

Leeghwaterstraat 44
2628 CA Delft
Postbus 6012
2600 JA Delft

www.tno.nl

T +31 88 866 22 00

TNO-rapport

2020 R10862 | Eindrapport

Modular E-cover for Smart Highway (MESH): Ontwikkeling van PV op de geleiderail

Datum 8 juni 2020

Auteur(s) R.A. Bezemer, TNO
K.E. Sewalt, TNO
E.M.B. Heller, Hogeschool van Amsterdam
D.A. Roosen, Solliance
V. de Waal, Heijmans
M. Arnoldy, Femtogrid

Exemplaarnummer

Oplage

Aantal pagina's 53 (incl. bijlagen)

Aantal bijlagen 1

Opdrachtgever RVO

Projectnaam Modular E-cover for Smart Highway (MESH)

Projectnummer 060.16846

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.

© 2020 TNO

Openbare samenvatting

Titel : Modular E-cover for Smart Highway (MESH): Ontwikkeling van PV op de geleiderail
Auteur(s) : R.A. Bezemer, TNO
K.E. Sewalt, TNO
E.M.B. Heller, Hogeschool van Amsterdam
D.A. Roosen, Solliance
V. de Waal, Heijmans
M. Arnoldy, Femtogrid
Datum : 8 juni 2020
RVO-projectnr. : TEID215026
TNO-rapportnr. : 2020 R10862

Grootschalige toepassing van zonnecellen (photovoltaic cells, PV) in de gebouwde omgeving is gelimiteerd, mede omdat dakoppervlakken niet volledig benut kunnen worden ten gevolge van de ligging en de aanwezigheid van verstoringselementen als schoorstenen, dakkapellen, daklichten, etc. Het wegennet in Nederland biedt aanknopingspunten voor integratie van PV waarmee nog meer zonlicht omgezet kan worden in elektriciteit. Een terugkerend element in de infrastructuur is de geleiderail (vangrail); alleen al in Nederland staat er 7400 km geleiderail, met een potentie van 700 MWp aan geïntegreerde PV. Op die manier wordt dubbel ruimtegebruik gerealiseerd.

In dit project is dunne film PV toegepast op geleiderails langs de provinciale weg in een modulaire 'E-cover'. De opgewekte stroom is geleverd aan het elektriciteitsnet. De verwachting is dat in de toekomst steeds meer infrastructuur voor verkeersmanagement toegepast wordt in het kader van de transitie naar "smart highways". Dit zal een drijfveer zijn voor toepassing van het modulaire E-cover concept voor de smart highway, met lokale energieopwekking.

Doelstelling

Het doel van dit project was om in een pilot een traject met dubbele geleiderails te voorzien van dunne film PV en zo inzicht te krijgen in de optimale configuratie en het functioneren van de gehele opstelling. Op deze manier kan de werking van het principe in de praktijk worden aangetoond.

De configuratie dient zodanig te zijn dat de primaire functie van de geleiderail (veiligheid) niet wordt gehinderd. Dit leidt tot eisen aan de dunne film PV, het bevestigingsconcept (snel monteerbaar en veilig), de power optimizers voor de lijnvormige PV toepassing, DC management en energietransport. Het functioneren van de opstelling omvat energieopbrengst, robuustheid en gevoeligheid voor onder andere vervuiling en vocht.

Een verdere doelstelling was dat de werking voldoende zou zijn aangetoond om in een vervolgproject de technologie voor commerciële toepassingen op te kunnen schalen.

Uitvoering en resultaten

Een ontwerpteam is samengesteld, waarin de vijf partners deelnamen. Het project is uitgevoerd in zeven werkpakketten:

1. Programma van Eisen (PvE)

De ontwikkeling van het PvE is benaderd vanuit de functies van het uiteindelijke product, waarvan de E-cover (PV met de constructieve elementen voor plaatsing tussen de geleiderails) de kern is. Het ontwerpteam heeft het PvE in een aantal sessies opgesteld: uitgangspunten, eisen en wensen aan ontwerp, productie en installatie, omstandigheden tijdens gebruik, duurzaamheid en demontage aan het einde van de levensduur. Het PvE is iteratief aangescherpt gedurende de ontwikkeling in de volgende werkpakketten.

In het PvE zijn eisen geformuleerd m.b.t. de twee hoofdfuncties van het systeem, voertuiggeleiding en elektriciteitsproductie. Voor voertuiggeleiding worden eisen gesteld aan de afschermdende constructie; bij elektriciteitsproductie spelen met name de veiligheidsaspecten een rol.

In het PvE zijn veel invloedsfactoren geïdentificeerd zoals op het gebied van calamiteiten, gebruik/misbruik en klimatologische omstandigheden. Een aantal factoren zijn meegenomen in het ontwerp en andere factoren zijn in de pilot nader bekeken.

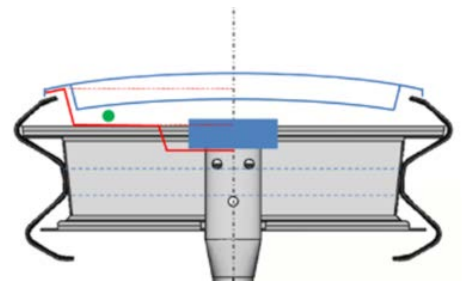
De ontwikkeling van het PvE is gelijk opgegaan op met de conceptontwikkeling en ontwerpdefinitie, namelijk van een kwalitatief naar een meer kwantitatief karakter.

2. Ontwikkelen E-cover concept

Het ontwerpteam heeft in een serie werksessies ontwerp oplossingen gegenereerd met het PvE als basis. Een morfologisch overzicht is opgesteld waarmee voor verschillende functies en ontwerpaspecten deel oplossingen in kaart gebracht zijn. Door verschillende deel oplossingen te combineren zijn ontwerp richtingen voor de E-cover bepaald, die vervolgens getoetst zijn aan de (hoofd)criteria uit het PvE.

Bij de conceptontwikkeling is een breed scala aan ontwerptools ingezet, onder andere handschetsen, CAD-modellen, 3D-printen van schaalmodellen en experimenteel uitproberen van vormen en oplossingen op ware grootte op een stuk geleiderail.

Daarna is een opstelling van 12 meter geleiderail geplaatst (de lengte van 3 maal de standaard modulemaat), waarop naast de uitvoering van de E-cover in kunststof ook metalen uitvoeringen onderzocht zijn.



Op basis van een uitvoerige risicoanalyse en twee inhoudelijke sessies met een expertpanel is uiteindelijk gekozen voor een volledige kunststof variant. Het panel was samengesteld uit consortiumpartners en andere partijen, zoals Rijkswaterstaat, wegbeheer van de Provincie Noord-Holland, een producent van geleiderail

en een specialist in botstesten.

Op basis van het conceptontwerp zijn drie ontwerp opdrachten uitgevoerd door studenten aan de Hogeschool van Amsterdam en één opdracht door studenten van ROC Mondriaan te Delft. Hoofdonderwerpen: bevestigingssysteem aan geleiderail met aandacht voor veiligheid en constructieve aspecten, autonoom / plug-and-play PV-systeem met focus op energie-aspecten en veiligheid.

3. Dunne PV film

In het project zijn drie typen dunne film PV-modulen voor toepassing in de pilot onderzocht, twee CIGS-modulen van leveranciers MiaSolé en Global Solar en één amorf Si-module van leverancier HyET Solar, met onderstaande specificaties.

#	Leverancier	Type	Vermogen	Lengte
1	MiaSolé	FLEX 120N	30V5@3A93 (120W)	2598 mm
2	Global Solar	PowerFLEX BIPV	16V5@5A4 (90W)	2017 mm
3	HyET Solar	Powerfoil	17V@1A25 (22W)	1230 mm

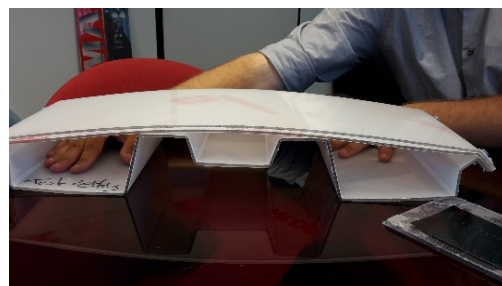


Samples van deze drie typen zijn PV-technisch beoordeeld en op de 12 meter proefopstelling beoordeeld op installatietechnische aspecten (aanbrengen, aansluiten, kabeldoorvoer en kabelaansluitingen). Uiteindelijk is gekozen om met de CIGS-modulen van MiaSolé en Global Solar door te gaan. Belangrijkste criteria hierbij waren het vermogen per strekkende meter, mechanische robuustheid, verkrijgbaarheid en de mogelijkheid om de junction box aan de achterzijde van de module te monteren.

4. Engineering

Een multidisciplinair team vanuit Heijmans, TNO en Femtogrid heeft detailanalyses uitgevoerd en omgezet in een detailontwerp. Belangrijke aspecten waren de vorm van de dragende constructie, bevestigingen, flexibiliteit van materialen en de configuratie van alle componenten.

Tevens zijn onder leiding van Provincie Noord-Holland criteria opgesteld voor een pilotlocatie en is een locatie gevonden die daaraan voldeed.



Het definitieve ontwerp voor de **E-cover** is opgebouwd uit drie delen van slagvast poly-carbonaat: een bodemdeel op de afstandshouders van de geleiderail, een deksel en een afdekkap. Het bodemdeel en de deksel vormen samen de onderconstructie voor de PV-modulen, die op de bovenkant van het deksel

worden gekleefd. De junction box met kabels steekt door een gat in het deksel. De transparante, getextureerde afdekkap is later in het ontwerp toegevoegd tegen impact, mogelijk vandalisme en schitteringen voor passerend verkeer.

Het **elektrisch systeem** bevat Solar Power Optimizers en DC-AC Inverters. De optimizers verhogen de gelijkspanning naar 380 VDC. De inverters in een straatkast vormen om naar 230 VAC wisselspanning.

Het systeem kent een eigen veiligheidsoptie: bij doorbreken van de trunk-kabel (bij door de geleiderail schieten van een voertuig) schakelt het systeem af. Daarnaast bevat de geleiderail enkele tiltsensoren die bij kanteling van de geleiderail t.o.v. de verticaal (onder andere bij een aanrijding) het systeem uitschakelen.

Gedurende de concept- en de detailleringsfase is **veiligheid** beoordeeld via een Failure Mode and Effect Analysis en door twee inhoudelijke sessies met een expert-panel vanuit onder meer Rijkswaterstaat, wegbeheer van de Provincie Noord-Holland, een producent van geleiderail en een specialist automotive botstesten. De belangrijkste overwegingen waren mechanische en elektrische veiligheid bij calamiteiten. Dit heeft geleid tot drie besluiten, waarvan de laatste de grootste consequenties had:

- de onderconstructie wordt een volledige kunststof variant in plaats van metaal;
- in de geleiderail worden tiltsensoren opgenomen;
- de optimizers worden niet in de onderconstructie geplaatst, maar achter de geleiderail. Er is voor gekozen de optimizers niet boven, maar onder het maaiveld te plaatsen. Dit laatste komt voort uit het maaibeeld van de wegbeheerder.

Een eerste versie van de **businesscase** is na het eerste ontwerp in 2017 opgesteld. Deze heeft meegewogen in de Go/No-go beslissing voorafgaand aan realisatie van de pilot (zie 5. *Prototyping en beproeving*). Om de elektriciteitskosten te kunnen vergelijken met andere producten die elektriciteit leveren, is gekozen om de "Levelized Cost of Electricity (LCoE)"¹ als methode te hanteren. Uitgangspunten zijn een discontovoet van 0%, een levensduur van 20 jaar en het niet beprijzen van CO₂-uitstoot gezien de lage prijs. De businesscase kent drie mijlpalen: pilot 2017, 1 km MESH-opstelling in 2018 en 100 km MESH-opstelling in 2020.

Voor de Go/No-go beslissing is als referentie een LCoE van € 0,12 per kWh genomen (LCoE-schattingen voor PV op woningen is € 0,09-0,13 per kWh²). De projectpartners hebben de MESH-kosten en de toekomstige energieopbrengst ingeschat. De resultaten voor de eerste businesscase zijn als volgt:

	72m (pilot)	1 km (2018)	100km (2020)
Investering (€m)	763	425	235
Onderhoud (€/jr/m)	8	4	2
Opbrengst (kWh/jr/m)	73,8	88,5	118
LCoE (€/kWh)	0,621	0,288	0,120
Terugverdientijd (jr)	623	67	20

Door de verwachte kostendaling bij een groter project daalt de LCoE, onder andere door goedkopere productietechnieken en een verwachte hogere PV-efficiëntie (zie bijlage). Na opschaling is de terugverdientijd van 20 jaar ongeveer gelijk aan de verwachte levensduur.

¹ Intergovernmental Panel on Climate Change, 5th Assessment report WP3, 2014

² ECN, MKEA zon en wind op land, 2016.

Op basis van deze informatie was er bij de projectpartners voldoende vertrouwen in een positieve business case op termijn.

