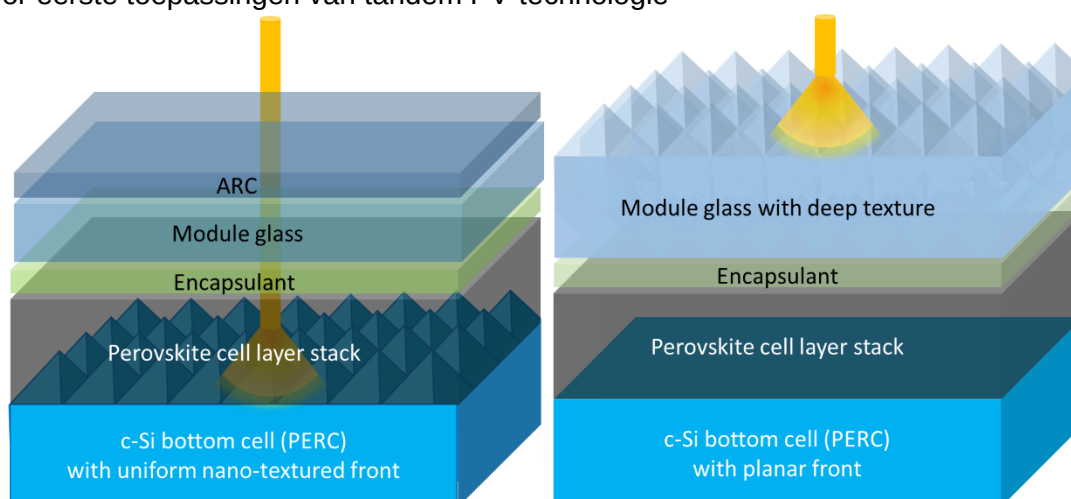


Openbaar eindrapport TKI Urban Energy project LIMITLESS

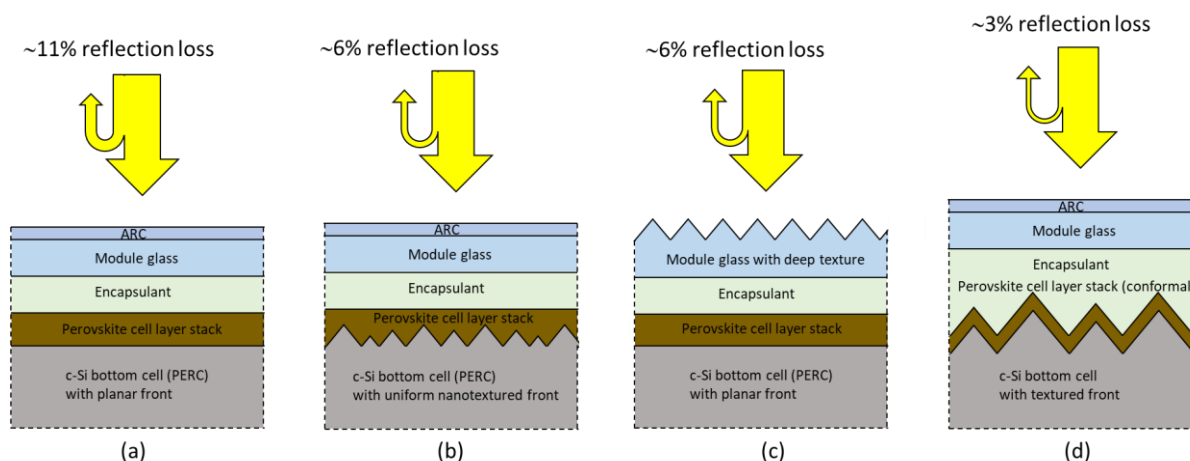
Uitgangspunten en doelstellingen van project en partners

State-of-the-art serie-geschakelde (zogenaamde 2-terminal of 2T) tandemzonnecellen van een perovskiet zonnecel op een kristallijn silicium (c-Si) zonnecel hebben rendementen bereikt van meer dan 30% met een vlakke voorzijde. Een vlakke voorzijde van een zonnecel is echter ongunstig voor het rendement omdat het een hoge reflectie geeft. In het geval van de tandemzonnecellen gaat er door deze hoge reflectie een geschatte 3 procentpunt rendement verloren. Industrieel relevante oplossingen voor betere lichtinvang zijn daarom vereist voor de nieuwe perovskiet/silicium tandemtechnologie, om er in de toekomst meer impact mee te kunnen bereiken (lagere kosten, meer voordeel van het overschakelen van de huidige silicium zonnecellen naar deze nieuwe tandemzonnecellen).

