

Stieltjesweg 1
2628 CK Delft
Postbus 155
2600 AD Delft

www.tno.nl

T +31 88 866 20 00
F +31 88 866 06 30

TNO-rapport

TNO 2017 R11300

PV SolaRoad Infrastructuur (PV-SIN)

Datum 3 november 2017

Auteur(s) Ir. S.A.W. Klerks
Drs. ing. W.C. van der Poel
Dr. ir. M.S. de Wit

Exemplaarnummer 0100309621
Oplage
Aantal pagina's 36 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen
Opdrachtgever RVO Rijksdienst voor Ondernemend Nederland

Projectnaam PV-SIN
Projectnummer TEZG113009 (RVO referentie) en 056.01971 (TNO referentie)
Penvoerder TNO
Medeaanvragers ECN, FemtoGrid, Imtech (Dylniq), Ooms Civiel en Gouda
Chemiebouw
Looptijd project 1 januari 2014 tot 1 juli 2017

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2017 TNO

Inhoudsopgave

1	Samenvatting	3
2	Inhoudelijk eindrapport	5
2.1	Inleiding	5
2.2	Opzet van de rapportage	5
2.3	Doelstellingen	6
2.4	Samenwerkende partijen	9
2.5	Beschrijving begrippen.	11
3	Projectresultaten	15
3.1	Inleiding	15
3.2	Eisen en validatiemethoden	15
3.3	Ontwerp V2 en V3	16
3.4	PV module	17
3.5	Toplaag	18
3.6	Elektrisch systeem	19
3.7	Drager	20
3.8	Koppeling	20
3.9	Monitoring	21
3.10	Gebruik en beheer	25
3.11	Verdienmodel	26
3.12	Conclusies en aanbevelingen	27
3.13	Perspectief voor toepassing	28
3.14	Bijdrage van het project aan de doelstellingen van de regeling (duurzame energiehuishouding, versterking van de kennispositie)	28
3.15	Mogelijkheden spin off binnen en buiten de sector	29
4	Overzicht van openbare publicaties	30
5	Algemene informatie	35
6	Ondertekening	36

1 Samenvatting

Wereldwijd groeit de focus op Duurzame Energie. De EU heeft de ambitie om in 2030 27% hernieuwbare energie te produceren, Nederland wil in 2030 49% minder CO₂ uitstoten. In een dichtbevolkt land als Nederland wordt het een ingewikkelde opgave om deze ambities in te passen. Ruimte is schaars, waardoor duurzame energie-opwekking snel op problemen stuit met de ruimtelijke inpassing. Voorbeelden hiervan zijn horizonvervuiling of andere vormen van hinder voor mens en natuur, concurrentie met andere vormen van grondgebruik zoals natuur of landbouw.

Wegen vormen een interessant alternatief omdat dit wegooppervlak toch al in gebruik is en er daarmee geen concurrentie met andere functies optreedt, maar juist dubbel ruimtegebruik wordt gerealiseerd. Het wegooppervlak in Nederland is aanzienlijk groter dan het dakoppervlak (1100 km² vs 650 km²)¹. Daarnaast worden de meeste wegen niet intensief gebruikt waardoor er een groot deel van de daglicht op valt, die geogst kan worden door zonneceltechnologie te integreren in wegen.

Dit rapport beschrijft de resultaten van het TKI project PV-SIN (PV SolaRoad Infrastructuur), ingebed in de bredere context waarbinnen PV-SIN is uitgevoerd, namelijk de ontwikkeling van SolaRoad.

Het project PV-SIN beoogt de technische uitdagingen op het gebied van integratie van PV in wegen te onderzoeken, oplossingen daarvoor aan te dragen en in het Living Lab in Noord Holland² te monitoren en evalueren. Dit is verder geconcretiseerd in twee subdoelstellingen:

Doelstelling 1: ontwikkeling van een veilig, robuust en duurzaam systeem voor de opwekking van energie uit weginfrastructuur

Doelstelling 2: het optimaliseren van de opbrengst van de PV in weginfrastructuur

Conclusies met betrekking tot doelstelling 1: "ontwikkeling van een veilig, robuust en duurzaam systeem voor de opwekking van energie uit weginfrastructuur":

De combinatie van het project PV-SIN met het Living Lab in Krommenie heeft aangetoond dat het mogelijk is om PV te integreren in een openbare weg en dat het mogelijk is om een energieopbrengst van > 90 kWh/m²/j te halen, wat gelijk staat aan een performance ratio van 65%. Ook is te concluderen dat er nog veel potentieel is om dit te verhogen, bijvoorbeeld door optimalisaties in de PV-module en toplaag. Het Living Lab is sinds oktober 2014 open voor verkeer, en is éénmalig afgesloten geweest vanwege een onveilige situatie. Daarmee is een grote stap gezet richting een veilig systeem. De reparaties en de afname in de energie-opbrengst met de tijd laten zien dat er, met name op het gebied van de toplaag en de assemblage, oplossingen ontwikkeld moeten worden om de robuustheid en duurzaamheid te verbeteren om zo grootschalige toepassing mogelijk te maken.

¹ <http://www.hollandsolar.nl/downloads/1156/Holland%20Solar%20Rapport-Ruimte%20voor%20zonne-energie%202015web.pdf>

² Het Living Lab in Noord-Holland is buiten dit project ontwikkeld.

Conclusies met betrekking tot Doelstelling 2: “het optimaliseren van de opbrengst van de PV in weginfrastructuur”:

In het binnen PV-SIN ontwikkelde ontwerp “V2” zijn diverse optimalisaties doorgevoerd, die leiden tot verhoogde energieproductie (+ 20% ten opzichte van het startontwerp “V1”). De PV-module in het ontwerp “V2” is beter (met lagere productiekosten) te produceren bij opschaling. Hierdoor wordt een aanzienlijke kosten-batenverbetering behaald. Door het toepassen van dunne film PV in het “V3” ontwerp is een begin gemaakt met het opdoen van ervaring met deze veelbelovende PV-technologie voor deze toepassing.

2 Inhoudelijk eindrapport

2.1 Inleiding

Wereldwijd groeit de focus op Duurzame Energie. De EU heeft de ambitie om in 2030 27% hernieuwbare energie te produceren, Nederland wil in 2030 49% minder CO₂ uitstoten. In een dichtbevolkt land als Nederland wordt het een ingewikkelde opgave om deze ambities in te passen. Zonne-energie zal naar verwachting in de komende jaren sterk groeien van 0,8 GWp tot 15 GWp in 2030³ (15 GWp komt overeen met ongeveer 50 miljoen zonnepanelen, 250 km² zonneweide of 6,5 zonnepanelen per woning, ongeacht het type woning of de geschiktheid). Om richting deze, of grotere ambities te gaan zijn dus andere oppervlaktes nodig dan de nu beschikbare oppervlaktes. Deze behoefte zal nog versterkt worden door de verwachte groei naar elektrische energie door de omschakeling van de transportsector naar elektriciteit als energiedrager en de overschakeling van gas naar elektriciteit voor verwarming in huishoudens.

In sommige landen, en op kleine schaal ook in Nederland, worden zonnepanelen in weilanden geplaatst (zonneweides). In het dichtbevolkte Nederland, waar ruimte juist schaars is, stuit duurzame energie-opwekking snel op problemen met de ruimtelijke inpassing. Voorbeelden hiervan zijn horizonvervuiling of andere vormen van hinder voor mens en natuur, concurrentie met andere vormen van grondgebruik zoals natuur of landbouw.

Wegen vormen een interessant alternatief omdat dit wegoppervlak toch al in gebruik is en er daarmee geen concurrentie met andere functie optreedt, maar juist dubbel ruimtegebruik wordt gerealiseerd. Het wegoppervlak in Nederland is ongeveer 2x zo groot als het dakoppervlak (1100 km² vs 650 km²)⁴. Daarnaast worden de meeste wegen niet intensief gebruikt waardoor er een groot deel van de dag licht op valt, die geogost kan worden door zonneceltechnologie te integreren in wegen.

Dit rapport beschrijft de resultaten van het TKI project PV-SIN (PV SolaRoad INfrastructuur), ingebed in de bredere context waarbinnen PV-SIN is uitgevoerd, namelijk de ontwikkeling van SolaRoad.

2.2 Opzet van de rapportage

In deze rapportage worden de belangrijkste resultaten en conclusies van het project PV-SIN samengevat. Hierbij wordt geput uit een groot aantal deelrapporten waarin uitkomsten van de verschillende werkpakketten van het project worden beschreven. Vanwege de vertrouwelijke aard van het onderzoek worden de resultaten en conclusies in deze publieke rapportage niet tot in detail beschreven.

In paragraaf 2.3 worden de doelstellingen van het project en de doelstellingen van de ontwikkeling van SolaRoad beschreven. Ook de projectaanpak wordt hier

³ Rapport Monitoring Leveringszekerheid 2014-2030, Tennet TSO B.V. 2015.

⁴ <http://www.hollandsolar.nl/downloads/1156/Holland%20Solar%20Rapport-Ruimte%20voor%20zonne-energie%202015web.pdf>

toegelicht. De inbedding van PV-SIN in de context van andere projecten wordt beschreven in paragraaf 2.3.4 gevolgd door de introductie van de in het project betrokken partijen. In paragraaf 2.5 worden een aantal veelgebruikte begrippen geïntroduceerd. In hoofdstuk 3 worden de resultaten per onderwerp besproken en per onderwerp wordt beknopt toegelicht:

- wat de uitgangspunten zijn;
- wat het resultaat is (wat is bereikt/geleerd);
- wat de eventuele ontwikkelpunten zijn (waar zit nog ruimte voor verbetering).

Vervolgens worden in paragraaf 3.11 de uitgangspunten voor het economisch verdienmodel beschreven.

Conclusies en aanbevelingen volgen in paragraaf 3.12 met reflectie op de doelstellingen. Slotparagrafen 3.13 t/m 3.15 gaan over perspectief voor toepassing, bijdrage van het project aan de doelstellingen van de regeling, en mogelijkheden voor spin off binnen en buiten de sector.