Op het terrein van Heijmans in Rosmalen is een opstelling van 12 meter geleiderail geplaatst waarop zowel kunststof als metalen uitvoeringen van de E-cover onderzocht zijn. Op de verschillende E-covers zijn de drie typen geselecteerde PV-modulen gemonteerd en is bekabeling aangesloten om installatieaspecten, kabeldoorvoer en het algemeen technisch functioneren te kunnen beoordelen. De PV-modulen leverden geen energie.

De technische werkgroep heeft besloten om de opstelling vooral te gebruiken voor het beoordelen van mechanische aspecten (zoals de montagemethode) en het optimaliseren van installatietechnische aspecten (PV-modulen aanbrengen en aansluiten, connectoren en bekabeling).

De proefopstelling heeft een belangrijke rol gespeeld bij de keuze voor het type PV en selectie van materialen. Bij de tweede veiligheidssessie met het expertpanel is definitief gekozen voor een volledige kunststof uitvoering van de E-cover.



Een belangrijk onderdeel in deze fase van het project betrof de besluitvorming inzake de Go/No-go beslissing voor uitvoering van de pilot. Drie voorwaarden waren daarbij leidend:

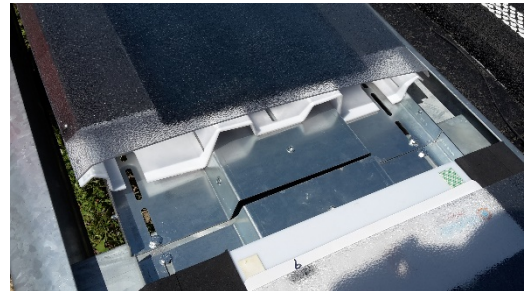
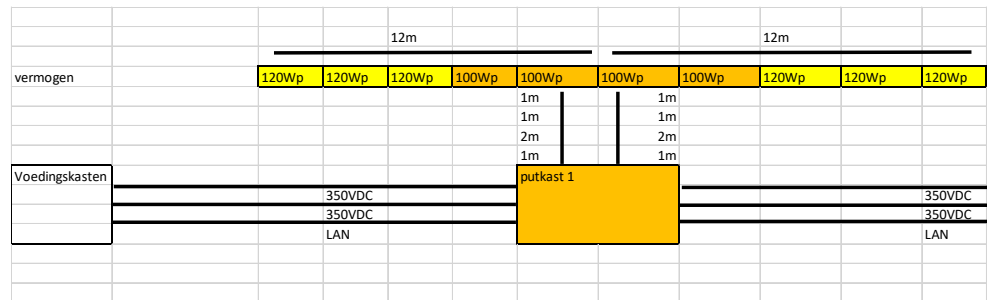
1. het expert panel vindt de beheersmaatregelen uit de risicoanalyse voldoende om de pilot veilig te kunnen uitvoeren;
2. de projectpartners hebben voldoende vertrouwen in een positieve businesscase;
3. iedereen onderschrijft een serie pilotafspraken, waarin kosten, taken en verantwoordelijkheden vastgelegd zijn.

Aan deze voorwaarden is uiteindelijk voldaan, zodat de pilot van start kon gaan.

6. Pilot

Voor de pilotbouw zijn vergunningen aangevraagd en is afgestemd met de weg- en de gebiedsbeheerder. Voor de start zijn afspraken gemaakt over eventuele vervanging van defecte elementen en de verdeling van bijbehorende kosten. In de zomer van 2018 is de pilot in Heerhugowaard opgebouwd aan de nieuwe provinciale weg N194, als onderdeel van renovatieproject N23 Westfriisaweg. De pilot heeft een lengte van 72 meter, waarvan iedere 12 meter samengesteld is met 2 modulen Global Solar (ieder 2,00 m x 50 cm, vermogen 90 Wp) en drie modulen MiaSolé (ieder 2,60 m x 37 cm, vermogen 120 Wp). Het gemiddelde vermogen is dus ca. 45 Wp/m¹.

Per 24 meter geleiderail zijn de optimizers voor dat deel in een putkast ondergebracht. Elke putkast bevat één optimizer voor elke module MiaSolé, één optimizer voor elk paar in serie geschakelde modulen Global Solar en een Raspberry Pi voor communicatie via ZigBee met optimizers in de put en de apparatuur in de straatkast. Onderstaand staat een schematische weergave van de eerste 24 meter van de pilot en foto's.



Met de aanleg van de pilot is tegelijkertijd het monitoringssysteem geïnstalleerd: camera's, weerstation en monitoringsapparatuur (zie onder).

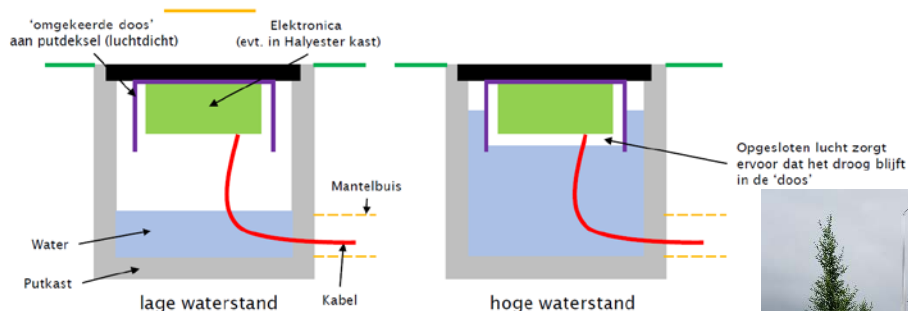


Doordat de netbeheerder de eindaansluiting op het net eerst moest verzwaren en van een aparte energiemeter voorzien, is pas in december 2018 de netkoppeling gerealiseerd.

Bovendien heeft in die tijd hevige regenval ertoe geleid dat een meer dan verwachte hoeveelheid water in de putkasten kwam, waardoor de optimizers in 2 van de 3 putkasten tijdelijk onder water kwamen te staan en uitvielen. Het systeem is toen afgeschakeld.

De putkasten en het montagerek voor de optimizers zijn vervolgens aangepast volgens het principe van de duikklok, zie onderstaand figuur.

Principe Duikklok MESH



Tegelijkertijd zijn de aangetaste optimizers vervangen, visueel geïnspecteerd en opnieuw geïnstalleerd. Twee optimizers leverden geen bruikbare signalen meer. De pilot werd daardoor ingegaan met 10 modulen Global Solar (i.p.v. 12) en 17 modulen MiaSolé (i.p.v. 18). Na deze aanpassingen heeft de pilot van 18 maart 2019 tot 19 maart 2020 gefunctioneerd zonder calamiteiten, incidenten of benodigd onderhoud. De problemen met waterindringing hebben zich niet meer voorgedaan.



7. Monitoring en energieopbrengst

Een monitoringsplan is opgesteld met als doelen het MESH-systeem te evalueren (veiligheid en opbrengst), technische verbetermogelijkheden te inventariseren en de businesscase aan te scherpen.

Luchttemperatuur, relatieve vochtigheid, luchtdruk en zoninstraling zijn doorlopend gemeten en twee infraroodcamera's observeerden de straatkast en de locatie om eventuele calamiteiten te registreren. Deze hebben echter niet plaatsgevonden. Regelmatig is visueel geïnspecteerd op vervuiling en algemene staat van de gehele opstelling. Gedurende de monitoringsperiode is de opstelling niet gereinigd. Temperaturen in de E-cover zijn met 12 thermokoppels gemonitord via een draadloos netwerk. In aanvang functioneerde dit goed, maar na verloop van tijd niet meer. Dit probleem is niet verholpen, omdat het geen cruciale parameter is en omdat herstel teveel inspanning zou vergen, namelijk het aanleggen van een bedraad netwerk. Daardoor zijn slechts beperkt E-cover-temperaturen beschikbaar.

M.b.v. het simulatieprogramma SAM (System Advisor Model) van National Renewable Energy Laboratory (NREL) is een indicatieve jaaropbrengst berekend voor het MESH systeem. Oorspronkelijk (12 modulen Global Solar en 18 modulen MiaSolé) was de verwachte jaaropbrengst ca. 2.600 kWh. Na herinstallatie (10 modulen Global Solar en 17 modulen MiaSolé) was de verwachte jaaropbrengst ca. 2.350 kWh. Rekening houdend met 20-25 % verlies door afdekcap en vervuiling was de verwachting jaarlijks ca. 1.800 kWh te kunnen leveren.

Vanaf dat de aansluiting op het energienet in maart 2019 was gerealiseerd tot maart 2020 bedroeg de gemeten levering totaal 1.200 kWh, dus ca. 67% van de verwachte 1.800 kWh.

Er is onderzoek gedaan naar mogelijke oorzaken door de verkregen gegevens te analyseren. Op basis van dit onderzoek kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- individuele PV-modulen en/of systeemcomponenten hebben niet afwijkend gefunctioneerd t.o.v. de verwachtingen;
- de drempelwaarde van de optimizers waaronder geen energie wordt geleverd, is te laag om een deel van het verschil te kunnen verklaren;
- de Performance Ratio van de PV-modulen is relatief laag: gemiddeld rond 40% (is gemiddeld 77% voor PV-systemen op daken); dat is in lijn met wat verwacht zou worden op basis van de lage energieopbrengst;
- uit de vermogensmetingen blijkt dat kabel-/transportverliezen enige invloed hebben gehad, tot ca. 10%;
- de afdekkap had meer effect dan het ingeschatte verlies van ~20-25 %.

Dit laatste lijkt de meest waarschijnlijke hoofdoorzaak van de relatief lage opbrengst. Bij toekomstige opschaling kan een afdekkap vervallen door het toepassen van een robuuste mee-gelamineerde frontsheet op de PV-modulen.

Verbetermogelijkheden

De MESH-opstelling is van maart 2019 tot maart 2020 als pilot-opstelling gemonitord. Op basis van de bevindingen in de ontwikkel- en de pilot-/monitoringfase zijn verbetermogelijkheden geïntroduceerd.

1. Integratie in de geleiderail?

Het integreren van PV met de primaire functie van de geleiderail (botsveiligheid) is complexer gebleken dan vooraf voorzien. In het oorspronkelijke ontwerp – alle elektronica tussen de geleiderails – was onderbouwd dat de bots- en elektrische veiligheid gewaarborgd zouden zijn. Het ontwerp bleek echter niet houdbaar vanuit de veiligheidsfilosofie van provincie en wegbeheerder. Het resultaat was een kostentechnisch en esthetisch minder aantrekkelijk ontwerp: het plaatsen van de elektronica achter de geleiderail. In de pilot is dat gebeurd in ondergrondse putten, omdat bovengrondse kastjes niet pasten bij het maaibeeld van de wegbeheerder. Twee alternatieve oplossingen:

- elektronica achter de geleiderails in een kast plaatsen. Dit is elektrisch veilig en minder kostbaar, terwijl de apparatuur watervrij gehouden wordt. Het maaien wordt hiermee echter arbeidsintensiever;
- de elektronica wordt alsnog in de onderconstructie geïntegreerd zonder negatieve invloed op de bots- of elektrische veiligheid. Mechanische veiligheid (loskomen van componenten) en elektrische veiligheid (afschakelen van het systeem bij impact) moeten dan door botsproeven worden aangetoond.

2. Constructieve aspecten

De opstelling met elektronica onder het maaiveld in een 'duikersklok' is elegant en effectief. Er bestaat een risico dat door opwaartse druk water kan indringen in het geval van kleine lekken door bijvoorbeeld scheurtjes; daarop kan getest worden. Om dit risico te voorkomen is een alternatief het gebruik van bovengrondse kastjes

nabij de geleiderail. Die zijn bovendien goed bereikbaar, bijvoorbeeld voor onderhoud. Nadeel is echter dat het maaien arbeidsintensiever wordt.

De kunststof onderconstructie waarop de PV-modulen zijn bevestigd, kan waarschijnlijk vereenvoudigd worden als de elektronica niet tussen de geleiderails geplaatst wordt.

De harde afdekkap tegen beschadigingen en schitteringen functioneert goed, maar neemt ook licht weg. Mogelijk kan de deze lichter uitgevoerd worden en optisch gekoppeld worden met de PV-folie in één robuuste bescherm laag.

3. Productie, aanleg, onderhoud

Productie en assemblage van het bodemdeel van de E-cover ging gepaard met veel handwerk. Bij een seriematige aanpak en mechanisatie is het proces te vereenvoudigen en te verkorten.

De installatie op locatie kostte veel tijd. Dat is te beperken door constructieve vereenvoudigingen, mechanisatie van de montage en lokale (DC) toepassing van het opgewekte vermogen.

Een vervolgonwerp moet rekening houden met plug & play vervanging van elementen in de geleiderail om onderhoudskosten te minimaliseren.

4. Energieopbrengst

De PV-modulen kunnen meer vermogen per strekkende meter opwekken door a) toepassing van nieuwere types PV-cellen met hogere efficiëntie, b) optimale PV-breedte tussen de geleiderails en c) integreren van de afdekkap en de beschermingslaag tot een laag die zo min mogelijk licht wegneemt. Daarmee is de verwachting dat de energieopbrengst verhoogd kan worden van de gerealiseerde 18 kWh/m/jr naar 80 kWh/m/jr.

Het energieverlies kan verder beperkt worden door bekabeling te minimaliseren, onder andere door lokale DC-toepassing voor de infrastructuur of nabijgelegen gebouwen. Dan wordt energie opgeslagen in lokale batterijen. Deze toepassingen zijn gemakkelijk schaalbaar afhankelijk van de lokale toepassing.

