



# Openbaar eindrapport DYNAMO

---

## Gegevens project

- Projectnummer: 1621303
- Projecttitel: DYNAMO – Infrastructure Integrated PV in DYNAMic envirOnments
- Penvoerder en medeaanvragers: TNO (penvoerder), Heliox, Heijmans Wegen BV, Bayards Build
- Projectperiode: maart – oktober 2019
- Publicatiedatum openbaar rapport: 29 januari 2020



# 1 Samenvatting projectopzet

## 1.1 Aanleiding

Infrastructuurgeïntegreerde PV (I2PV) biedt een groot potentieel om een belangrijke bijdrage te leveren aan het Nederlandse energielandschap, met name in en langs wegen. Deze omgevingen zijn echter niet de standaard statische omgevingen waarbinnen conventionele PV is geoptimaliseerd; het zijn zeer dynamische omgevingen met snel wisselende schaduwen.

## 1.2 Doelstelling

Dynamische omgevingen bieden een nieuwe uitdaging in PV om I2PV-systemen te voorspellen, te modelleren en te optimaliseren. Er is nog geen onderzoek beschikbaar naar deze zaken binnen de literatuur. Binnen DYNAMO is een eerste verkenning uitgevoerd naar de impact en naar mogelijke mitigatiemaatregelen die zullen resulteren in betere I2PV-componenten en -systemen. Dynamische schaduw is in het project gedefinieerd als een schaduw die op een bepaalde plek niet langer dan 10 seconden onafgebroken aanwezig is.

DYNAMO levert een eerste rapportage van een laboratoriumstudie van dynamische schaduw die specifiek is afgestemd op de weg- en verkeersomgeving. Dit is gedaan via uitbreiding van de bestaande modellen voor I2PV-prestaties en -rendementen, waarbij rekening wordt gehouden met specifieke dynamische omgevingen, met als doel de business case te verbeteren en de technische en verwachte risico's voor toekomstige I2PV-projecten te verminderen.

## 1.3 Werkwijze

ECN heeft, in samenwerking met Heliox, Heijmans en Bayards Build, de impact geëvalueerd van dynamische omgevingen met snel veranderende schaduw op geluidswallen en wegen met geïntegreerde PV. Er is een koppeling gemaakt met eerdere en bestaande projecten (SONOB, PVSin, Solar Highways en PV4Roads) om de resultaten van het laboratorium te modelleren en te verifiëren. Het DYNAMO-consortium richt zich ook op het verspreiden van de nieuwe inzichten naar de Nederlandse gemeenschap en naar belanghebbenden die geïnteresseerd zijn in het aanpakken van problemen met PV in dynamische omgevingen. Dit zal resulteren in een sterke Nederlandse kennispositie met primair onderzoek en implementatie voor geoptimaliseerde I2PV-technologie.

# 2 Resultaten

## 2.1 Resultaten

In het project zijn meerdere tools ontwikkeld en getest voor het karakteriseren van de impact van dynamische schaduw. Het gaat om tools voor:

- Indoor testen van dynamische schaduw over een gehele module (2 typen opstellingen)
- Indoor testen van dynamische schaduw over een deel van de module (2 typen opstellingen)
- Outdoor testen van PV-systemen met dynamische schaduw
- Simulatie van dynamische schaduw situaties met BIGEYE
- Algoritmes voor het simuleren van vermogenselektronica.

Met deze tools is het dynamisch schaduwgedrag getest van 5 types vermogenselektronica: 3 power optimizers, 1 micro-inverter en 1 string inverter. De resultaten van deze tests zijn geanalyseerd.

De projectaanpak, resultaten en conclusies zijn gedeeld met de Nederlandse gemeenschap in een openbare workshop. De deelnemerslijst is bijgevoegd als bijlage 1 en de presentatie als bijlage 2.



## 2.2 Conclusies

Uit de testen bleek dat dynamische schaduw inderdaad verstorend kan werken voor de vermogenselektronica. In diverse situaties levert een dynamische schaduw zelfs een groter energieverlies op dan een statische schaduw van dezelfde omvang. Tot nu toe zijn de volgende vermoedelijke foutbronnen geïdentificeerd:

- lange bemonsteringstijd van het MPP-algoritme,
- lage limiet van de ramp rate van de DC/AC-omvormer,
- serieschakeling van beschaduwde en onbeschaduwde cellen of modules.

Om de invloed van deze en mogelijke andere foutbronnen daadwerkelijk vast te stellen zijn vervolgmetingen noodzakelijk, met meerdere types vermogenselektronica en onder meerdere beschaduwingsomstandigheden.

