

Project informatie

Project nummer: TEHE117099

Project titel: POLARIS

Penvoerder: Tempres Systems BV

Deelnemers: Levitech B.V., Morphotonics B.V., Solar Electricity Development B.V., TNO
(voormalig Stichting Energieonderzoek Centrum Nederland), Veco B.V.

Aanvangsdatum: 1 mei 2018

Einddatum: 31 oktober 2021



morphotonics



Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Subsidieregeling energie en innovatie (SEI), Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.



Rijksdienst voor Ondernemend
Nederland

Samenvatting

Bij aanvang van het project waren de kosten voor de productie van zogenaamde bifacial zonnemodules die zowel lichtgevoelig zijn aan de voor- als de achterzijde van de module, nog erg hoog in verhouding tot het gemeten vermogen van het module. Om deze reden is in het POLARIS project gewerkt aan alle facetten van de productiecyclus van een module om daarmee de kosten effectiviteit van dit type zonnemodules te verbeteren gecombineerd met een hoge betrouwbaarheid en energieopbrengst.

Ten einde lagere productiekosten van het cel fabricage proces aannemelijk te maken in een industriële omgeving zijn in de laboratoria van TNO op basis van een bij aanvang van het project bestaande procesflow aanpassingen gedaan om kostbare laboratorium processen te vervangen door industrieel bewezen diffusie en depositie technologieën zoals voor boor diffusie, silicium nitride, poly-silicium en aluminium oxide. Levitech en Tempres hebben hiertoe hun apparatuur geoptimaliseerd voor de specifieke toepassing van productie van zonnecellen waarbij door het verhogen van doorvoer en verlagen van onderhoudskosten significante kosten reducties zijn gerealiseerd.

Tegelijkertijd is er bepaald hoe de energieopbrengst kan worden gemaximaliseerd door lichtmanagement te optimaliseren voor dubbelzijdige in plaats van enkelzijdige lichtgevoeligheid. Om dit te bewerkstelligen is gebruik gemaakt van de innovatieve technologie van Morphotonics waarbij nano-imprint lithografie wordt gebruikt om structuren te patroneren om daarmee de lichtinkoppeling te verbeteren.

Dit alles is vervolgens samengebracht om modules te maken aan de hand van de in POLARIS ontwikkelde oplossingen. Hierbij zijn eerst testmodules gemaakt van verschillende formaten waarbij module materialen zijn veranderd en zijn blootgesteld aan geselecteerde versnelde levensduurtesten volgens standaard normen. Dit resulteerde in een optimale combinatie van module materialen die is geselecteerd voor de fabricage van PV modules bestaande uit 60 in serie geschakelde cellen en zijn toegepast in de diverse testopstellingen.

Om op grotere schaal te kunnen kijken naar het gedrag van verschillende configuraties van veldopstellingen is uitgeweken naar commercieel beschikbare cellen met eigenschappen vergelijkbaar met de in POLARIS ontwikkelde cellen. Deze modules zijn in een drietal veld opstellingen geïnstalleerd met variatie van een aantal parameters waarna de energieopbrengsten zijn geëvalueerd.

Uiteindelijk is aan de hand van de in het project verkregen informatie ook gekeken naar mogelijkheden voor verdere uitrol van bifacial modules in Nederland. Toepassing in reguliere projecten blijkt nog niet direct van toegevoegde waarde. Dit komt door een aantal economische overwegingen

- De huidige SDE+ subsidieregeling voor zowel parken op land als die voor grote(re) dak opstellingen ondersteunt slechts de energieopbrengst per eenheid nominaal vermogen, met enkel voorzijde belichting, tot een maximale waarde, 950 kWh/kWp. Dit is 5-10% lager dan een typische opbrengst in Nederland.
- Land in Nederland is erg kostbaar, hierdoor is het typisch zo dat maximalisatie van energieopbrengst per module secundair is aan energieopbrengst per vierkante meter land.
- In een economische optimalisatie leiden beide feiten er toe dat er én veel modules, tot >90% van het landoppervlak, geplaatst worden, én dat de meeropbrengst in kWh van de bifacial modules niet tot een hoger inkomen leidt.

Er is echter een belangrijk punt dat op het moment steeds relevanter wordt en zeker zo belangrijk als kosten effectiviteit lijkt te worden: namelijk de impact op de omgeving en daarmee draagvlak voor toepassing van zonnemodules. In eerste instantie gaat dit om de hogere instraling op de grond en de

positieve effecten die hieruit voortkomen voor bodemkwaliteit en ecologie. Ook de combinatie met zonvolgsystemen en bifacial modules geeft een win-win situatie waardoor er minder land nodig is voor gelijke energieopbrengst. Tevens laat de hogere mate waarin het licht onder de modules komt ook meervoudig landgebruik toe. Er zijn ondertussen meerdere onderzoeksprojecten waarbij deze modules worden toegepast voor meervoudig landgebruik en specifieke agrarische toepassingen .

Inhoud

Inhoudelijk eindrapport	
1.1 Introductie	6
1.2 Doelstelling	6
1.3 Werkwijze	7
1.4 Onderzoeksvragen van het project.....	8
1.5 Werkpakket beschrijvingen vanuit het projectvoorstel	9
1.6 Project resultaten en discussie	14
1.7 Deliverables.....	32
1.8 Conclusies en aanbevelingen	34
Appendix	
Disseminatie van project resultaten	37

Inhoudelijk eindrapport

1.1 Introductie

Meerdere grote PV producenten hebben reeds bifacial zonnecellen en modules in (pilot) productie genomen¹. De PANDA² modules van Yingli, ontwikkeld in samenwerking met Tempres en ECN, zijn daar een voorbeeld van. Ondanks de grote en diverse voordelen van bifacial PV laat een definitieve doorbraak van deze technologie echter nog op zich wachten. Voordat bifacial PV definitief kan doordringen op de grotere markt, dienen de volgende probleemstellingen te worden opgelost:

1. De productie van bifacial cellen en modules is doorgaans nog duurder dan die van monofaciale producten.
2. De meest bifacial cellen en modules zijn nog niet voorbij TRL6/7 ontwikkeld, en moeten de stap naar massaproductie en bijbehorende kwalificaties nog nemen. Zo is onder meer het fabricage proces nog niet volledig geoptimaliseerd op stabiliteit, doorvoer en materiaalverbruik.
3. Voordat project ontwikkelaars en installateurs een nieuwe technologie implementeren, zijn duurtesten en veldtesten van de PV modules noodzakelijk. Dit geldt zeker voor bifacial PV, waar zowel de cel als de moduletechnologie relatief nieuw is, en de energie opbrengst nog niet exact voorspeld kan worden:
 - o Modules worden geclassificeerd in kosten per vermogen, en dit vermogen wordt bepaald met een enkelzijdige meting. De daadwerkelijke kosten van de door een bifacial systeem opgewekte energie vallen uiteindelijk lager uit: als er ook licht op de achterzijde van het module valt, in praktijk in het algemeen diffuus licht, zal er met eenzelfde module meer kWh worden opgewekt. Deze meerwaarde is echter – zeker op de Nederlandse markt- nog onvoldoende gedemonstreerd en geaccepteerd.
 - o Er bestaan nog geen goede computer simulatie programma's om de totale (maandelijkse/jaarlijkse) energie -en daarmee commerciële - opbrengst van een bifacial systeem te voorspellen. Er wordt nu veelal het commerciële programma PVSyst gebruikt, hiermee kunnen bifacial systemen slechts rudimentair doorgerekend worden. Geavanceerdere modellen zijn in ontwikkeling, maar nog onvoldoende gevalideerd op systemen uit de praktijk en die voldoende relevant zijn voor potentiële investeerders.

1.2 Doelstelling

In het POLARIS project zullen innovatieve bifacial modules, gebaseerd op de PERPoly zonnecel, in pilot productie naar TRL 8 worden gebracht en in een drietal pilot systeemconfiguraties worden getoetst op duurzaamheid en opbrengst. De PERPoly zonnecel is gebaseerd op n-type kristallijn Silicium materiaal en passiverende contacten waardoor zowel de standaard voorzijde efficiëntie als de **bifaciality** (ratio achterzijde/voorzijde efficiëntie) hoger is dan die van standaard industriële (p-type) cellen. Deze zonnecel is door de partners reeds tot TRL 5-6 gebracht o.m. in eerder uitgevoerde TKI projecten Antilope en NexPas. De POLARIS module is een glas-glas module hetgeen ook zal zorgen voor modules die een langere levensduur hebben en mede daardoor ook langer hun vermogen kunnen blijven leveren. Aan de buitenzijde van de modules wordt een innovatief "light trapping" coating (LTC) aangebracht dat ervoor zorgt dat licht ook onder een grotere hoek beter in de cellen wordt ingevangen. Dit zal de energie-jaaropbrengst in het veld verder verhogen.

Het doel van het POLARIS project is:

¹ <http://taiyangnews.info/taiyangnews-bifacial-solar-modules-technology-2017-download-form/>

² https://pv.energytrend.com/news/Yingli_PANDA_Bi-facial_Module_Wins_Prize_in_China.html;
<http://www.yinglisolar.com/en/products/monocrystalline/panda-bi-facial-144hcf/>

De hoog efficiënte bifacial POLARIS zonnemodule verder door te ontwikkelen zodat het gereed komt voor introductie op de markt, en hiermee zowel hogere energie opbrengst als lagere kosten van PV-systemen in Nederland mogelijk te maken.

Het overkoepelende doel van het project zal worden beoogd middels subdoelstellingen op 3 verschillende niveaus, die elk verschillende bovenstaande probleemstellingen beschreven in 1.1 aanpakken:

Subdoelstellingen voor **bifacial systemen**, waarmee **probleemstelling 3** wordt opgelost:

- Aantonen van hogere energie opbrengst van bifacial pilot systemen in 3 verschillende configuraties en vergeleken met een standaard monofacial systeem.
- Validatie van reeds ontwikkelde geavanceerde bifacial systeem modelering
- Acceptatie en inzicht in meerwaarde van bifacial PV systemen bij de Nederlandse energie bedrijven, ondernemers, installateurs en consumenten door middel van publicaties, workshops en presentaties.

Subdoelstellingen voor **bifacial modules**, waarmee **probleemstelling 2** wordt opgelost:

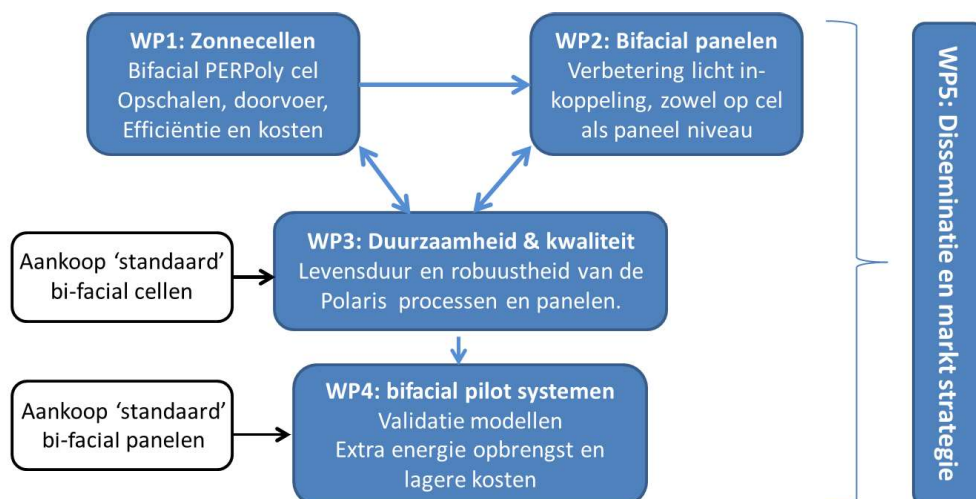
- Verhogen van het module rendement door verbetering van de licht inkoppeling met minimaal 5% door structuur aan te brengen tussen de cellen en op het glas
- Verbeteren van de duurzaamheid en verlengen van de levensduur van 20 naar minimaal 30 jaar door het glas-glas ontwerp van de modules.

Subdoelstellingen voor **bifacial cellen**, waarmee **probleemstellingen 1 en 2** worden opgelost:

- Verhogen van productie doorvoer tot 6000 wafers/uur voor de verschillende cel proces stappen, hetgeen een significante CoO verlaging (20 – 30%) per productie stap oplevert
- Verbeteren van de productie stabiliteit door innovaties aan cel proces flow en cel design
- Verlagen van de productie kosten door verminderd zilver (Ag) gebruik middels aanpassing van het contact ontwerp, getuned op het Noord-Europees / NL klimaat
- Verhogen van het cel rendement van 21.5% tot 22% door het aanbrengen van smallere metaal contacten met minder schaduwverliezen.

1.3 Werkwijze

Om de doelstellingen van dit project, te weten een bifacial cel en module product dat klaar is voor introductie op de markt (dus TRL8), alsmede het aantonen van een hogere energieopbrengst en lagere kosten (in €/kWh) voor bifacial systemen zo effectief mogelijk te behalen is het project opgedeeld in 4 technische werkpakketen. Daarnaast is er een vijfde werkpakket, waarin het verder ontwikkelen van de marktstrategie en disseminatie van project resultaten (met name extra energie opbrengst) voor acceptatie en dus markt introductie van bifacial PV in NL zal zorgen. In WP1 zullen de partners Tempres, Levitech, Veco en TNO de innovatieve, bifacial “PERPoly” zonnecel verder ontwikkelen, de productie verhogen, het proces stabiliseren en de kosten verlagen. In WP2 ligt de focus op de modules. Morphotonics zal werken aan verbetering van licht inkoppeling aan zowel voor als achterzijde van bifacial modules, terwijl TNO de licht inkoppeling tussen de cellen, in de module, verder zal verbeteren. In WP3 worden alle innovaties op cel en module gebied uit WP1 en 2 op duurzaamheid en robuustheid getest. De best bevonden cel en modulematerialen zullen gebruikt worden voor het produceren van voldoende bifacial POLARIS modules. In WP4 worden deze geïnstalleerd door SED en TNO in drie verschillende systemen waarmee de hogere energie opbrengst en kosten reductie van bifacial PV zal worden aangetoond.