Vernieuwde businesscase

De businesscase die vóór de pilot is opgesteld, is bijgewerkt op basis van de gemaakte en benodigde kosten voor de MESH-opstelling, de werkelijke energieopbrengst en de toekomstig mogelijke energieopbrengst als de verbeteringen in de energie-opbrengst zouden worden doorgevoerd. Met de overige parameters gelijk aan de eerste businesscase is de bijgewerkte businesscase als volgt:

LCoE (eenvoudige methode, IPCC 2014)	Proto design	Proto realised	1km (2020)	100 km (2022)	1000km (2025)
Investering (€/m)	763	1800	1700	1302	1302
Onderhoud (€/m/jr)	8	8	8	8	8
Opbrengst (kWh/m/jr)	36	18	80	98	108
LCoE (€/kWh)	1,27	5,85	1,16	0,74	0,67

De LCoE van het MESH systeem is hoog vergeleken met de gewenste 0,12 €/kWh. Ook de hierboven geschetste toekomstige verbeteringen in PV-toepassing en

opschaling geven nog een hoge LCoE. Verdere verlaging van de LCoE vraagt een verlaging van de investering, vooral de aanlegkosten.

Conclusies

De MESH-opstelling is in juli 2018 gebouwd en heeft vanaf maart 2019 gedurende 12 maanden goed gefunctioneerd. De constructie is in die tijd robuust gebleken: er is geen achteruitgang geconstateerd en er was geen onderhoud of vervanging van elementen nodig.

Er is veel nieuwe kennis verzameld over dit ontwerp en de praktische implementatie van flexibele PV-cellen gekoppeld aan de infrastructuur. Deze praktijkproef heeft inzicht gegeven in welke problemen kunnen optreden en waar oplossingen liggen.

De levering is totaal 1.200 kWh geweest, ca. 67% van de verwachte 1.800 kWh.

Als deze toepassing vergeleken moet worden met netstroom is de LCoE van het MESH-systeem nu te hoog. Als de waardering ook kan zitten in vermijden van installeren van windmolens of zonneparken op schaarse grond kan de discussie een andere dimensie krijgen. Deze is echter nog niet in geld uit te drukken.

Andere denkrichtingen zijn het plaatsen van PV direct achter de geleiderail of als autonoom systeem voor mobiele barriers, waarbij de PV zorgt voor additionele functionaliteit. Lessen van MESH met betrekking tot toegepaste materialen en het ontwerp kunnen hierbij worden toegepast.

Inhoudsopgave

	Openbare samenvatting	2
1	Inleiding en algemene projectgegevens	13
1.1	Projectgegevens	13
1.2	Inleiding	13
1.3	Doelstelling	13
2	Werkwijze	14
2.1	WP 1: Opstellen specificaties	14
2.2	WP 2: Ontwikkelen E-cover concept	14
2.3	WP 3: Dunne film PV	15
2.4	WP 4: Engineering	15
2.5	WP 5: Prototyping en beproeving – Go/No-go beslissing	15
2.6	WP 6: Pilot	16
2.7	WP 7: Monitoring	16
3	Resultaten	17
3.1	WP 1: Opstellen specificaties	17
3.2	WP 2: Ontwikkelen E-cover concept	18
3.3	WP 3: Dunne film PV	19
3.4	WP 4: Engineering	21
3.5	WP 5: Prototyping en beproeving – Go/No-go beslissing	25
3.6	WP 6: Pilot	27
3.7	WP 7: Monitoring, energieopbrengst en businesscase	32
4	Conclusies en verbetermogelijkheden	43
4.1	Conclusies	43
4.2	Verbetermogelijkheden	44
5	Ondertekening	47
	Bijlage: Business case en ontwikkelingen in de efficiëntie van PV	48

1 Inleiding en algemene projectgegevens

1.1 Projectgegevens

RVO-projectnummer: TEID215026
Projecttitel: Modular E-cover for Smart Highways (MESH)
Penvoerder: TNO
Mede-aanvragers: Heijmans N.V. (uitgevoerd door Heijmans Infra B.V.)
Femtogrid Energy Solutions B.V.
Hogeschool van Amsterdam
Provincie Noord-Holland
Projectperiode: 1 januari 2016 t/m 19 maart 2020

1.2 Inleiding

Grootschalige toepassing van zonnecellen (photovoltaic cells, PV) in de gebouwde omgeving is gelimiteerd vanwege, mede omdat dakoppervlakken niet volledig benut kunnen worden ten gevolge van de ligging en de aanwezigheid van versturende elementen, elementen als schoorstenen, dakkapellen, daklichten, etc. Het wegennet in Nederland biedt aanknopingspunten voor integratie van PV waarmee nog meer zonlicht omgezet kan worden in elektriciteit. Een terugkerend element in de infrastructuur is de geleiderail (vangrail); alleen al in Nederland staat er 7400 km geleiderail, met een potentie van 700 MWp aan geïntegreerde PV.

In dit project is dunne film PV toegepast op geleiderails langs de provinciale weg in een modulaire 'E-cover'. De opgewekte stroom is geleverd aan het elektriciteitsnet. De verwachting is dat in de toekomst steeds meer infrastructuur voor verkeersmanagement toegepast wordt in het kader van de transitie naar "smart highways". Dit zal een drijfveer zijn voor toepassing van het modulaire E-cover voor de smart highway, met lokale energieopwekking.

1.3 Doelstelling

Het doel van dit project was om in een pilot een traject met dubbele geleiderails te voorzien van dunne film PV en zo inzicht te krijgen in de optimale configuratie en het functioneren van de gehele opstelling. Op deze manier kan de werking van het principe in de praktijk worden aangetoond.

De configuratie dient zodanig te zijn dat de primaire functie van de geleiderail (veiligheid) niet wordt gehinderd. Dit leidt tot eisen aan de dunne film PV, het bevestigingsconcept (snel monteerbaar en veilig), de power optimizers voor de lijnvormige PV toepassing, DC management en energietransport. Het functioneren van de opstelling omvat energieopbrengst, robuustheid en gevoeligheid voor onder andere vervuiling en vocht.

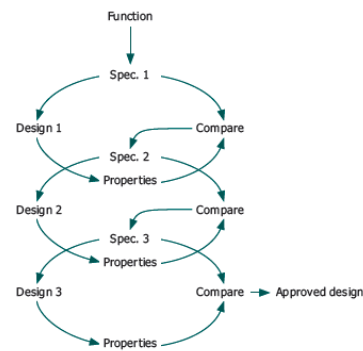
Een verdere doelstelling was dat de werking voldoende zou zijn aangetoond om in een vervolgproject de technologie voor commerciële toepassingen op te schalen.

2 Werkwijze

2.1 WP 1: Opstellen specificaties

Dit werkpakket heeft geresulteerd in een Programma van Eisen (PvE), dat gedurende het project als levend document behandeld is.

Om tot een PvE en specificaties voor de E-cover te komen, is een methodische en systematische aanpak gevolgd. In Figuur 1 is het ontwerpproces afgebeeld. De ontwerpstappen zijn een aantal malen doorlopen om tot een eindresultaat te komen dat voldoet aan de gestelde eisen, want productontwikkeling is een iteratief proces. Dat betekent dat de werkpakketten 1 t/m 4 grotendeels parallel zijn uitgevoerd.



Figuur 1: Gevolgde ontwerpproces, globaal

De ontwikkeling van het PvE is benaderd vanuit de functies van het uiteindelijke product, waarvan de E-cover (dunne film PV met de constructieve elementen voor plaatsing tussen de geleiderails) de kern is. De projectpartners hebben uitgangspunten, eisen en wensen gedefinieerd m.b.t. het ontwerp, de productie en installatie, omstandigheden tijdens gebruik, de duurzaamheid en demontage en verwijdering aan het einde van de levensduur. Dit is gebeurd in een aantal sessies en door veel e-mailcommunicatie. Het resultaat is het PvE voor het E-cover concept voor de geleiderail, dat de levensloop van het product volgt via ontwerp, productie, gebruik tot uiteindelijk weer verdwijnen (sloop). Het PvE is begonnen als globaal document en werd steeds concreter gedurende de productontwikkeling in de volgende werkpakketten. Op het moment dat het PvE voldoende detail bevatte om ook de ontwerpcriteria te omvatten, is de conceptontwikkeling gestart (werkpakket 2).

2.2 WP 2: Ontwikkelen E-cover concept

Dit werkpakket heeft geresulteerd in een vastgelegd conceptontwerp (technische ontwerpschets, conceptuele beschrijving en montagemethode) voor de PV module, getoetst aan het PvE. Andersom heeft de ontwikkeling ook invloed gehad op het PvE, zoals toegelicht in paragraaf 2.1.

Het ontwerpteam is samengesteld uit de projectpartners TNO (dunne film PV, productontwikkeling, elektrisch ontwerp, materialen, constructies), Heijmans (infradeskundigheid, mechanisch ontwerp en engineering) en Femtogrid (elektrisch ontwerp, power optimizers, innovatieve DC-toepassing in de infrastructuur). In een serie werksessies heeft het team ontwerp oplossingen gegenereerd met het PvE als basis en een morfologische kaart en diverse ontwerp tools als hulpmiddelen. Daarmee zijn vervolgens ontwerpkeuzes gemaakt.

Op basis van het conceptontwerp zijn drie ontwerp opdrachten voorbereid en uitgevoerd, elk door een groep van 3 à 4 studenten aan de Hogeschool van

Amsterdam (opleiding Engineering, Design & Innovation) in samenwerking met TNO/ Solliance. Daarnaast is één opdracht uitgevoerd door studenten van ROC Mondriaan te Delft in samenwerking met TNO.

- Sept 2016 – jan 2017: HvA-innovatielab 1: veilige en stevige bevestiging van zonnecellen op de geleiderail (4 studenten).
- Nov 2016 – febr 2017: ROC Mondriaan: mechanische aspecten van de onderconstructie op de geleiderail.
- Febr – juni 2017: HvA-innovatielab 2: plug-and-play PV op geleidebarrier, met nadruk op energieopbrengst en -opslag (3 studenten).
- Sept 2017 – jan 2018: HvA-innovatielab 'Warmte': autonoom elektrisch systeem ontwerpen voor op een "MESH barrier" (4 studenten).

2.3 WP 3: Dunne film PV

Dit werkpakket heeft, op basis van verzamelde informatie over bestaande technologieën en experimentele gegevens, geresulteerd in een keuze voor enkele typen dunne film PV.

Van verschillende wereldwijd beschikbare dunne film PV technologieën zoals a-Si, CIGS, CdTe en Perovskite is informatie verzameld over de specificaties, de toepassingsmogelijkheden en de verwachte technologische ontwikkelingen. Deze informatie is geëvalueerd tegen de belangrijkste randvoorwaarden voor integratie van PV op de geleiderail: een licht, onbreekbaar en vervormbaar substraat, een hoge energieopbrengst per vierkante meter in horizontale/gekromde plaatsing, de interconnectie van cellen tot modules met minimale verliezen en een lange levensduur. Het PvE heeft hiervoor gediend als basis, maar de werkzaamheden hebben ook het PvE verder aangescherpt.

2.4 WP 4: Engineering

Dit werkpakket heeft geresulteerd in werktekeningen, een business case en een veiligheidsanalyse.

Een multidisciplinair team vanuit Heijmans, TNO en FemtoGrid heeft intensief samengewerkt en op diverse gebieden detailanalyses uitgevoerd en omgezet in een detailontwerp. Belangrijke aspecten waren de vorm van de dragende constructie, bevestiging op de geleiderail, bevestiging van PV op de dragende constructie, flexibiliteit van de materialen i.v.m. de veiligheidsfunctie van de geleiderail en de configuratie van alle mechanische en elektronische componenten.

Tevens zijn onder leiding van Provincie Noord Holland criteria opgesteld voor een pilotlocatie en is een locatie gevonden die daaraan voldeed.

2.5 WP 5: Prototyping en beproeving – Go/No-go beslissing

In dit werkpakket is een prototype gebouwd op basis van de tekeningen en gegevens uit werkpakket 4. Op een proefgeleiderail met 12 m lengte op het terrein van Heijmans zijn 'E-covers' met 3 typen PV gemonteerd en aangesloten om het functioneren te kunnen beoordelen. Een veiligheidssessie heeft plaatsgevonden met experts van binnen en buiten het projectteam. Een aantal tests op (onderdelen van) de opstelling is uitgevoerd om het effect van relevante mechanische en

fysische invloeden te onderzoeken. De resultaten hebben aanleiding gegeven tot kleine ontwerpverbeteringen alvorens de opstelling is gebouwd voor de volledige pilot (WP 6). Bovendien is in deze fase de business case verder uitgewerkt.

Na dit werkpakket is op basis van de verzamelde informatie een beslissing genomen over het al of niet doorzetten van de pilotproef. Besloten is de proef door te zetten.

2.6 WP 6: Pilot

Dit werkpakket heeft geleid tot een werkende pilotopstelling langs de N194 bij Heerhugowaard in Noord-Holland. Tegelijk met de bouw van de opstelling is ook de monitoringsapparatuur (WP7) geïnstalleerd.