Zeker is dat bij aanwezigheid van dynamische schaduw het module-ontwerp, het systeemontwerp en de MPPT-algoritmes een significante invloed hebben op de energieopbrengst. Verkeerde keuzes op dit gebied kunnen leiden tot opbrengstverliezen van meer dan 10%. Er is mogelijk ook een negatieve invloed op de levensduur van de vermogenselektronica, vanwege wisselende belasting van de elektronica. Dit kon binnen de beperkte tijdsduur van dit project helaas niet verder onderzocht worden.

Wat de beste ontwerpkeuzes zijn, hangt van veel factoren af. Onder meer schaduwintensiteit, schaduwduur, schaduwfrequentie, de verhouding tussen directe instraling en diffuse instraling. Verder bleek er een groot verschil in gedrag tussen de verschillende geteste typen vermogenselektronica-componenten. Er is daardoor geen algemene aanbeveling te doen. Wel heeft TNO modellen beschikbaar waarmee het gedrag gemodelleerd kan worden onder diverse belichtingsomstandigheden, uitgaande van het module-ontwerp, systeemontwerp en de gemeten karakteristieken van de vermogenselektronica.

## 2.3 Aanbevelingen

Zoals hiervoor aangegeven is het op dit moment onmogelijk om algemene aanbevelingen te doen over de beste ontwerp- en componentkeuzes in het geval van dynamische schaduw.

We kunnen wel een *hypothese* formuleren over situaties waarin veel negatieve impact van dynamische schaduw te verwachten is. Op grond van de bovengenoemde vermoedelijke foutbronnen verwachten we die in ieder geval in de volgende situaties:

- korte schaduwduur of hoge schaduwfrequentie (in verhouding tot de bemonsteringsfrequentie van het MPPT-algoritme),
- grote wisselingen van de DC-stroom van de DC/AC-omvormer,
- serieschakeling van beschaduwde en onbeschaduwde cellen of modules.

In al deze gevallen is het te verwachten dat de impact groter is naarmate de schaduwdiepte groter is. Dat wil zeggen wanneer de intensiteit van de instraling tijdens beschaduwing veel lager is dan daarvoor en daarna. Op grond daarvan verwachten we dat PV die is geïntegreerd *in het wegdek* veel gevoeliger is voor dynamische schaduw dan PV die is geïntegreerd *in geluidsschermen*. Immers voertuigen die *over* de PV-cel rijden, *op kleine afstand*, geven daarop een veel diepere schaduw dan voertuigen die *langs* de PV-cel rijden, *op grote afstand*. Binnen de categorie van PV geïntegreerd in geluidsschermen geldt weer dat *monofaciale* PV gevoeliger is voor dynamische schaduw dan *bifaciale* PV. Geluidsschermen met bifaciale PV vangen gelijktijdig licht op aan de voor- en achterzijde van het geluidsscherm. Hierdoor wordt de invloed van schaduw aan één van deze zijdes afgezwakt.

Bij het regelmatig optreden van dynamische schaduw bevelen we aan om het ontworpen systeem te verifiëren door een combinatie van testen en modelleren.

## 2.4 Knelpunten

Tijdens de uitvoering van het project zijn meerdere knelpunten opgetreden. Het testen van dynamische schaduw in een lab-omgeving is zeer complex. Dit komt onder meer door elektrische interacties en interacties tussen verschillende regelingen. Zo rezen er vermoedens dat het gedrag van een bepaald type power optimizer beïnvloed werd door de 100 Hz frequentie in de lichtintensiteit van de continue zonn simulator. Om dit soort zaken te



ondervangen zijn de indoormetingen uitgevoerd op een tweetal typen opstellingen. Verder zijn de indoormetingen aangevuld met outdoormetingen.

De outdoormetingen hebben ook weer hun beperkingen. In de buitenlucht zijn de omstandigheden zoals stralingsintensiteit, schaduwdiepte en schaduwrichting veel minder beïnvloedbaar. Dit staat nog los van het feit dat bruikbare buitenmetingen alleen mogelijk zijn op een dagdeel zonder bewolking.

Het belangrijkste knelpunt in dit onderzoek is dat dynamische schaduw zeer complex is. De impact van de dynamische schaduw is voor elk merk en type apparaat anders en hangt van vele omgevingsfactoren af. Het is daardoor op dit moment onmogelijk om algemene conclusies te trekken. Wel is het mogelijk om specifieke situaties te bestuderen in de laboratorium- en simulatieomgeving die TNO in dit project ontwikkeld heeft.

## 2.5 Perspectief voor toepassing

De kennis die in dit project is opgedaan, kan gebruikt worden bij het ontwerpen en evalueren van PV-systemen voor I2PV toepassingen, en bij het selecteren van geschikte vermogenselektronica en geschikte MPPT-algoritmen.