1.4 Onderzoeksvragen van het project

De belangrijkste onderzoeksvragen in Polaris zijn gericht op het effect van innovaties op cel en module (uit WP1 en 2) op de **energie opbrengst van de PV systemen**:

A: Effect van hogere efficiëntie van de ontwikkelde bifacial Polaris cel t.o.v. state of art bifacial cellen

B: Effect van modules met lagere kosten (minder Ag verbruik en hogere productiedoorvoer)

C: Effect van cellen met hogere bifaciality (stencil print metallisatie op achterzijde)

D: Effect van verbeterde licht inkoppeling (m.n. lage hoek instraling) door anti-reflecterende laag

E: Effect op energie opbrengst en kosten als alle innovaties uit A t/m D worden gecombineerd

F: Breed-gedragen validatie van de energie opbrengst modellen voor verschillende systeem

Voor het beantwoorden van onderzoeksvragen A t/m E zijn per test opstelling 4 tot 12 Polaris modules met de betreffende innovaties voorzien. Voor het beantwoorden van onderzoeksvraag F zijn drie grotere systemen noodzakelijk, om de randeffecten en bijvoorbeeld zelf-schaduw van het systeem op de juiste manier te kunnen analyseren. Vanwege de kosten van pilot productie bij de projectpartners zelf is gekozen om de systemen niet volledig op te bouwen uit Polaris modules. Binnen het project zullen hiertoe state-of-art bifacial cellen en modules aangekocht worden. Dit heeft als bijkomend voordeel dat de Polaris modules direct vergeleken kunnen worden met bestaande commerciële producten. In het project is gekozen voor de constructie van onderstaande bifacial pilot systemen..

Traditioneel:	Optimaal gebruik van grond:	Combinatie met landgebruik:
---------------	-----------------------------	-----------------------------

<p>Traditioneel Zuid 30°</p>	<p>Oost-West 10°</p>	<p>Oost-West 90°</p>
4 rijen van 8 modules	4 rijen van 2x6 modules	6 rijen van 2x6 modules.

1.5 Werkpakket beschrijvingen vanuit het projectvoorstel

WP 1: Bifacial zonnecellen: <u>Tempress</u> , Levitech, Veco, TNO		Category: IO
<p>De PERPoly zonnecel is gebaseerd op n-type silicium, met een p+ boron emitter en Al₂O₃ passivatie aan de voorzijde en een n+ gedoteerd polysilicium gepassiveerd contact op de achterzijde. Deze cel is reeds door TNO, Tempress, Levitech en Veco ontwikkeld tot TRL6, zie ook Appendix B.</p>		
1.1	Bifacial zonnecel design en process flow, lead: TNO	(IO) M1 – M6
<p>TNO zal de proces flow samen met Tempress en Levitech verder optimaliseren, door proces stappen te combineren (bv. door chemie voor schoonmaak en isolatie of hoge temperatuur diffusie en drive in stappen samen te voegen; een andere optie is bijvoorbeeld oxidatie en depositie stappen in dezelfde buis uit te voeren) en deze verder te vereenvoudigen. Testen zullen gedaan worden op batches van 25 cellen. Na 6 maanden zal de proces flow bevroren waarna deze door Tempress, Levitech en Veco verder zal worden geoptimaliseerd op doorvoer, materiaal verbruik en verminderde spreiding in resultaten.</p>		
1.2	Opschalen van diffusie en poly depositie, lead: Tempress	(IO) M1 – M15
<p>Tempress zal innovaties aan de tools voor boron diffusie, polysilicium depositie, dotering van (poly) Si, en SiN_x depositie uitvoeren. Voor boron diffusie zullen onder andere een betere gas distributie over oven, verbeterde hardware (deur), automatisering en warmte huishouding worden geïmplementeerd waarmee de doorvoer zal worden vergroot tot en met 6000 wafers per uur en daarmee de kosten tot 30% zullen worden bespaard in CAPEX/wafer geproduceerd. Voor de LPECVD (voor poly en SiN_x depositie) zal het aantal wafers per carrier (boot) van 3200 tot 4000 worden vergroot, en zal een grotere plasma generator, alsmede een nieuw heating element worden ingebouwd teneinde ook hier een hogere en stabielere doorvoer voor de processen te verkrijgen. Dit werk zal plaatsvinden in de pilot lijn bij TNO. Testen en validatie van eigenschappen van de verschillende lagen zal door TNO en Tempress in Petten gedaan worden.</p>		
1.3	Verhogen doorvoer en verlagen kosten van Al₂O₃ depositie, lead: Levitech (IO)	(IO) M1 – M15
<p>Levitech zal de kosten voor Al₂O₃ depositie met 20% verlagen door de betrouwbaarheid van het transport van wafers in de Levitrack te verbeteren en de doorvoer te verhogen van 4800 tot 6000 wafers per uur. Hiertoe installeert Levitech flexibele zijwand-banden die de wafers op hoge snelheid stabiel door de tool heenleiden. Ontwerp, test en implementatie zal allereerst in Almere plaatsvinden, waarna TNO evaluatie van de elektrische eigenschappen van de Al₂O₃-films geproduceerd bij 6000 wafers/uur (implied Voc, J0) zal uitvoeren. Na verificatie van passiverende eigenschappen in zonnecellen zal Levitech een retrofit-kit waarin alle tot op dat moment bekende verbeteringen zijn opgenomen produceren en installeren op het Levitrack systeem bij TNO in M12. Aangezien het de verwachting is dat er nog een tweede slag overheen moet worden gemaakt zal deze kit geheel</p>		

afgeschreven in het kader van het project. Verder wordt de Cost-of-Ownership (mede) gereduceert door een aantal onderhoudsprocessen te verbeteren dan wel te versnellen.			
1.4	Reductie van zilver consumptie, lead: Veco	(IO)	M1 – M15
<p>Veco zal de stencils voor metallizatie verder verbeteren, met name op stabiliteit. Dit zal gedaan worden door patronen in de dunne metalen stencils aan te brengen die de stress tijdens de print stap zullen reduceren. Het patroon zal hierdoor regelmatig en vaster van vorm worden. Hiermee is het dan mogelijk dunnere lijnen te printen (45 µm naar 30 µm breed) over de gehele zonnecel hetgeen zal leiden tot een 20% reductie in zilver verbruik alsmede een efficiëntie verhoging van 0.4 – 0.5%.</p> <p>Het stencil print proces zal zowel op de voorzijde als op de achterzijde van de zonnecel worden toegepast. Hiermee is nog een verbetering van de bifacial cellen mogelijk die in deze taak door TNO en Veco onderzocht gaat worden: Het afstemmen van het metaal patroon op lagere licht instralings condities specifiek voor zoals die in NL en noord EU. Bij deze condities is de opgewekte stroom gemiddeld genomen lager, en zullen de weerstandsverliezen in de contacten lager zijn. Hierdoor kan er nog minder zilver gebruikt worden met een verdere kosten verlaging als gevolg.</p>			
1.5	Integratie en Productie van cellen voor POLARIS modules, lead: TNO	(EO)	M7 – M18
<p>TNO zal de diverse productie verbeteringen van zonnecellen uit 1.2 – 1.4 uittesten op batches van 250 - 500 cellen. Deze cellen zullen worden gebruikt in 3.1 voor kwaliteits testen op betrouwbaarheid en robuustheid. Target is een optimaal en stabiel proces voor 22% PERPoly cellen (M7 - 15). TNO zal vervolgens samen met Tempress, Levitech en Veco 1200 Polaris cellen produceren op de pilot line in Petten, waarbij resultaten uit 3.1 zullen worden meegenomen (M18). Optimalizatie op zilver verbruik, efficiëntie, bifaciality of energie (jaar) opbrengst zullen verschillende configuraties voor met name de metallizatie opleveren. Deze zullen worden gebruikt voor de verschillende modules voor de onderzoeks vragen A - C in WP4 (M22 – 30).</p>			
WP1 Deliverables & Milestones			
D1.1	Process freeze voor PERPoly cellen met 22% efficiëntie		M6, TNO
D1.2	Kosten effectief proces voor boron diffusie en poly, SiNx depositie		M15, Tempress
D1.3	Kosten effectief proces voor Al2O3 depositie		M15, Levitech
D1.4	Kosten effectief proces en materialen (stencils) voor zilver depositie		M15, Veco
D1.5	1000 PERPoly cellen voor productie van modules		M18, TNO
WP 2: Bifacial zonnemodules: <u>Morphotonics</u>, TNO			Category: IO
<p>Het Polaris bifacial module bestaat uit 60 PERPoly cellen, die tussen 2 glasplaten worden gelamineerd. Het gebruik van dubbelzijdig glas in de POLARIS modules zal de levensduur verhogen. Gestructureerde tabs tussen de cellen, en folies op de glasplaten zullen zorgen voor optimale licht inkoppeling.</p>			
2.1	Licht inkoppeling tussen de cellen, lead: TNO	(IO)	M3 – M9
<p>Bij standaard modules valt ongeveer 3% van het inkomende licht tussen de cellen door. In monofacial modules wordt dit gereflecteerd aan het achterfolie; TNO zal in deze taak speciaal voor bifacial modules structuur tussen de cellen testen om dit licht te reflecteren. Ook zal TNO speciale, gestructureerde koperen tabs (die gebruikt worden om te cellen met elkaar te verbinden) in de POLARIS modules testen voor extra licht inkoppeling. De testen zullen allereerst uitgevoerd worden op kleine laminaten bestaande uit 4 zonnecellen. Doelstelling is 50% minder verliezen tussen de cellen.</p>			

De 4-cells laminaten zullen tevens in taak 3.1 getoetst worden op duurzaamheid en robuustheid.		
2.2	Licht inkoppeling op module niveau, Morphotonics (IO)	M3 – M15
<p>Anti-reflectieve coatings met micro-structuren geoptimaliseerd voor het invangen van diffuus licht zijn zeer effectief op de achterzijde van bifacial modules. Omdat hier geen direct zonlicht op valt maar vooral licht met een grotere invalshoek hebben dergelijke micro-structuurtjes een grote meerwaarde ten opzichte van standaard achterzijde-glas of glas met een standaard AR coating. De optische eigenschappen van verschillende met nanoimprint-lithografie getextureerde coatings zullen door Morphotonics worden getest op glas en er zal een coating worden geselecteerd die geschikt is om te worden toegepast op de Polaris module. Doel is een hoger lichtinkoppeling van minimaal 5%. Technologie voor het opschalen van optische structuren van wafer-schaal naar module schaal zal door Morphotonics worden doorontwikkeld.</p> <p>De getextureerde coating zal in eerste instantie worden toegepast op 4-cells modules (M9) en vervolgens op 60-cells modules (15). Beide zullen in taak 3.1 worden getoetst op duurzaamheid en robuustheid.</p>		
WP 2 Milestones, Deliverables		
D2.1	Process freeze licht management tussen cellen	M9, TNO
D2.2	Optimaal en stabiel proces voor Light Trapping Coating (LTC) in modules	M15, Morphotonics

WP 3: Kwaliteit: TNO, Tempres, Levitech, Veco, Morphotonics		Category: IO
<p>De commerciële cel en module fabrikanten zullen een nieuwe PV technologie pas in productie als de duurzaamheid (reliability) en stabiliteit voldoende is aangetoond. Hiervoor zijn standaard IEC testen gedefinieerd. Het laboratorium van TNO in Petten is uitgerust met alle apparatuur en klimaatkamers om deze testen uit te voeren.</p>		
3.1	Levensduur testen in klimaatkamers en dak opstelling, lead: TNO (IO)	M7 – M20
<p>De innovaties uit WP1 en WP2 zullen in deze taak getoetst worden op duurzaamheid en stabiliteit. Kleine test modules (4 cellen) zullen aan versnelde klimaatkamer testen (damp-heat, thermal cycle, hoge spanning (1000 V)) worden onderworpen. Deze testen kunnen 6 weken tot 3 maanden duren. Enkele grote (60 cells) POLARIS modules (gemaakt in WP3.2) zullen vervolgens op het dak van TNO worden geïnstalleerd voor langere duur testen. Voordat deze vervolgens in WP4 in systemen zullen worden geïnstalleerd zullen deze naar TUV worden gestuurd (M20) voor officiële IEC certificatie en validatie van de Polaris modules.</p>		
3.2	Productie van POLARIS modules, lead: TNO (EO)	M15 – M20
<p>Voor het toetsen van de licht inkoppeling met de nieuwe licht-trapping folies op systeem niveau zijn niet noodzakelijkerwijs PERPoly cellen nodig maar volstaan standaard bifacial cellen. TNO zal deze inkopen en samen met Morphotonics verwerken tot minimaal 8 bifacial modules waarmee onderzoeksvraag D kan worden beantwoord. Daarnaast zal TNO de PERPoly cellen uit taak 1.5 verwerken tot minimaal 12 bifacial modules waarmee onderzoeksvragen A t/m C kunnen worden beantwoord. Samen met Morphotonics zal TNO ook modules produceren waarbij alle innovaties worden gecombineerd tot het ultieme Polaris module, zoals beschreven in onderzoeksvraag E. Morphotonics: Het aanbrengen van de coating op enkele Polaris modules waarin alle in innovaties zijn verwerkt.</p>		
WP 3 Milestones, Deliverables		
D3.1	Klimaat kamer testen, ultieme BOM	M15, TNO

D3.2	Minimaal 8 modules met commerciële cellen en LTC	M18, Morphotonics
D3.3	Minimaal 12 modules met Polaris cellen (en LTC voor 2 van deze)	M20, TNO
M3.4	Validatie duurzaamheid en betrouwbaarheid Polaris modules	M20, TNO - TUV