Het doel van dit project was om twee oplossingen te onderzoeken voor lichtbeheer van 2T perovskiet/silicium tandemzonnecellen, om het rendement met 2 procentpunt te verhogen. Deze oplossingen zouden bijdragen aan de rendements- en kostenreductiedoelstellingen van de MMIP2 van het TKI, en zouden de implementatie van PV in de gebouwde omgeving ten goede komen. PV in de gebouwde omgeving is naar verwachting een geschikt marktsegment voor eerste toepassingen van tandem PV-technologie



Figuur 1 Overzicht van de twee methodes voor lichtbeheer die in dit project zijn onderzocht. Links door toevoeging aan de silicium zonnecel van een nanotextuur op de voorzijde, waarop perovskiet wordt aangebracht vanuit een vloeistofcoating (benadering 1), rechts door aanbrengen van een transparante laag met een diepe textuur op het glas van het zonnepaneel (benadering 2).



Figuur 2 Illustratie van het verwachte rendementsvoordeel van de methodes voor lichtbeheer in het project, uit een analyse vroeg in het project. Links, (a): referentiesituatie met een vlakke perovskietlaag op een vlakke silicium zonnecel. Midden, (b) en (c): de methodes voor lichtbeheer die in dit project zijn onderzocht, geschikt voor perovskietproductie uit vloeistof. Rechts, (d): alternatieve aanpak voor lichtbeheer, met behulp van een perovskietlaag die grovere textuur van de silicium zonnecel conformeel bedekt, wat moeilijk te bereiken zou zijn met perovskietproductie uit vloeistof. Tijdens het project werd er een uitgebreidere modellering uitgevoerd en we schatten momenteel dat de reflectie van schema (b) hoger is (ongeveer 9-10%) en van schema (c) lager (ongeveer 4-6%).

Het project werd geïnspireerd door de uitstekende wereldwijde vooruitgang met perovskiet-zonneceltechnologie op basis van depositie uit vloeistof. Dit leidde tot een projectdoelstelling om de noodzaak van drastische veranderingen in de perovskietdepositie te vermijden die nodig zouden zijn om met conventionele (grove) siliciumtextuur om te gaan. Een tweede uitgangspunt was een eerder door TKI ondersteund ontwikkelingsproject waarin c-Si PERC-cellen werden gemodificeerd met een polysilicium emitter om geschikt te zijn voor tandemcellen (het project "PERCspective", dat alleen planaire tandemcelstructuren zonder textuur bestudeerde).

De onderzoeksactiviteiten waren verdeeld over drie onderwerpen:

1. Van PERC afgeleide c-Si zonnecellen voor gebruik als onderste zonnecel van de tandem, met zowel vlakke als getextureerde voorzijdes. Het ontwikkelen en optimaliseren van een textuur met submicron piramides op deze zonnecellen.
2. Nieuwe perovskietoplossingen, en *slot-die* en *blade coating* toepassingen, voor compatibiliteit van perovskietdepositie uit vloeistof met de c-Si oppervlaktetextuur. Daarnaast onderzoek met depositie door *spin coating*, ter ondersteuning van de industrieel relevante verwerking op basis van *slot-die coating*.
3. Aanbrengen van een textuurlaag op glas, als tweede aanpak voor lichtbeheer. Optimalisatie van deze textuurlaag voor reductie van materiaalverbruik en voor stabiliteit tegen UV licht en vervuiling. Toepassing van dit glas voor vervaardiging van mini-zonnepanelen met de tandemcellen, en karakterisering en buitentesten van de eigenschappen.