Voor de pilotbouw zijn vergunningen aangevraagd en is afgestemd met de weg- en de gebiedsbeheerder. Voor de start van de pilotperiode hebben de projectpartners afspraken gemaakt over hoe de noodzaak van vervanging van defecte elementen te beoordelen en hoe de bijbehorende kosten te verdelen. Besloten is PV-modulen van twee goed functionerende typen te installeren, in totaal 30 PV-modulen. De dragende constructieve elementen zijn geproduceerd, 72m geleiderail is voorzien van de E-cover, de optimizers zijn ondergronds in een afgesloten rek gemonteerd en via kabels aan de PV-modulen gekoppeld, de bekabeling naar de omvormers is gelegd en de aansluiting op het net is gerealiseerd.

2.7 WP 7: Monitoring

Tijdens de voorbereiding van de pilot is een monitoringsplan opgesteld met als doel:

- te evalueren hoe het MESH-systeem functioneert in de praktijk, zowel qua veiligheidsaspecten als qua elektriciteitsproductie;
- te onderzoeken wat mogelijke technische verbeteringen zijn;
- en input te leveren voor aanscherping van de business case.

Op locatie zijn tijdens de pilotperiode diverse parameters min of meer continu gemeten, zoals weercondities, PV-temperatuur, bewegingen en energieopbrengst. Daarnaast is regelmatig een visuele inspectie uitgevoerd op onder andere vervuiling en algemene staat van de gehele opstelling.

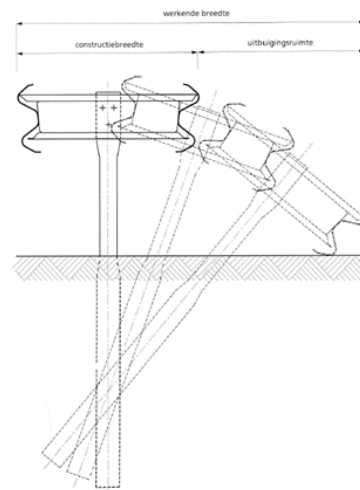
3 Resultaten

3.1 WP 1: Opstellen specificaties

3.1.1 *Programma van Eisen (PvE)*

Dit werkpakket heeft geresulteerd in een Programma van Eisen (PvE), dat gedurende het project als levend document behandeld is. Het PvE bevat de verzameling criteria waaraan het ontwerp moet voldoen en vormt de toetssteen voor beoordeling van ontwerp oplossingen. Het eisenprogramma richt zich op de combinatie of integratie van een PV-systeem en een afschermingsvoorziening, preciezer in de vorm van een geleiderail en/of barrier.

In het PvE zijn eisen geformuleerd en wordt verwezen naar relevante normen en regelgeving m.b.t. de twee hoofdfuncties van het systeem, voertuiggeleiding en elektriciteitsproductie. Voor voertuiggeleiding worden eisen gesteld aan de afschermende constructie, bij elektriciteitsproductie spelen met name de veiligheidsaspecten een rol. Het MESH systeem mag de voertuigkerende en -geleidende werking niet nadelig beïnvloeden (zie Figuur 2) en moet elektrisch veilig zijn bij aanrijdingen (impact) en oneigenlijk gebruik (zoals overstappende personen in situaties met autopech of in geval van misbruik zoals vandalisme).



Figuur 2: Principewerking geleiderail bij aanrijdingen (links) en standaard geleiderail (rechts)

Diverse invloeden van buitenaf kunnen de genoemde hoofdfunctie(s) beïnvloeden. In het PvE zijn een groot aantal invloedsfactoren geïdentificeerd zoals op het gebied van calamiteiten, gebruik/ misbruik en klimatologische omstandigheden. Bij de inventarisatie is bepaald óf deze invloedsfactoren van relevante invloed worden geacht en of hier voor het project/ pilot nadere uitwerking vereist is.

Er zijn drie categorieën vastgesteld om de invloedsfactoren in te schalen:

- 1 meenemen in vervolg, dat wil zeggen een maatgevend niveau kwantificeren, en het ontwerp daaraan toetsen op een nader te bepalen wijze;
- 2 niet nader onderzoeken. Bij invloeden waarvan verwacht wordt dat ze een minimale rol zullen spelen of het zeer voor de hand ligt dat ze niet voor problemen zullen zorgen;

- 3 ervaren in pilot. Invloeden die niet tot een onveilige situatie kunnen leiden/ waartegen een eenvoudige tegenmaatregel is te treffen, dat in de pilot kan worden bekeken wat de invloed is en hoe daar mee om te gaan.

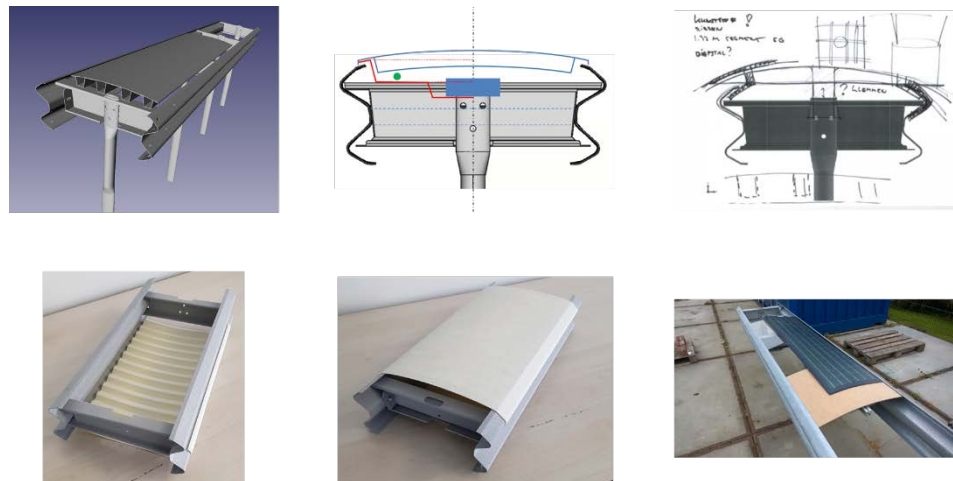
De ontwikkeling van het Programma van Eisen is gelijk opgegaan met de conceptontwikkeling en ontwerpdefinitie, namelijk van een kwalitatief naar een meer kwantitatief karakter. In aanvang zijn de eisen vrij globaal beschreven gekwantificeerd, gaandeweg is dit verder aangescherpt. In het Programma van Eisen wordt onderscheid gemaakt tussen eisen die meegenomen kunnen in de pilot of op een later stadium

3.2 WP 2: Ontwikkelen E-cover concept

3.2.1 Conceptontwikkeling

In een serie werksessies heeft het team ontwerp oplossingen gegenereerd met het PvE als basis en een morfologische kaart en diverse ontwerptools als hulpmiddelen. In het morfologisch overzicht zijn voor verschillende functies en ontwerpaspecten technische oplossingen in kaart gebracht. Door verschillende oplossingen te combineren kunnen ontwerprichtingen voor de E-cover bepaald worden welke vervolgens getoetst worden met behulp van de (hoofd)criteria uit het PvE .

Bij de conceptontwikkeling is een breed scala aan ontwerptools ingezet zoals het maken van handschetsen, het opzetten van CAD-modellen, het 3D-printen van schaalmodellen en het experimenteel uitproberen van vormen en oplossingen op ware grootte op een stuk geleiderail. In Figuur 3 zijn enkele afbeeldingen opgenomen ter illustratie van dit proces.



Figuur 3: Inzet verschillende ontwerptools bij de conceptontwikkeling

3.2.2 Prototyping

Gedurende het ontwerptraject zijn prototypen op ware grootte vervaardigd van enkele onderdelen van kansrijke ontwerpvoorstellen voor de E-cover.

In Figuur 4 zijn een d.m.v. thermovormen uit kunststof vervaardigde onderbak en een bijbehorende kap te zien op een stuk geleiderail van 4 m lengte (dit is de standaard moduulmaat) bij het MEC-lab van TNO in Delft. Bij dit ontwerpvoorstel vormt de bovenkap de drager van de (links nog niet aangebrachte) flexibele PV-module. In de onderbak kunnen solar kabels, micro-omvormers en/of optimizers opgenomen worden.



Figuur 4: Prototypen van een kunststof onderbak en kunststof deksel

In de ontwikkelfase is in een vervolgslag bij Heijmans in Rosmalen een opstelling van 12 m geleiderail geplaatst (de lengte van 3 maal de standaard moduulmaat) waarop naast de kunststof uitvoering van de E-cover metalen uitvoeringen onderzocht zijn, te weten een stalen bodemdeel in combinatie met een aluminium bovenkap, zie Figuur 5.



Figuur 5: Metalen uitvoering concept E-cover

Onder andere door uitvoering van een uitvoerige risicoanalyse en twee inhoudelijke sessies met een expert panel (zie ook 3.4.3) is uiteindelijk gekozen voor een volledige kunststof variant.

3.3 WP 3: Dunne film PV

In het project zijn 3 typen dunne film PV-modulen voor toepassing in de pilot door Solliance onderzocht.

Dit betreft 2 CIGS (Copper, Indium, Gallium, Selenium) modules, respectievelijk van leveranciers MiaSolé en Global Solar (beide producenten deel uitmakend van de Hanergy groep) en 1 amorf Si (Silicium) module van het Nederlandse HyET Solar. Zie Tabel 1 en Figuur 6, Figuur 7 en Figuur 8.

Tabel 1 Overzicht 3 typen dunne film PV

#	Leverancier	Type	Vermogen	Lengte
1	MiaSolé	FLEX 120N	30V5@3A93 (120W)	2598 mm
2	Global Solar	PowerFLEX BIPV	16V5@5A4 (90W)	2017 mm
3	HyET Solar	Powerfoil	17V@1A25 (22W)	1230 mm

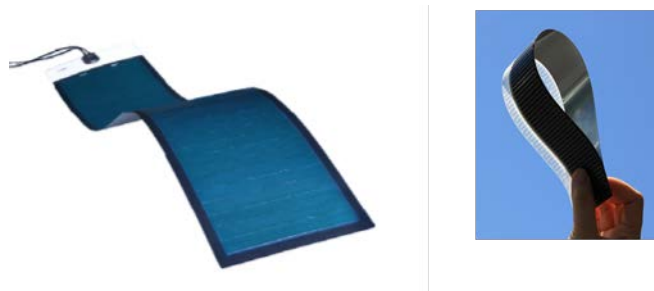
Van deze 3 typen flexibele modules zijn samples besteld en deze zijn door Solliance PV-technisch beoordeeld en op de 12 m proefopstelling op het terrein van Heijmans bekeken op installatietechnische aspecten (aankomen PV-modules, aansluiten PV-connectoren, kabeldoorvoer en -aansluitingen), zie ook 3.5.

Uiteindelijk is gekozen om met 2 typen de pilot in te gaan, namelijk de CIGS modules van MiaSolé en Global Solar.

Belangrijkste criteria hierbij waren:

1. voldoende vermogen per strekkende meter module (minimaal 25 Wp/m¹);
2. mechanische robuustheid van de modules;
3. verkrijgbaarheid en levertijd;
4. mogelijkheid om de junction box aan de achterzijde van de module te monteren (i.v.m. verholen kabelloop).

Op deze criteria scoorden de beide typen CIGS modules beter dan de HyET Solar module. Bij de Global Solar modules verzorgde de leverancier de plaatsing van de junction boxen aan de onderzijde, bij de modules van MiaSolé heeft Solliance dit uitgevoerd, zie Figuur 9.



Figuur 6: MiaSolé module



Figuur 7: Global Solar module



Figuur 8: HyET Solar module



Figuur 9: Montage junction box aan de onderzijde van de MiaSolé module

3.4 WP 4: Engineering

3.4.1 Ontwerp E-cover

Het definitieve ontwerp voor de E-cover, afgebeeld in Figuur 10, is opgebouwd uit 3 kunststof delen: een bodemdeel, een deksel en een afdekkap. Het bodemdeel en de deksel vormen samen de onderconstructie voor de PV-modulen. Het ontwerp is als volgt opgebouwd:

1. het bodemdeel wordt op de afstandshouders van de geleiderail gemonteerd en dient tevens als kabelgoot voor de solar kabels;
2. de PV-modulen worden (zelf)klevend aangebracht op de bovenkant van het deksel waarbij de junction box met solar kabels door een gat in het deksel steken zodat de kabels in het bodemdeel komen te liggen;
3. de transparante afdekkap is (mede in overleg met het expert panel) in een later stadium als derde onderdeel toegevoegd als extra bescherming tegen impact en mogelijk vandalisme. De kap is getextureerd uitgevoerd om hinderlijke lichtreflecties voor het passerende verkeer te voorkomen;
4. alle kunststof delen zijn vervaardigd uit slagvast polycarbonaat (PC);
5. de afdekkap en deksel met daarop aangebrachte PV-module worden als subsamenstelling voorgemonteerd en op de (pilot)locatie op de op de geleiderail aangebrachte bodemdelen bevestigd.

De uitwerking en detaillering van de kunststof delen heeft in nauw overleg met de uiteindelijke producent Van Schagen (kunststof verwerkende industrie te Rotterdam) plaatsgevonden.