WP 4: Bifacial pilot systemen: <u>SED</u>, TNO (ZZBV)		Category: IO
4.0	Commerciële bifacial modules, lead: TNO (EO)	M1 – M3
<p>Voor het valideren van de modellen en simulaties zijn bifacial systemen met minimaal 32, 48 en 72 modules in verschillende configuraties nodig, om de randeffecten en bijvoorbeeld zelf-schaduw van het systeem op de juiste manier te kunnen analyseren. Echter, het is niet noodzakelijk dat deze ook allemaal bestaan uit Polaris modules; standaard commerciële modules volstaan ook mits deze goed doorgemeten zijn. TNO zal de modules specificeren, aankopen, doormeten, en verdelen over de 3 opstellingen in WP4.1 – 4.3. Ook zullen enkele modules worden aangekocht voor testen van de anti-reflecterende laag/anti-reflecterende laag op full-scale modules in WP2.</p>		
4.1	Traditioneel, Zuid 30°, lead: SED (IO)	M3 - M30
<p>Deze opstelling wordt momenteel het meest toegepast op platte daken en in solar farms. Door een witte, reflecterende achtergrond te gebruiken in combinatie met bifacial modules kan de opbrengst tot wel 30% verhoogd worden³. Deze pilot opstelling zal door SED op een wit dak worden geïnstalleerd. TNO zal de opstelling gedurende een jaar monitoren en daarmee haar model valideren. In de loop van het project zullen in deze opstelling minimaal 2 standaard modules door Polaris type B modules worden vervangen. Deze zullen gedurende een jaar worden gemonitord tegen de referentie modules.</p>		
4.2	Optimaal gebruik van oppervlak, Oost-West 10°, lead: SED (IO)	M3 – M30
<p>De Oost-West 10 opstelling is geschikt voor optimaal grondgebruik, alsmede om de energie opbrengst evenrediger over de dag te verspreiden. In combinatie met een witte ondergrond en met bifacial modules kan met deze opstelling de opbrengst tot 20% worden verhoogd⁷. De opstelling zal door SED op een wit dak worden geïnstalleerd. TNO zal de opstelling gedurende een jaar monitoren en daarmee haar model valideren. In de loop van het project zullen in deze opstelling minimaal 12 standaard modules door Polaris modules (2 van ieder soort) worden vervangen. Ook deze zullen gedurende een jaar worden gemonitord door TNO tegen de referentie modules.</p>		
4.3	Combinatie met landgebruik, Oost-West 90°, lead: TNO (IO)	M3 – M30
<p>Deze pilot opstelling is de meest innovatieve binnen het project. Door de bifacial modules vertikaal en oost-west te plaatsen, zullen de modules hun productie piek in de ochtend en in de middag hebben. Dit matcht beter met het energie verbruik van de consument. De totale productie is gelijk aan die van standaard monofacial modules in een Zuid-30 opstelling. Een tweede voordeel van deze opstelling is dat de grond voor alternatief gebruik geschikt blijft. TNO zal 6 rijen van 2x6 modules installeren op landbouwgrond in Petten. De afstanden tussen de rijen zijn verschillend, om de modellen nauwkeurig te kunnen verifiëren. TNO zal de opstelling gedurende een jaar monitoren en daarmee haar model valideren. In de loop van het project zullen in deze opstelling minimaal 4 standaard modules door Polaris modules type B en D worden vervangen. Deze zullen gedurende een jaar worden gemonitord door TNO en vergeleken met de referentie modules.</p>		
4.4	Validatie van systeem modellering, lead: TNO (EO)	M9 – M30

³ Zie appendix A

Er bestaan nog geen goede simulatie programma's om de totale (maandelijkse/jaarlijkse) energie opbrengst van een bifacial systeem te voorspellen. In het algemeen wordt het commerciële programma PVSyst gebruikt, hiermee kunnen bifacial systemen slechts rudimentair doorgerekend worden. TNO heeft een compleet model ontwikkeld, wat gebruik maakt van elektrische, optische, geografische en meteorologische data. Dit model is reeds op kleine schaal gevalideerd, in dit project zal de finale validatie plaatsvinden waarna dit model commercieel beschikbaar is. Na afloop van het project zal TNO samen met SED zorgdragen voor een correcte decommissioning van de modules.

WP 4 Milestones, Deliverables		
D4.1	Aankoop en meetrapport 152 commerciële bifacial modules	M3, TNO
D4.2	Opbouw bifacial pilot systeem Zuid 30	M6, SED
D4.3	Opbouw bifacial pilot systeem Oost-West 10	M7, SED
D4.4	Opbouw bifacial pilot systeem Oost-West 90	M8, TNO
D4.5	1 jaar bifacial systeem data met commerciële modules	M19, SED
D4.6	1 jaar bifacial systeem data met Polaris modules	M30, TNO
M4.7	Validatie systeem modellering voor zowel comm. als Polaris modules	M20 & 30, TNO

WP 5: Disseminatie en Marktstrategie: Tempress, alle partners		Category: IO
<p>De projectresultaten die geschikt zijn voor publicatie, bv meetdata van modules en energie opbrengst van bifacial systemen, zullen intensief worden verspreid. De kennisverspreiding activiteiten hebben het doel om:</p> <ul style="list-style-type: none"> • De publiek beschikbare resultaten zo spoedig en breed mogelijk in de PV-gemeenschap te verspreiden • De exploitatie activiteiten, marketing plan & strategie van de industriële partners te ondersteunen • Educatie van over de mogelijkheden van bifacial PV systemen aan bedrijven, installateurs, en publiek in NL, teneinde de implementatie van (deze vorm van) PV in NL te voorspoedigen 		
WP 5 Milestones, Deliverables (IO)		
D5.1	Openbare website om project data met het publiek te delen	M6, TNO
D5.2	Markt strategie en exploitatie plan om de bifacial modules beschikbaar te krijgen op de Nederlandse markt in 2020	M12, Tempress
D5.3	Seminar of workshop over implementatie van bifacial PV in NL	M24, ALL

1.6 Project resultaten en discussie


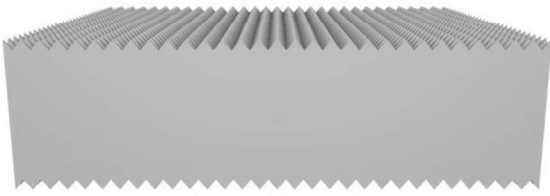
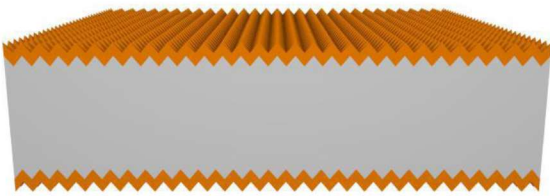
Hieronder volgt een beschrijving van de projectresultaten voor de vijf werkpakketten

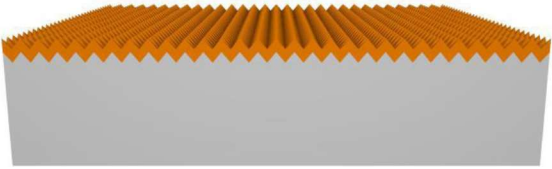
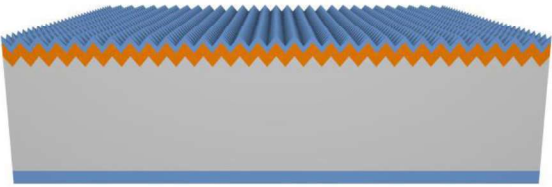
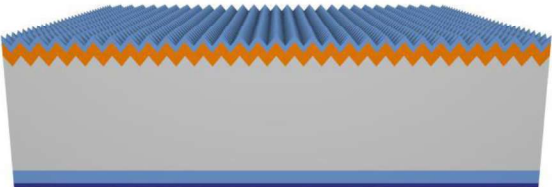
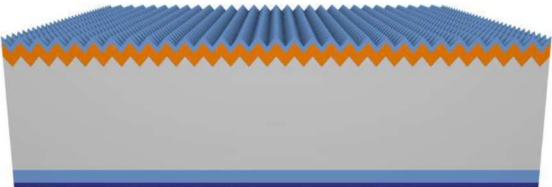
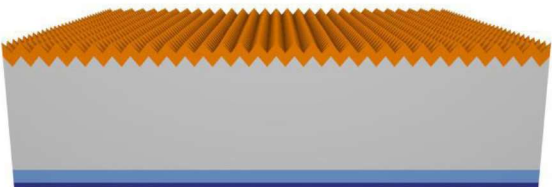
Werkpakket 1: Bifacial zonnecellen

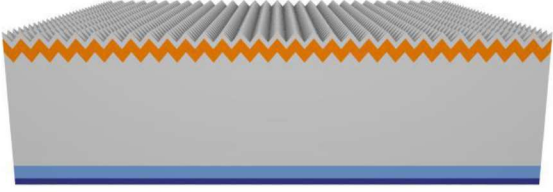
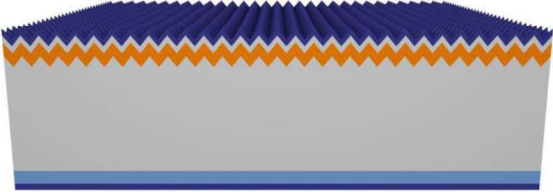

Tempress, Levitech, Veco, TNO

In werkpakket 1 is een baseline proces flow gedefinieerd op basis van de reeds door het consortium ontwikkelde proces flow, waarbij processen en chemie zijn geselecteerd met een meer industriële aard door het eerder toepassen in andere zonnecel processen. Er zijn in het project een aantal variaties van de flow getoetst en de uiteindelijke geselecteerde flow is hieronder weergegeven. Door deze aanpassingen in de proces flow is een methodiek ontstaan welke kosteneffectief bifacial zonnecellen kan produceren, waarbij dit ook makkelijk te implementeren zal zijn in een bestaande productiefaciliteit. In onderstaande tabel is deze proces flow beschreven.

Tabel 1.1: Procesflow voor fabricage van n-type bifacial zonnecellen

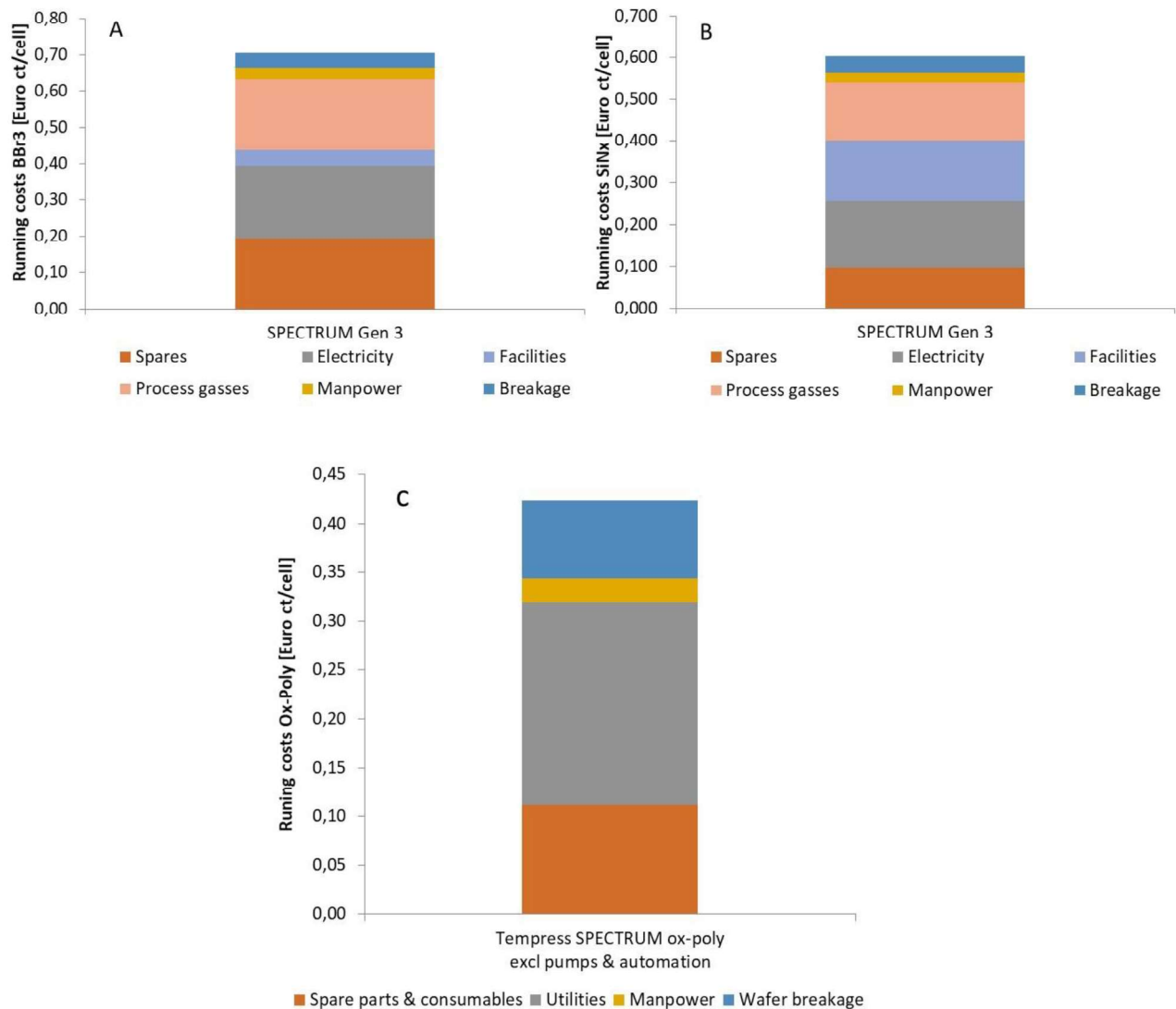
	Standaard n-Cz Silicium wafers met een resistiviteit van 1-5 Ω .cm worden gebruikt.
	Een industriële standaard alkalische textuur wordt toegepast voor het vormen van een minder reflecterend oppervlak.
	Boor diffusie zorgt voor het aanbrengen van een p-gedoteerde laag in het silicium. Dit gebeurt in een back-to-back configuratie zodat de belading verdubbeld kan worden en enkelzijdige boor depositie en diffusie de voorkeur geniet.