2.3 Doelstellingen

2.3.1 *Projectdoelstelling*

Zoals beschreven in de projectaanvraag: het project PV-SIN beoogt de technische uitdagingen op het gebied van integratie van PV in wegen te onderzoeken, oplossingen daarvoor aan te dragen en in de buiten dit project ontwikkelde Living Lab in Noord Holland te monitoren en evalueren. Dit is verder geconcretiseerd in twee subdoelstellingen:

Doelstelling 1: ontwikkeling van een veilig, robuust en duurzaam systeem voor de opwekking van energie uit weginfrastructuur

Doelstelling 2: het optimaliseren van de opbrengst van de PV in weginfrastructuur

2.3.2 *Doelstelling in brede zin*

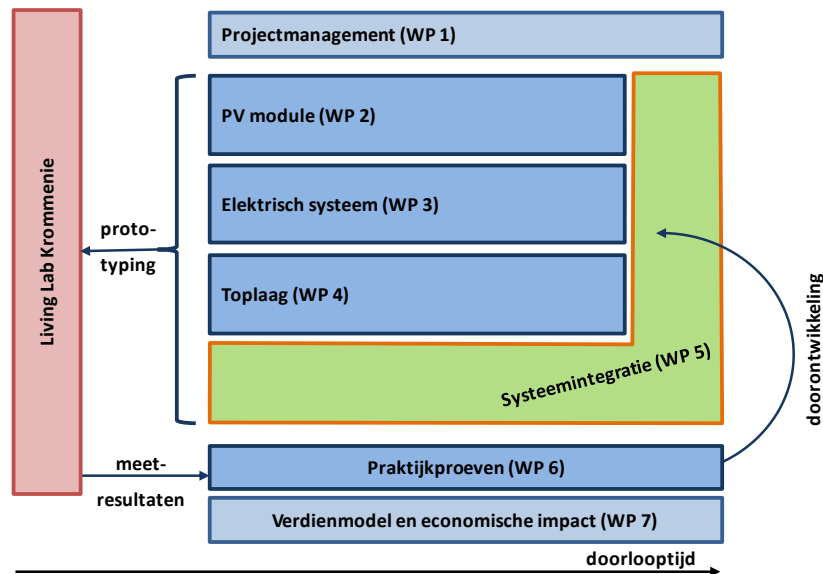
De doelstelling in brede zin (van de partijen werkend aan SolaRoad) is om het concept SolaRoad verder te ontwikkelen tot een commercieel exploitabel product bestaande uit elementenverharding met geïntegreerde PV, dat:

- het mogelijk maakt om grootschalig zonnestroom op te wekken uit weginfrastructuur;
- voldoet aan de eisen voor weginfrastructuur met betrekking tot veiligheid, levensduur, beheer en onderhoud;
- toepasbaar is op allerlei typen infrastructuur (fietspaden, voetpaden, parkeerplaatsen, busbanen, wijkontsluitingswegen etc. , ...);
- lifecycle kosten heeft die het product aantrekkelijk maken;
- internationaal toepasbaar is.

Deze doelstellingen zijn veel breder dan het project PV-SIN. In het volgende hoofdstuk zullen voor de verschillende werkzaamheden zoals uitgevoerd in PV-SIN de uitgangspunten, resultaten en ontwikkelpunten worden gepresenteerd. De ontwikkelpunten zullen hierbij worden afgezet tegen de doelstellingen in brede zin om zo de bijdrage van de resultaten aan de totale ontwikkeling inzichtelijk te maken.

2.3.3 Werkwijze

Het project is opgezet rondom de ontwikkeling van een systeem voor de integratie van PV-technologie in wegen en de toepassing hiervan.



Figuur 1 Aanpak PV-SIN project

Ten behoeve van deze ontwikkeling zijn een aantal onderdelen en technologieën cruciaal (PV-technologie, toplagen, elektrisch systeem), welke geïntegreerd moeten worden tot één oplossing die getoetst kan worden aan praktijkomstandigheden in het Living Lab.

Om de uiteindelijke bovenliggende brede doelstelling (grootschalige toepassing van PV in wegen) te kunnen behalen is het verdienmodel en de economische impact gedurende de ontwikkeling ook verder onderzocht. In bovenstaande Figuur 1 is de samenhang schematisch weergegeven.

2.3.4 Inbedding PV-SIN in ontwikkeling PV in wegen

Het project PV-SIN is een belangrijke bouwsteen in de ontwikkeling van PV in wegen. Voorafgaand en parallel aan PV-SIN hebben ook andere activiteiten plaatsgevonden. Voor een goed begrip van dit rapport is het van belang om inzicht deze context te hebben. Deze wordt hierna kort geschetst.

In 2009 is TNO het initiatief “Zonne-energie uit Wegen” gestart. Dit leidde in 2011 tot een eerste prototype van een wegelement met zonnecellen (zie Figuur 2), ontwikkeld samen met Ooms Avenhorn Groep (tegenwoordig onder de naam Ooms Civiel onderdeel van Strukton), Imtech Infra (tegenwoordig onder de naam Dynniq) en de Provincie Noord-Holland. De vier partijen hebben in januari 2011 de plannen met betrekking tot de ontwikkeling van een weg met geïntegreerde zonnecellen onder de naam SolaRoad wereldkundig gemaakt.



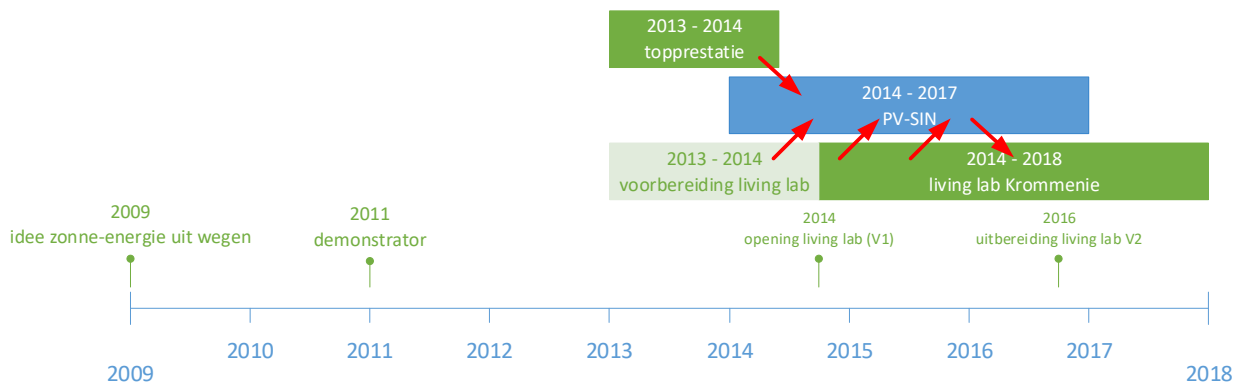
Figuur 2 2011: Eerste demonstrator SolaRoad

In oktober 2014 is een eerste pilot op een stuk fietspad in de Provincie Noord-Holland aangelegd (Living Lab⁵ Krommenie). Zie Figuur 3 voor een impressie van dit Living Lab.



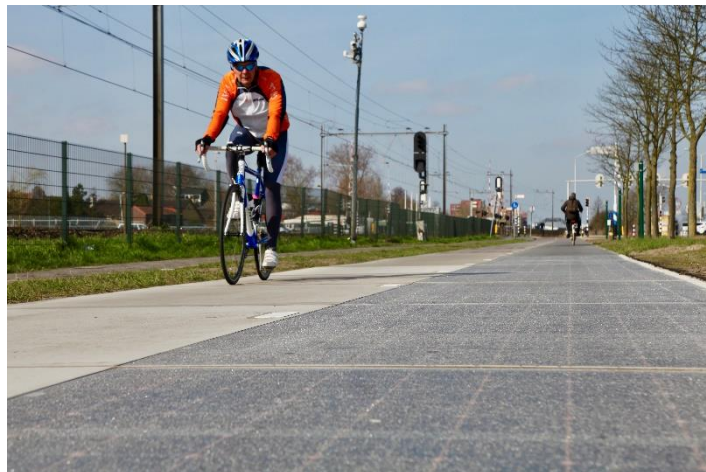
Figuur 3 2014: Living Lab SolaRoad in Krommenie, Provincie Noord-Holland

⁵ Voorheen werd dit ook wel aangeduid als Field Lab. De term Living Lab benadrukt beter het daadwerkelijk gebruik in de openbare ruimte.



Figuur 4 Tijdslijnen SolaRoad en PV-SIN

De ervaringen met het in 2014 aangelegde eerste deel van het SolaRoad fietspad in Krommenie zijn gebruikt als input voor onderzoek en ontwikkeling binnen PV-SIN. In Figuur 4 zijn de tijdslijnen van PV-SIN binnen het kader van SolaRoad geschetst. In oktober 2016 zijn een zestal PV-SolaRoad modules, ontwikkeld binnen PV-SIN, in het tweede deel van het fietspad in Krommenie geplaatst (zie Figuur 5 voor een impressie). De prestaties en opbrengsten zijn binnen de looptijd van PV-SIN gemonitord.



Figuur 5 Uitbreiding Living Lab SolaRoad in Krommenie, Provincie Noord-Holland.

2.4 Samenwerkende partijen

De volgende partijen zijn de projectpartners in PV-SIN, met hun rol en een korte beschrijving van het type organisatie.

Naam deelnemer	Type organisatie	Rol in project
TNO	Onderzoeks-organisatie (niet-economische activiteiten)	Project management. Doet onderzoek en analyse m.b.t.: materiaalkundige aspecten, mechanisch gedrag, slijtage, stroefheid, thermisch gedrag en lichttransparantie. Opbrengstmodel (vanuit monitoring data) en

Naam deelnemer	Type organisatie	Rol in project
		ontwikkelt techno-financieel model van de PV-SIN toepassing
Ooms Civiel	Groot bedrijf	Ontwikkelt en levert het geïntegreerd wegebouwkundig PV-SIN systeem
Dynniq (voorheen Imtech)	Groot bedrijf	Ontwikkelt en levert het geïntegreerde elektrische system. Integratie met ICT functionaliteit
Femtogrid	MKB	Levert elektrische oplossing voor het minimaliseren van schaduwverliezen
Gouda Chemie	MKB	Ontwikkelt coatings die toegepast gaan worden als toplaag
ECN	Onderzoeks-organisatie (niet-economische activiteiten)	Ontwikkelt het PV laminaat. Analyse en keuze dunne film versus kristallijn. Onderzoek aan levensduur van het laminaat in de toepassing

Daarnaast is de provincie Noord-Holland nauw betrokken vanwege hun rol in het SolaRoad-consortium en hun expertise als wegbeheerder.

TNO

TNO is een onafhankelijke onderzoeksorganisatie die met haar expertise en onderzoek een belangrijke bijdrage levert aan de concurrentiekracht van bedrijven en organisaties, aan de economie en aan de kwaliteit van de samenleving als geheel. De unieke positie van TNO is te danken aan haar veelzijdigheid en capaciteit tot integratie van deze kennis.

TNO is in het project vooral betrokken vanuit haar uitgebreide kennis op het gebied van hightech productieprocessen, apparatuur en de kennis van geïntegreerde toepassingen in de infrastructuur. De productie van de SolaRoad module waarbij de transparante constructieve toplaag wordt geassembleerd met de PV-cellen, is door TNO uitbesteed.