Behaalde resultaten en knelpunten

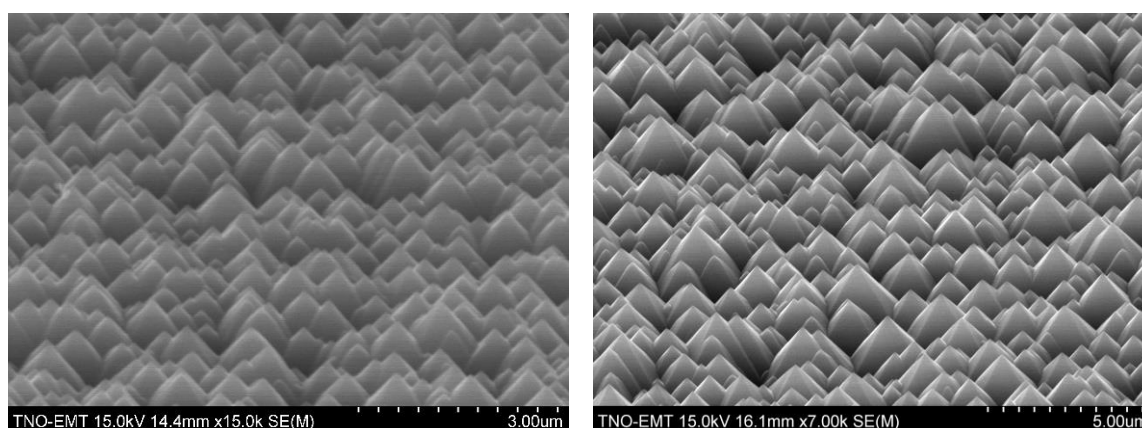
1.1 PERC-afgeleide c-Si zonnecellen als onderste zonnecel.

Een PERC-achtige onderste zonnecel voor tandems kan relatief eenvoudig worden geproduceerd, bijvoorbeeld met metaaloxide-passiveringslagen, een kosteneffectieve

metallisatie aan de achterzijde, en een n-type polysilicium/tunneloxide-gepassiveerd contact aan de voorzijde dat als emitter fungeert. Dit is een geschikte architectuur voor de onderste zonnecel van tandemcellen. In het LIMITLESS-project bereikten dergelijke cellen met een vlakke voorzijde een zeer hoge openklemspanning (Voc) tot 710 mV. Het voordeel van een PERC-achtige onderste zonnecel is dat deze de laagste proceskosten heeft van alle huidige op silicium gebaseerde zonneceltechnologieën¹ en dat het gepassiveerde contact aan de voorzijde de Voc aanzienlijk verhoogt in vergelijking met standaard PERC-zonnecellen.

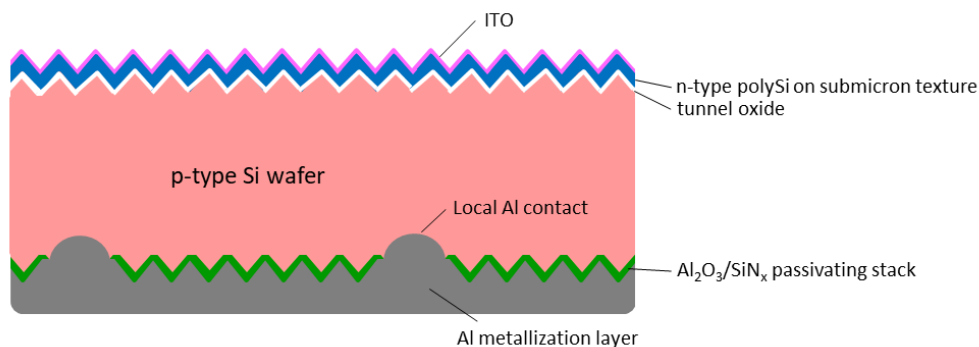
TNO ontwikkelde een combinatie van planarisatie en nanotextuurproces voor silicium *wafers*. De ontwikkelde procesparameters zijn compatibel met industriële productie in termen van procesapparatuur en procesparameters zoals doorvoersnelheid (tacttijd). De uniformiteit van de textuur was voldoende om geen defecten in de bedekking van de textuur door de perovskietlaag waar te nemen bij inspectie met elektronenmicroscopie. Op basis van reflectie van deze textuur (zonder de later volgende perovskietlaag) liggen de optische eigenschappen en prestaties van deze textuur dicht bij de conventionele grovere textuur.

Ondanks de toepassing van het gepassiveerde contact (de eerder genoemde n-type polysilicium/tunneloxide combinatie) liet de zonnecel met nanotextuur een significante lagere Voc zien dan de vergelijkbare planaire zonnecel: 681 mV in plaats van 710 mV. We zijn er echter van overtuigd dat optimalisatie kan resulteren in veel hogere Voc. In het project was de mogelijkheid voor Voc-optimalisatie beperkt door de beperkte beschikbaarheid van procesapparatuur.



Figuur 3. Afbeeldingen met elektronenmicroscopie van (a) de nanotextuur, met een piramidehoogte van minder dan 1 μm ; (b) ter vergelijking een gebruikelijke silicium-zonneceltextuur met een piramidehoogteverdeling van ongeveer 0.5 tot 2 μm . Merk op dat de foto's verschillende schaalgroottes hebben.