	<p>Om parasitaire diffusie op de achterzijde van de wafer te verwijderen wordt een single-side etch uitgevoerd. Dit is een standaard proces in het produceren van zonnecellen waarbij bestaande apparatuur getuned kan worden om het juiste etsgedrag voor deze proces flow te realiseren.</p>
	<p>Fosfor gedoteerd poly-Si wordt middels een LPCVD oven gedeponeerd op de wafer.</p>
	<p>Achterzijde SiN_x wordt gedeponeerd op de wafer door gebruik te maken van een PECVD proces zoals ook toegepast in conventionele zonnecellen.</p>
	<p>Om een lekstroom te voorkomen wordt de rand van de wafer geïsoleerd door een klein deel van de rand weg te etsen met een plasma ets machine. Dit is een oplossing welke reeds succesvol is geïmplementeerd in de TNO n-Pasha proces flow, en na tunen van parameters ook toegepast kan worden voor deze proces flow.</p>
	<p>Poly-Si wordt vervolgens verwijderd van de voorzijde van de wafer door toepassen van een ets met KOH zoals vaker toegepast in de zonnecelproductie. KOH etst Si veel sneller aan dan B₂O₂ en SiN_x waardoor deze twee films als effectieve etsmaskers gebruikt worden, waarbij ze niet exclusief hiertoe sacrificiale lagen aangebracht hoeven te worden.</p>

	<p>ALD is een breed toegepaste techniek voor het deponeren van Al_2O_3 ten behoeve van passivatie van de emitter.</p>
	<p>Voorzijde SiN_x wordt gedeponerd op de wafer door gebruik te maken van een PECVD proces zoals ook toegepast in conventionele zonnecellen.</p>
	<p>Uiteindelijk worden zilver contacten op de zonnecel aangebracht door conventionele screenprint technieken gevolgd door het sinteren in een FFF.</p>

Taak 1.2 Kosteneffectief proces voor Boor diffusie, PECVD en Poly-Si depositie

Tempress heeft een derde generatie van zijn platform ontwikkeld waarbij beduidend grotere volumes geproduceerd kunnen worden dan in de tweede generatie met lagere consumptie van energie en chemicaliën voor elke behandelde wafer. Dit vertaalt zich de onderstaande kosten per wafer (Figuur 1.1).



Figuur 1.1 Kostenopbouw van de (A) BBr₃ (B) SiN_x en (C) Ox-Poly depositie processen

Hiermee zijn totale toegevoegde kosten van de depositie en diffusie processen voor de proces flow in het POLARIS project 0,027 €/cel.

Taak 1.3 Kosteneffectief proces voor Al₂O₃ depositie

Het gebruik van een ALD Al₂O₃ laag levert een kwaliteitsverbetering in veel zonnecel architecturen. Om competitief te zijn én blijven moeten de toegevoegde kosten van deze extra proces stap laag blijven. Levitech had als doelstelling in het POLARIS-project de ‘Cost of Ownership (CoO)’, dit is het totaalbedrag aan kosten voor aanschaf en bezit van de LEVITRACK® gedurende de hele gebruikscyclus, te verlagen met 20%. Dit is gerealiseerd in 3x verbeterlagen:

- **Stabiliteit:** Introductie en testen van bewegende zijwand ('Moving Side Wall')
- **Capaciteit:** Verhogen van productiecapaciteit van 4800 naar 6000 wafers per uur
- **Kosten:** Ontwikkeling van RVS proces-platen met langere levensduur

In de Levitrack drijven de zonnecel wafers op een gaslager door de tool. Botsingen met een statische reactorwand kan resulteren in vertraagde wafers en transportproblemen. De introductie van de bewegende zijwand minimaliseert dit effect, een meer uniforme timing met minder kans op uitval bij zowel lager als hoge productiecapaciteit (hogere doorloopsnelheid). Een verhoogde capaciteit, van 4800 naar 6000 wafers per uur, is gerealiseerd door wafers op een hogere snelheid te transporteren en laden met kortere tussenpozen. Zowel het transport als laagkwaliteit is aangetoond stabiel te blijven in een marathon run van 250.000 wafers. Deze verbetering resulteert direct in een hogere machine opbrengst. Naast het verhogen van de opbrengst is binnen dit project ook een verlaging van de operationele kosten gerealiseerd. Tijdens deposities in de LEVITRACK® vervuilen de proces platen geleidelijk, deze worden verwisseld per interval en vervolgens onderworpen aan chemische reiniging. Standaard worden aluminium proces platen gebruikt, deze kunnen maar een beperkt aantal keren gereinigd worden. Door over te stappen naar RVS platen, heb je hogere initiële kosten maar wel een grote verlenging van de plaat levensduur met netto lagere operationele kosten. Deze drie verbeteringen resulteren samen in een 27% verlaging van operationele kosten.

Tabel 1.1. Verbetering van operationele kosten per product (details beschikbaar op aanvraag)

	Standard	Moving Side Wall	Throughput upgrade	SS process plates
Throughput	4800wph	4800wph	6000wph	6000wph
Mean Time Between Failure	Nominal	x1/3	x1/3	x1/3
Process plate cost	Nominal	Nominal	Nominal	x2
Process plate lifetime	Nominal	Nominal	Nominal	x3
Cost of Ownership (CoO) per wafer*	100%	96%	84%	73%

Taak 1.4/1.5 print activiteiten

De activiteiten zoals beschreven in het projectplan zouden zijn uitgevoerd door Veco. Deze partner heeft uiteindelijk niet geparticipeerd in het project en is er een andere invulling aan deze taken gegeven zoals hieronder beschreven.

Integratie en productie van cellen voor POLARIS modules

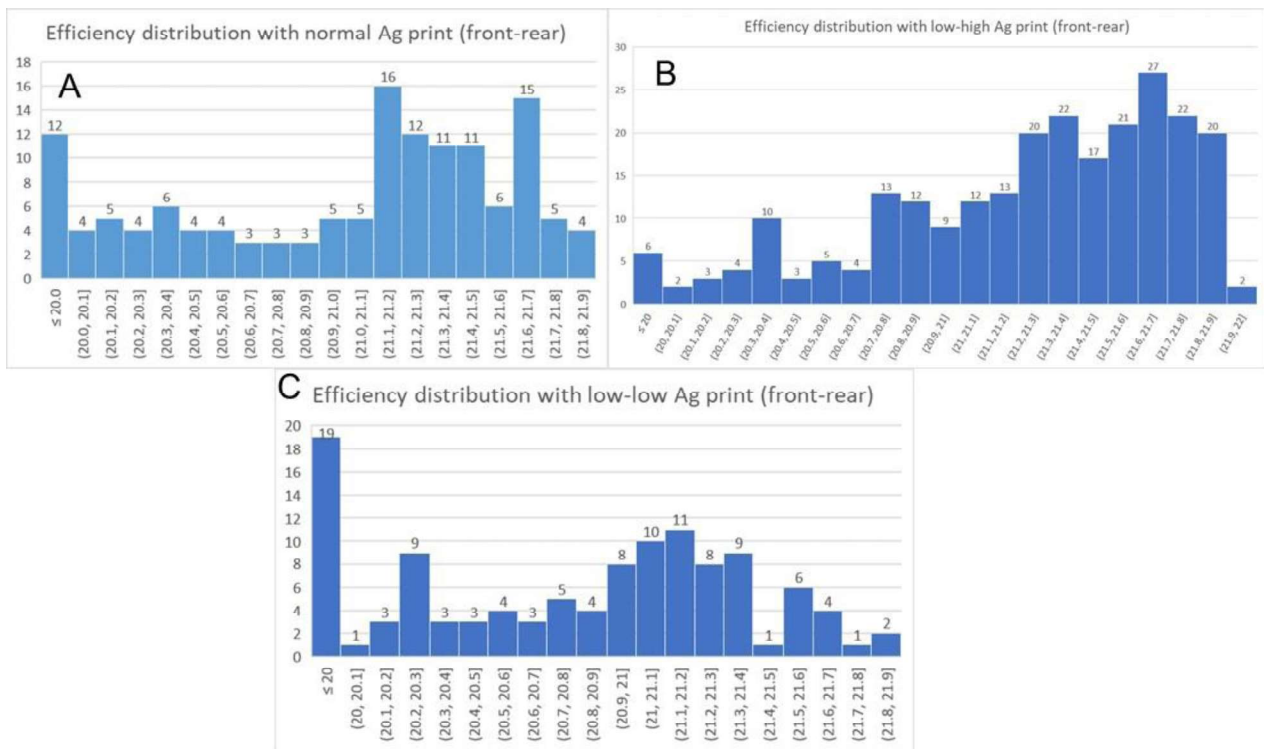
Deze subtaak had tot doel > 1000 POLARIS cellen te fabriceren volgens de geoptimaliseerde workflow zoals uitgevoerd in de taken 1.1 t/m 1.4.

Er zijn op basis van commerciële halffabricaten drie typen cellen gefabriceerd voor de fabricage van de modules in WP3, te weten:

- POLARIS cellen met 5 busbars en een standaard voor en achterzijde metallisatie patroon
- Als a) met een mindere hoeveelheid Ag geprint op de voorzijde van de cel
- Als a) met minder geprint Ag op de voor en achterzijde van de cel

Vanwege hoge uitval door procesproblemen gedurende de productie zijn uiteindelijk 370 cellen overgebleven van de ingezette halffabrikaten, minder dan beoogd.

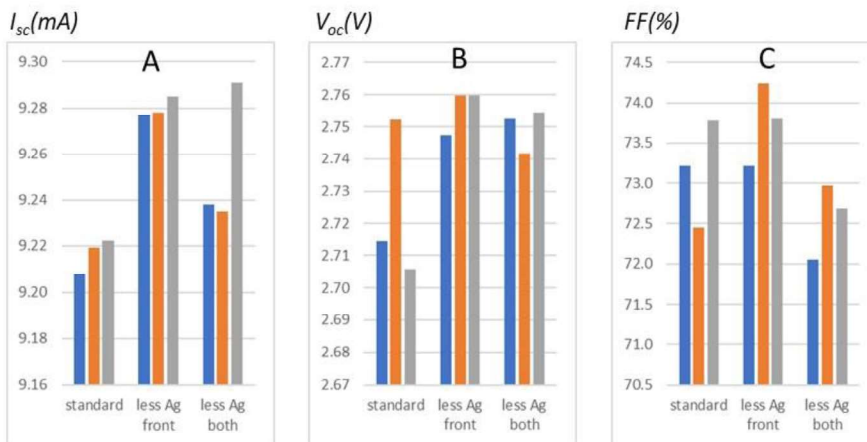
De rendementsverdeling van de drie type cellen A, B en C is in figuur 1.2 weergegeven. Ondanks de grote spreiding zien we met name in Figuur 1.2B dat er relatief veel cellen zijn geproduceerd met bins tussen de 21.5 en 22.0 %.



Figuur 1.2: Rendementsverdeling van de 3 typen A,B,C geproduceerde Polaris cellen

Vermindering van Ag consumptie

Een eerste onderzoek met het simulatiemodel BIGEYE en gesimuleerde cel-metallisaties liet zien dat vooral in minder zonnige klimaatomstandigheden, nauwelijks dalende of zelfs licht verhoogde energieopwekking bereikt kan worden door cellen te printen met fors minder Ag waardoor de kosten voor de energieopwekking omlaag kunnen gaan. Zoals in bovenstaande sectie beschreven zijn drie type groepen cellen gemaakt met verschillende metallisatie patronen toegepast, groepen A, B en C. Van deze cellen zijn minimodules gemaakt in glas-glas uitvoering met vier zonnecellen per minimodule. Hieronder in Figuur 1. 3 staan van links naar rechts de gemeten I-V parameters I_{sc} , V_{oc} en FF bij een voorzijde belichting.



Figuur 1.3 Gemeten I-V parameters: (A) I_{sc} (mA), (B) V_{oc} (V) en (C) FF(%) voor de drie groepen cellen met vlnr standaard, verminderd zilver aan de voorkant en verminderd Ag aan voor- en achterkant

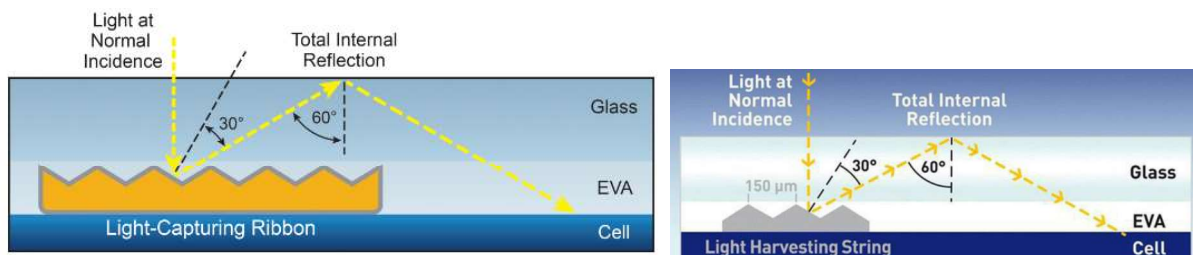
Duidelijk neemt de I_{sc} toe voor groep B met minder Ag aan de voorzijde, maar met tevens minder Ag op de achterzijde neemt de backreflectie iets af waardoor de voorzijde I_{sc} minder stijgt. Ook de V_{oc} neemt in beide gevallen toe, wat ook positief is voor de FF, maar bij te weinig totale geleiding, zoals bij "less Ag both" neemt de FF toch af.

Ten slotte de I_{sc} voor achterzijde belichting. De 3% hogere I_{sc} met minder bedekking van de achterzijde is overduidelijk te zien. Verschillen in V_{oc} door verschillende recombinatie snelheden, gerelateerd aan de Ag bedekking zijn, zoals bekend, onafhankelijk van de belichtingszijden.