Ooms Civiel BV

Ooms Civiel is een innovatieve infraprovider met bijna 350 enthousiaste professionals. Het bedrijf bestaat uit een viertal werkmaatschappijen, elk met hun eigen discipline. Door bundeling van krachten en activiteiten is Ooms Civiel in staat een antwoord te geven op complexe vraagstukken van opdrachtgevers. Zij bedenken kosteneffectieve en duurzame oplossingen voor elk infra-, bouw- of engineeringprobleem. Ooms Civiel heeft een eigen Research & Development afdeling die garant staat voor continu onderzoek, innovatiedrang en kennis van de laatste ontwikkelingen. Dit totaalpakket maakt Ooms Civiel tot een interessante partner in de wereld van infra en consultancy, zelfs internationaal. Ooms Civiel werkt zelfstandig maar kan desgewenst samen met strategische partners plannen ontwikkelen en uitvoeren.

Dynniq

Dynniq (voorheen Imtech) is een Europese technische dienstverlener op het gebied van elektrotechniek en ICT. De 1800 medewerkers ontwerpen, engineeren,

beheren en onderhouden technologische oplossingen die helpen bij het dagelijks leven. De missie van Dynniq is met geavanceerde technologie mensen en goederen ondersteunen bij het snel, duurzaam en veilig bereiken van hun bestemming. De kennis over het managen van mobiliteit, parkeren én energie gecombineerd met onze aanpak vanuit systems engineering maken het mogelijk verschillende mobiliteits- en energiesystemen te koppelen en te managen. Zo realiseren zij een vitale en sterke infrastructuur.

FemtoGrid

FemtoGrid biedt oplossingen voor hernieuwbare energie. De producten genereren meer energie en kennen een meetbaar hoger rendement. FemtoGrid bereikt dit door de toepassing van unieke technologieën. Zij biedt een veilige, betrouwbare, en plug & play zonne-energie. Het potentieel van zonne-energie wordt hierbij optimaal ontsloten door het optimaliseren van iedere PV-module. Dit onderscheidt FemtoGrid van de traditionele aanpak die zonne-energie per string optimaliseert.

Gouda Chemiebouw

Gouda Chemiebouw is onderdeel van de VLAQ groep en is een specialist in advies over en de toepassing van hightech kunstharstechnieken. Het uitgebreide assortiment bestaat onder andere uit: kunstharsgebonden gietvloeren, damp-open vloerafwerkingen, troffelmortel vloerafwerkingen, epoxy reparatiemortels, coatingsystemen, slijtlagen en anti-slipssystemen en vlakverwarming.

ECN

ECN is een onderzoeksorganisatie waarvan de activiteiten gericht zijn op een efficiënt gebruik van energie en infrastructuur, de inzet van duurzame energiebronnen, een schone omzetting van fossiele brandstoffen en de ontwikkeling van energieanalyses en -beleid. Met en voor de markt ontwikkelen we kennis en technologie die een transitie naar een duurzame-energiehuishouding mogelijk maken. Speerpunten zijn energiebesparing, duurzame energie en een efficiënt en schoon gebruik van fossiele brandstoffen. ECN richt zich vooral op de behoeften van de overheid en de industrie.

2.5 Beschrijving begrippen.

Om de leesbaarheid te vergroten worden hieronder een aantal veelgebruikte begrippen toegelicht.

SolaRoad

Concept om zonne-energie uit wegen te winnen, ontwikkeld door TNO, Ooms Civiel, Imtech (tegenwoordig Dynniq) en provincie Noord-Holland. Ook de 'commerciële' naam van het product in ontwikkeling.



Living Lab

In het kader van dit project wordt gerefereerd aan de pilot die in oktober 2014 is aangelegd in Krommenie, Noord-Holland (zie Figuur 6). Het Living Lab is een

faciliteit welke volledig gefinancierd wordt door de vier initiatiefnemers van het project, waar de ontwikkelde technologie in praktijkomstandigheden kan worden gevalideerd. Daarnaast dient het Living Lab om het bestaan van deze ontwikkeling wereldwijd zichtbaar te maken, de werking van het concept te demonstreren met veel aandacht voor het praktisch gebruik en de veiligheid van de weggebruikers.



Figuur 6 Living Lab SolaRoad tijdens de aanleg

SolaRoad Element

De segmenten (Figuur 7) waaruit de weg wordt samengesteld. Voor het Living Lab in Krommenie zijn elementen van +/- 2,7 bij 3,5m geproduceerd.



Figuur 7 SolaRoad element in de kraan, kort na productie.

(PV) Module

Het zonnepaneel of PV-module dat onderdeel is van het SolaRoad element. Het deel dat elektrisch gezien één eenheid is.

Toplaag

Transparante laag die het wegooppervlak vormt waarover de voertuigen rijden. Geeft stroefheid aan voertuigen, beschermt de PV-module en laat het zonlicht door (Figuur 8).



Figuur 8 Sample van toplaag

Versie 1 (V1)

1^e SolaRoad versie gemaakt met conventionele PV modules, geproduceerd door Soltech, waar aan de bovenzijde een toplaagsysteem is aangebracht op basis van kunsthars met afstrooimateriaal, en welke zijn ingebed in rubber en vervolgens in een betonnen behuizing (zie Figuur 9). De geproduceerde energie wordt via een DC-DC converter per module (2 per element) via een bus-kabel naar een centrale DC/AC omvormer gebracht. Dit systeem is van Femtogrid. Drie elementen zijn uitgevoerd met extra sensoren en sparingen voor testelementjes om de toplaag te testen. Deze elementen zijn in oktober 2014 geplaatst, in totaal 27 stuks waarin 54 PV modules zijn opgenomen (2 per element).



Figuur 9 Foto van element V1

Versie 2 (V2, MWT)

Op basis van de ervaringen met de modules V1 is V2 ontwikkeld (zie Figuur 10). Belangrijkste wijziging is een customized PV-module ontwerp. Daarnaast is er een frame in plaats van de rubber inbedding. Elektrisch gezien, is er naast het systeem

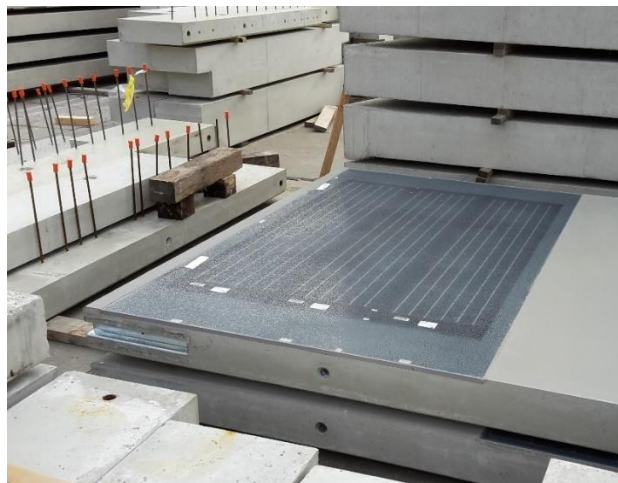
van FemtoGrid, gebruikt in V1, ook gebruik gemaakt van twee typen micro omvormers (DC/AC) om daar ervaring mee op te doen. In totaal zijn 4 elementen met daarin 12 PV-modules geplaatst in oktober 2016.



Figuur 10 Foto van element V2 tijdens plaatsing

versie 3 (V3, thin film)

Voor de toekomst is thin film (dunne film PV) een interessante technologie. Cruciaal hierin is dat deze technologie flexibel (buigbaar) is en daardoor vervormingen in de ondergrond kan volgen, eenvoudiger te produceren en eenvoudiger toe te passen is. Momenteel is deze technologie nog in ontwikkeling en zijn twee elementen (6 PV-modules) in het Living Lab uitgerust met deze technologie om hier in een vroegtijdig stadium ervaring mee op te doen (Figuur 11). De opbouw is in grote mate gelijk aan V2, de PV module is uiteraard anders. Vanwege praktische redenen is niet het gehele oppervlak voorzien van deze technologie, maar slechts een deel. Hiervan zijn 2 elementen met in totaal 6 PV-modules geplaatst in oktober 2016.



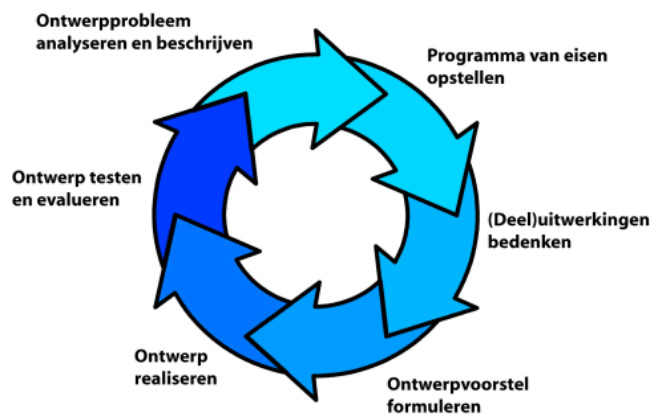
Figuur 11 Foto van element V3 na productie

3 Projectresultaten

3.1 Inleiding

Voor verschillende onderwerpen zal worden ingezoomd op de uitgangspunten, het resultaat en de ontwikkelpunten. Bij de uitgangspunten wordt besproken wat de situatie voor de start van het project was. De resultaten betreffen de resultaten zoals die in het project zijn gehaald en daarmee bijdragen aan de projectdoelstellingen. De ontwikkelpunten vormen een samenvatting van geïdentificeerde stappen om de brede, project overstijgende, doelstellingen te halen.

De hierna gepresenteerde onderwerpen belichten de totale ontwikkelcyclus van PV-SIN (zie Figuur 12): Van het formuleren van de eisen, het maken en uitwerken van het ontwerp, tot het opdoen van praktijkervaring en monitoren in het Living Lab.



Figuur 12 Ontwikkelcyclus voor productontwikkeling

De activiteiten m.b.t. de eisen en validatie zijn uitgevoerd in werkpakket 5 (systeemintegratie) en zijn beschreven in paragraaf 3.2. Onderwerpen gerelateerd aan het ontwerp zijn beschreven in paragraaf 3.3 tot en met 3.8 en uitgevoerd in de werkpakketten 2 t/m 5. De ervaringen in het Living Lab zijn beschreven in paragraaf 3.9 t/m 3.10 en uitgevoerd in WP6.