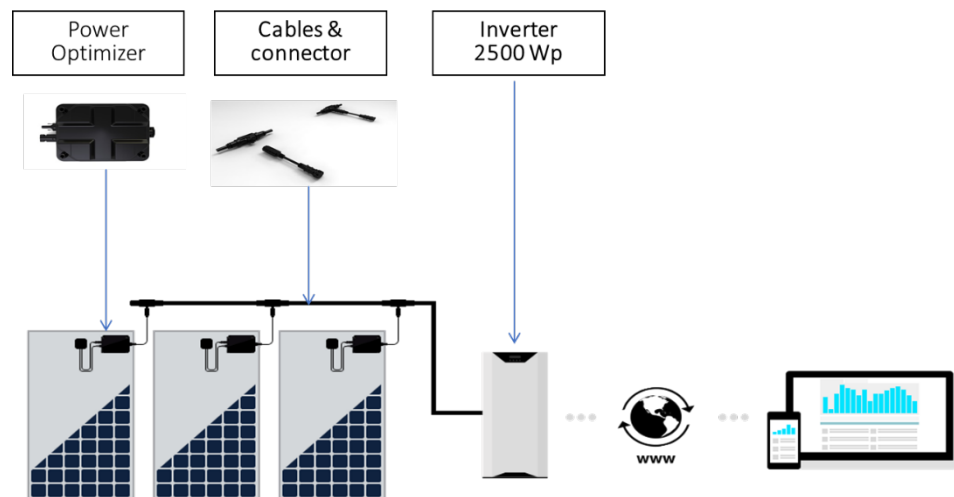
Figuur 10: Definitief ontwerp bestaande uit 3 kunststof delen: bodemdeel, deksel en afdekkap

3.4.2 *Elektrisch systeem*

Het uitgewerkte en toegepaste elektrisch systeem is dat van projectpartner Femtogrid met Solar Power Optimizers en DC-AC Inverters, zie Figuur 11. De Solar Power Optimizers (SPO's) verhogen de 48 VDC gelijkspanning komend uit de panelen naar 380 VDC (de busspanning), waarna met de inverters (opgesteld in een straatkast) de omvorming naar 230 VAC wisselspanning plaatsvindt. Op paneelniveau vindt hierbij zogenaamde Maximum Power Point Tracking (MPPT) en datacollectie plaats.

Omwille van de veiligheid is gekozen de optimizers niet in het bodemdeel maar buiten de geleiderail te plaatsen. De geleiderail blijft hierdoor conform de laagspanningsrichtlijn aanraakveilig.

Het Femtogrid systeem kent een eigen veiligheidsoptie: bij doorbreken van de trunk-kabel (wat kan voorkomen bij het door de geleiderail schieten van een voertuig) schakelt het systeem af. Daarnaast is gekozen om in de geleiderail enkele tiltsensoren op te nemen die bij impact - ingeval van een aanrijding - en kanteling van de geleiderail t.o.v. de verticaal de uitschakeling van het systeem initiëren zonder dat de trunk-kabel doorbroken hoeft te zijn.



Figuur 11: Elektrisch systeem Femtogrid

3.4.3 Veiligheidssessies expert panel

Er is een uitgebreide risicoanalyse (Failure Mode Effect Analysis) uitgevoerd. Daarnaast zijn gedurende zowel de concept- als de detailleringsfase twee inhoudelijke sessies gehouden met een expert panel. Het panel was samengesteld uit onder meer externe, niet tot het consortium behorende partijen, zoals Rijkswaterstaat, vertegenwoordigers van wegbeheer van de Provincie Noord-Holland, een producent van geleiderail en een specialist automotieve botstesten. Op basis van de risicoanalyse en de sessies is uiteindelijk gekozen voor een volledige kunststof variant van de onderconstructie van de E-cover. De belangrijkste overwegingen hierbij zijn vooral de mechanische en elektrische veiligheid bij calamiteiten geweest: het minimaliseren van de kans op letsel bij losraken van onderdelen en het minimaliseren van de kans op elektrisch aanraakcontact. Het opnemen van enkele tiltsensoren in de geleiderail die bij impact - ingeval van een aanrijding - en kanteling van de geleiderail t.o.v. de verticaal de uitschakeling van het systeem initiëren zonder dat de trunk-kabel doorbroken hoeft te zijn, ondervond instemming van het panel.

Figuur 12: Expert panel tijdens een van de sessies



3.4.4 Eerste versie businesscase voor Go/No-go beslissing in WP5

In deze paragraaf wordt ingegaan op de business case van het MESH-systeem zoals deze is opgesteld na het eerste ontwerp. Deze business case was de basis voor de Go/No-go beslissing voor de realisatie van de pilot. In de bijlage wordt meer detail gegeven van de business case, onder andere een gevoeligheidsanalyse. In paragraaf 3.7.4 wordt een update van de business case besproken op basis van de gerealiseerde kosten en baten uit de pilot.

Omdat er in deze fase (ten tijde van het eerste ontwerp) van MESH nog geen duidelijk businessmodel vastgesteld is, is besloten de elektriciteitskosten te bepalen, zodat deze vergelijkbaar is met andere producten die elektriciteit leveren. Er is hierbij gekozen om de "Levelized Cost of Electricity (LCoE)"³ als methode te hanteren met de volgende uitgangspunten:

- de toekomstige business case wordt gemaakt voor 3 mijlpalen:
 - Pilot 2017
 - 1 km MESH-opstelling in 2018
 - 100 km MESH-opstelling in 2020
- discontovoet van 0%;
- levensduur van 20 jaar;
- CO₂-prijs meenemen is niet realistisch (is nu heel laag);
- andere duurzaamheidsvoordelen zijn niet in geld te vertalen, maar wel heel belangrijk voor het verhaal eromheen.

Voor de Go/No-go beslissing is de business case van SolaRoad (referentie: SolaRoad Business Plan Final, 6 July 2016) als uitgangspunt genomen, dat wil zeggen dat een LCoE van € 0,12 per kWh een redelijk vergelijk is (2020 schattingen voor de LCoE voor PV op huizen is € 0,09-0,13 per kWh⁴).

Inschatting van de systeemkosten van MESH zijn gedaan door de projectpartners. De verdeling van de kosten van het systeem in hoofdcomponenten voor het prototype en de uiteindelijke opschaling naar 100 km in 2020 is als volgt:

Tabel 2: MESH systeemkosten voor prototype en bij opschaling tot 100 km.

MESH-onderdeel	Prototype (€m)	Besparing opschaling	Opschaling (€m)
E-cover, PV, optimizers	578	58%	242
Regulier werk	81	83%	14
Projectafhankelijk werk	103	95%	5
Totaal	763		261

De inschattingen van de energieopbrengst zijn gemaakt door Solliance.

In de onderstaande Tabel 3 staan de resultaten voor de business case van het prototype, 1 km in 2018, 100 km in 2020 in de eerste schatting en met de september 2017 update (uiterst rechts). Duidelijk te zien is dat door de verwachte kostendaling bij een groter project de LCoE daalt. De kostendaling komt door het kunnen inzetten van o.a. goedkopere productietechnieken. Tevens is er over 2 jaar tijd een opbrengstverhoging van de PV te verwachten die tot een lagere LCoE leidt.

³ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 5th Assessment report WP3, 2014.

⁴ ECN, MKEA zon en wind op land, 2016.

Deze opbrengstverhoging zal (op basis van de historische leercurve van PV) net als de kostendaling van PV nog wel een aantal jaren doorgaan als gevolg van technische verbeteringen en productieopscaling. De terugverdiëntijd (TVT) van 20 jaar is in de range van de verwachte levensduur van de installatie van 20 jaar. Hiermee is een neutrale business case bereikt.

Tabel 3: Business case MESH

LCoE (eenvoudige methode, IPCC 2014)	Proto	1km (2018)	100km (2020)	100 km update (2020)
Investering (€m)	763	425	261	235
Onderhoud (€/m/jr)	8	4	3	2
Opbrengst (kWh/m/jr)	73,8	88,5	118,0	118,0
LCoE (€/kWh)	0,621	0,288	0,133	0,120
Vermeden CO ₂ -uitstoot @0,57 kg/kWh (ton/m/jr)	0,042	0,050	0,067	0,067
Kosten vermeden CO ₂ -uitstoot (€/ton)	1089	505	233	210
Energieopbrengst (€/m/jr)	8,85	10,62	14,16	14,16
Terugverdiëntijd (jaar)	623	67	23	20

Voor de Go/No-go beslissing zijn ook gevoeligheidsanalyses gemaakt. Deze staan in de bijlage.

Deze businesscase is in de stuurgroepvergadering van 26 september 2018 goedgekeurd. Er was bij de projectpartners voldoende vertrouwen in een positieve business case op termijn⁵.

3.5 WP 5: Prototyping en beproeving – Go/No-go beslissing

In de ontwikkelfase is in een vervolgslog op het terrein van Heijmans in Rosmalen een opstelling van 12 m geleiderail geplaatst (de lengte van 3 maal de standaard moduulmaat) waarop naast de kunststof uitvoering van de E-cover metalen uitvoeringen onderzocht zijn, te weten een stalen bodemdeel in combinatie met een aluminium deksel. Op de verschillende E-covers zijn de 3 typen geselecteerde PV gemonteerd en is bekabeling aangesloten om installatieaspecten, kabeldoorvoer en het algemeen technisch functioneren te kunnen beoordelen. De PV-modulen werden niet aangesloten met een DC-AC inverter op een netaansluiting, energie werd niet geleverd.

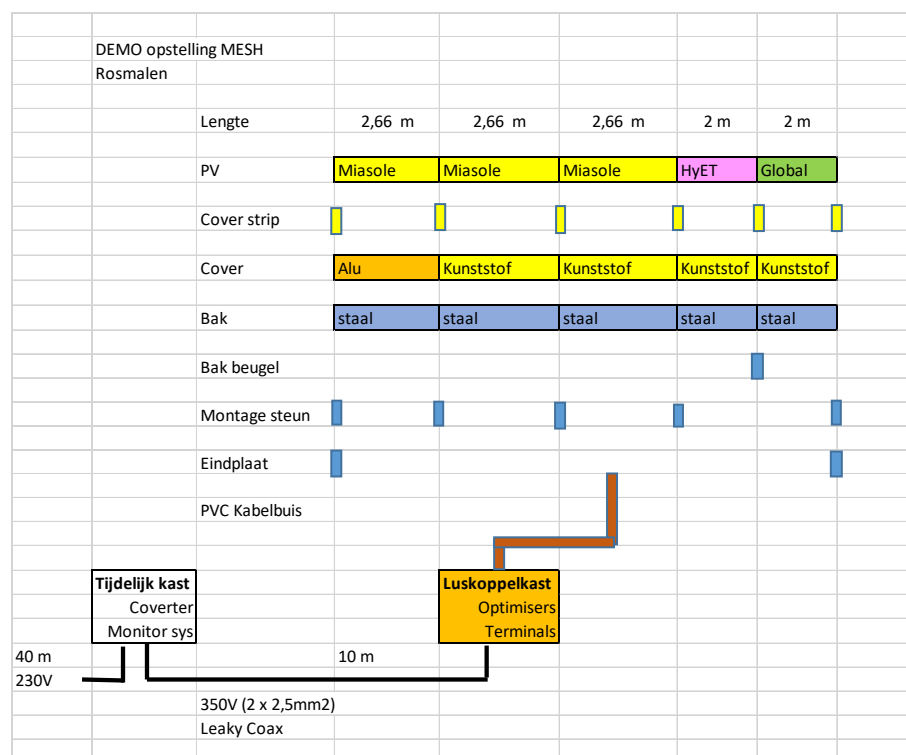
De oorspronkelijke intentie was om bij de proefopstelling ook energie op te wekken en metingen te verrichten m.b.t de energieopbrengst, enkele relevante klimatologische parameters (zoals instraling - direct/diffuus, temperatuur, luchtvochtigheid) en invloedsfactoren als vervuiling en weersbestendigheid te beoordelen. Hiertoe is ook een 'klein' monitoringsplan opgezet. In Figuur 13 is de schematische opzet van de proefopstelling te zien, in Figuur 14 enkele foto's.

In de technische werkgroep is gedurende het proces besloten om geen monitoring uit voeren en de opstelling vooral te gebruiken voor het beoordelen van

⁵ Notulen vergadering stuurgroep MESH 26-9-2018

mechanische aspecten (zoals ontwikkeling en uitproberen van montagebeugels waarmee de bodemdelen op de afstandshouders gemonteerd worden) en het optimaliseren van installatietechnische aspecten (aanbrengen PV-modulen, aansluiten PV-connectoren, kabeldoorvoer en -aansluitingen).

De proefopstelling heeft vooral een belangrijke rol gespeeld bij de definitieve keuze voor het type PV en selectie van te gebruiken materialen voor de E-cover. Bij de tweede veiligheidssessie met het expert panel, gehouden in Rosmalen, is de uiteindelijke keuze gemaakt voor een volledige kunststof uitvoering van de E-cover.



Figuur 13: Schematische opzet proefopstelling Rosmalen



Figuur 14: Proefopstelling 12 m op terrein Heijmans in Rosmalen

Een belangrijk onderdeel in deze fase van het project betrof de besluitvorming inzake de Go/No-go beslissing voor uitvoering van de pilot.