Werkpakket 2 Bifacial zonnemodules: Morphotonics, TNO

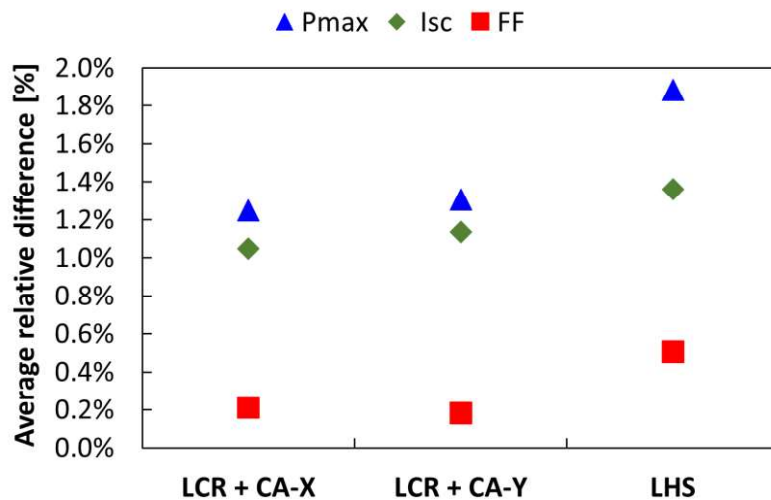
Taak 2.1 Licht inkoppeling tussen de cellen

Bij standaard modules valt ongeveer 3% van het inkomende licht tussen de cellen door. In monofacial modules wordt dit gereflecteerd aan het achterfolie. In bifacial modules zal dit licht grotendeels verloren gaan. Daarnaast gaat een deel van het inkomende licht verloren door reflectie van de metalen tabs die gebruikt worden om stroom te vervoeren en cellen met elkaar te verbinden. Om dit type verlies te beperken is in deze taak door TNO een aantal gestructureerde tabs getest die het licht op de tabs dusdanig kunnen reflecteren dat het alsnog in de cellen geabsorbeerd kan worden. Er zijn twee type tabs getest: *Light Capturing Ribbons* (LCR) die bevestigd zijn op de cel met twee typen geleidende lijm (CA-X en CA-Y) en een *Light Harvesting String* (LHS) die op de cel gesoldeerd is (zie Figuur 2.1).



Figuur 2.1 *Light Capturing Ribbon* (links) en *Light Harvesting String* (rechts) die getest zijn op extra opbrengst.

In totaal zijn er 18 enkel-cels bifacial minimodules gemaakt en getest. Vier hiervan zijn gemaakt met niet gestructureerde tabs en de overige 14 met LCR of LHS tabs. De IV-karakteristieken (P_{max} , I_{sc} en FF) van de minimodules met gestructureerde tabs zijn met een zonn simulator gemeten en vergeleken met die van de minimodules met standaard tabs. De resultaten zijn weergegeven in 2.2.



Figuur 2.2 Opbrengst van minimodules met gestructureerde tabs vergeleken met die van standaard tabs

De LHS tabs presteren het beste met een verhoging van het vermogen (P_{\max}) van bijna 2%. Dit is grotendeels het gevolg van een verhoging van de I_{sc} met 1-1.5%. Maar ook een deel van deze verhoogde opbrengst (0.5%) kan worden toegeschreven aan een verbeterde vulfactor (FF), oranje symbolen, door de extra breedte, en dus geleiding, van de LHS tabs.

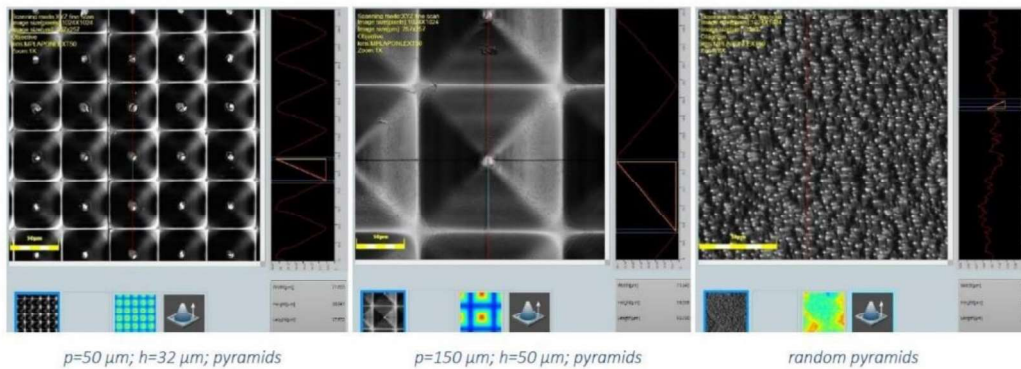
Vervolgens is een achttal van de minimodules aan de voorzijde door Morphotonics voorzien van een anti-reflectie textuur die beschreven wordt in Taak 2.2. De stroomopbrengst (I_{sc}) wordt hierdoor verder verhoogd tot maximaal 3.3%. Echter is gebleken dat de winst die behaald wordt met de gestructureerde tabs en de winst door de aangebrachte textuur aan de voorzijde van de modules niet additief is. Dat wil zeggen dat het gebruik van gestructureerde tabs geen meerwaarde biedt als de module ook nog wordt voorzien van een anti-reflectie textuur aan de voorzijde.

Taak 2.2 Licht inkoppeling op module niveau

In deze taak is onderzocht hoe anti-reflectieve of Light tTrapping coatings (LTC) met micro-structuren aan voor- en achterkant van een bifacial module kunnen bijdragen aan een verhoogde opbrengst. Allereerst zijn de optische eigenschappen van verschillende door Morphotonics met Nano-imprint lithografie getextureerde lagen zijn getest op glas. Hiervoor zijn drie soorten texturen geselecteerd:

- Een *random* micropiramide textuur met een typische textuurhoogte van 1 μm
- Een matrix van piramides met een breedte van 50 μm en een hoogte van 32 μm
- Een matrix van piramides met een breedte van 150 μm en een hoogte van 50 μm

Microscopie-afbeeldingen van deze texturen zijn te zien in Figuur 2.3.



Figuur 2.3 Microscopie-afbeeldingen van drie soorten geteste texturen, gemaakt met nano-imprint lithografie

Naast de verschillende texturen zijn er ook twee soorten transparante imprintmaterialen onderzocht (A & B). Uit transmissiemetingen is gebleken dat de 50 μm hoge piramides in combinatie met materiaal A de beste resultaten levert. De transmissie van het glas wordt verhoogd van 91% voor niet-getextureerd glas, naar 98% voor het glas met deze anti-reflectielaag.

De anti-reflectielaag is vervolgens toegepast op 12 enkel-cel bifacial modules. Het beste resultaat werd bereikt met het aanbrengen van de laag op zowel de voorzijde als de achterzijde van de module. In de zonn simulator werd hierbij een verhoogde stroomopbrengst (Isc) gemeten van 5.0% ten opzichte van een module zonder anti-reflecterende laag.

De nano-imprint lithografietechniek van Morphotonics maakt gebruik van stempels die gekopieerd worden vanaf een master gemaakt van bijvoorbeeld silicium, koper of nickel. De master van de geselecteerde anti-reflectietextuur heeft een oppervlak van slechts 15x15 cm^2 . Om volledige 60-cel modules te kunnen voorzien van anti-reflecterende lagen moet de master worden opgeschaald naar een oppervlak van 164x98 cm^2 . Hiervoor is een opschalingstechniek ontwikkeld waarbij de textuur van de originele master meerdere malen naast elkaar wordt gekopieerd. Morphotonics heeft deze techniek verfijnd en toegepast op de anti-reflectietextuur. Het resultaat van een tot module maat opgeschaalde stempel is te zien in Figuur .



Figuur 2.4 Nano-imprintlithografie stempel, opgeschaald naar de afmetingen van een 60-cel bifacial module.

Tot slot is de opgeschaalde stempel gebruikt om zes 60-cel modules te voorzien van de textuur. Om dit te realiseren is het imprintingsproces geoptimaliseerd. Hierbij is met name aandacht besteed aan de

hechting van de laag aan de module en de optimale imprint druk en snelheid om te komen tot een resultaat zonder luchtbelletjes in de laag.

WP 3: Kwaliteit: TNO, Morphotonics

In Werkpakket 3 zijn kleine test modules gemaakt met innovatieve cellen uit Werkpakket 1 en cellen van een commerciële partij. De test modules hebben versnelde duurzaamheidstesten ondergaan om de materialen te specificeren die zijn toegepast in de productie van grotere bifacial modules voor de opgebouwde zonnestroomsystemen die zijn beschreven in Werkpakket 4.

Taak 3.1 Levensduur testen in klimaatkamers en dak opstelling

In taak 3.1 zijn kleine test modules gemaakt bestaande uit vier in serie geschakelde bifacial zonnecellen en verschillende module materialen zoals hieronder weergegeven in tabel 3.1:

Tabel 3.1 Specificatie van de gebruikte module materialen voor de fabricage van de diverse testmodules

Materialen	Specificaties
Cellen	TNO n-type PerPoly Silicium 5 Busbar Jolywood n-type PERT Silicium 5 Busbar
Glas	Secure Superwhite 4 mm aan voor en achterzijde
Encapsulant	EVA (Ethyl vinylene Acetate) POE (Polyolefine Elastomer) TPO (Thermoplastische Polyolefine)

De testmodules met in totaal zes verschillende combinaties van cel en module materialen zijn onderworpen aan versnelde levensduurtesten in bij TNO aanwezige klimaatkamers (2500 uur Damp-Heat bij 85°C/85% relatieve vochtigheid, 400 thermische cycli tussen -40 en 85 °C, en PID testen bij hoge spanning (1000 V)) om een Bill of Materials (BOM) te definiëren voor de fabricage van stabiele en betrouwbare 60 cel modules in Taak 3.2. Er is gekozen om minstens 2 keer de standaard IEC test uit te voeren om een goed onderscheid te verkrijgen in de betrouwbaarheid van de verschillende materiaal combinaties die in de modules gebruikt zijn.

De testen hebben uitgewezen dat modules met EVA als encapsulant een significante afname van het vermogen vertonen tot meer dan 50 % na 2500 uur Damp Heat test bij 85°C en 85% relatieve luchtvochtigheid, terwijl modules met POE een geringe degradatie en met TPO als encapsulant nagenoeg geen degradatie vertoont. Alle geteste modules vertonen nagenoeg geen degradatie na 400 thermische cycli tussen -40 en 85°C. Damp Heat is dus een kritische stress factor gebleken voor dit type modules. Een belangrijk geïdentificeerd degradatiemechanisme in de testmodules met EVA als encapsulant is een corrosie effect als gevolg van een chemische reactie van het encapsulant met vocht dat kan leiden tot de vorming van azijnzuur. Dit zuur reageert met Lood componenten aanwezig in de Ag metaallijnen op de cellen met als gevolg verminderde hechting en daarmee verlies van vermogen. Het encapsulant TPO is chemisch veel inerte voor vochtinfiltratie en is daarmee uiteindelijk geselecteerd als de encapsulant voor de fabricage van de grote bifacial glas-glas modules in taak 3.2 en te installeren in de systemen in WP4.

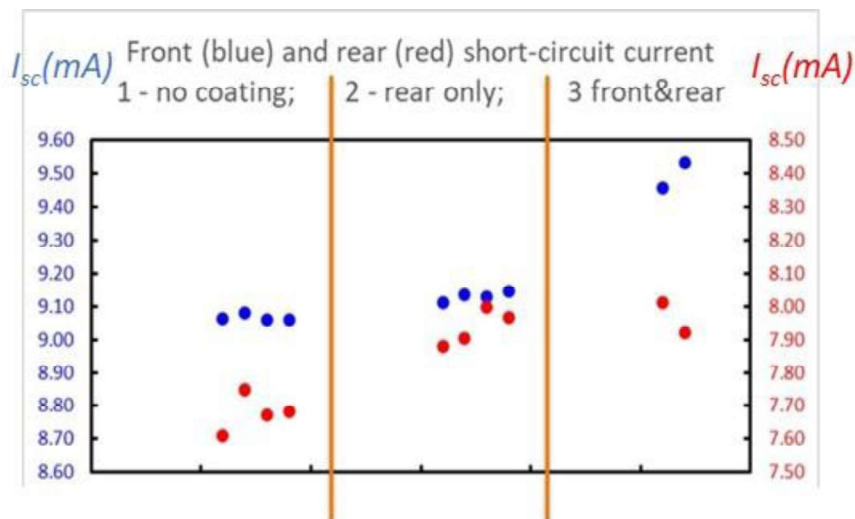
Taak 3.2 Productie van POLARIS modules

In Taak 3.1 zijn de cel en modulematerialen gespecificeerd voor de productie van 60 cels bifacial modules waarvoor het bedrijf Soltech uit België was gekozen voor de fabricage. Als gevolg van het feit dat er in Werkpakket 1 minder POLARIS cellen waren geproduceerd dan beoogd was het plan zes modules met POLARIS cellen en twaalf dubbelzijdige glas glas modules te laten maken met commerciële cellen van Jollywood.

Voor wat betreft de fabricage van modules met de POLARIS cellen bleek dat de metaallijnen op de cellen niet goed waren uitgelijnd tijdens het zeefdruk proces waardoor geen lange strings van cellen aan elkaar gesoldeerd konden worden. Als gevolg daarvan konden derhalve geen grote modules worden gemaakt en is als mitigatie maatregel gekozen voor de productie van twaalf kleinere testmodules die zijn geïnstalleerd op de nieuwe outdoor test faciliteit bij TNO in Petten. Hiermee is beoogd de onderzoeksvragen zoals eerder geformuleerd in sectie 1.3 toch afdoende te beantwoorden.

Uiteindelijk zijn tien dubbelzijdige glas glas modules succesvol vervaardigd met de cellen van Jollywood waarna zes modules zijn gestuurd naar Morphotonics die vier modules hebben voorzien van een light trapping coating aan de achterkant en twee modules aan zowel voor als achterzijde van het module (zie ook Taak 2.2).

