ze de jaloezieën in een horizontale positie. De kanteling met de holle bolling naar buiten wordt nooit gebruikt. Dit werd ook wel verwacht, omdat op deze manier verblindend zonlicht (glare) nog steeds door de jaloezieën heen kan schijnen.

3.5 Knelpunten

Zoals in elk project waarin een nieuw product wordt ontwikkeld, komen er knelpunten voor. We onderscheiden: technisch, organisatorisch en commercieel.

3.5.1 Technisch

Het bleek behoorlijk problematisch om diodes in-lijn mee te lamineren. Ten eerste omdat er al de technische uitdaging is om een nieuwe interconnectie van cellen te lamineren. Ten tweede omdat zeer dunne diodes zeldzaam zijn en het behoorlijk risicovol is t.a.v. de betrouwbaarheid van het laminatieproces. Daarom is er gekozen om de diodes op ‘de klassieke manier’ in de junction boxes (JB) buiten het glas op te nemen. Gezien het feit dat de afmeting van de junction boxes voornamelijk bepaald worden door de grootte van de connectoren (die weer de verbinding naar de kabel geven), is het wel of niet integreren van diodes in de JB in ieder geval geen kritische specificatie t.a.v. de afmetingen van de JB.

3.5.2 Organisatorisch

We zouden de beperkte beschikbaarheid van omvormer elektronica een organisatorisch knelpunt kunnen noemen. Voor aanvang van het project (begin 2022) waren er signalen dat de diversiteit van Power Optimizers (PO's) en micro-omvormers zou toenemen. Echter, telkens als er een nieuwe fabrikant van deze omvormers op de markt kwam, richtte deze zich voornamelijk op het spannings- en vermogens-bereik van gangbare PV-panelen. Voor ZIEZO zijn er echter omvormers nodig in de range van 50 tot 200 Wp. Deze zijn er nagenoeg niet. Als alternatief kiezen we daarom voor het (parallel of in-serie) aansluiten van meerdere ZIEZO-ramen op één omvormer. Dit maakt de uiteindelijke installatie van een gebouw met vele ZIEZO-ramen een stuk complexer. Meerdere kabels kunnen leiden tot aansluitfouten. Als deze aansluitfouten pas laat ontdekt worden, leidt dat tot hoge kosten op de bouwplaats. Dat er fouten gemaakt zullen worden is zeer aannemelijk aangezien de betrokken partijen (E-installateurs en gevelbouwers) meestal niet bekend zijn met ramen waar stekkers aan zitten.

Hoopvol was de start-up Solarnative (DE) die een dunne langgerekte micro-omvormer heeft ontwikkeld die in het kozijn (aan de zijde van een ZIEZO-raam) geplaatst zou kunnen worden. Echter in eerste instantie richtte dit bedrijf zich op een nominale rating van 400 Wp en hoger, hetgeen voor ZIEZO zou betekenen dat de omvormer voor het grootste deel van de tijd een niet-efficiënte DC-AC omvorming zou geven. In samenspraak met Solarnative, medio 2023, werd afgesproken dat we weer opnieuw contact konden opnemen in het voorjaar 2024 over een ‘ZIEZO custom-made’ versie met een optimaal nominaal vermogen voor ZIEZO-ramen. Helaas is het laatste nieuws dat Solarnative inmiddels failliet is [3].

Voor de interne project organisatie is er geen enkel knelpunt geweest gedurende het project.

3.5.3 Commercieel

De grootste bottleneck voor een succesvolle marktintroductie is de (te) hoge kostprijs van het ZIEZO-product. Daaraan ligt de vele handarbeid ten grondslag. Niet alle handmatige processtappen in een Insulating Glazing Unit (IGU) fabriek hoeven problematisch te zijn. Echter, de hoge kosten van het PV-paneel zelf (met de cellstrips) zijn wél problematisch en worden veroorzaakt door de handmatige stappen bij de toeleverancier van dit half-fabricaat.

3.6 Doelgroep en Perspectief Toepassing

De doelgroep van het ZIEZO-project zijn de stakeholders in de gebouwde omgeving. M.b.v. de berekeningen uit WP3 hebben we laten zien dat het toepassen van ZIEZO-ramen in sommige marktsegmenten het verschil kan maken tussen het wel of niet voldoen aan de BENG-eisen en later mogelijk ook het wel of niet voldoen aan de specifieke eisen voor toepassing van zonne-energie in gebouwen zoals voorgeschreven vanuit de EPBD IV).