¹ Messmer C, Goraya BS, Nold S, et al. The race for the best silicon bottom cell: Efficiency and cost evaluation of perovskite–silicon tandem solar cells. *Prog Photovolt Res Appl.* 2021; 29: 744–759. <https://doi.org/10.1002/pip.3372>



Figuur 4. Schematische dwarsdoorsnede van de PERC-achtige silicium zonnecellen voor de tandem zoals ontwikkeld in het project.

1.2 Vervaardiging van perovskiet zonnecel op silicium nanotextuur.

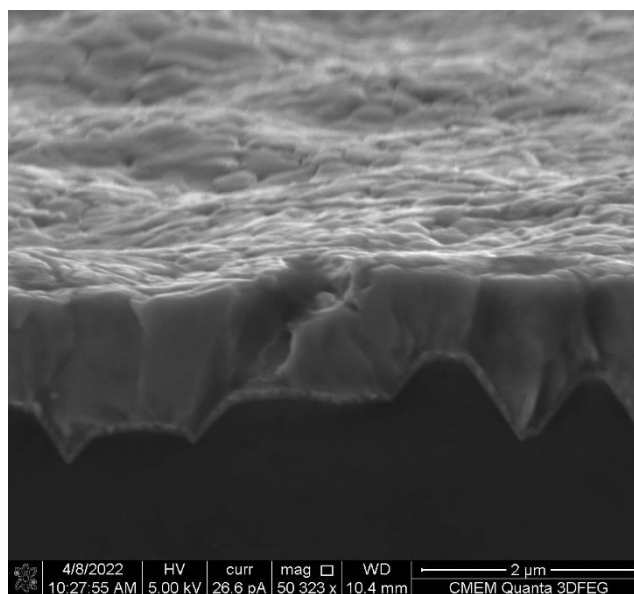
De ontwikkeling van de perovskiet-zonnecel op getextureerd silicium richtte zich op twee belangrijke lagen in de zonnecel-stack: de gatentransportlaag en de perovskietlaag. De meeste experimentele ontwikkeling werd uitgevoerd op zogenaamde 'ohmse substraten': siliciumwafers die eenvoudigweg als achterzijdecontact voor de perovskiet-zonnecel fungeerden. Zoals hierboven beschreven, was voor de depositietechnologie voor perovskiet in het project gekozen voor depositie uit oplossing, aangezien deze depositietechnologie het verst ontwikkeld is en geschikt voor het vervaardigen van perovskiet-zonnecellen met goede prestaties, en mogelijk het meest geschikt is voor industrialisatie en productie tegen lage kosten. Zowel *blade coating* als *slot-die coating* werden gebruikt in het project, met aanvankelijk de nadruk op *blade coating*.

Een eerste knelpunt in het LIMITLESS-project was de vorming van een conforme gatentransportlaag (HTL, *hole transport layer*). De HTL is de eerste laag die op de recombinatielaag op de silicium zonnecel wordt afgezet. Het is naar verwachting belangrijk dat deze conform op de siliciumtextuur wordt gevormd, om een contactpad voor de elektronen in de perovskietlaag naar de recombinatielaag te vermijden (dat zou nl. de perovskiet-zonnecel kortsluiten). Vanwege de beschikbare procesapparatuur waren niet alle oplossingen voor conforme depositie van de HTL mogelijk die in de literatuur zijn gerapporteerd. Alternatieve oplossingen die in het project zijn onderzocht, bleken niet te resulteren in goede tandemcelresultaten.

Een tweede knelpunt in het project was de vorming van een perovskiet-zonnecel-stack door middel van *blade coating* op silicium. Met *blade coating* was het in het project wel mogelijk om op glas-substraat een goede perovskiet-zonnecel te creëren met een voor tandems geschikte 1,7 eV *bandgap*, en een celrendement van ongeveer 18%. Hierbij hebben we ook verschillende methodes voor chemische passivering getest om die hoge prestaties te bereiken. Dit succesvolle proces kon echter niet goed worden gereproduceerd op spiegelglad gepolijste silicium 'ohmse substraten'. De redenen hiervoor zijn niet duidelijk geworden.