3.2 Eisen en validatiemethoden

Uitgangspunten

Voorafgaand aan dit project was al gestart met het ontwikkelen van het programma van eisen (PvE) van deze nieuwe applicatie van PV-technologie. Hoewel eisen aan wegen én PV-systemen bekend zijn levert de combinatie van beiden een onvolledige, en in sommige gevallen tegenstrijdige, set aan eisen op. De vertaling van de eisen in lab-experimenten om een veilige toepassing in de weg (onder pilotomstandigheden) vast te stellen is ook onderwerp van aandacht en was voorafgaand aan dit project al uitgevoerd.

Resultaten

In het project is, op basis van het bestaande PvE, een verbetering van het PvE gerealiseerd, waarbij ook de leerervaringen uit het Living Lab zijn opgenomen en vertaald naar aanpassingen in het PvE en validatieprotocol. Hierbij is meer aandacht besteed aan (het toetsen van) de elektrische veiligheid van de PV-module gericht omdat, in tegenstelling tot V1, in PV-SIN niet met een reeds gecertificeerde PV-module wordt gewerkt.

Een ander onderwerp van aandacht is het effect van temperatuur(wisselingen) op het ontwerp. Het afdoende beproeven van de door temperatuur(wisselingen) geïnitieerde fenomenen in een validatie is hierbij essentieel gebleken. Dit speelt zowel bij V1 als bij V2 en V3.

Op andere aspecten, zoals het effect van passerende voertuigen op de mechanische integriteit, veiligheid voor de weggebruiker (stroefheid, vlakheid), bestand zijn tegen dooizouten, initiële opbrengst etc. zijn het PvE en het validatieprotocol adequaat gebleken. Het Living Lab heeft op die onderwerpen geen aandachtspunten opgeworpen.

Ontwikkelpunten

Het PvE en bijbehorend validatieprotocol is ontwikkeld met oog op toepassing in Nederland, voor licht verkeer en in pilotomstandigheden. Om het geschikt te maken voor de brede doelstelling als beschreven in paragraaf 2.3.2 zal dit aangepast / aangevuld moeten worden op, in ieder geval, de volgende onderwerpen:

- Aandacht voor energieopbrengst gedurende de levensduur: voor deze pilot (de eerste weg wereldwijd waarin PV is geïntegreerd opengesteld en voor het algemeen gebruik) is de nadruk vooral op veiligheid voor de weggebruiker gelegd. Gevolg daarvan is dat er minder nadruk op de energieopbrengst was. Voor bredere toepassing van SolaRoad zal dit van toenemend belang zijn.
- Bredere/ algemenere toepasbaarheid, zowel in wegtype als in klimatologische omstandigheden. Het PvE en validatieprotocol zijn specifiek voor fietspaden in Nederland opgezet. Dit zal vertaald moeten worden naar een bredere toepasbaarheid om in lijn te brengen met de bredere doelstelling.
- Inpassing en acceptatie in de reguliere uitraagprocessen voor producten of systeemoplossingen in de wegenbouw. Wegen met PV-technologie zullen op termijn uitgevraagd moeten kunnen worden in tenderprocedures zoals deze ook voor andere typen verharding gelden. Programma's van eisen en validatieprocessen voor SolaRoad zullen in deze tenderprocessen moeten worden ingepast.

3.3 Ontwerp V2 en V3

Uitgangspunten

In PV-SIN zijn V2 en V3 ontworpen. Dit is gebaseerd op het PvE en een doorontwikkeling van het V1 ontwerp dat voor het Living Lab is ontwikkeld en in datzelfde Living Lab is uitgetest. Het concept van de grote prefab betonnen elementen waarin meerdere PV-modules zijn opgenomen blijft gehandhaafd. Ook elektrisch gezien wordt het concept van een parallelstructuur waarin PV-modules afzonderlijk van elkaar kunnen functioneren gehandhaafd. De aanpassingen aan het ontwerp moeten er aan bijdragen dat: het efficiënter te produceren is, ook op grotere schaal, het effect van impactbelasting wordt verminderd en de

energieopbrengst hoger wordt. Daarnaast is er de ambitie om ervaring op te doen met een andere PV-technologie: flexibele dunne film. Deze technologie biedt mogelijk voordelen boven de meest gebruikte PV-technologie op basis van kristallijn silicium wafers doordat deze technologie beter mechanisch belastbaar is.

Resultaten

Op basis van de ervaringen met V1 is het ontwerp op een aantal cruciale onderdelen aangepast om het productieproces te vereenvoudigen, kinderziektes die in V1 zaten op te lossen en productiekosten te verlagen. Dit heeft tot een aantal aanpassingen geleid:

- Er zijn modules specifiek voor deze toepassing ontworpen, zie paragraaf 3.4.
- De verbinding tussen de drager en de PV-module is niet meer met een rubber compound maar met een metalen frame gemaakt. Dit vereenvoudigt productie.
- Gebruik van kabelgoten in plaats van sparingen in de betonnen behuizing. In het V1 ontwerp waren sparingen opgenomen om elektronica en kabels op te nemen in het element. Dit was redelijk complex in productie en daarom is besloten deze te verwijderen en een kabelgoot naast de weg te plaatsen waar elektronica en kabels in zijn op te nemen.
- Eén ontwerp waarin zowel kristallijn silicium als dunne film technologie in kan worden opgenomen om met beide PV-technologieën ervaring op te doen.

Ontwikkelpunten

Het V2 ontwerp zal nog verder verbeterd moeten worden om beter bestand te zijn tegen temperatuurswisselingen. Het is gebleken dat onder invloed van temperatuurswisselingen delaminatie kan optreden. Voor de opschaling en kostenreductie behoeft het assemblageproces nog aandacht, op zo'n wijze dat ook beheer en onderhoud eenvoudiger zijn uit te voeren.

3.4 PV module

Uitgangspunten

Voor het ontwerp V1 is gebruik gemaakt van een standaard module-opbouw van kristallijn silicium cellen met H-patroon interconnectie-technologie. Hiervoor is gekozen omdat dit product voor andere toepassingen gezien wordt als het meest bewezen betrouwbaar én gecertificeerd. Het systeem functioneert maar kent ook een aantal nadelen: het materiaalgebruik is hoog, de modules zijn maar beperkt bestand tegen puntlasten, de beschaduwingspatronen die in de praktijk optreden matchen niet goed met het string design. Daarnaast is het ontwerp niet eenvoudig op te schalen om in een standaard productielijn te kunnen produceren.

De inherente brosheid van kristallijn silicium is een punt van aandacht en daarom is het interessant om ook naar dunne film PV technologie te kijken. Deze technologie kan (op termijn) ook voordelen in het productieproces bieden.

Resultaten

Er is een dedicated module ontwerp voor SolaRoad elementen V2 op basis van kristallijn silicium gemaakt, waarin op basis van MWT (metal-wrap-through) technologie een aantal van de hierboven beschreven nadelen is opgelost. Dit 50-

cels module ontwerp is zowel in gebruikte materialen (Bill of materials), als string design geoptimaliseerd om een hogere betrouwbaarheid, hogere opbrengst, lagere productiekosten en eenvoudigere opschaling van productievolumes te hebben dan het V1 ontwerp.

Om ervaring op te doen met dunne film technologie zijn bestaande dunne film PV modules (powerflex modules van global solar, een CIGS (Copper Indium Gallium (di)Selenide) gebaseerde flexibele dunne film oplossing) gemodificeerd om toepasbaar te zijn in het algemene ontwerp. Dit is toegepast in het Living Lab.

Ontwikkelpunten

In het Living Lab is gebleken dat de temperatuurstabiliteit van één onderdeel van het V2 ontwerp niet voldoende is voor deze toepassing. Door een aanpassing aan deze laag is dit, naar verwachting, goed te verhelpen.

Om een commercieel interessante oplossing op basis van dunne film te ontwikkelen is een conceptueel andere aanpak noodzakelijk. Het inherente voordeel van de flexibiliteit van Dunne film-PV kan tot een heel ander hoofdontwerp leiden. Op basis van dit hoofdontwerp zal ook het module ontwerp kunnen worden geoptimaliseerd.

3.5 Toplaag

Uitgangspunten

De toplaag is een cruciaal component voor zowel de energieproducerende functie als voor de wegfunctie. Het principe van de toplaag is gebaseerd op een slijtlaag zoals deze bijvoorbeeld op brugdekken wordt toegepast, maar dan in een transparante vorm. Dit is voorafgaand aan V1 ontwikkeld, mede ondersteund door het project 'topprestatie' waar zowel naar de wijze van testen van dergelijke systemen als naar de systemen zelf is gekeken.

Resultaten

De wegfunctie (een veilig wegoppervlak om overheen te rijden) wordt goed vervuld. Er zijn ook geen reacties van weggebruikers ontvangen dat het wegoppervlak zou verblinden, of dat het op wat voor manier dan ook minder vertrouwd wordt als wegoppervlak. Er is éénmaal een ongeplande afsluiting van het fietspad geweest vanwege delaminatie van de toplaag, dit was in december 2014. Dit heeft er toe geleid dat er extra aandacht is gelegd op het oplossen van dit issue binnen dit project.

Een verbetering van de toplaag is vervolgens ontwikkeld en deze is ook aangebracht op de elementen V1, V2 en V3 in het Living Lab. Dit is in oktober 2015 gebeurd, de oude toplaag (V1.0) is verwijderd en vervangen door de verbeterde versie van de toplaag. In deze verbetering is een compatibiliteitsissue tussen toplaag en module opgelost wat de problemen met delaminatie vermindert. Op het gebied van de energiefunctie van de weg, waar de lichttransmissie van de toplaag een belangrijke functie in vervult, zien we een afname van de transmissie in de loop van de tijd, waarschijnlijk veroorzaakt door klimatologische invloeden.

Ontwikkelpunten

Voor wat betreft de toplaag zijn er ontwikkelpunten vooral op twee aspecten: delaminatie en degradatie van de optische eigenschappen. Deze zullen hierna

worden beschreven. Daarnaast zou het wenselijk zijn om onderhoud eenvoudiger uit te kunnen voeren.

Delaminatie is in V1 grotendeels toe te wijzen aan temperatureffecten. In V2 treedt ook lokaal delaminatie op, welke primair is toe te wijzen aan de thermische werking van de PV module (zie paragraaf 3.3).

De delaminatie in de V3 elementen wordt veroorzaakt door een onvoldoende ontwikkelde en geteste interface, tussen ondergrond en toplaag op een deel van het oppervlak waar juist geen PV module zit. Dit is voornamelijk geen urgent probleem omdat deze interface bij verdere toepassing deze PV-technologie niet verder zal worden gebruikt.

De *degradatie* van de optische eigenschappen is nog niet uitvoerig onderzocht. De focus van het project ligt primair op veiligheid, waardoor de aandacht zich richt op het zo veel mogelijk voorkomen van delaminatie en de daaruit volgende reparaties. De energieopbrengst was in 2014 en 2015 boven of binnen de afgesproken bandbreedte. De energieopbrengst blijft ook daarna voor een van de beter presterende modules ruim binnen deze afgesproken bandbreedte.