De kennis is ook toepasbaar in andere toepassingsgebieden van PV waar dynamische schaduw optreedt. Denk hierbij bijvoorbeeld aan *drijvende PV*. Hier zorgen golven en wind enerzijds voor bewegende schaduw. Anderzijds zorgen ze voor variatie in de intensiteit van de zoninstraling, als gevolg van wisselende oriëntatie van het drijvende zonnepaneel ten opzichte van de zon.

Een ander toepassingsgebied waar dynamische schaduw optreedt zijn *gecombineerde zon- en windparken*. Hierbij worden op één stuk land zowel een zonnepark als een windpark gebouwd. Deze maken samen gebruik van één aansluiting op het elektriciteitsnet. Dit is sterk in opkomst vanwege de kostenbesparingen die dit oplevert en vanwege de beperkte aansluitcapaciteit van het elektriciteitsnet. In deze gecombineerde zon- en windparken zorgen de roterende turbinebladen echter wel voor een dynamische schaduw op de zonnepanelen, met een typische schaduwfrequentie in de orde van 1 Hz. Ook in al deze toepassingsgebieden van PV is een passend ontwerp en selectie van de juiste apparatuur en regelalgoritmes noodzakelijk.

Parallel aan deze toepassingen is vervolgonderzoek nodig. Om de geformuleerde hypothesen te toetsen en meer algemeen bruikbare kennis te ontwikkelen, dienen verdere experimenten plaats te vinden. Het gaat daarbij om metingen aan meer typen apparatuur, maar ook om metingen in een bredere verzameling aan omstandigheden. Ook is het wenselijk om de modellen verder te ontwikkelen. Enerzijds om het beste module- en systeemontwerp te eenvoudiger te bepalen. Anderzijds om kosten-batenanalyses in specifieke situaties mogelijk te maken.

De actuele spin-off activiteiten van de projectpartners staan verderop beschreven in sectie 4 Spin-off.

## 3 Bijdrage aan TKI-doelstellingen

### 3.1 Bijdrage aan duurzame energiehuishouding

De doelstellingen en de reikwijdte van het DYNAMO-project zijn direct relevant voor de belangrijkste doelstellingen van programmalijn 3, te weten de ontwikkeling van multifunctionele bouwelementen en I2PV, die bijdragen aan energiebesparing en/of energieopwekking. Centraal in dit project staat het overwinnen van potentiële technische barrières en het elimineren van technische en economische risico's voor grootschalige implementatie van PV in de infrastructuur. DYNAMO richt zich daarmee op de doelstellingen van programmalijn 3b - ontwikkeling van multifunctionele infrastructuur-geïntegreerde PV-elementen. Verder richt dit project zich op de doelstellingen van programmalijn 1d - PV-systeemcomponenten, door de nadruk te leggen op het beoordelen en mogelijk verbeteren van oplossingen voor energiebeheer, om de prestaties en veiligheid van het systeem te optimaliseren.

De prestaties van I2PV-systemen worden negatief beïnvloed door niet-optimale module-oriëntatie en complexere beschaduwingsomstandigheden. In tegenstelling tot op de grond geïnstalleerde statische systemen in een open veld,



zijn de schaduw effecten voor I2PV complexer en over het algemeen ingrijpender. Inzicht in de impact van dynamische schaduwwerking is van belang voor een economisch verantwoorde en veilige integratie van PV in de wegeninfrastructuur. Volledige benutting van het gebied van een geluidsscherm voor elektriciteitsopwekking vereist bijvoorbeeld een installatie dicht bij de grond en dus meer "zachte" en "harde" dynamische schaduwwerking. Bij integratie van PV-systemen in snelwegen bepaalt het variërende verkeer de complexe dynamische beschaduwingsstoestand gedurende de dag, waarbij 80 tot 90% van het actieve PV-gebied harde beschaduwing ondervindt door passerende voertuigen tijdens de spits, waardoor het systeem "aan" en "uit" kan worden gezet, wat onvoorziene risico's met zich meebrengt.

Dankzij recente ontwikkelingen op het gebied van slim moduleontwerp en oplossingen voor energiebeheer verbeteren de niet-uniforme schaduw tolerantie op het niveau van de module en/of het systeem. Het ontwerp van PV-systemen is echter nog steeds gebaseerd op kosteneffectieve PV-systeemtechnologieën met in serie geschakelde modules in combinatie met een geschikte centrale omvormer. Dergelijke systemen zijn inherent gevoelig voor alle beschaduwingsomstandigheden vanuit het oogpunt van prestaties, maar ook veiligheid, waarbij dynamische schaduwomgevingen potentieel meer extreme belastingen kunnen veroorzaken. Daarom is het belangrijk om het effect van dynamische schaduwwerking op de prestaties en de elektrische veiligheid van het I2PV-systeem te beoordelen om mogelijke problemen te identificeren en vervolgens het ontwerp van het PV-systeem te optimaliseren. Dit zal uiteindelijk het rendement verbeteren, eventuele economische en veiligheidsrisico's verminderen en op den duur een grootschalige implementatie van I2PV in Nederland en Europa mogelijk maken.