De resultaten van gemeten kortsluitstromen zijn weergegeven in figuur 3.1 en laten duidelijk zien dat de aanwezigheid van de LTC leidt tot een significante verhoging van de gemeten kortsluitstromen aan zowel de voor als achterzijde van het module.



Figuur 3.1 De gemeten kortsluitstromen I_{sc} (mA) met belichting aan de voorzijde (blauw) en achterzijde (rood) van het module. Module 1 bevat geen LTC, module 2 bevat een LTC aan de achterzijde en module 3 bevat een LTC aan voor- en achterzijde

Werkpakket 4: Bifacial pilot systemen: SED, TNO

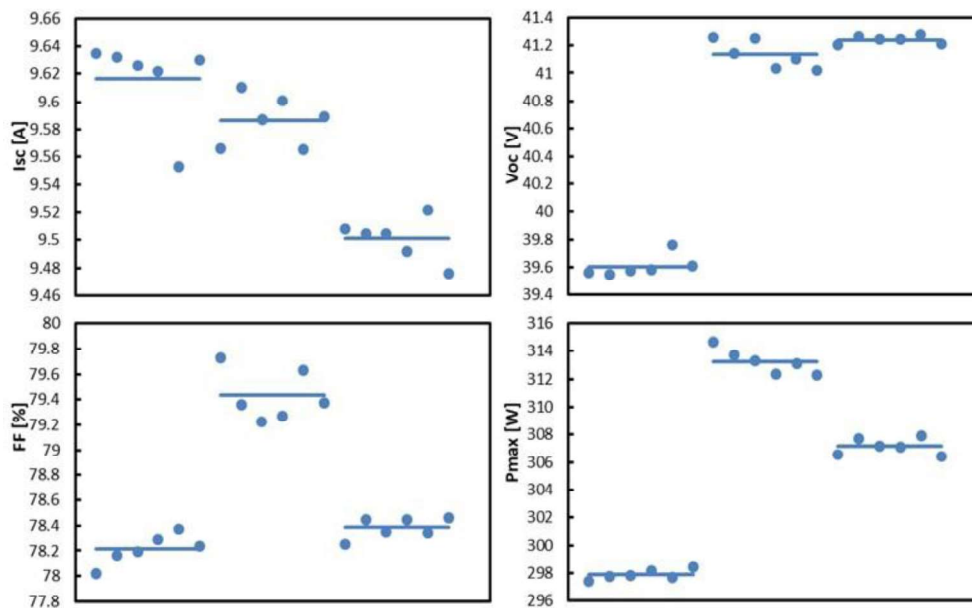
In WP 4 zijn een drietal pilot zonnepanelen gebouwd waar de voordelen van bifacial modules aangetoond worden en waarin de verbeteringen op cel- en moduleniveau uit het POLARIS project worden aangetoond onder realistische omstandigheden.

Taak 4.0 Commerciële bifacial modules

Ten behoeve van de pilot zonnepanelen zijn er commerciële modules gekocht van Jollywood. Oorspronkelijk zouden dit n-PERT modules worden. Vanwege verdergaande ontwikkeling van de productie bij Jollywood naar n-TOPCon en multiwire interconnectie zijn er zes n-PERT en zes n-TOPCon modules

met vijf busbars besteld. De rest van de modules zijn n-TOPCon met 12 busbars geworden. De wafergrootte voor al deze drie moduletypes was nog M2.

Van elk moduletype zijn zes modules gemeten aan de voor- en aan de achterzijde om de standaard test conditie prestatie te bepalen. De nominale vermogens zijn respectievelijk 300, 315 en 310 W voor n-PERT, n-TOPCon (12BB) en n-TOPCon (5BB). De metingen door TNO laten kleine verschillen zien ten opzichte van de datasheets, maar niet buiten de meetonnauwkeurigheid. Duidelijk ligt de V_{oc} van n-TOPCon flink hoger dan van n-PERT. Ook de fill factor voor de 12BB is hoger dan die voor de 5BB moduletypes. De bifaciality factoren, dat is het vermogen gemeten aan de achterzijde gedeeld door die van de voorzijde zijn 88%, 85% en 82%.



Figuur 4.1 Gemeten I-V parameters (I_{sc} , V_{oc} , FF, P_{max}) voor drie typen Jolywood modules met in elk figuur v.l.n.r. n-PERT, n-TOPCon (12BB) en n-TOPCon (5BB)

Taak 4.1 Traditioneel, zuid-gericht systeem

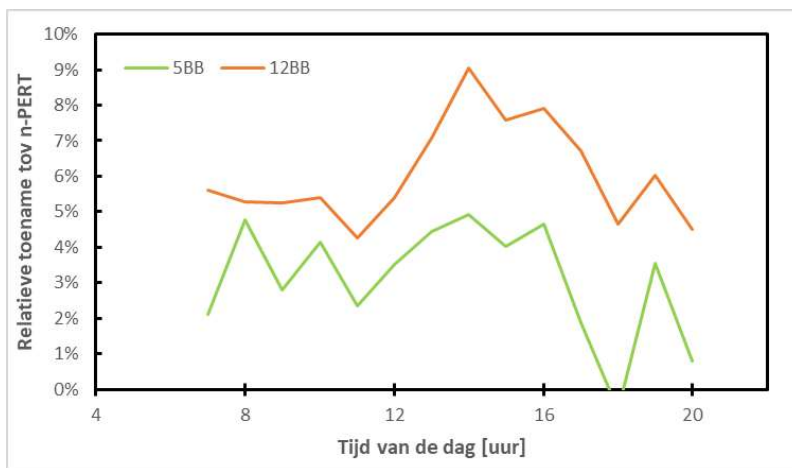
SED: coördinatie, bouw; TNO: data analyse.

Het eerste daksysteem is een zuid-gericht systeem (zie Figuur 4.2). Er zijn vier rijen van acht modules gebouwd. De installatie is 10 cm hoger dan gebruikelijk om het licht dat door het dak verstrooid wordt beter te verdelen over de achterzijde van de zonnemodules. Ook is zorg besteed dat de installatie zelf zo veel mogelijk licht verstrooit: er zijn witte ballast tegels gebruikt en het achterschild (dat de windbelasting moet verminderen) is ook wit gespoten.



Figuur 4.2 Foto van het zuid-gerichte systeem op het dak van een bedrijfsgebouw in Broek op Langedijk

Vergeleken met een monofacial systeem op hetzelfde dak leveren deze bifacial modules gemiddeld 7% meer kWh/kWp. De n-TOPCon modules, 5BB en 12BB, geven 3.1% en 7.4% extra kWh, dit is in redelijke overeenstemming met de nominale vermogens, die 3.3% en 5.0% hoger liggen. Let wel, de bifaciality factor, BF, van 5BB is flink lager dan die van n-PERT. De lagere BF zorgt er voor dat de 5BB TOPCon in de uren dat er een hogere bifacial gain is, voornamelijk als de zon laag staat of er veel diffuus licht is, ten opzichte van n-PERT minder energie produceert. Aan de andere kant zorgt de hogere V_{oc} van de TOPCon modules er voor dat ze minder voltage verliezen als de temperatuur van de modules toeneemt. In het dagprofiel van de 12BB TOPCon hieronder in Figuur 4.3 zien we dat van 13:00 tot 16:00 de 12BB boven de 7% extra energie geeft, terwijl dit aan de randen van de dag zo'n 5-6% is. Dit is toe te schrijven aan de hogere omgevings- en moduletemperaturen net na de middag, vergeleken met de uren na zonsopgang en voor zonsopgang. Bij de 5BB TOPCon is dit effect minder goed te zien, mogelijk ook omdat de winst in de middagsuren wegvallen tegen de verliezen in de ochtend- en avonduren.



Figuur 4.3 Relatieve toename van de dag energieopbrengst van de 5BB en 12BB modules tov n-PERT technologie

Taak 4.2 Optimaal dakgebruik, oost&west-gericht systeem

Een systeem met om-en-om west- en oost-gerichte rijen modules kan een hogere bedekkingsgraad hebben dan een traditioneel, zuid-gericht systeem omdat schaduw van rij op rij voorkomen wordt. Net als bij het zuid-gericht systeem is ook hier de installatie 10 cm hoger dan gebruikelijk. Ook is zorg besteed dat de installatie zelf zo veel mogelijk licht verstrooit: er zijn witte ballast tegels gebruikt.

Door de oriëntatie van de twee rijen modules is de opbrengst per module (of per kWp) iets lager. Daarnaast zien we ook dat west-gerichte modules een 4% hogere opbrengst hebben dan oost-gerichte modules. Dit is typisch voor (west-) Nederland, er is meer zonlicht in de avonduren dan in de ochtend.



Figuur 4.4 Foto van de oost-west gerichte dakopstelling in Langedijk

Taak 4.3 Meervoudig landgebruik, verticaal systeem, oost/west-gericht

Een verticaal systeem heeft een minimale footprint en wordt vaak toegepast voor meervoudig landgebruik. In POLARIS is op het erf van een bloembollerteler in de omgeving van TNO-Petten het eerste verticale zonnestelsel van Nederland gebouwd (figuur 4.5). Hierbij tellen we een enkelvoudige rij van modules, zoals in geluidsschermen, niet mee. Er zijn negen rijen van acht modules geïnstalleerd. De onderlinge rijafstand varieert van 2 meter (m) aan de westzijde, via 4 m naar 6 m aan de oostzijde. Vanwege de sterkere instraling in de avond zijn de meeste modules naar het westen gericht. Echter van de derde en zevende rij (vanaf zuid geteld) zijn de modules om-en-om naar het oosten gericht. Dit is goed zichtbaar op onderstaande foto: de tweede module van de tweede rij (van rechts/west geteld) is "blauw", dit is de achterzijde van een oost-gericht module.

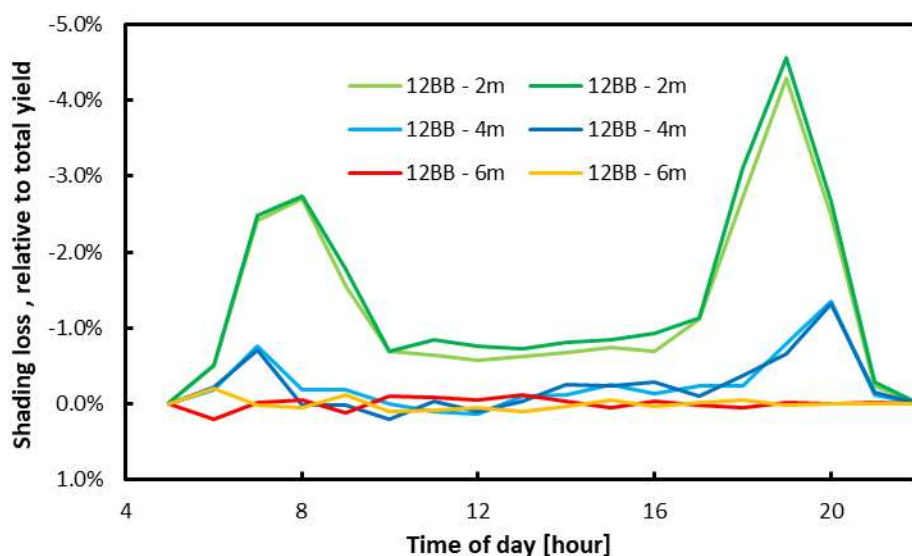


Figuur 4.5 Foto van het verticale zonne-teststelsel in Petten

Effect rij-rij afstand

We zien met toenemende rij-afstand de opbrengst per module toenemen. Hieraan dragen twee effecten bij: ten eerste valt er minder vaak schaduw bij grotere rij-afstand, en als er wel schaduw is, valt de schaduw bij kleinere rij-afstanden over een groter deel van de modules. Ten tweede, des te dichter de modules op elkaar staan, des te minder zien de onderste cellen de blauwe lucht of de wolken (deze draagt in Nederland ongeveer de helft bij aan de totale instraling), doordat de waarnemingshoek, van de hemelbol, van de onderste cellen afhangt van de ratio tussen de lengte van de modules en de afstand tussen de modules.

De grafiek (figuur 4.6) laat de opbrengstverschillen zien tussen modules met 2 m pitch, groen, met 4 m pitch, blauw, en met 6 m pitch, rood, ten opzichte van het gemiddelde van de twee modules op 6 m pitch, gesommeerd per uur. Als eerste valt op dat de 2 m pitch leidt tot grote verliezen gedurende enige uren rond 8 uur en rond 19 uur. Dit komt doordat er directe schaduw valt op deze modules als de zon in het (zuid)oosten of (zuid)westen staat. De curves voor 4 m pitch laten een veel kleiner en smaller effect zien en deze piek is smaller, overeenkomend met de zon oost of west. Doordat deze modules naar het westen gericht zijn met hun voorzijde zijn de verliezen in de avond groter. Als laatste kunnen we ook zien dat er gedurende het midden van de dag, van 8 tot 18 uur er weinig verschil is in de energie opbrengst, en daarmee de schaduwverliezen, voor 4 m en 6 m pitch.