3.6 Elektrisch systeem

Uitgangspunten

Vertrekpunt is geweest om een bestaand systeem te gebruiken dat zo goed mogelijk voldoet aan de eisen met betrekking tot veiligheid en opbrengst. Gekozen is voor het systeem van FemtoGrid. Dit systeem bestaat uit een DC-DC omvormer met MPPT-tracker per module en vervolgens een bus-kabel die de stroom naar een centraal punt leidt. Daar wordt de gelijkspanning omgezet in wisselspanning die naar het net gaat. Daarnaast is het van belang voor het Living Lab dat er data verzameld kan worden van de modules. Ook dat kan met dit systeem.

Resultaten

De voordelen van de parallel-architectuur (waarbij iedere module onafhankelijk is en er per module wordt geoptimaliseerd) komen goed tot hun recht in een systeem als SolaRoad waar de performance per module per tijdstip sterk kan verschillen. Er zijn geen incidenten met elektrische veiligheid geweest waarbij bijvoorbeeld gevaarlijke spanning op aanraakbare delen stond of er brandgevaarlijke situaties ontstaan zijn. Het systeem is betrouwbaar gebleken: er zijn nauwelijks onderbrekingen geweest in het functioneren van het systeem, op één kortsluiting in een kabel na. Deze is door de foutdetectie herkend. In de uitbereiding van het Living Lab in 2016 is naast het systeem van FemtoGrid ook gebruik gemaakt van twee micro-omvormer systemen van Autarco en APsystems. Hierbij wordt de energie lokaal, per module, van module spanning naar 230 V AC omgezet. Deze systemen voldoen ook, al is de ervaring die daarmee tot nu toe is opgedaan beperkter.

Ontwikkelpunten

In de periode dat V1 actief is (2014 t/m heden) zijn er problemen voorgevallen met de datacommunicatie van de optimizers (opgenomen in de elementen) naar de centrale kast waar de ontvangers zijn geplaatst. Daarnaast is er kortsluiting in de buskabel opgetreden, welke is gerepareerd. Voorkomen van deze problemen is

nodig voor grootschalige toepassing. Andere ontwikkelpunten voor dit component die de brede doelstelling (grootschalige toepassing) op het vlak van het elektrisch systeem zouden ondersteunen zijn: het ontwikkelen van een component voor een optimaal elektrisch systeem dat zowel fysiek (ruimtebeslag, omstandigheden onder de grond) als elektrisch (match met vermogen en karakteristiek van PV-module, gewenste transportafstanden en vermogens, wijze van koppelen aan het grid) optimaal is voor SolaRoad. Deze optimalisaties zullen een positieve invloed op de aanlegkosten van het systeem hebben.

3.7 Drager

Uitgangspunten

Vertrekpunt is een eenvoudig te produceren en te plaatsen drager die voldoende ondersteuning geeft aan de PV-modules en toplaag. Een prefab-betonnen drager is een oplossing die in 'normale' wegebouwprocessen goed toepasbaar is.

Resultaten

De drager voldoet goed, plaatsing verloopt eenvoudig en tijdens gebruik zijn er geen bijzondere aspecten naar voren gekomen.

Ontwikkelpunten

De betonnen behuizing is niet gemonitord, aangezien er geen bijzonderheden met het gewapend beton zijn te verwachten, noch zijn deze geconstateerd tijdens algemene inspecties. Het optimaliseren van het ontwerp en het productieproces (in relatie tot het totale assemblageproces) zal tot reductie van productiekosten leiden.

3.8 Koppeling

Uitgangspunten

Het streven is om een comfortabele weg te realiseren. Dit wordt in belangrijke mate bepaald door een vlakke weg. Indien de elementen ongelijk van elkaar komen te liggen levert dit een oncomfortabelere situatie op. Om dit te voorkomen zijn de elementen gekoppeld.

Resultaten

Er is een demontabele koppeling ontwikkeld die het mogelijk maakt om zonder schade aan de elementen één element er tussenuit te halen. Dit is ook getest in de praktijk en werkt naar behoren. Om te onderzoeken of de koppelingen effectief zijn, is er een aantal elementen uitgevoerd zonder koppeling, is op een aantal plaatsen de ondergrond verslechterd en zijn sommige koppelingen niet aangebracht. Eerste analyse wijst uit dat de koppeling enig effect heeft op de zetting. De periode waarover de metingen zijn uitgevoerd is echter vrij kort (2 jaar) voor het optreden van zetting.

Ontwikkelpunten

De koppeling kan geoptimaliseerd worden in dimensionering en voor bepaalde toepassingen (combinaties van belasting en ondergrond) kan de koppeling mogelijk achterwege worden gelaten. Beide kunnen de productiekosten reduceren.

3.9 Monitoring

Uitgangspunten

Vanwege het innovatieve gehalte van deze applicatie van PV is geen referentie monitoringsdata beschikbaar van PV geïntegreerd in wegen. Er is gekozen om een monitoringssysteem op te zetten waarbij breed informatie wordt verzameld om in te kunnen spelen op de vragen die optreden tijdens het Living Lab.

Zo wordt informatie verzameld van:

- temperatuur (wegdek, omgeving);
- opbrengst (per PV module);
- lichtdoorlatendheid toplaag;
- verkeersintensiteit;
- weer (zoninstraling, temperatuur, neerslag etc.).

Deze data wordt lokaal verzameld, overgebracht naar een centrale database en vervolgens opgeschoond. Als er behoefte aan is wordt een sectie van de data verder geanalyseerd.

Resultaten monitoringssysteem

Het monitoringssysteem heeft zeer veel data opgeleverd (meer dan 20 miljoen individuele en unieke datapunten) en is daarmee een zeer rijke databron. Analyse ervan is op hoofdlijnen gedaan, waarvan hierna een samenvatting is gegeven. De betrouwbaarheid van het systeem is voldoende maar kan zeker verbeterd worden. Zo zijn er problemen opgetreden met de draadloze gegevensoverdracht waardoor meetdata over periodes niet beschikbaar is.

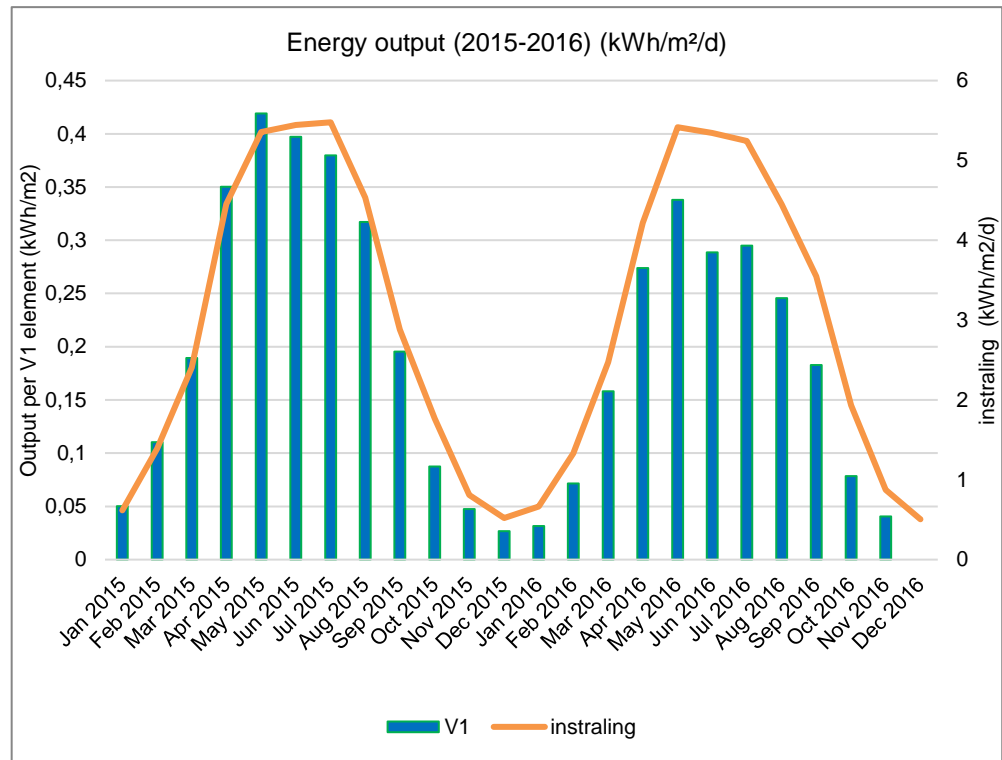
Resultaten energieopbrengst

De initiële verwachtingen voor de opbrengst waren tussen de 35 en 70 kWh/m²/jaar, zoals ook in het PVE is vastgelegd. In de Tabel 1 hieronder staan de resultaten voor de verschillende systemen (V1, V2 en V3) en voor één module uit het systeem V1. Dit betreft een relatief goed producerende module en geeft daarmee inzicht in de potentie van het V1 systeem. De opbrengst van het V3 systeem (gebaseerd op dunne film) blijft, zoals verwacht, achter bij de andere systemen omdat het celrendement van deze technologie nu nog lager ligt. De verwachte jaaropbrengst van V2 ligt net iets onder de 100 kWh/m²/j.