Belangrijk is dat DYNAMO voortbouwt op de ervaring van diverse andere projecten die in programmalijn 3b zijn gefinancierd. In eerdere projecten, waar PV-geluidsschermen, zonnewegen en andere soorten I2PV-producten zijn ontwikkeld, is rekening gehouden met statische schaduw, maar zijn dynamische schaduwomgevingen niet geëvalueerd. In DYNAMO hanteren we een empirische en gecontroleerde benadering om de dynamische schaduwwerking te begrijpen. Dit zal leiden tot een effectievere toepassing van I2PV-projecten, waardoor de hoeveelheid elektriciteit die op deze manier kan worden opgewekt toeneemt. Daarnaast zal de ontwikkelde empirische kennis en modellering leiden tot "gestandaardiseerd maatwerk" van elk systeem, op systeemniveau voor optimale prestaties, maar in dit geval geoptimaliseerd met systeemcomponenten en niet met specifieke moduleconstructies. Met andere woorden, zelfs met standaard moduleconfiguraties kan de output nog steeds worden geoptimaliseerd dankzij een beter begrip van de beperkingen en een op kennis gebaseerd ontwerp.

### 3.2 Bijdrage aan kennispositie

Het DYNAMO-project bouwt voort op het onderzoek naar andere soorten dynamische schaduw om Nederland te vestigen als gedachtenleider over de impact van snel veranderende schaduw. Het project bevat ook een fundamentele hoeveelheid onderzoek voor de ontwikkeling van potentiële oplossingen om optredende negatieve effecten te beperken en I2PV producten te verbeteren. In het bijzonder kijkt DYNAMO naar het type schaduw dat veroorzaakt wordt door verkeer op PV die aanwezig is *naast* of *in* wegen. Hiertoe is het nodig om, op een gecontroleerde manier, experimenteel te testen wat de potentiële impact van dynamische schaduw is. Het DYNAMO-project draagt bij aan het versterken van de kennispositie van Nederland in dit gebied en geeft een belangrijk commerciële voorsprong aan Nederlandse leveranciers van I2PV producten. Ten eerste, wordt het effect van dynamische schaduw op I2PV systemen empirisch en theoretisch geëvalueerd. Dit levert hulpmiddelen op voor verdere kennisontwikkeling. Ten tweede, zal de vooruitgang in begrip en beoordeling van de invloed van dynamische schaduw helpen bij de ontwikkeling van meer concurrerende I2PV producten en bij het verminderen van investeringsrisico's.

## 4 Spin-off

Het project heeft voor de partners tot volgende spin-off geleid:

- TNO, Heliox, Heijmans en Bayards Build passen de opgedane kennis toe bij hun projecten op het gebied van Infrastructuur geïntegreerde PV, zoals PV in geluidsschermen of PV in wegdekken.



- TNO en Heliox doen in het SolarWind-project een vervolgonderzoek<sup>1</sup> naar de effecten van dynamische schaduw in gecombineerde zonne- en windparken. Daarbij werken zij samen met projectontwikkelaars Zwanendal BV, Solarfields en Vattenfall. Hiermee willen beide partijen hun portfolio uitbreiden: TNO haar diensten op het gebied van advisering, Heliox haar range van producten op het gebied van vermogenselektronica.
- Daarnaast passen TNO en Heliox de opgedane kennis toe bij andere PV-toepassingen waar dynamische schaduw een rol speelt, zoals: gebouwgeïntegreerde PV (BIPV) en drijvende PV.

## 5 Publicaties

B. K. Newman, A.R. Burgers, N. J. J. Dekker, P. Manshanden, M. J. Jansen, J. C. P. Kester, 'Impact of Dynamic Shading in cSi PV Modules and Systems for Novel Applications', *IEEE PVSC 2019*.

Downloadbaar via: <https://www.pvsc-proceedings.org/>

## 6 Nadere informatie

Extra (digitale) exemplaren van dit rapport kunnen gratis worden verkregen via de volgende contactpersoon:

Josco Kester, TNO, [josco.kester@tno.nl](mailto:josco.kester@tno.nl).

De contactpersoon kan ook meer informatie over dit project verstrekken.

## 7 Financiële ondersteuning

Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Nationale regelingen EZ-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.

## Bijlage

- A. Presentatie openbare workshop 03-10-2019, bij Heijmans, Rosmalen.

---

<sup>1</sup> Voor het SolarWind-project is bij RVO financiële steun aangevraagd in het kader van de tender voor TKI Urban Energy. Op het moment van schrijven van dit rapport is de beoordeling van de aanvraag nog niet voltooid.