De toepassing van het project zit uiteraard in het ZIEZO-product zelf. We voorzien dat ZIEZO-ramen vooral toegepast gaan worden in gebouwen die een relatief groot gedeelte geveloppervlakte hebben t.o.v. dakoppervlak, dus hoogbouw. In dergelijke situatie biedt het dak onvoldoende plek voor standaard PV-modules.

Als we dan verder specificeren, zijn er gebouwen met een gevel die een hoge Window-to-Wall-Ratio (WWR) hebben. De architect van een dergelijk gebouw kan deze verhouding niet zomaar veranderen. Het is te eenvoudig gedacht om bij een tekort aan hernieuwbare energie in de gevel, dan maar de WWR te verlagen zodat er meer plek komt voor PV-gevelpanelen. De gewenste WWR komt tot stand op basis van eisen aan voldoende daglicht in het gebouw. Voor gebouwen met een hoge WWR zal er dus noodzaak zijn om de ramen zo intelligent mogelijk te maken. Een ZIEZO-raam is een dergelijk slim regelend raam dat optimaliseert naar de al eerder genoemde KPI's: weinig warmteverlies in de winter, verminderd gebruik airco in de zomer, optimaal invangen zonlicht op koude dagen, voldoende daglicht en geen hinderlijke glare. En dan een boost op de elektriciteitsopwekking waardoor power ratings van effectief ongeveer 120 Wp*/m² mogelijk zijn¹.

Verder is het esthetisch effect van de strepen uiteraard van belang voor het inschatten van het toekomst perspectief. De jaloezieën kun je naar boven trekken. Bij een 'gewoon raam' heb je dan perfect zicht naar buiten, bij een ZIEZO-raam blijf je naar de gestreepte PV-cellen kijken. Dat zal voor veel eindgebruikers niet acceptabel zijn. Echter, we denken dat er in de hoogbouw met veel ramen (hoge WWR) een significant groot marktsegment is, waarbij de jaloezieën überhaupt nooit omhoog getrokken worden, vanwege bv. privacy, glare bij lagere zonnestand, buitenlicht reflecterend in monitors, of gewoon gemakzucht. De kantoormedewerkers in dergelijke gebouwen zijn al gewend geraakt aan een gestreept uitzicht naar buiten. Als daarbij het verhaal over de meerwaarde van ZIEZO aan de medewerkers achter de ZIEZO-ramen goed duidelijk gemaakt wordt, dan kan er wel degelijk een acceptatie ontstaan.

Tot slot, als de eerder genoemde bottleneck van de hoge kostprijs weggehaald kan worden, middels het mass-customization concept (zie paragraaf 'Spin off'), dan ligt er een zeer goed perspectief voor ZIEZO-ramen in de markt van kantoorgebouwen.

¹ Bij een boost van gem. 20% over het complete jaar en een STC bepaalde power rating van 100 Wp/m², kan dit voor elektriciteitsopwekking berekening beschouwd worden als 120 Wp/m².

4 Outlook en kennisverspreiding

4.1 Bijdrage aan doelstellingen van HER+

Het ZIEZO-project vermindert de CO₂-uitstoot door middel van:

- Opwekking elektriciteit d.m.v. PV-cellstrips in een gedeelte van de gevel waar normaliter totaal geen elektriciteitsopwekking plaatsvindt.
- Vermindering van energiekosten aan verwarming in het stookseizoen.
- Vermindering van energiekosten aan airconditioning in de zomer (en hete dagen in lente en herfst).
- Optimalisatie van additionele LED-verlichting in de ruimtes achter de ZIEZO-ramen.

Door slim te regelen wordt het ZIEZO-raam gedurende het jaar continue ingesteld, en wordt er gemaximaliseerd op de vermindering van energiekosten (dus CO₂-uitstoot) en gebruikerseisen.

Uiteraard zijn niet alle aspecten altijd maximaal ingesteld met een slimme regeling. Als er bijvoorbeeld gekozen wordt voor een hogere coverage ratio van de PV-cellstrips, dan zal dat meer elektriciteit opleveren, maar er zal dan ook iets meer LED-verlichting nodig zijn; dit kan de slimme regeling niet veranderen.

Een kwantitatieve uitwerking van vele scenario's met verschillende configuraties van het ZIEZO-raam, op verschillende manieren geregeld, voor diverse gebouwen en oriëntaties van de gevel is gedaan in WP3.

4.2 Spin off

In bovenstaande paragraaf over knelpunten werd al geschetst dat de hoge kostprijs van het half-fabricaat 'cell-striped PV-panel' een bottleneck is voor grootschalige markintroductie.