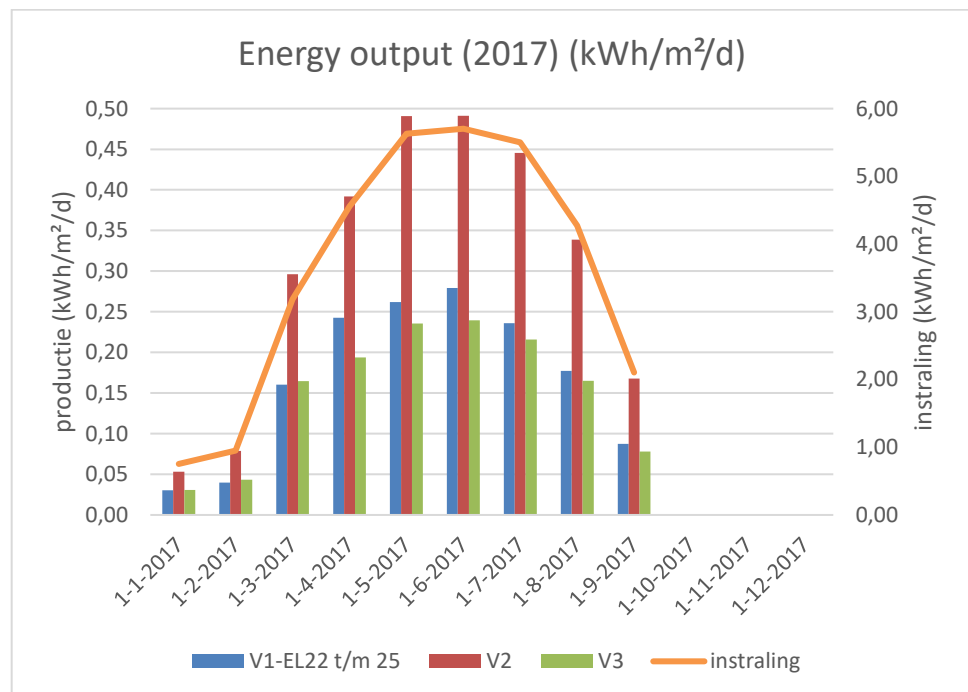
	V1	V1 Module 23B	V2	V3
2015	78 kWh/m ²	93 kWh/m ²		
2016	61 kWh/m ²	69 kWh/m ²		
2017 (t/m sept)	48 kWh/m ²	61 kWh/m ²	84 kWh/m ²	41 kWh/m ²
2017 (verwacht)	55 kWh/m ²	69 kWh/m ²	95 kWh/m ²	47 kWh/m ²

Tabel 1 Energieopbrengst van V1, module 23B uit het systeem V1, V2 en V3

In Figuur 13 wordt de opbrengst per maand getoond voor V1 over de periode 2015 en 2016. Figuur 14 toont de opbrengst per maand over de eerste 9 maanden van 2017 voor V1, V2 en V3.



Figuur 13 Energieproductie in 2015 en 2016 (systeem V1)



Figuur 14 Energieproductie in 2017 (systeem V1,2 en 3)

De initiële energieopbrengst voor de systemen V1 en V2 is hoger dan verwacht en deze blijft ook voor 2017 binnen de bandbreedte van de initiële verwachtingen. Een afname in opbrengst is ook waarneembaar, vooral bij systeem V1. Dit beeld wordt

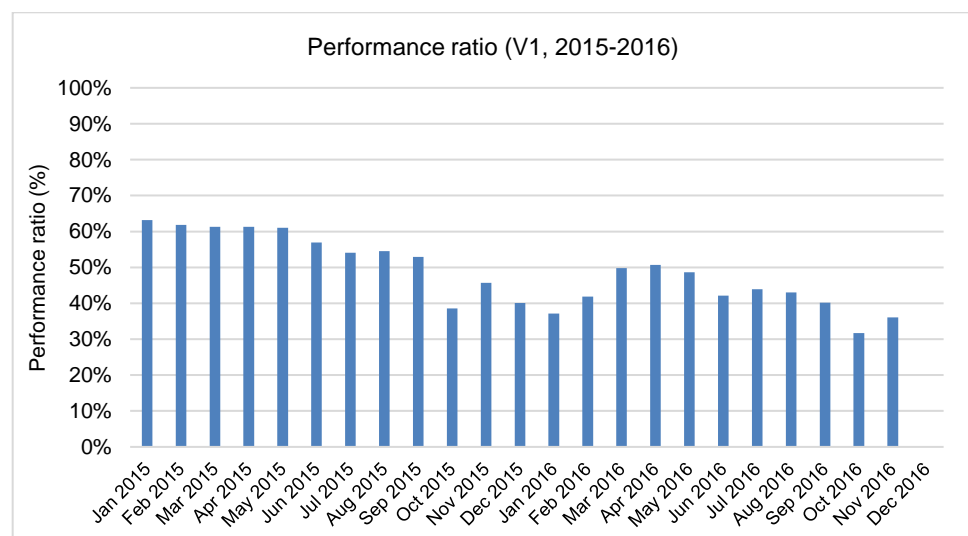
ondersteund als naar de 'performance ratio' wordt gekeken, zie de grafieken in Figuur 15 en Figuur 16 en Tabel 2 hieronder. Ook is te zien dat deze trend stabiliseert op een lager niveau. Initieel blijft de performance ratio, zeker die van goed presterende modules, niet veel achter bij conventionele PV-systemen op daken, zie ook de toelichting hieronder. Over de tijd neemt de performance af van het V1 systeem. Bij het V2 en V3 systeem is dat minder duidelijk zichtbaar.

Toelichting bij de term "performance ratio":

Performance ratio is een maat voor de prestatie van een systeem. De werkelijke geproduceerde energie wordt afgezet tegen het theoretische maximum gegeven het rendement van de modules en de hoeveelheid energie van de zon die op de modules valt. Recent is een onderzoek gedaan de performance ratio van Nederlandse PV systemen op daken⁶ en daar is een gemiddelde performance ratio van 77% gemeten.

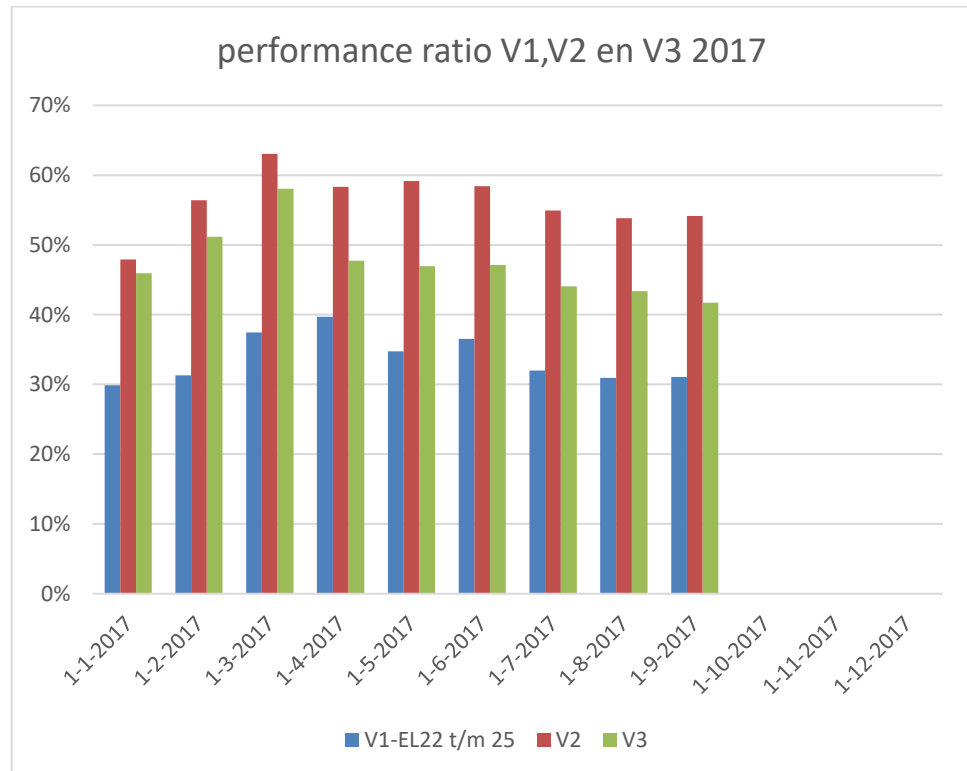
	V1	V1 module 23B	V2	V3
2015	54%	65%		
2016	41%	45%		
2017 (t/m sept)	31%	44%	56%	46%

Tabel 2 Performance ratio van het systeem en van module 23B



Figuur 15 Ontwikkeling performance ratio in 2015 en 2016 (systeem V1)

⁶ Moraitis, P., Kausika, B. & van Sark, W., 2016. *Results tel de Zon 2016*, Utrecht: Utrecht University.



Figuur 16 Ontwikkeling performance ratio in 2017 (systemen V1, V2 en V3)

De volgende oorzaken zijn onderkend voor de afname in energieopbrengst in het systeem V1:

- Degradatie van de (vervangen) toplaag onder invloed van klimaat. Zoals in paragraaf 3.5 aangegeven treedt er een verandering op in de toplaag die een negatief effect op de opbrengst heeft.
- Reparaties aan de toplaag ten gevolge van de delaminatie, zoals in paragraaf 3.5 beschreven. Deze reparaties zijn vaak onder minder ideale omstandigheden uitgevoerd waardoor de transparantie niet optimaal is.
- Vervanging van de toplaag in oktober 2015, dit is ook zichtbaar in Figuur 15. De vervanging van de toplaag is niet volledig geweest en het aanbrengen van een nieuwe toplaag is niet optimaal uit te voeren onder omstandigheden in het veld. Dit heeft een negatieve invloed op de energieopbrengst.

Ontwikkelpunten

Het is nodig de monitoringsinfrastructuur betrouwbaarder maken zodat er minder aandacht nodig is voor het in stand houden van het monitoringssysteem. Ook het verder automatiseren van de dataverwerking zou helpen om de monitoring meer bij te laten dragen aan de ontwikkeling.

Het beschikbaar maken van een (beperkte) dataset voor externe communicatie. Er is veel behoefte van geïnteresseerde journalisten, potentiële klanten en dergelijke om te kunnen zien hoe het systeem presteert.

De verzamelde data is nog niet uitputtend geanalyseerd. Nadere analyse van de data zou tot aanvullend inzicht leiden. Beter begrip van het effect van bv. temperatuur, hellingshoek van de zon, direct en indirect licht, neerslag etc. zouden de ontwikkeling kunnen sturen.

Het verschil tussen een 'goed presterende' module en het systeemgemiddelde is groot (bijvoorbeeld in 2015 voor systeem 1 en module 23B 77,99 kWh/m² ten opzichte van 93,32 kWh/m²). Dit is gedeeltelijk te verklaren vanuit verschillen in productiekwaliteit. Consistent een hoge kwaliteit in de productie halen zal tot een performanceverbetering leiden.

Het is begrijpelijk dat de opbrengst van V3 achter blijft t.o.v. V2, vanwege het lagere module rendement. Daarnaast blijft ook de performance ratio van V3 licht achter bij V2. Dit vraagt nadere analyse. Oorzaken kunnen bijvoorbeeld liggen in een mismatch van module met elektronica, hogere optische verliezen door een niet geoptimaliseerde interface tussen module en toplaag, cel degradatie etc.

Overige ontwikkelpunten met betrekking tot de performanceverbetering van de verschillende onderdelen zoals toplaag en PV-module zijn beschreven in de paragrafen 3.4 en 3.5.

3.10 Gebruik en beheer

Uitgangspunten

Voor de ervaringen met gebruik en beheer is het Living Lab in Krommenie cruciaal gebleken. Vertrekpunt is geweest is dat dit Living Lab als een 'normaal' fietspad beheerd moet kunnen worden en dat weggebruikers het als een normale weg moeten kunnen gebruiken. Belangrijkste afwijking van het 'normale' is dat er gestrooid wordt volgens het regime dat voor bruggen wordt gehanteerd om het risico van opvriezen te beperken. Voorafgaand aan het project was onduidelijk of het wegoppervlak sneller zou bevriezen / opvriezen en daarom is als voorzorg besloten een 'strenger' strooiregime te hanteren.