Om tot daadwerkelijk uitvoering van de pilot over te kunnen gaan zijn door de projectpartners bij de Go/No-go beslissing drie belangrijke voorwaarden leidend geweest:

1. de beheersmaatregelen uit de risicoanalyse dienen door het expert panel voldoende geacht te worden om de pilot elektrisch en mechanisch gezien veilig te kunnen uitvoeren;
2. er moet voldoende vertrouwen bij de projectpartners zijn in een positieve business case op termijn;
3. er dient een gedegen en door iedereen onderschreven overzicht van pilotafspraken opgesteld te zijn waarin kosten, taken en verantwoordelijkheden vastgelegd zijn.

Aan alle drie de voorwaarden heeft de technische werkgroep kunnen voldoen waardoor groen licht gegeven is voor uitvoering van de pilot.

3.6 WP 6: Pilot

3.6.1 *Aanleg pilot*

In de zomer van 2018 is de pilot in Heerhugowaard opgebouwd. Dit gebeurde op een nieuw stuk geleiderail op de nieuwe provinciale weg N194 (Alkmaar–Hoorn) als onderdeel van het grote renovatieproject N23 Westfrisiaweg.

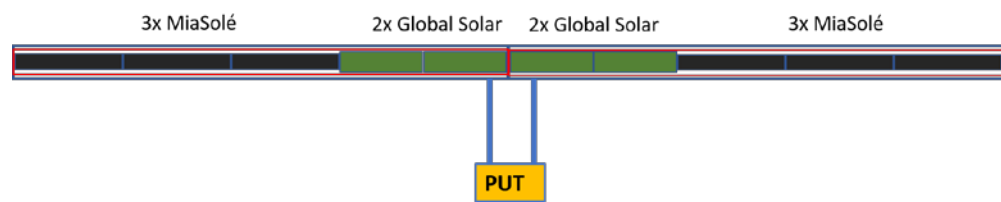
De pilot is als volgt opgebouwd, zie ook Figuur 15 en Figuur 16:

- een totale lengte van 72 m, waarvan elke 12 m samengesteld is met:
 - 2 modules Global Solar
lengte 2,00 m, breedte 50 cm, vermogen 90 Wp
 - 3 modules MiaSolé
lengte 2,60 m, breedte 37 cm, vermogen 120 Wp

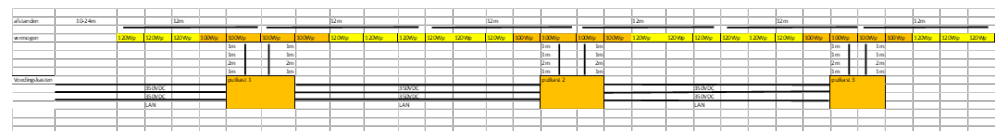
Per 24 m geleiderail is een putkast toegepast waarin de Femtogrid optimizers voor dat deel van de pilot zijn ondergebracht. De installatie van de optimizers in putkasten vormde één van de veiligheidsmaatregelen voortkomend uit de risicoanalyse. Op deze manier blijft de geleiderail conform de laagspanningsrichtlijn aanraakveilig.

Elke putkast bevat:

- 6 optimizers, waarbij 1 optimizer voor elke module MiaSolé
- 2 optimizers, waarbij 1 optimizer voor elk paar in serie geschakelde modules Global Solar
- 1 Raspberry Pi voor communicatie via ZigBee met optimizers in de put en via een vaste ethernetverbinding met de apparatuur in de straatkast

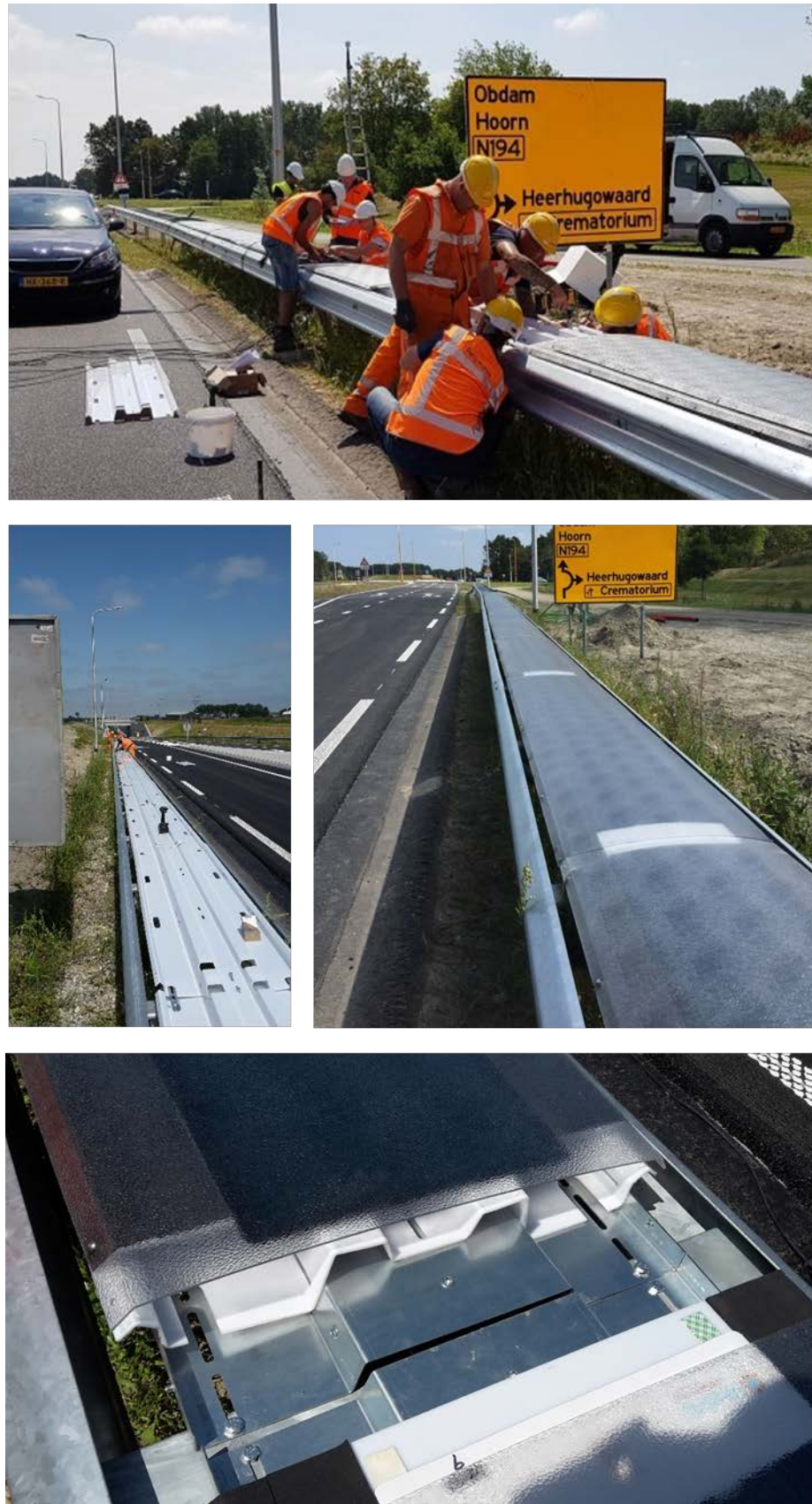


Figuur 15: Schematische opbouw 24 m pilot



Figuur 16: Schematische opbouw 72 m pilot

Voor het gehele pilot tracé bedraagt het gemiddelde vermogen op deze manier ca. 45 Wp/m¹. In Figuur 17 en Figuur 18 zijn enkele afbeeldingen van de installatie van de E-covers en putkasten te zien.

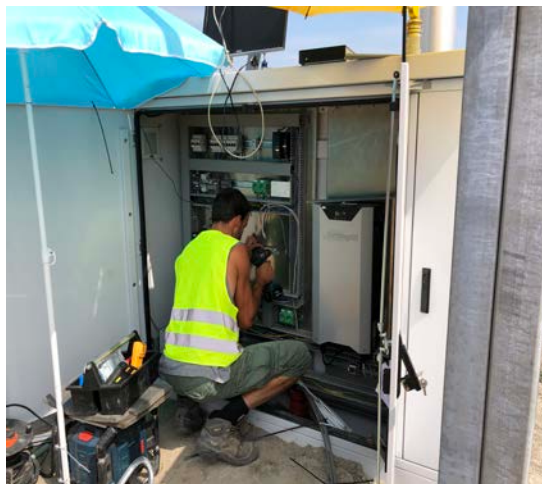


Figuur 17: Enkele afbeeldingen van de installatie van de E-covers in de zomer van 2018



Figuur 18: Een van de putkasten en rek met optimizers klaar voor plaatsing

Met de aanleg van de pilot is tegelijkertijd het monitoringssysteem geïnstalleerd, zie Figuur 19. Hierbij werden camera's, weerstation en monitoringsapparatuur (bestaande uit onder meer Femtogrid DC-AC inverters, PC, kWh meter, dataloggers, 3G-modem) in de straatkast gemonteerd en in bedrijf gesteld.

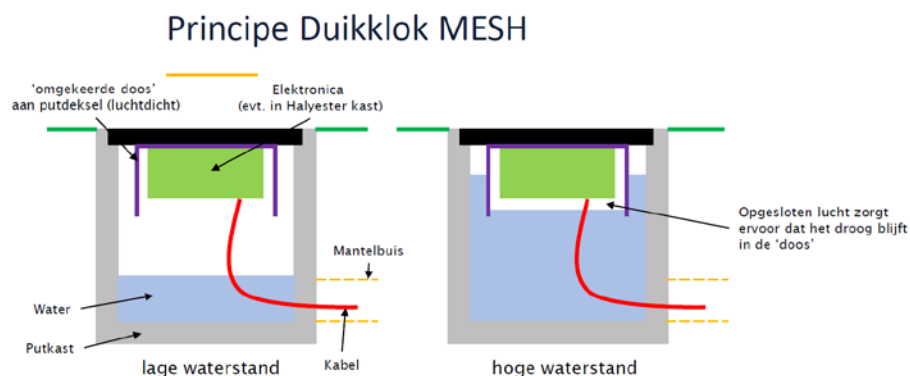


Figuur 19: Installatie monitoringsapparatuur

3.6.2 Opstart en tegenslag

Na installatie van de pilot in de zomer van 2018 is pas enkele maanden later, in december 2018, de netkoppeling gerealiseerd waardoor het systeem echt opgestart kon worden en energieopbrengst geleverd en gemonitord kon gaan worden. Reden voor de vertraging is het feit dat de eindaansluiting op het OV-punt (openbare verlichting) eerst door de netbeheerder Liander nog verzwaaard moest worden van 25A naar 35A en van een aparte energiemeter diende te worden voorzien. In die tijd deed zich echter ook een volgend probleem voor: waterindringing na hevige regenval in 2 van de 3 putkasten waardoor de optimizers tijdelijk onder water kwamen te staan en uitvielen. Het systeem is om veiligheidsredenen afgeschakeld en het projectteam heeft begin 2019 verbeteringen uitgedacht en doorgevoerd.

De putkasten en het montagerek voor de optimizers zijn hierbij aangepast zodanig dat bij waterindringing in de putten de apparatuur toch droog blijft volgens het principe van de duikklok, zie Figuur 20. Tegelijkertijd zijn de aangetaste optimizers hierbij vervangen. Na herinstallatie bleek uit de communicatiedata dat van twee optimizers geen bruikbare signalen meer ontvangen werden. Een korte inspectie toonde geen direct zichtbare schade aan optimizers, connectoren en/of aangesloten panelen. Besloten werd omwille van de beschikbare tijd en resterend budget daar op dat moment geen verdere effort in te steken. De pilot werd op die manier ingegaan met 10 te monitoren modules Global Solar (i.p.v. 12) en 17 te monitoren modules MiaSolé (i.p.v. 18).



Figuur 20: Principe duikklok in putkasten

Na deze aanpassingen is de pilot op 18 maart 2019 'echt' in bedrijf gesteld en tot 19 maart 2020 werkend geweest. Er hebben zich geen calamiteiten voorgedaan, er zijn geen incidenten geweest en er is geen onderhoud nodig geweest. De problemen met waterindringing hebben zich gedurende de pilot van een heel jaar daarna niet meer voorgedaan.