De ontwikkeling van het proces gebaseerd op *blade coating* op silicium werd uiteindelijk stopgezet, waarna is overgestapt op het gebruik van *slot-die* depositie, omdat een dergelijk *slot-die* depositieproces voor perovskiet met 1,6 eV *bandgap* beschikbaar was gekomen uit een ander project en succesvol was gebleken op glad gepolijst silicium. Dit proces werd getest op silicium 'ohmse substraten' met nanotextuur (Fig. 5). Er werd een beperkte optimalisatie

uitgevoerd voor de depositie van een HTL op textuur met *slot-die coating*. De perovskiet-celresultaten op nanotextuur bleven echter aanzienlijk achter bij die op glad gepolijst ohms substraat (celrendement 16% en $V_{oc}=1,1$ V voor glad gepolijst substraat, versus beste rendement 9,7% en $V_{oc}=0,94$ V op nanogetextureerd substraat, bij celafmetingen van 1 cm^2), en de resultaten waren veel minder uniform. Als gevolg hiervan zijn in dit project alleen tandemcellen gemaakt op glad gepolijste ('planaire') bodemcellen. Deze planaire tandemcellen zijn gebruikt voor het testen van het optische voordeel van de tweede lichtbeheeroplossing: het aanbrengen van textuur op moduleglas.



Figuur 5. Afbeeldingen met elektronenmicroscopie van de dwarsdoorsnede van een planariserende perovskietlaag gedeponeerd (uit oplossing) op een silicium wafer met nanotextuur.

1.3 Geprinte textuur op moduleglas.

Bij de start van het project had Morphotonics een bestaand proces voor het aanbrengen van diepe textuur op glas voor zonnepanelen. In het LIMITLESS-project lag de focus op verbeterde processen, materialen en prestaties met dit proces, o.a. gericht op lagere kosten en hoge stabiliteit in praktijkgebruik. TNO gaf hierbij technische ondersteuning aan Morphotonics. Nieuwe ontwerpen voor de geometrie van de textuur werden ontwikkeld en geïmplementeerd. Versnelde degradatietesten in UV werden uitgevoerd, met een uitstekende UV-stabiliteit als uitkomst. TNO testte of er een verschil in vervuiling zou zijn van het glas in de praktijk van een zonnepaneel-installatie. Na een testperiode van 3 maanden werd slechts een klein verschil waargenomen.

Vervolgens werden planaire tandem-zonnecellen gelamineerd met het getextureerde moduleglas tot mini-zonnepanelen, en vergeleken met mini-zonnepanelen met het gebruikelijke planaire (gladde) glas als referentie, en de voordelen van de textuur gekarakteriseerd. Omdat de perovskiet-zonnecellen in de tandem een *bandgap* van 1,6 eV hadden en daarom een andere stroom opwekten dan de silicium-zonnecellen van de tandem, moest de analyse worden uitgevoerd door middel van meting van de 'spectrale respons', d.w.z. dat de stroomgeneratie van elk van de zonnecellen in de tandem versus de golflengte van het invallende licht wordt gekarakteriseerd. Deze meting is voor tandemzonnecellen gevoelig voor artefacten (kleine invloeden in de eigenschappen) en daarom lieten de

resultaten veel spreiding zien. Positief was dat de resultaten gemiddeld in lijn waren met de theoretische verwachting van het voordeel van glastextuur: een voordeel van 7% voor de totaal in de tandem-zonnecel opgewekte stroom. Op het moment dat dit rapport werd geschreven, is *monitoring* in opstelling buitenshuis gaande van mini-zonnepanelen met planaire cellen die zijn gelamineerd met dit getextureerde glas, om meer vertrouwen te krijgen in dit voordeel en de stabiliteit daarvan.

Perspectief voor toepassing en spin-off

Bijna alle grote zonnecel- en zonnepaneel-producenten hebben voor zichzelf het vooruitzicht om op termijn tandem PV in commerciële productie te nemen. De ontwikkeling bij deze bedrijven bevindt zich evenwel nog grotendeels in de fase van laboratoriumonderzoek. Sommige streven ernaar om in de nabije toekomst met pilotproductietesten te beginnen. De vooruitzichten voor het moment van marktintroductie van tandem PV variëren aanzienlijk, tussen ongeveer 2027 en kort na 2030.