Resultaten

Toepassing van een dergelijk systeem in de openbare weg betekent ook dat het beheerd en onderhouden moet worden. Beheer behelst primair strooien, maaien van bermen en inspecteren van de weg zodat deze veilig gebruikt kan worden. Vanwege de kinderziektes is er veel vaker geïnspecteerd en is ook duidelijk geworden dat er gewerkt moet worden aan specifieke reparatietechnieken voor dit wegtype. Er is geen aangepast schoonmaakregime gehanteerd, om zoveel mogelijk aan te sluiten bij 'werkelijke' omstandigheden. Het bleek dat de bermbegroeiing zo ver over het wegoppervlak groeit, dat het tot beschaduwing van het actieve deel leidt.

Van weggebruikers zijn er tijdens de periode geen klachten of bijzonderheden ontvangen. De werkzaamheden in het Living Lab zorgden wel voor overlast, wat soms tot ergernis leidde, maar over de weg zelf zijn de meeste weggebruikers neutraal, over het algemeen valt het de fietsers niet erg op.

Ontwikkelpunten

Om onderhoud en eventuele noodreparaties, die bijvoorbeeld na een ongeluk noodzakelijk zijn, goed uit te kunnen voeren, zullen er eenvoudig inzetbare reparatietechnieken beschikbaar moeten komen.

Het voorkomen van beschaduwning door bembegroeiing zal de opbrengst verhogen.

Het strooien volgens een intensiever regime heeft effect op de beheerskosten en brengt meer zout in het milieu. Analyse van de monitoringsdata, specifiek op dit onderwerp, kunnen mogelijk aantonen dat dit niet nodig is, of indicaties geven op welke wijze het ontwerp mogelijk aangepast kan worden om de kans op gladheid te mitigeren.

3.11 Verdienmodel

Uitgangspunten

Voorafgaand aan het project was al geïdentificeerd dat bij een dergelijke disruptieve innovatie ook het verdienenmodel aandacht behoeft. Onderdeel van het project PV-SIN is daarom ook de ontwikkeling van een verdienenmodel. Vanuit het verdienenmodel is enerzijds gekeken naar de kostenkant en anderzijds naar de opbrengstenkant.

Resultaten

Het concept combineert twee functies (wegen en energieopwekking), dat resulteert ook in twee mogelijke klantgroepen: organisaties die primair een wegfunctie invullen (wegbeheerders, vastgoedeigenaren, etc.) en bedrijven die primair een energiefunctie vervullen (energiebedrijven, energiecoöperaties, energie-opwekkende particulieren en bedrijven). Daarnaast is er een duidelijke betrokkenheid van netbeheerders om deze bron van duurzame energie aan te sluiten.

Door een goede match, met hoge synergie, tussen deze partijen te maken, kan SolaRoad maximaal waarde toevoegen. Naarmate de ontwikkeling van het concept verder is doorontwikkeld en de LCOE (levelised cost of electricity) daalt zullen meer business cases rendabel worden. Hieronder wordt ingegaan op twee belangrijke onderwerpen in deze business cases: de kostprijsverlaging en de elektriciteitsproductie.

Resultaten kostprijsverlaging

Om SolaRoad een interessant alternatief te laten zijn voor andere alternatieve energiebronnen en andere soorten verharding, is de kostprijs per vierkante meter van het uitontwikkelde product een belangrijke factor. Ten opzichte van de productie voor de pilot (zeer kleine schaal, productie op "prototype-niveau") is een kostenreductie te verwachten langs de volgende lijnen: procesoptimalisatie / leereffecten, doorontwikkeling / productoptimalisatie, externe prijsontwikkeling in de tijd en schaalvoordelen.

Binnen PV-SIN is de aandacht primair gericht op de doorontwikkeling / productoptimalisatie om, bij het ontstaan van enige schaalgrootte, voordelen te behalen met het ontwerp V2 ten opzichte van V1.

Resultaten elektriciteitsproductie

De energieopbrengst was in 2014 en 2015 boven of binnen de afgesproken bandbreedte. De energieopbrengst blijft voor goed presterende modules ook ruim binnen deze afgesproken bandbreedte. Voor de modules V2 is de elektriciteitsproductie naar verwachting 20% hoger dan voor V1. Zie ook paragraaf 3.9

Binnen PV-SIN is een verhoging van de elektriciteitsproductie gerealiseerd, in overeenstemming met doelstelling 2. Op basis van de meetresultaten is te verwachten dat een optimalisatie mogelijk is van zo'n 30% ten opzichte van V2.

Ontwikkelpunten

Het concept heeft de potentie om grootschalig toegepast te worden. Vanuit de ontwikkeling van het verdienmodel zijn er een aantal aanbevelingen geformuleerd die het grootschalig toepasbaar maken van SolaRoad kansrijker maken:

- Het vergroten van het toepassingsgebied: niet alleen fietspaden maar ook andere wegen;
- Verbetering van de performance: langere levensduur, lagere productiekosten, hogere energieopbrengsten;
- Het geschikt maken van de (juridische/ bestuurlijke) omgeving voor oplossingen als SolaRoad waardoor zich ook een markt kan ontwikkelen. Dit kan betrekking hebben op tenderstructuren waarin dit wordt gevraagd aan de markt maar ook een passend en doeltreffend validatieprotocol;
- Schaalgrootte ontwikkelen: de integratie van PV in wegen kan enkel kosteneffectief worden als de bijbehorende groeicurve kan worden doorlopen. Een periode waarbij steeds grotere projecten om een oplossing met PV-in wegen vragen. Ook een periode waarin hogere aanlegkosten worden geaccepteerd om voldoende schaalgrootte en leereffect te ontwikkelen zodat de kosten van de uiteindelijke oplossing concurrerend zijn met andere duurzame energiebronnen.

3.12 Conclusies en aanbevelingen

Conclusies met betrekking tot doelstelling 1: "ontwikkeling van een veilig, robuust en duurzaam systeem voor de opwekking van energie uit weginfrastructuur":

De combinatie van het project PV-SIN met het Living Lab in Krommenie heeft aangetoond dat het mogelijk is om PV te integreren in een openbare weg en dat het mogelijk is om een energieopbrengst van > 90 kWh/m²/j te halen, wat gelijk staat aan een performance ratio van 65%. Ook is te concluderen dat er nog veel potentieel is om dit te verhogen, bijvoorbeeld door optimalisaties in de PV-module en toplaag.

Het Living Lab is sinds oktober 2014 open voor verkeer en is éénmalig afgesloten geweest vanwege een onveilige situatie. Daarmee is een grote stap gezet richting een veilig systeem.

De reparaties en de afname in de energie-opbrengst met de tijd laten zien dat er, met name op het gebied van de toplaag en de assemblage, oplossingen ontwikkeld moeten worden om de robuustheid en duurzaamheid te verbeteren om zo grootschalige toepassing mogelijk te maken.

Conclusies met betrekking tot Doelstelling 2: "het optimaliseren van de opbrengst van de PV in weginfrastructuur":

In het ontwerp V2 zijn diverse optimalisaties aan de energieopbrengst doorgevoerd, wat ook leidt tot verhoogde energieproductie (+ 20% ten opzichte van V1). De PV-module in het ontwerp V2 is beter (met lagere productiekosten) te produceren bij opschaling. Hierdoor wordt een aanzienlijke kosten-batenverbetering behaald. Door

het toepassen van dunne film PV in het V3 ontwerp is een begin gemaakt met het opdoen van ervaring met deze veelbelovende PV-technologie voor deze toepassing.

Aanbevelingen

De combinatie van een R&D project en een Living Lab is zeer waardevol omdat op deze wijze snel duidelijk wordt hoe een ontwerp en een ontwikkeld prototype stand houdt in de praktijk. Dit levert veel waardevolle inzichten op dit ook in dit rapport zijn gedeeld. Daarnaast is het Living Lab een effectieve wijze om een innovatie te tonen aan de buitenwereld en zeer waardevol vanuit communicatie oogpunt.

De aanbevelingen die vanuit dit project naar voren zijn gekomen voor het behalen van de bredere doelstelling (het concept SolaRoad ontwikkelen tot een commercieel exploitabel product) zijn de ontwikkelpunten benoemd in paragrafen 3.2 tot en met 3.11.

3.13 Perspectief voor toepassing

In oktober 2014 is een Living Lab geopend in Krommenie om praktijkervaring op te doen met dit concept. Er is specifiek gekeken naar wegbeheer, ervaringen van weggebruikers, elektriciteitsproductie en levensduur onder praktijkomstandigheden.

Veel weggebruikers merken nauwelijks dat er een ander wegdek ligt dan gebruikelijk. Dit is ook precies wat wordt beoogd en vergroot de kans op grootschalige toepassing.

Het eerste jaar heeft SolaRoad 9800 kWh elektriciteit geproduceerd, wat vergelijkbaar is met het energiegebruik van drie huishoudens. Vertaald naar een kilometer fietspad (3,5m breed) en een opbrengst van 100 kWh/m²/j levert dat 350 MWh per jaar op. Wanneer dit wordt opgeschaald naar een areaal van 1000 kilometer fietspaden, welke met SolaRoad zou worden uitgerust, levert dit ca. 350 miljoen kWh per jaar aan duurzame elektriciteit op. Dit komt overeen met het elektriciteitsverbruik van tussen de 90.000 en 100.000 huishoudens. Ter vergelijking: dit komt overeen met een windmolenpark aan zee van ca 60 windmolens. Verdere opschaling van SolaRoad naar bijvoorbeeld provinciale- en gemeentelijke wegen, maakt de potentie van SolaRoad groot.

De grote maatschappelijke waarde van SolaRoad zit in de unieke combinatie van de wegfunctie met de functie van duurzame energieopwekking. Zonder extra ruimtebeslag, zonder hinder voor omwonenden of verstoring van de omgeving en de natuur, energie opwekken in fietspaden die er toch al liggen.

3.14 Bijdrage van het project aan de doelstellingen van de regeling (duurzame energiehuishouding, versterking van de kennispositie)

Dit project geeft invulling aan thema S5: integratie van PV in de infrastructuur (I2PV) (zie ook bijlage 2.4.13 Prioriteitsthema's ZEGO bij de subsidieregeling).

Als primaire technische uitdagingen voor deze integratie worden genoemd: zonnestroomproductie bij behoud van de primaire infrastructurele functie,

elektrische lay-out voor lijnvormige configuratie, veiligheid, storingsgevoeligheid, levensduur en rendement op investering.