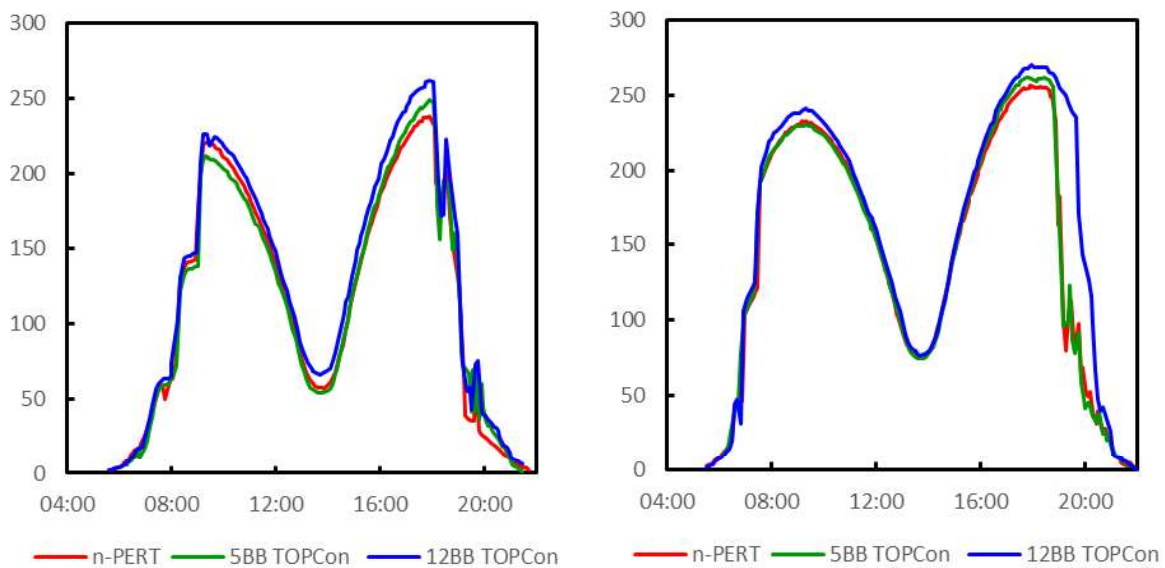


Figuur 4.6 Schaduwverliezen tussen modules met 2 m pitch, groen, met 4 m pitch, blauw, en met 6 m pitch, rood, ten opzichte van het gemiddelde van de twee modules op 6 m pitch

De totale verliezen door de inperking van de rij-rij afstand zijn ~22% voor 2 m pitch en 4% voor 4 m pitch. Beperken we ons tot het midden van de dag, 10-16 uur, dan zijn er geen directe schaduwverliezen, maar door de beperkte viewfactor is de energieopbrengst bij 2m pitch nog steeds 10% lager. Voor 4 m pitch is dit 0.9%, let wel: de twee modules op 6 m pitch verschillen ook $\pm 0.7\%$ ten opzichte van hun gemiddelde.

Effect bifaciality factor

Ook zien we dat de n-PERT modules met hogere BF in de ochtend beter presteren dan de n-TOPCon 5BB modules. Hieronder in figuur 4.7 zien we de momentane opwerkvermogens voor modules op 2 m afstand, links, en op 4 m afstand, rechts. Kijken we naar de maximale opwekking in de ochtend en in de middag, dan zien we dat de 12BB TOPCon, nominaal 315 W, altijd het hoogste vermogen opwekt. In de middag, de modules hebben de voorzijde naar het westen gericht, zien we dat de 310 Wp 5BB TOPCon, groene lijn, meer opwekt dan de 300 Wp n-PERT, in rood, maar minder dan het 12BB module. Echter, in de ochtend levert de n-PERT een hoger vermogen dan de 5BB TOPCon. Concluderend, de 3% lagere nominaal vermogen (van de voorzijde van de n-PERT) wordt ruimschoots gecompenseerd door de 6% hogere BF van de achterzijde van de n-PERT.

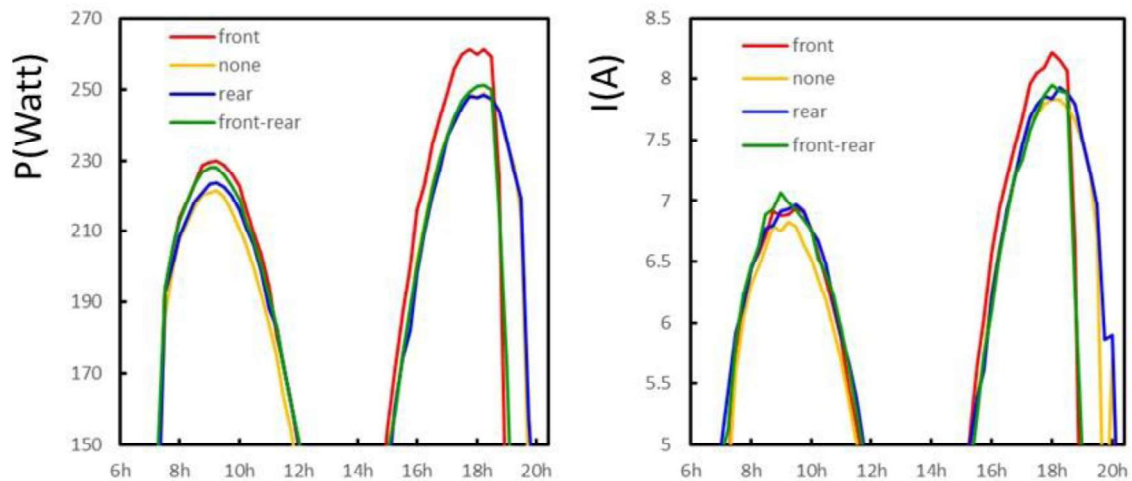


Figuur 4.7 Opwekprofiel van 1 juni 2021 voor de drie verschillende zonnecel-types in het verticale systeem met rij-rij afstand van 2 m, links, en 4 m, rechts. De schaduw verliezen in de vroege ochtend en late middag zijn duidelijk te zien in de opwekprofielen.

Morphotonics Light Trapping Coating (LTC)

Als laatste behandelen we hier modules met en zonder de LTC van Morphotonics. Zie Taak 2.2 voor de details. Twee modules zonder, twee met achterzijde en twee met tweezijdige coating zijn in het verticale systeem geplaatst. We vergelijken deze modules met twee Jollywood modules die een industrie-standaard antireflectie op de voorzijde hebben. Let wel, de Jollywood modules hebben een flink hogere STC piekvermogen van 310 W vergeleken met 286 tot 300 W, afhankelijk van de coating.

We zien duidelijk dat de Jollywood modules, in rood met label "front", het hoogste vermogen en de hoogste stroom in de middag hebben. Ook zien we een klein verschil in het moment waarop de schaduw intreedt. Hierdoor is het niet mogelijk om naar de totale energieopbrengst te kijken om het effect van de coating vast te leggen, omdat deze ook door de schaduwverschillen bepaald wordt. Het voordeel van de LTC aan alleen de voorzijde is niet heel duidelijk zichtbaar in deze meting. In de ochtend, als de zon op de achterzijde schijnt, zien we dat de module zonder coating, in geel "none", de laagste stroom en het laagste vermogen heeft. De vergelijkbare module met achterzijde coating, in blauw "rear", heeft iets meer vermogen dankzij de hogere stroom. Deze laatste is goed vergelijkbaar met de stroom van de Jollywood module en de Polaris module met voor- en achterzijde LTC, in groen. Dit module heeft in de ochtend haast hetzelfde vermogen als de Jollywood module, ondanks zijn nominaal flink lagere vermogen (310 W om 300 W).



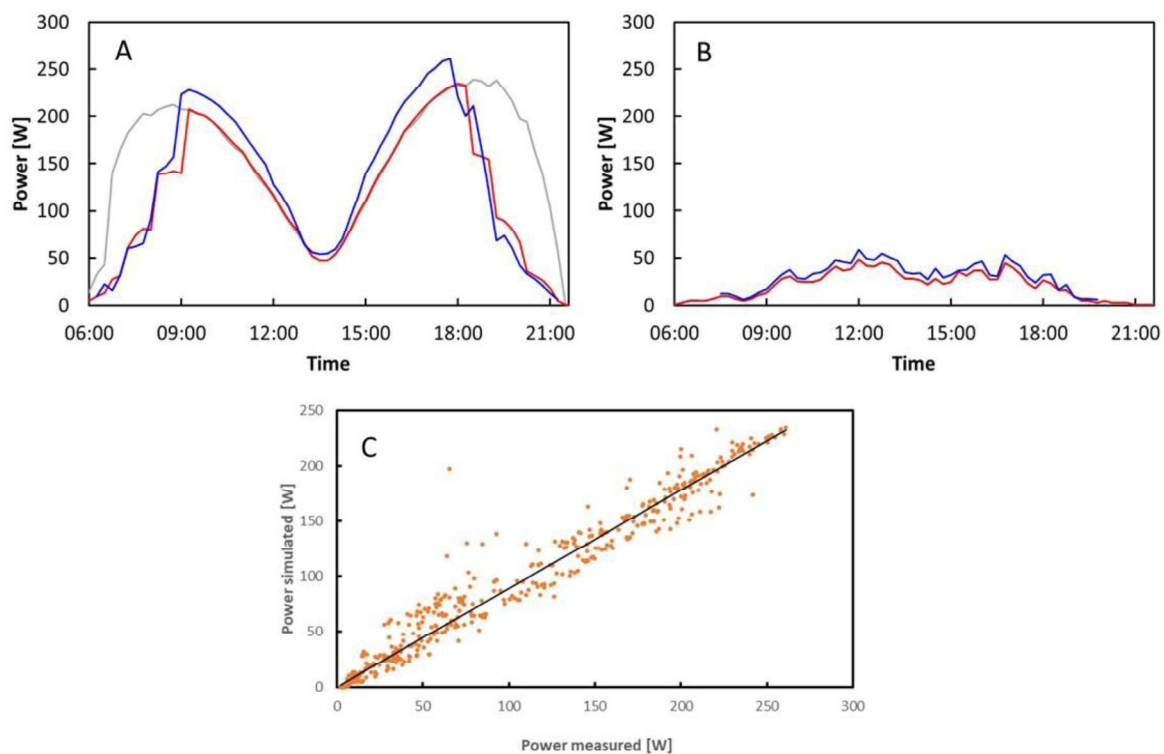
Figuur 4.8 Opwekprofiel van 1 juni 2021 voor de drie verschillende zonnecel-types in het verticale systeem met rij-rij afstand van 2 m, links, en 4 m, rechts. De schaduw verliezen in de vroege ochtend en late middag zijn duidelijk te zien in de opwekprofielen.

Taak 4.4 Validatie van systeem modellering

TNO heeft een compleet model, genaamd BIGEYE, ontwikkeld om de energieopbrengst van (complexe) PV-systemen, inclusief bifacial modules, alle mogelijke oriëntaties van modules en de albedo van de grond of dakbedekking.

Ook de data van de POLARIS-testvelden zijn gebruikt. Met name de verticale opstelling is een uitdaging voor simulatiesoftwarepakketten. De resultaten hieronder in Figuur 4.9 laten zien dat dit voor BIGEYE niet het geval is. De gemeten data zijn voor een week in juni met een aantal zonnige dagen (figuur 4.9A), maar ook een bewolkte dag (figuur 4.9B). De grijze lijn in figuur 4.9A is een simulatie zonder schaduw aspecten. Er is duidelijk te zien dat de gemeten data (blauwe lijn) in de vroege ochtend en de late middag veel lager ligt dan zonder schaduw het geval zou zijn. De rode lijn is een simulatie met schaduw die ook de twee draagbalken boven de modules meeneemt als objecten die de zon blokkeren.

Figuur 4.9C laat de correlatie zien tussen de gesimuleerde P_{max} en de gemeten P_{max} voor de derde module vanuit zuid gezien in een rij met tussenafstand van 2 m aan weerszijde. De zwarte lijn is een lineaire fit door de oorsprong.



Figuur 4.9. Het gemeten vermogen van de verticale testopstelling op een zonnige dag(A), bewolkte dag (B) in Juni 2021 en (C) de correlatie zien tussen met BIGEYE gesimuleerde P_{max} en de gemeten P_{max} voor een geselecteerde module uit de testopstelling

Werkpakket 5: Disseminatie en Marktstrategie: Tempress, alle partners

Disseminatie

Bij aanvang van het project is een website opgezet met informatie over het project: www.polarispv.nl. De website is sinds Mei 2021 niet meer actief.



Figuur 4.9 Banner van het project zoals weergegeven op de website

Verscheidene resultaten vanuit het project zijn gedissemineerd via mondelinge presentaties, posters en conferentieproceedings (zie sectie 2.4)

Marktstrategie

De marktintroductie van bifacial modules in Nederland werd tegengewerkt door de specifieke economische omstandigheden. Allereerst wordt zonne-energie op land gesubsidieerd door de SDE(+) subsidieregeling.

Deze regeling heeft een maximale kWh/kWp wat geclaimd kan worden. Een van de voordelen van bifacial zonnemodules is nu juist de hogere opbrengst per kWp (aan de voorzijde gemeten). Hierdoor stimuleert de regeling niet om een opstelling te bouwen met een hoge(re) kWh/kWp omdat de productie boven de grenswaarde van 950 kWh/kWp niet onder de regeling valt.

Ten tweede is (agraris) land in Nederland duur. Er wordt op dit moment 5000-7000 Euro/ha/jaar aan landvergoeding betaald voor PV-opstellingen. In de landen om ons heen is dit 3 – 5x lager. Dit betekent dat je zoveel mogelijk kWh per ha wilt hebben, zelfs deels ten koste van de kWh/kWp, omdat deze landkosten zo dominant zijn, zeker nu de CAPEX van PV-systemen zo veel gedaald is. En (zeer) volle bedekking van je land is juist weer niet gunstig voor je bifacial meeropbrengst.

In eerste instantie werden bifacial modules dan ook vooral toegepast in systemen waarbij de gedeeltelijke lichtdoorlating een strikte voorwaarde was en in systemen die door hun oriëntatie optimaal gebruik kunnen maken van de instraling aan beide zijden. In het eerste geval, gaat het bijvoorbeeld om overdekte parkeerplaatsen, maar ook de PV-opstellingen boven (zacht) fruit. Ook bij verticale plaatsing van modules is de keuze voor bifacial de enige, logische optie. Deze eerste systemen zijn vaak gebaseerd op trial and error.

Om deze ontwikkelingen te ondersteunen zijn er meerdere projecten gestart. Voor agri-PV zijn dit Symbizon, waarin strokenteelt onder zonvolgsystemen getest gaat worden en Sunbiose, waarin meerdere, deels bestaande, opstellingen voor verschillende agrarische toepassingen, in detail onderzocht wordt en de interactie tussen de PV-installatie en de gewassen eronder in detail bepaald worden. Voor geluidsschermen is het EU Life project SolarHighways al afgerond met een demonstratie langs de A50 bij Uden.