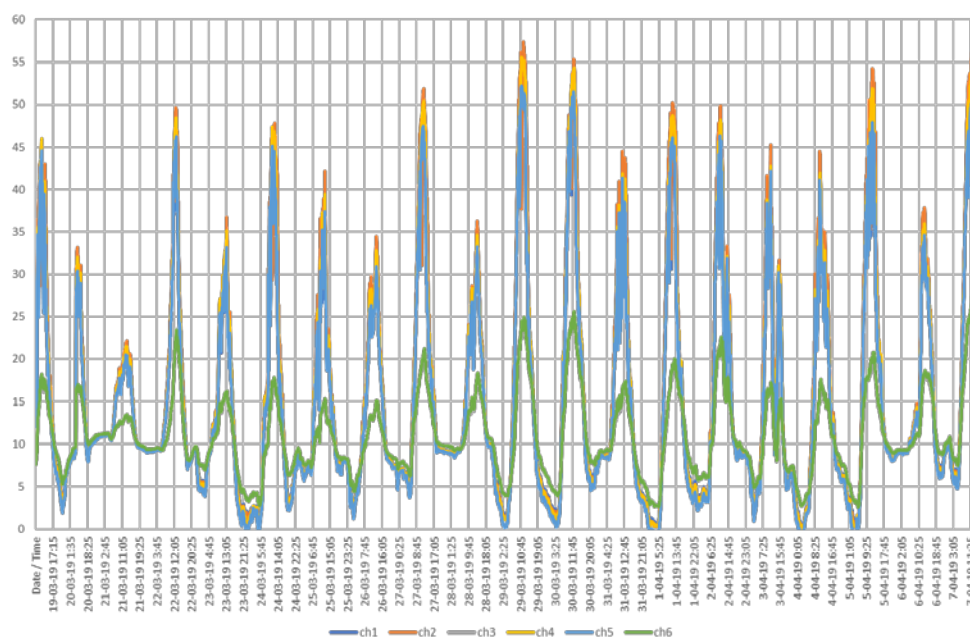
Figuur 21: Enkele beelden van de locatie gedurende het jaar van de pilot

3.7 WP 7: Monitoring, energieopbrengst en businesscase

3.7.1 *Weerstation, camera's en temperaturen E-cover*

Het geïnstalleerde weerstation, de Maximet GMX301, meet luchttemperatuur, relatieve vochtigheid, luchtdruk en zoninstraling. Twee infraroodcamera's observeerden de straatkast en de locatie; deze beelden werden lokaal op een recorder in de kast opgeslagen en periodiek (tweewekelijks) overschreven. Beelden konden niet real-time meegekeken worden. In geval van calamiteiten zouden de beelden van de recorder gehaald kunnen worden om incidenten terug te kijken. Dit heeft echter niet plaatsgevonden gedurende de pilot.

Temperaturen in de E-cover zijn met 12 thermokoppels gemonitord (van beide typen PV-modulen 2 modulen waarvan elke module met 3 thermokoppels) d.m.v. een klein draadloos netwerk. In aanvang functioneerde dit goed, zie Figuur 22, na verloop van tijd niet meer en werden zeer onrealistische meetwaarden vastgelegd. Dit probleem kon ter plekke niet worden verholpen en het alternatief, het alsnog aanleggen van een bedraad netwerk, vergde te veel tijd en kosten. Om die reden is voor de temperatuurmetingen beperktere data uit de pilot beschikbaar.



Figuur 22: Meetwaarden 6 thermokoppels in begin van de pilot

3.7.2 Resultaten PV opbrengst

Met behulp van het simulatieprogramma SAM (System Advisor Model)⁶ van National Renewable Energy Laboratory (NREL) is een indicatieve jaaropbrengst berekend voor het MESH systeem. Hierbij is uitgegaan van een horizontale opstelling van vlakke CIGS modules, zoals die in de SAM database beschikbaar zijn.

Op basis van de oorspronkelijke 12 modules Global Solar en 18 modules MiaSolé bedraagt de geschatte jaaropbrengst dan ca. 2.600 kWh.

Na de herinstallatie op basis van 10 modules Global Solar en 17 modules MiaSolé bedraagt de geschatte jaaropbrengst ca. 2.350 kWh bij dit geïnstalleerde vermogen van totaal 2.940 Wp. Deze inschatting is op basis van het oorspronkelijke ontwerp waarbij het extra (nadelige) effect van de afdekkap nog niet werd meegewogen. Rekening houdend met een bijkomend verlies van ~20-25 % door het effect van de extra afdekkap en optredende vervuiling is de uiteindelijke verwachting ca. 1.800 kWh te kunnen leveren op jaarbasis.

In de periode 19 maart 2019 – 19 maart 2020 bedraagt de levering zoals gemeten met de kWh meter in totaal 1.200 kWh, dus ca. 67% van de verwachte 1.800 kWh. Voor Nederlandse omstandigheden geldt voor zonnepanelen op daken als vuistregel een omrekenfactor van 0,8 - 0,9 voor de verhouding tussen de geproduceerde hoeveelheid kWh en het geïnstalleerde vermogen in kWp. Hier bedraagt deze verhouding $1.200 / 2.940 = 0,41$, dus grofweg de helft.

Om dit aanzienlijke verschil te kunnen verklaren, zijn de volgende mogelijke oorzaken benoemd en waar mogelijk kort onderzocht.

⁶ Voor informatie over het programma SAM zie: <https://sam.nrel.gov/>.

1. Slecht functionerende individuele componenten

Is er sprake geweest van extreem slecht functionerende individuele PV-modulen en/of optimizers in het systeem?

Dit is na de herinstallatie met 10 modulen (5 paar) Global Solar en 17 modulen MiaSolé niet waargenomen of uit de monitoringsdata af te leiden en dus niet het geval geweest. Er zijn geen 'verdachte' optimizers te zien en ook geen andere defecten aan de elektrotechnische installatie waargenomen.

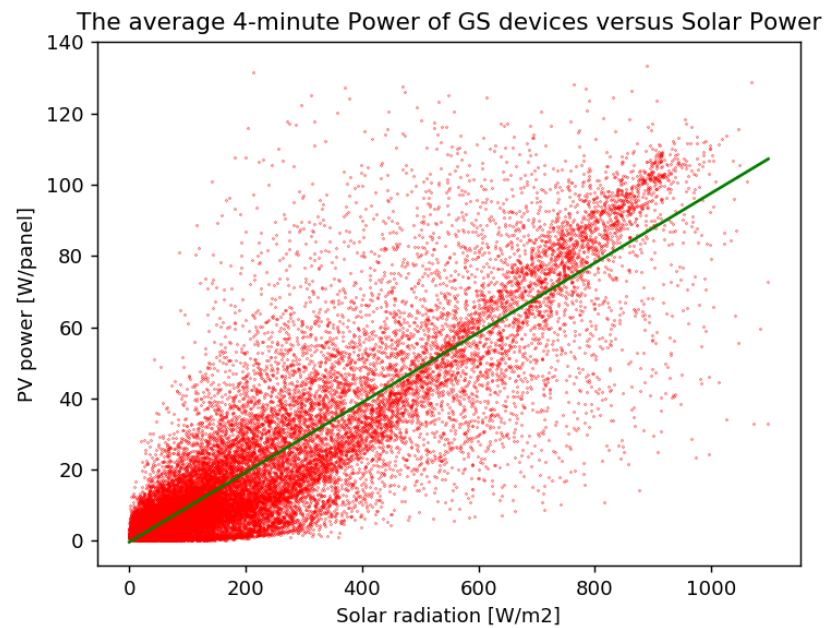
2. Drempelwaarden van de optimizers

Heeft een mogelijke drempelwaarde bij de optimizers in relatie tot de hoeveelheid instraling een rol gespeeld? Dit in relatie tot het gegeven dat de optimizers met een toelaatbaar aansluitvermogen van nominaal 310 W zijn overgedimensioneerd.

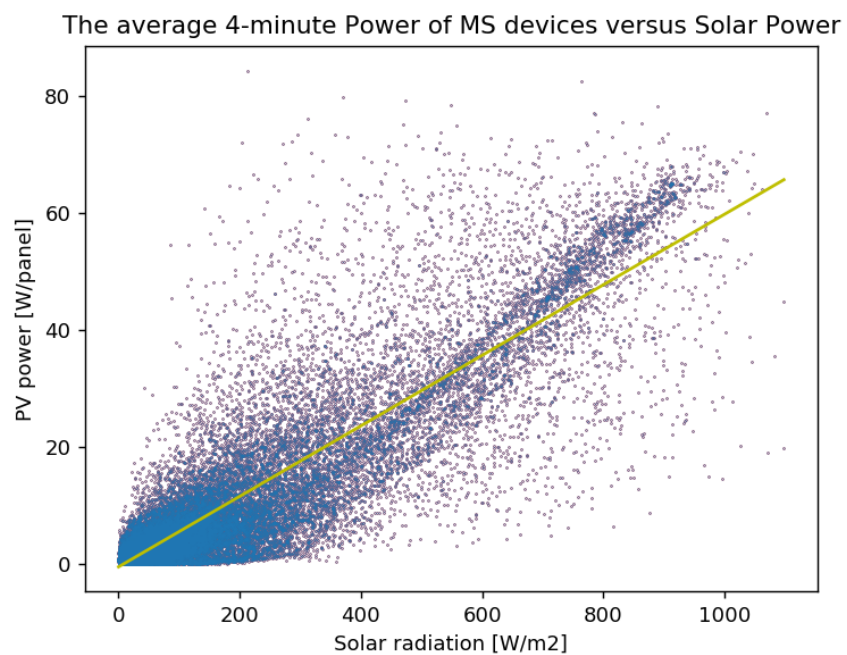
De relatie tussen het geleverde vermogen van de 5 paar in serie geschakelde Global Solar modulen en de 17 MiaSolé modulen en zoninstraling zijn geanalyseerd, zie de puntenwolken in Figuur 23 en Figuur 24.

Met regressieanalyse (kleinste-kwadratenmethode) is een lineaire vergelijking van beide typen CIGS modulen bepaald per m² moduleoppervlak, zie Figuur 25 en Figuur 26.

Er is wel enig verschil en verschuiving te zien bij het 'inkomen' van de 2 typen CIGS-panelen bij lage instraling; de MiaSolé modulen komen iets later op (bij ca. 8 W/m²). Dit verklaart het grote verschil tussen prognose en werkelijke opbrengst echter niet.

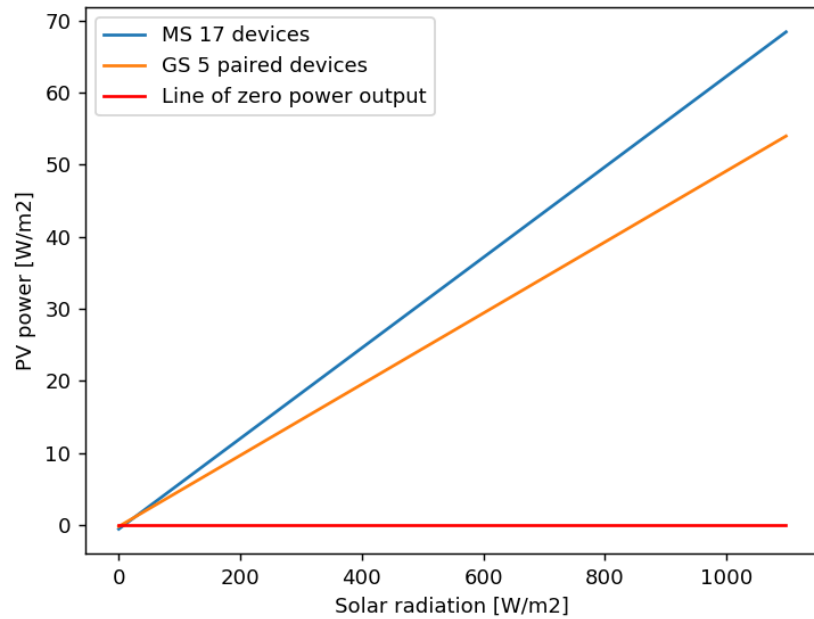


Figuur 23: Vermogen vs. instraling Global Solar modules, 5 paar



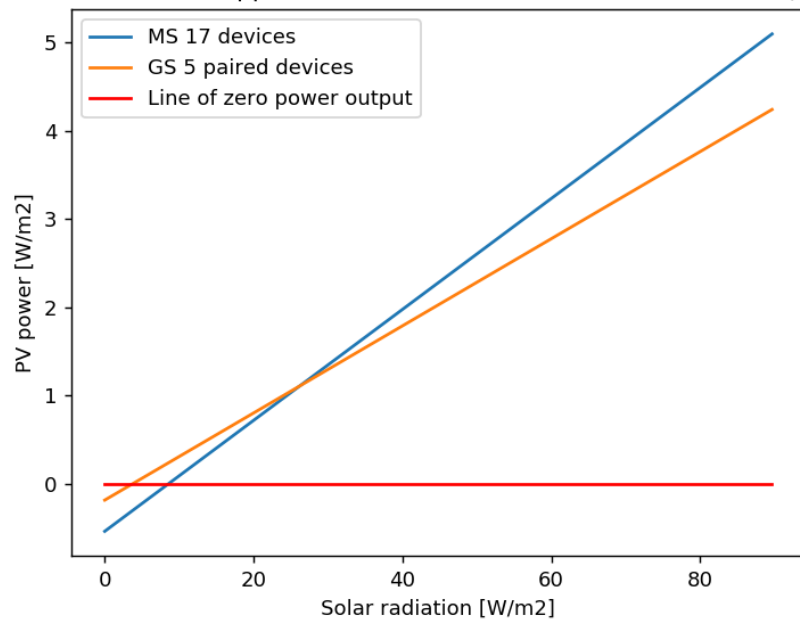
Figuur 24: Vermogen vs. instraling MiaSolé modules, 17 stuks

Linear approx. of relation Irradiance and Production (corrected to m2)



Figuur 25: Lineaire regressie Global Solar en MiaSolé vergeleken

Detail of linear approx. of relation Irradiance and Production (m2)



Figuur 26: Lineaire regressie Global Solar en MiaSolé bij lage instraling

3. Prestatie van de PV-modulen, performance ratio

Hoe presteren de PV-modulen, wat is de zogenaamde Performance Ratio op een schaal van 1-10 en is dit ongewoon?