In de Europese subsidie call CETP nr.10 'Built Environment' is het mogelijk om de productie van de cell-striped PV-panelen verder te automatiseren. TNO heeft als penvoerder recent hiervoor een indiening gedaan, waarbij het mass-customization concept opgevoerd wordt als mogelijkheid voor een vergaand geautomatiseerd productieproces van de PV-panelen. De partijen TNO, TU/e en Pilkington nemen deel aan dit consortium. Op 28 januari 2025 kwam het positieve antwoord van CETP, dat het projectvoorstel door de 1^e ronde is goedgekeurd. Het consortium is uitgenodigd om het full proposal in te dienen voor 1 April 2025, en zal dat zeker gaan doen.

4.3 Openbare publicaties

In chronologische volgorde hebben de volgende presentaties, academische publicaties en kennisverspreiding in publieke media plaatsgevonden:

4.3.1 Presentaties

18 September 2023

(poster) presentation at EU-PVSEC conference in Lisbon, Portugal

“Towards highly efficient multifunctional photovoltaic windows”

Simona Villa¹, Nicolas Guillevin¹, David Out¹, Marcel Ribberink², Roland Valckenborg¹

10 October 2023

Webinar Engineers Ireland

“Next-generation advanced facades: research and applications”

<https://www.engineersireland.ie/Events/event/9298>

100 attendees

9 February 2024

EIRES Lunch Lecture

Title: Solar building envelopes - key building blocks for the energy transition

<https://www.tue.nl/en/our-university/calendar-and-events/09-02-2024-eires-lunch-lecture>

150 attendees

22 March 2024

Going Beyond: Innovative Integration of Sustainable and Energy-Efficient Solutions in Building Design

Final workshop EU Horizon Powerskin project

“Simulation tools for energy efficiency in buildings: Supporting R&D of innovative building envelopes”

<https://www.linkedin.com/events/integrationofsustainable-energy7174057387585077248/about/>

unknown number of attendees

30 May 2024

Daylight Academy Conference in Norway

<https://daylight.academy/events/annual-conference/>

24 September 2024

Oral presentation at EU-PVSEC conference in Vienna, Austria

“Boosting the performance of semitransparent PV Windows”

Simona Villa¹, Nicolas Guillevin¹, David Out¹, Marcel Ribberink², Roland Valckenborg¹

3 October 2024

oral presentation at TU/e Sustainability Day

“Ziezo - Bifacial Photovoltaic Insulated Glass Window integrated with Solar Shading”

Ishac, M., Pouyanmehr, M., Loonen, R. C. G. M., and Valckenborg, R.

https://assets.w3.tue.nl/w/fileadmin/TU_e_Sustainability/Sustainability%20Day%203%20October%20-%20Full%20Updated%20Program%20.pdf

28 November 2024

Symposium EngD Smart buildings and Cities SBC, Built Environment at TU/e

“Ziezo - Bifacial Photovoltaic Insulated Glass Window integrated with Solar Shading: A model and tool to mediate between daylight, comfort and energy”

Ishac, M., Loonen, R. C. G. M., and Valckenborg, R.

<https://www.tue.nl/en/our-university/calendar-and-events/28-11-2024-annual-symposium-engd-smart-buildings-cities>

4.3.2 Academische publicaties

18 September 2024

peer-reviewed paper published in journal Solar RRL, Wiley Online Library

“Outdoor Performance Analysis of Semitransparent Photovoltaic Windows with Bifacial Cells and Integrated Blinds”

<https://doi.org/10.1002/solr.202400515>

Open access, dus gratis downloadbaar

27 September 2024

conference proceeding short paper

“Semitransparent bifacial PV Windows with integrated blinds: experimental and modelling results”

DOI: 10.4229/EUPVSEC2024/4BO.16.2

<https://userarea.eupvsec.org/proceedings/EU-PVSEC-2024/4BO.16.2/>

4.3.3 Nieuwsberichten publieke media

8 February 2024

press release ZIEZO and SolarBEAT

https://www.linkedin.com/posts/tno-duurzaam_bipv-pv-zonnepanelen-activity-7161299567659958272-iho5?utm_source=share&utm_medium=member_desktop

<https://www.tno.nl/nl/technologie-wetenschap/laboratoria/solarbeat/>

Richting eind van het project hebben we onderstaand nieuwsbericht uitgebracht:

14 November 2024

Press release ZIEZO from TNO

<https://www.tno.nl/nl/newsroom/2024/11/multifunctioneel-zonneraam-stroom/>

waaruit behoorlijk veel media aandacht is voortgekomen:



Figuur 22: Eindhovens dagblad (and Energieia) interviewde Roland Valckenborg voor additionele achtergrond informatie.