Daarnaast zien we nu ook dat zowel projectontwikkelaars als ook grondeigenaren en beleidsmakers en vergunning verstrekkers de meerwaarde van bifacial modules erkennen. Naast de opbrengstverhoging en de betere benutting van de vermogenslektronica en het netwerk, heeft het doorgelaten licht ook een positief effect op de kwaliteit van de bodem. Met name voor opstellingen die het meest economisch, gezien landkosten en subsidieregeling, gebouwd zijn. Recent heeft TNO hierover een rapport in opdracht van het College van Rijksadviseurs gepubliceerd en heeft de verantwoordelijke staatssecretaris bepaald dat PV-opstellingen op land moeten voldoen aan de richtlijnen voor grondinstraling zoals vastgelegd door TNO en WUR, Afgezien van ecologisch aangelegde zonneparken als De Kwekerij met een betrekkelijk lage landbedekking, is het alleen mogelijk om aan deze richtlijnen te voldoen als de modules een bepaalde mate van lichtdoorlating hebben.

1.7 Deliverables

1		Bifacial zonnecellen	Samenvatting	Status
	D1.1	Process freeze voor PERPoly cellen met 22% efficiëntie	Proces flow is ontwikkeld in het project en succesvol geïmplementeerd voor verder gebruik in het project.	gehaald
	D1.2	Kosten effectief proces voor boron diffusie en poly, SiNx depositie	Totale toegevoegde kosten van 0,027 €/cel voor de proces flow ontwikkeld in deliverable 1.1 in industriële machines	gehaald
	D1.3	Kosten effectief proces voor Al2O3 depositie	Door meerdere aspecten van de machine te optimaliseren is een kostenreductie van 27 % gerealiseerd	gehaald

	D1.4	Kosten effectief proces en materialen (stencils) voor zilver depositie	Niet uitgevoerd in verband met stoppen van activiteiten door Veco.	Niet gehaald
	D1.5	1000 PERPoly cellen voor productie van modules	In totaal 370 werkende cellen met een rendementsdistributie tussen 20 en 22 % zijn geselecteerd voor PV module productie in WP3	Niet gehaald
2		Bifacial zonnemodules		
	D2.1	Proces freeze licht management tussen cellen	Twee soorten gestructureerde tabs zijn getest in bifacial enkel-cel modules. Het beste resultaat heeft geresulteerd in een extra opgewekt vermogen van 2%. Uit tests met de gestructureerde tabs in combinatie met de in D2.2 ontwikkelde anti-reflectielagen is gebleken dat de gestructureerde tabs geen meerwaarde bieden boven het aanbrengen van de anti-reflectielaag. Er is besloten om in de module proces wel de LTF aan te brengen en niet met getextureerde tabs te werken.	Gehaald
	D2.2	Optimaal en stabiel proces voor LTF in modules	Er is een textuur en materiaal geselecteerd op basis van de beste anti-reflecterende eigenschappen en de klimaatkamer testen van D3.1. De resulterende anti-reflecterende laag is opgeschaald naar 60-cel module niveau. Het imprint proces is geoptimaliseerd en succesvol toegepast op 12 enkel-cel bifacial modules en 6 60-cel bifacial modules. Bij beide type modules is een stroomverhoging van 5% gerealiseerd.	Gehaald
3		Kwaliteit		
	D3.1	Klimaat kamer testen, ultieme BOM	Er zijn drie typen 4-cells glas-glas minimodules gemaakt met commerciële en TNO-made TOPcon cellen en drie verschillende encapsulanten (EVA, POE en TPO) en getest in klimaatkamer (Damp Heat en temperature cycling). Uit deze testen is een BOM geselecteerd die gebruikt zijn voor de vervaardiging van de grote modules	Gehaald
	D3.2	Minimaal 8 modules met commerciële cellen en LTF	Er zijn 12 grote modules vervaardigd bij het bedrijf Soltech met de ultieme BOM uit D3.1, waarvan zes voorzien van een Anti-reflecterende laag	Gehaald
	D3.3	Minimaal 12 modules met Polaris cellen (en LTF voor 2 van deze)	Doordat in WP1 minder Polaris cellen zijn gemaakt en niet geschikt waren voor integratie in grote PV modules zijn er ipv 12 grote modules 12 4-cels minimodules vervaardigd voor buiten karakterisatie op het dak van het TNO gebouw	Niet gehaald
4		Bifacial pilot systemen		
	D4.1	Aankoop commerciële bifacial modules 152	Er zijn vijf pallets met in totaal 160 modules, verdeeld over n-PERT en 5 of 12 busbar TOPCon modules gekocht.	Gehaald
	D4.2	Opbouw bifacial pilot systeem Zuid 30	Er is een zuid systeem geplaatst met 32 modules en module-level monitoring op een dak van een fabriek	Gehaald
	D4.3	Opbouw bifacial pilot systeem Oost-West 10	Er is op hetzelfde dak ook een bijna-horizontaal systeem geplaatst met 40 modules in rijen	Gehaald

			afwisselend oost of west-gericht. Ook hier is module-level monitoring toegepast.	
	D4.4	Opbouw bifacial pilot systeem Oost-West 90	Op het bouwvlak van een agrarisch bedrijf is het eerste verticale PV-systeem van Nederland geplaatst, volledig met SolarEdge power-optimisers en omvormers.	Gehaald
	D4.5	1 jaar bifacial systeem data met commerciële modules	Op het industriële dak zijn n-PERT en TOPCon modules van Jolywood naast elkaar getest voor meer dan een jaar.	Gehaald
	D4.6	1 jaar bifacial systeem data met Polaris modules	Wegens vertraging bij de bouw van het verticale systeem en in de cel- en module productie runs is er alleen data verzameld vanaf mei tot en met oktober 2021. Er is afgesproken met dak-, veld- en module-eigenaren dat de metingen "gewoon" doorlopen voorbij het einde van het POLARIS project.	Niet gehaald
5		Disseminatie en Markstrategie		
	D5.1	Openbare website om project data met het publiek te delen	Een openbare website is aangemaakt maar niet meer actief	Gehaald
	D5.2	Marktstrategie en exploitatie plan om de bifacial modules beschikbaar te krijgen op de Nederlandse markt in 2020	Een schets van de huidige markt en mogelijkheden voor bifacial zonnemodules in specifieke landtoepassingen zoals bv AgriPV is samengevat in dit rapport	Gehaald
	D5.3	Seminar of workshop over implementatie van bifacial PV in NL	Een seminar over de project resultaten is gepland op het Sunday symposium dat is uitgesteld tot 8 Juni 2022	Nog te halen

1.8 Conclusies en aanbevelingen

In sectie 1.3 waren een aantal belangrijke subdoelstellingen gedefinieerd voor het project als onderdeel van drie probleemstellingen. Aan de hand van de beschreven resultaten in sectie 1.6 zullen we hieronder beschrijven in hoeverre dit project antwoord heeft gegeven op deze subdoelstellingen.

Subdoelstellingen voor **bifacial cellen**:

- *Verhogen van productie doorvoer tot 6000 wafers/uur voor de verschillende cel proces stappen, hetgeen een significante CoO verlaging (20 – 30%) per productie stap oplevert*

De derde generatie van het SPECTRUM platform van Tempres combineert grotere doorvoer volumes met een lager verbruik van elektriciteit en chemicaliën per wafer. Dit geldt voor de Boordiffusie stap en de deposities van de poly-Si en SiNx lagen. Gezamenlijk komen de proceskosten voor deze stappen uit op €0.027 / zonnecel.

De upgrade van de Levitrack leidt tot een stabiele doorvoer van 6000 wafers/uur. Ook draait het proces langer zonder fouten en gaat de aluminium proces plaat veel langer mee. Dit leidt tot een daling van de proceskosten per wafer van 27%.

- *Verbeteren van de productie stabiliteit door innovaties aan cel proces flow en cel design*

De verbeteringen aan de Levitrack hebben geleid tot een 3x langere *mean time to failure* en een proces plaat die drie keer langer meegaat. Dit beïnvloedt de productiestabiliteit, wat ook aangetoond is met een run van meer dan 40 uur, zonder problemen en met constante kwaliteit van het proces.

- *Verlagen van de productie kosten door verminderd zilver gebruik middels aanpassing van het contact design, getuned op het Noord-Europees / NL klimaat*

In ons klimaat gaat bij constante cel rendement de jaarlijkse energieopbrengst omhoog bij hogere V_{oc} en I_{sc} , ten koste van de fill factor. Dit kan bereikt worden door een metaal grid te printen met minder en minder brede lijnen. Uit simulaties volgt dat door 45% minder Ag te printen, heeft de cel een absoluut 0.2% lagere efficiëntie, maar de jaarlijkse kWh-opbrengst neemt met 2.2% toe.

De experimentele cel variaties met minder Ag aan de voorzijde en aan beide zijden laten zien dat dit inderdaad leidt tot lagere FF, maar vooral tot hogere I_{sc} en V_{oc} . Verificatie van de energieopbrengst in een dakopstelling loopt nog.

- *Verhogen van het cel rendement van 21.5% tot 22% door het aanbrengen van smallere contacten met minder schaduwverliezen.*

In de productierun van 1000 cellen zijn hoogste rendementen van 21.9% tot 22.0% behaald.

Subdoelstellingen voor **bifacial modules**:

- *Verhogen van het module rendement door verbetering van de licht-inkoppeling met minimaal 5% door structuur aan te brengen tussen de cellen en op het glas*

Er is in het project gekeken naar het effect van gestructureerde tabs op de cellen en het aanbrengen van een Light Trapping Coating ter verbetering van de licht-inkoppeling. Het is gebleken dat gestructureerde tabs geen meerwaarde bieden boven het aanbrengen van de Light Trapping Coating. Dit heeft geleid tot een verhoging van maximaal 5% van de gemeten stromen en 4% van het modulerendement.

- *Verbeteren van de duurzaamheid en verlengen van de levensduur van 20 naar minimaal 30 jaar door het glas-glas ontwerp van de modules*

Door middel van variatie van module materialen zijn test modules gemaakt die zijn blootgesteld aan een aantal kritische versnelde test condities waaronder Damp Heat, Temperatuur cycli en Potential Induced Degradation (PID). Er is gekozen voor een testduur die minstens 2 keer langer was dan de huidige standaarden voorschrijven. De testen laten zien dat bij een geschikt gekozen combinatie van module materialen de modules betrouwbaar zijn en dus met een verminderd risicoprofiel gekozen zijn voor de veldtesten in dit project. Het is uit deze testen echter niet mogelijk een uitspraak te doen over de absolute levensduur van het module.

voor **bifacial systemen**;

- *Aantonen van hogere energie opbrengst van bifacial pilot systemen in 3 verschillende configuraties en vergeleken met een standaard monofacial systeem.*

Vanwege de sterke opkomst van bifacial PV en van TOPCon cel-concept gedurende de looptijd van dit project is de hogere energieopbrengst van de modules vergeleken met de state of the art bifacial modules, type n-PERT, voor het begin van het project. De kWh-metingen van de opbrengst laten zien dat de V_{oc} verbeteringen van de TOPCon cellen te zien zijn in de hogere meeropbrengst bij hogere moduletemperatuur, bijvoorbeeld onder hoge instralingscondities en bij hoge omgevingstemperatuur.

- *Validatie van reeds ontwikkelde geavanceerde bifacial systeem modelering*

De data van de testopstelling kan gereproduceerd worden door BIGEYE. Dit gaat zeer goed voor het vermogen en in schaduwarme condities ook voor het voltage en de stroom in het werkpunt. Als de rij-rij afstand voor schaduw zorgt, dan wordt het vermogen nog nauwkeurig bepaald door BIGEYE, gebruikmakend van een numerieke verliesfunctie. BIGEYE kan ook in "full IV" gebruikt worden. Zij voorspelt dan wel correct de stappen waarbij een of twee bypass diodes opengaan, maar de exacte timing van deze stappen is heel gevoelig voor kleine variatie in hoogte en afstand van de modules.

- *Acceptatie en inzicht in meerwaarde van bifacial PV systemen bij de Nederlandse energie bedrijven, ondernemers, installateurs en consumenten door middel van publicaties, workshops en presentaties.*

De deelnemers van dit consortium hebben de voordelen van bifacial PV-systemen onder de aandacht van alle stakeholders gebracht. TNO heeft in 2019 de bifi-PV workshop georganiseerd waar Tempres en TNO meerdere presentaties gehouden hebben en TNO ook bezocht is door zo'n 30 deelnemers. De expertise van TNO is ook gezocht door provinciale en gemeentelijke bestuurders en beleidsmedewerkers, die willen weten wat de ontwikkelingen zijn voor PV-systemen. Met name de hogere opbrengst bij lagere instraling en de toegenomen instraling op de ondergrond zijn voordelen die door veel stakeholders gewaardeerd worden.

Appendix

Disseminatie van project resultaten

In onderstaande tabel zijn de bijdragen waarin resultaten vanuit het Polaris project zijn gepresenteerd samengevat:

	Waar	Type	Onderwerp	Werkpakket	Partner
#1	EU PVSEC 2019	Mondelinge presentatie en Conferentieproceeding	Improving the Yield by Designing the Module for a Climatic Region	1,4	TNO
#2	Metallization workshop 2019	Poster Presentatie	Optimising front and rear metallisation grids for bifacial annual yield	1,4	TNO
#3	EUPVSEC 2019	Mondelinge Presentatie	Optimising fill factor for bifacial energy yield and LCoE	1,4	TNO
#4	28th NREL workshop crystalline Si cells and modules	Mondelinge Presentatie	The latest developments in bifacial solar cells at ECN	1	TNO
#5	EUPVSEC 2020	Poster presentatie en Conferentie Proceedings	POST MORTEM ANALYSIS OF BIFACIAL PV MODULES BASED ON N-TYPE CRYSTALLINE-SI CELLS	3	TNO