Binnen dit project hebben we specifiek gekeken naar het genereren / optimaliseren en evalueren van oplossingen voor deze uitdagingen, specifiek voor de integratie van PV in wegdekken, de z.g. SolaRoad elementen. De prototypes van deze elementen zijn uitvoerig in een lab-omgeving getoetst. De provincie Noord-Holland heeft een proefvak op een fietspad beschikbaar gesteld om deze elementen in een z.g. Living Lab te beproeven. Dit project heeft daarmee een belangrijke bijdrage geleverd in het bereiken van bovenstaande doelstelling van de subsidieregeling. Hiermee hebben we de Nederlandse kennispositie op dit onderwerp (PV in wegdekken) versterkt.

3.15 Mogelijkheden spin off binnen en buiten de sector

Zuid-Holland heeft een vooronderzoek laten uitvoeren naar SolaRoad in een busbaan, Gelderland naar opschaling naar 1 km fietspad, Noord-Holland onderzoekt het gebruik van SolaRoad voor zwaar verkeer. Afgelopen jaar is er zeer veel (inter)nationale belangstelling geweest voor SolaRoad. Met name vanuit andere Nederlandse provincies, maar ook vanuit diverse landen. Inmiddels is een nieuw R&D traject gestart (PV4Roads) waarin een breed consortium een modulair, elektriciteitsproducerend PV-wegdek-systeem wil ontwikkelen dat grootschalig toepasbaar is voor meerdere typen wegen (niet alleen fietspaden, maar ook zwaarder verkeer) en dat kostenefficiënt exploiteerbaar is.

4 Overzicht van openbare publicaties

Voor een overzicht van alle publicaties, interviews en andere media-uitingen wordt verwezen naar de website www.solaroad.nl

Een selectie uit de vele publicaties zijn.

<http://qz.com/404847/the-day-when-roads-will-harness-solar-energy-is-drawing-near/>

<http://www.bbc.com/news/technology-32615964>

<http://www.iflscience.com/environment/worlds-first-solar-cycle-path-surprisingly-successful>

http://www.engineeringnet.nl/detail_nederland.asp?Id=14472&titel=Pilootfase%20Solaroad%20levert%20meer%20energie%20op%20dan%20verwacht&category=nieuws

<http://www.utilities.nl/solaroad-presteert-boven-verwachting.154057.lynkx>

<http://www.rtlnieuws.nl/economie/toekomstmakers/zonnefietspad-solaroad-blijkt-succes>

<http://www.verkeersnet.nl/15369/zonnefietspad-solaroad-levert-meer-energie-op-dan-verwacht/>

http://www.noordtopics.nl/verkeer/2015_05_12-5.shtm

<http://solarmagazine.nl/nieuws-zonne-energie/i3520/zonnefietspad-solaroad-levert-in-eerste-half-jaar-meer-energie-op-dan-verwacht>

<http://www.ouderenjournaal.nl/home/2015/05/12/zonnefietspad-levert-meer-energie-dan-verwacht/>

<https://www.tno.nl/nl/over-tno/nieuws/2015/5/solaroad-levert-in-pilootfase-meer-energie-op-dan-verwacht/>

<http://www.bright.nl/solaroad-fietspad-zonncellen-krommenie-succes-beter-dan-verwacht>

<http://www.duurzaambedrijfsleven.nl/infra/5369/nederlands-zonnefietspad-overtreft-verwachting>

<https://nieuwsuit.com/2015/solaroad-zonnefietspad-blijkt-succes-te-zijn/>

<http://www.cobouw.nl/nieuws/duurzaamheid/2015/05/13/zonnestroomfietspad-krijgt-vervolg>

<http://www.cobouw.nl/nieuws/e-installatie/2015/05/11/solarfietspad-levert-meer-op-dan-verwacht>

<http://www.cobouw.nl/nieuws/duurzaamheid/2015/05/12/zonnecellen-in-fietspad-beter-dan-verwacht>

<http://www.dichtbij.nl/zaanstreek/regionaal-nieuws/artikel/4005023/fietspad-met-zonnepanelen-levert-meer-energie-dan-verwacht.aspx>

<http://www.rtvnh.nl/nieuws/164032/fietspad-met-zonnecellen-in-krommenie-levert-meer-stroom-op-dan-verwacht>

<http://groenecourant.nl/wetenschap/fietspad-met-zonnecellen-in-noord-holland-levert-meer-op-dan-verwacht/>

<http://www.cbc.ca/news/technology/solaroad-generates-more-power-than-expected-1.3069371>

<http://www.engadget.com/2015/05/11/solar-bike-path-results/>

<http://www.sustainablebusiness.com/index.cfm/go/news.display/id/26291>

<http://www.takepart.com/article/2015/05/12/solar-bike-lane-making-electricity>

<http://www.theepochtimes.com/n3/1353226-the-dutch-are-getting-solar-power-from-bike-lanes/>

<http://mic.com/articles/117948/6-months-later-here-s-what-s-happened-to-the-netherlands-solar-bike-paths>

http://www.upi.com/Top_News/World-News/2015/05/11/Solar-road-in-the-Netherlands-producing-more-energy-than-anticipated/2591431395075/

<http://eandt.theiet.org/news/2015/may/solar-road.cfm>

<http://www.ubergizmo.com/2015/05/solar-bike-path-generates-more-energy-than-expected/>

http://www.huffingtonpost.co.uk/2015/05/12/this-cycle-path-is-also-a-giant-solar-array-and-it-works-really-well_n_7263554.html

<http://www.energylivenews.com/2015/05/11/dutch-bike-solar-road-generates-energy/>

<https://en-maktoob.news.yahoo.com/dutch-solar-road-makes-enough-energy-power-household-121010832.html>

<http://www.i4u.com/2015/05/91114/70-meter-solar-road-surface-generates-enough-power-household>

<http://gazettereview.com/2015/05/netherlands-working-on-solar-road-surfaces/>

<http://esciencenews.com/sources/physorg/2015/05/12/solaroad.cycle.path.electricity.yield.exceeds.expectations>

<http://thinkprogress.org/climate/2015/05/11/3657220/solaroad-producing-energy/>

<http://www.sciencealert.com/solar-roads-in-the-netherlands-are-working-even-better-than-expected>

<https://extensionsustainability.usu.edu/netherlands-solar-road-working-better-than-expected/>

<http://bobthegreenguy.com/blog/>

<http://www.aljazeera.com/news/2015/05/150510092535171.html>

– RTVNH

<http://www.rtvnh.nl/nieuws/154358/Wereldpers+in+Krommenie+voor+opening+fietspad>

– Jeugdjournaal

http://www.npo.nl/nos-jeugdjournaal/12-11-2014/POW_00716381

– NOS

<http://nos.nl/video/2003460-1200-fietspad.html>

Radio Nederland:

– Vara's vroege vogels 16 november

http://vroegevogels.vara.nl/Fragment.150.0.html?&tx_ttnews%5Btt_news%5D=370678

NOS radio 1 nieuws

<http://www.radio1.nl/gemist-overzicht/2014-11-12>

BNR Urban Energy

<http://www.bnr.nl/radio/urbanenergy/543760-1411/uitzending-12-november-energie-liqt-op-straat>

Televisie internationaal

– Al Jazeera

<https://www.youtube.com/watch?v=2xw72Wb-FXU&feature=youtu.be>

– CNNi

<http://www.cnn.com/video/data/2.0/video/international/2014/11/14/exp-solar-bike-path-opens-in-the-netherlands.cnn.html>

– RAI (Italië)

<http://www.rainews.it/dl/rainews/media/SolaRoad-in-bici-sui-pannelli-solari-2b5f139e-ab35-4754-8ef6-80bf939163e1.html>

– VRT (België)

<http://deredactie.be/cm/vrtnieuws/videozone/nieuws/buitenland/1.2146295>

– CCTV China + enkele lokale Chinese zenders:

<http://tv.cntv.cn/video/C10330/b060150eb1f7461f8ea5b965bef48a65>

<http://tv.cntv.cn/video/C10336/5cf8e95510f6497bbcc084cd3a828223>

– Zoomin.tv
<http://videos.tf1.fr/infos/2014/voici-la-premiere-piste-cyclable-solaire-8518365.html>

– TV1 Rusland
<http://www.1tv.ru/news/world/271732>

Radio internationaal

– PRI's The World – radio
<http://www.pri.org/stories/2014-11-12/bike-path-made-entirely-solar-panels>

– Deutsche Welle
<http://www.dw.de/show-me-the-way/av-18070068>

Artikelen internationaal

– Foxnews
<http://www.foxnews.com/tech/2014/11/04/dutch-solar-bike-lane-generates-enough-energy-to-power-three-homes/>

– CNN / Cable One
http://home.cableone.net/news/read/category/business/article/the_associated_press-dutch_try_installing_solar_panels_in_bicycle_path-ap

– NPR
<http://www.npr.org/blogs/thetwo-way/2014/11/10/363023227/solar-bike-path-opens-this-week-in-the-netherlands>

– The Guardian
<http://www.theguardian.com/environment/2014/nov/05/worlds-first-solar-cycle-lane-opening-in-the-netherlands>

– BBC
http://www.bbc.com/capital/specials/protection-now/environment/netherlands-unveils-world-s-first-solar-bike-lane_a-35-334.html

– Huffington Post
http://www.huffingtonpost.com/2014/11/10/netherlands-solar-bike-lane_n_6135090.html?ncid=tweetInkushpmg00000048

Overige publicaties

Plenaire Presentatie en conference paper op EU PVSEC 2015 solar road operating efficiency and energy yield – an integrated approach towards inductive power transfer.

– Artikel in NRC Next september 2014
<http://www.nrc.nl/next/van/2014/september/17/een-briljant-idee-was-hun-begin-en-zijn-ze-nu-su-1419276>

– [Item in Nieuwsuur](#), mei 2014

– Artikel B&U juli 2013:
[Artikel – SolaRoad BU2013](#)

– Item in tv-programma Het Groene Oosten
<http://youtu.be/-vb6iQ0clhc>

– Artikel OTAR Magazine
[ArtikelOTAR_januari2014](#)

– Artikel in Civiele Techniek
[CivieleTechniekSR](#)

5 Algemene informatie

Voor meer informatie of het bestellen van dit rapport kunt u contact opnemen met:
Drs. G.J.E. (Gerritjan) Valk
Telefoonnummer: 08886 67301
e-mail: gerritjan.valk@tno.nl

Dit rapport kan tegen betaling van € 50,00 geleverd worden.

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.

6 Ondertekening

Delft, 3 november 2017



Drs. ing. W.C. van der Poel
Auteur



Ir. D.R. Donkervoort
Review



Ir. E. Hagen
Research Manager
Structural Reliability