14 November 2024

<https://www.telegraaf.nl/financieel/1447643476/tno-maakt-dubbelzijdig-zonnepaneel-opwek-stroom-aan-binnen-en-buitenkant-woning>

14 November 2024

<https://www.duurzaam-ondernemen.nl/nieuw-multifunctioneel-zonnepaneel-wekt-stroom-op-door-licht-te-weerkaatsen/>

15 November 2024

<https://optics.org/news/15/11/21>

15 November 2024

<https://engineeringnet.be/nl/nieuws/item/23520>

16 November 2024

<https://www.ed.nl/economie/zonnepanelen-met-luxaflex-erin-maken-kantoorpanden-energiezuiniger-we-hebben-zelfs-een-wereldrecord~a528082a/>

20 November 2024

<https://solarmagazine.nl/nieuws-zonne-energie/i39076/nieuw-raam-met-zonnecellen-wekt-stroom-op-door-licht-te-weerkaatsen>

27 November 2024

<https://www.change.inc/energie/zonneraam-tno-wekt-kwart-meer-stroom-op-door-weerkaatsing-licht-via-jaloezieen-41369>

2 December 2024

<https://deingenieur.nl/artikelen/nieuw-raam-oogst-extra-veel-zonne-energie>

16 December 2024

<https://www.maakindustrie.nl/nieuws/energie/nieuw-multifunctioneel-zonneraam-wekt-stroom-op-door-licht-te-weerkaatsen/>

24 December 2024

<https://www.advancedsciencenews.com/solar-windows-with-reflective-blinds-give-buildings-an-energy-boost/>

26 December 2024

<https://www.trouw.nl/duurzaamheid-economie/zonneraam-tno-levert-stroom-en-verkoeling~bdb25937/>

31 December 2024

<https://energeia.nl/multifunctioneel-zonneraam-vestigt-wereldrecord/>

28 Januari 2025

<https://www.stedebouwarchitectuur.nl/artikel/innovatie/energie-oogsten-met-de-gevel>

4.4 Beschikbaarheid rapport

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

4.5 Contactpersonen

- Pilkington, www.pilkington.nl : Marcel Ribberink, marcel.ribberink@nsg.com
- TNO, <https://www.tno.nl/en/about-tno/organisation/units/energy-materials-transition/> : Roland Valckenborg, roland.valckenborg@tno.nl
- TU/e, <https://www.tue.nl/en/our-university/departments/built-environment> : Roel Loonen, r.c.g.m.loonen@tue.nl
- W/E Adviseurs, <https://www.w-e.nl/> : Pieter Nuiten, nuiten@w-e.nl

5 Conclusies

Het project ZIEZO is organisatorisch en financieel geheel naar verwachting uitgevoerd. Het heeft geleid tot een succesvol project waarin een nieuw product ontwikkeld is. Voorlopig is er nog geen commerciële naam voor dit product en wordt er naar gerefereerd als een ZIEZO-raam.

In de kern van het ZIEZO-raam zitten dubbelzijdige PV-cellen, die slim geassembleerd worden tot ruiten van gestreepte PV-cellen; deze productiestap is zowel in-huis bij TNO ontwikkeld, als uitbesteed bij een 3rd party. Beide routes hebben geleid tot een succesvol halffabrikaat in het complete ZIEZO raam. Echter, beide routes zijn relatief duur vanwege het vele handwerk, en daarmee de meest belangrijke bottleneck voor grootschalige commerciële uitrol.

Er zijn vele KPI's van het ZIEZO-product opgesteld aan de hand van de basis functionaliteiten: genoeg daglicht (zo weinig mogelijk artificiële verlichting), genoeg thermische isolatie (zo laag mogelijke stookkosten in winter), genoeg glare-preventie (geen additionele zonwering nodig), voorkomen van oververhitting (zo laag mogelijke airco kosten in de zomer), en maximalisatie van elektriciteitsopbrengst (voor zover niet conflicterend met de andere functionaliteiten).

Mini-modules (20cm x 20cm) zijn gebruikt in de vroege project fase om de productontwikkeling verder te brengen. Vervolgens zijn er kleinere prototypes (60cm x 45cm) geïnstalleerd in outdoor research facility SolarBEAT waarmee vooral de complexe mate van boost door de dubbelzijdige PV-cellen goed in kaart is gebracht en begrepen. Het peer-reviewed artikel hierover [2] heeft veel positieve exposure opgeleverd, ook in de traditionele media (kranten, linkedin, vakbladen, etc..)