De concepten voor lichtbeheer die in LIMITLESS zijn onderzocht, zijn bedoeld om in potentie te kunnen worden toegepast in pilottesten en commerciële producten. Onze ontwikkeling van het eerste concept, *slot-die* coating van een planariserende perovskietlaag op een silicium zonnecel met nanotextuur, was slechts matig succesvol. Ook lijkt de theoretische verwachting van het voordeel (voor het rendement van het tandem-zonnepaneel) van deze aanpak voor lichtbeheer bescheiden. Niettemin kan het productieproces voor de silicium zonnecel met nanotextuur in feite eenvoudiger zijn dan voor een silicium zonnecel met een niet-getextureerde (gladde) voorzijde, en daarom kan deze aanpak toch commercieel aantrekkelijk zijn. Dit moet verder worden onderzocht. De toepassing van een polysilicium emitter aan de voorzijde van de silicium zonnecel is in elk geval aantrekkelijk. Wel moet (en kan, naar alle verwachting) de V_{oc} ten opzichte van de resultaten van ons project nog verder verbeterd worden.

De resultaten in het project van het tweede concept voor lichtbeheer, textuur op moduleglas, waren succesvoller. Qua prestaties (verbetering van zonnepaneelrendement) lijkt dit concept aantrekkelijk. Omdat het een ongebruikelijke materiaal en structuur aan de buitenste voorzijde van het zonnepaneel toevoegt, zal de betrouwbaarheid (stabiliteit van de rendementswinst) zeer grondig moeten worden getest. De eerste testen die in dit project zijn uitgevoerd zien er veelbelovend uit, maar uitgebreidere laboratorium-testen en met name testen van lange duur buitenshuis zullen nodig zijn om het voor commerciële toepassing te overwegen.

De ontwikkelde bouwstenen voor de concepten voor lichtbeheer en tandem-zonneceltechnologie (zoals de technologie voor het aanbrengen van de nanotextuur, polysilicium emitter, glastextuur, etc.) kunnen zowel gecombineerd als op zichzelf staand worden toegepast. Op die wijze kunnen de inzichten die zijn verkregen en de processen die zijn ontwikkeld binnen LIMITLESS, bijdragen aan de ambities van de EU om hightech PV-productie terug te brengen naar de EU-landen zelf. Het feit dat de meeste bouwsteenprocessen zijn ontwikkeld op of vertaald naar de industriële apparatuur van de fabrikanten binnen het projectconsortium, zal bijdragen aan hun mogelijkheden en concurrentievermogen in deze opkomende sector in de PV markt.

Bijdrage van het project aan de doelstellingen van de TKI Urban Energy

De TKI Urban Energy ondersteunt de ontwikkeling en toepassing van energie-innovaties voor de duurzame transformatie van woningen, commerciële gebouwen, woonwijken en industrieterreinen, bijvoorbeeld door middel van zon-PV. Meer specifiek ondersteunt TKI UE de ontwikkeling van PV met een hoog rendement en kostenreductie, die beide in potentie mogelijk worden gemaakt door tandem-PV-technologie. Het LIMITLESS-project heeft bijgedragen aan deze doelstelling door het genereren van Nederlandse kennis over nieuwe bouwstenen voor de productie van tandemzonnecellen en -zonnepanelen. Dat deze bouwstenen (productieprocessen) zijn ontwikkeld met industriële of pilot productie-apparatuur van de Nederlandse apparatuurfabrikanten geeft een extra stimulans voor de ontwikkeling van marktkansen.

De onlangs aangenomen Europese *'Net Zero Industry Act'* (NZIA) biedt een sterke stimulans om de productie van zonnecellen en zonnepanelen terug te brengen naar Europa. Op de middellange termijn zal de tandemtechnologie waarschijnlijk een belangrijke rol gaan spelen in deze ontwikkeling. Het LIMITLESS-project heeft de kennispositie van het consortium op het gebied van deze tandemtechnologie versterkt. Dit kan leiden tot commerciële kansen en een betere concurrentiepositie voor elk van de industriële partners in dit project.

Overzicht van openbaar verkrijgbare publicaties van LIMITLESS resultaten

De resultaten van het LIMITLESS-project hebben nog niet geleid tot technische of wetenschappelijke publicaties. Het rapport en meer informatie kunt u opvragen bij de coördinator:

- TNO Solar Energy and Solar Technology and Applications (locations Petten and Eindhoven, the Netherlands)
- General email: secretariat-se/sta@tno.nl
- Project coordinator: bart.geerligts@tno.nl

Dit project is mede gefinancierd door TKI-Energie, uit de Toeslag voor Topconsortia voor Kennis en Innovatie (TKI's) van het ministerie van Economische Zaken en Klimaat.