Grote prototypes (100cm x 180cm) zijn geïnstalleerd in het Pilkington Experience Centre in Enschede. Achter deze ZIEZO-ramen werken kantoor medewerkers. Dit gaf ons de gelegenheid om alle functionaliteiten te evalueren. Dankzij een vervroegde installatie (t.o.v. projectplanning) konden deze grote prototypes ook ruim een jaar lang geanalyseerd worden.

Last but not least, is de modelering van de ZIEZO-ramen op een zeer professioneel niveau uitgevoerd, waarbij alle hierboven genoemde functionaliteiten en KPI's zijn meegenomen. De resultaten zijn middels een gebruikersvriendelijk tool te gebruiken door eindgebruikers of verkopers/consultants. M.b.v. dit tool kan het ZIEZO-raam gespecificeerd worden op basis van de specifieke eisen van gebouw en klant. Daarbij worden ook alle milieu aspecten meegenomen (LCA, MPG, MKI, recycled content, etc...) en zullen gebouwen met ZIEZO-ramen moeten voldoen aan bouwbesluit criteria (BENG1,2,3, TO-juli).

Zoals vermeld zal alleen nog de kostprijs naar beneden gebracht dienen te worden. Partner Pilkington verwacht dat indien de kostprijs grofweg een factor twee lager is, het ZIEZO-product een commercieel succes zal zijn. Deelname aan een Europees project waarin dit kostprijs doel specifiek getackeld zal worden, kan deze laatste horde wegnemen.

De samenstelling van het consortium is bijzonder effectief gebleken waarbij de projectpartners aanvullende expertises hebben ingebracht. Alle projectpartners kijken terug op een efficiënt uitgevoerd project, geheel volgens projectplan.

Bijlage A: Referenties

- [1] www.tno.nl/solarbeat
- [2] S. Villa, D. Out, N. Guillevin, M. Hurtado Ellmann, M. Ribberink, R. Valckenborg (2024), Outdoor Performance Analysis of Semitransparent Photovoltaic Windows with Bifacial Cells and Integrated Blinds. Sol. RRL, 8: 2400515. <https://doi.org/10.1002/solr.202400515>
- [3] <https://solarmagazine.nl/nieuws-zonne-energie/i37826/duitse-micro-omvormerfabrikant-solarnative-in-problemen-bedrijf-te-koop>

Bijlage B: Lay-out Openbaar eindrapport

Volgens website RVO Topsector Energie (https://www.rvo.nl/sites/default/files/2024-07/Format-eindrapport_TSE.pdf) geraadpleegd 2025-02-25

Openbaar eindrapport

Deadline: Binnen 13 weken na afloop van het project moet het verzoek tot vaststelling en de rapportage door RVO zijn ontvangen
Indienen: Het eindrapport voegt u als bijlage toe bij uw aanvraag tot vaststelling.

Het openbare eindrapport is bedoeld voor een breder publiek. U vermeldt in het rapport vanuit welk Ministerie het project is gesubsidieerd. De publicatiedatum vermeldt u op het rapport. Het gaat hierbij uitdrukkelijk niet om de commerciële promotie van de producten of projectresultaten. U bent verantwoordelijk voor de uitgave en u bent vrij in de keuze van vormgeving van het rapport.

Het openbare eindrapport bevat de onderstaande elementen en is bij voorkeur opgesteld in de Nederlandse taal:

- Projecttitel
- Penvoerder en deelnemers
- Projectperiode
- Samenvatting van de uitgangspunten en doelstelling van het project
- Een tekening, schema of foto's van het proces dat u heeft onderzocht of gedemonstreerd, zodat een breder publiek een beeld krijgt van het project.
- Beschrijving van de behaalde resultaten, de knelpunten, de doelgroep 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 meer exemplaren van dit rapport te bestellen zijn.
- Vermelding van contactpersoon (personen) voor meer informatie.
- Het openbare eindrapport wordt door RVO gepubliceerd. Vermelding van de verkregen subsidie is daarom verplicht. Vermelding in het openbare eindrapport doet u op de volgende manier:

"Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Klimaat en Groene Groei, het Ministerie van Landbouw, Visserij, Voedselzekerheid en Natuur, en voor zover van toepassing, [het Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties] of [het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat], Regeling nationale EZK- en LNV-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland."

Energy & Materials Transition

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