Vanwege de regionale verschillen en de ieder jaar weer andere zoninstraling wordt gebruik gemaakt van een factor die onafhankelijk hiervan is. Dit is de Performance Ratio (PR). Dit getal geeft in feite aan hoe goed het systeem presteert.

De formule is:

$$PR = \frac{E/P}{H/G} = \frac{Y_w}{Y_r}$$

Met:

E = de opbrengst in Wh

P = het geïnstalleerd vermogen in Wp

H = de werkelijke instraling in Wh/m²

G = de referentie instraling van 1000 Wh/m²

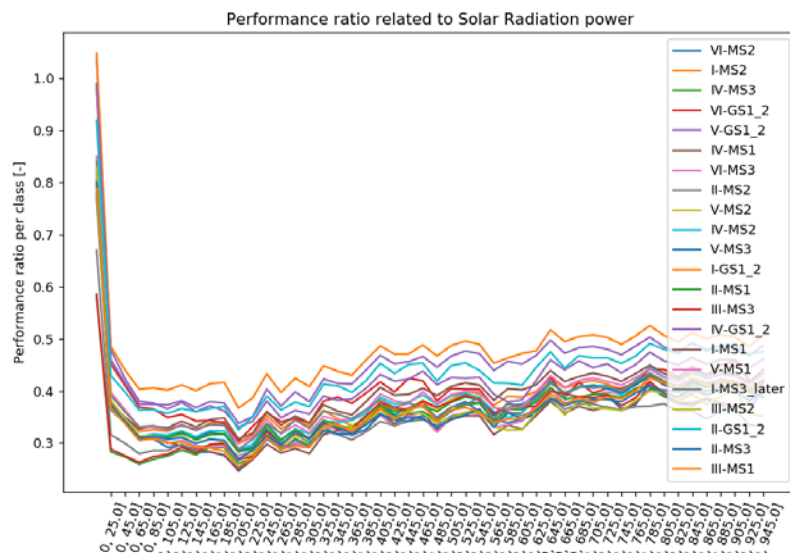
Y_w = de werkelijke opbrengst

Y_r = de referentieopbrengst

Als het systeem naar behoren functioneert, is de PR min of meer constant. Zo niet, dan kan er sprake zijn van defecten of (PV) degradatie.

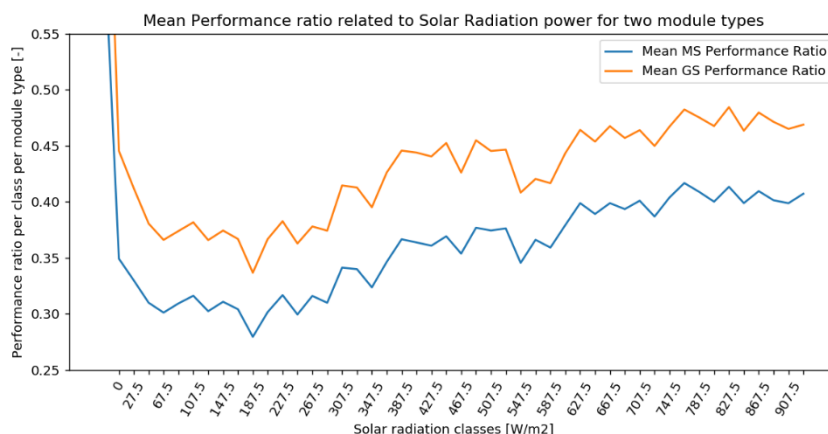
Voor Nederland is een PR van ca. 77% een berekende gemiddelde waarde⁷.

In Figuur 27 en Figuur 28 is de uit de analyse berekende PR voor de MESH PV-modulen weergegeven, als totaaloverzicht en per type module gemiddeld.



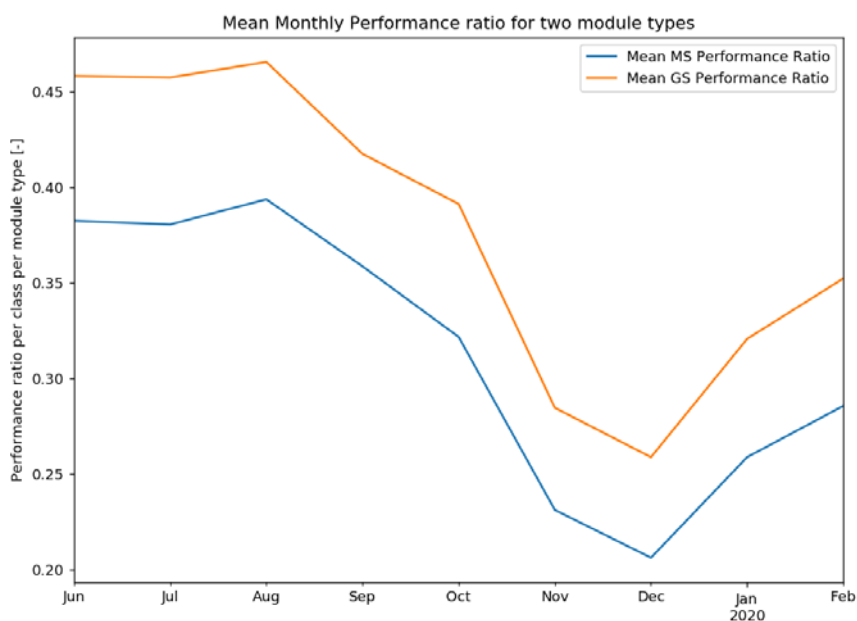
Figuur 27: Performance Ratio Global Solar en MiaSolé modulen

⁷ initiatief Tel de Zon – Moraitis et al., 2016



Figuur 28: Performance Ratio gemiddeld voor Global Solar en MiaSolé module

In Figuur 29 is de maandelijkse fluctuatie en het verloop van zomer naar winter te zien van de PR per type module gemiddeld gedurende een deel van de pilot.



Figuur 29: Performance Ratio maandelijks verloop van zomer naar winter

Over het algemeen is de PR laag; de waarden liggen tussen 30% en 50% en te zien is dat een lagere instraling een iets lagere waarde geeft. De PR schommelt rond de 40% en is in die zin redelijk constant, echter constant aan de lage kant. Dit is in lijn met de eerder geconstateerde verhouding van 41% tussen de geproduceerde hoeveelheid kWh en het geïnstalleerde vermogen in kWp.

4. Effect afdekkap

Is het effect van de extra polycarbonaat afdekkap (plus luchtlaag) groter dan ingeschat?

Er is een verlies van ~20-25 % aangenomen door het effect van de extra afdekkap en daarbij optredende vervuiling, mogelijk is dit te laag ingeschat. Dit lijkt nu de meest waarschijnlijke oorzaak van de relatief lage opbrengst ten opzichte van de berekende en verwachte prognose.

De effecten van de afdekkap kunnen betrekking hebben op:

- het optreden van lichtreflectie en -absorptie;
- de invloed van de luchtspleet tussen kap en PV
 - interne lichtreflectie
 - warmteaccumulatie
- de invloed van de kromming van het bovenzvlak;
- de invloed van de textuur van het bovenzvlak (zie Figuur 30);
- het aanhechten van vervuiling.

Metingen onder een zonn simulator met en zonder afdekkap kunnen hier verder inzicht geven. Buiten de scope van het project zal dit in overleg met Solliance aanvullend uitgevoerd kunnen worden wanneer daar gelegenheid voor is.

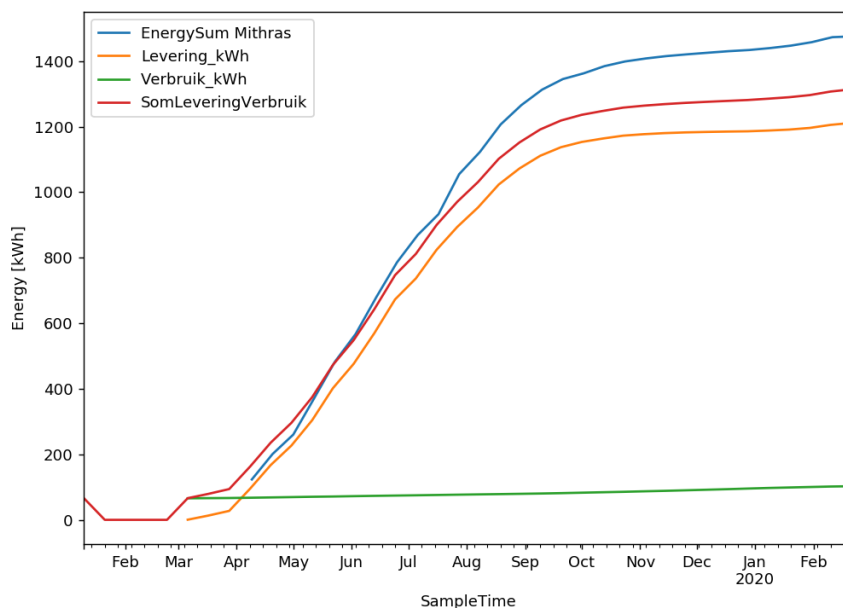


Figuur 30: Materiaalstructuur 3 mm polycarbonaat afdekkap

5. Kabel-/transportverliezen

De invloed van mogelijke verliezen tot aan de kWh-meter zijn indicatief beoordeeld door de opbrengstmetingen van de kWh-meter in de straatkast te vergelijken met de door het DC-systeem geproduceerde en via de optimizers in de putten geregistreerde hoeveelheid energie.

Het verschil tussen de twee cumulatieve meetwaarden is weergegeven in Figuur 31. Het verschil tussen de door de kWh-meter geregistreerde energie (zijnde de som van levering en het eigen verbruik) en de door het DC-systeem geproduceerde energie (Mithras) bedraagt ca.10%. Op basis van praktijkervaringen wordt deze waarde niet dusdanig afwijkend geacht dat dit het grote verschil tussen prognose en werkelijke opbrengst kan verklaren. Het kan echter wel een deel van de verklaring zijn.



Figuur 31: Cumulatieve vergelijking energiemetingen kWh-meter en DC-systeem

3.7.3

Optimalisatie PV opbrengst

Om de PV opbrengst te verhogen is een aantal opties aan te geven:

- een (losse) afdekkap kan vermeden worden door het toepassen van een robuuste mee-gelamineerde frontsheet op de PV-module;
- het benutten van de volledige breedte van 60 cm van MESH geeft een theoretisch vermogen van respectievelijk 60 Wp/m^2 (omgerekend vanuit Global Solar $0,5 \text{ m} \times 2,0 \text{ m} - 100 \text{ Wp}$) en 80 Wp/m^2 (omgerekend vanuit MiaSolé $0,37 \text{ m} \times 2,6 \text{ m} - 130 \text{ Wp}$). Dit zijn dan custom made uitvoeringen waar grote afnames tegenover staan;
- het toepassen van dunne flexibele (gebogen) silicium cellen (zoals door TNO-ECN toegepast op Lightyear One) als alternatief voor CIGS is in potentie aantrekkelijk, ook qua verkrijgbaarheid en bewezen productietechnische maakbaarheid.

Er passen dan ca. $4 \times 6 = 24$ cellen (van $6'' \times 6''$) per strekkende meter op een flexibele backsheet, dit komt ongeveer overeen met 100 Wp bij 4 W per cel. Dit kan in de praktijk misschien nog hoger zijn; bij 5 W is dit al 120 Wp .

Met de omrekenfactor van $0,8$ voor de verhouding tussen de geproduceerde hoeveelheid kWh en het geïnstalleerde vermogen in kWp komt dit bij 100 Wp/m^2 op een prognose van 80 kWh/jr/m^2 .

3.7.4

Vernieuwde businesscase

In deze paragraaf wordt ingegaan op de resultaten uit de realisatie van de pilot en de monitoring voor zover deze van belang zijn voor de business case. Potentiële verbeteringen door herontwerp worden besproken in hoofdstuk 4. In de bijlage worden meer details gegeven over de business case.

Het oorspronkelijke idee van het MESH-systeem was dat de PV-modulen op de geleiderails gemonteerd konden worden, zodat er bespaard zou worden op een

onderconstructie voor de PV. Tevens zouden in het ontwerp onderdelen als optimizers (of micro-inverters) in een onderconstructie tussen de geleiderails passen. Naar aanleiding van de veiligheidssessies is het ontwerp is als volgt aangepast:

1. MESH heeft een extra anti-reflecterende afdekkap gekregen bovenop de PV
2. De optimizers zijn geplaatst in een ondergrondse put.

Dit heeft de volgende consequenties voor de businesscase van de pilot-installatie:

1. de afdekkap heeft een verminderde opbrengst van de PV tot gevolg door de verminderde doorlatendheid. Dit was ingeschat op 20 - 25%;
2. er zijn extra kosten voor de put en de afdekkap. Voor de pilot zijn de realisatiekosten uitgekomen op € 1800/m (opgave Heijmans). De verdeling van deze kosten over de hoofdcomponenten van het systeem staat in Tabel 4.

Tabel 4: Business case MESH

MESH-onderdeel	(€m)
E-cover, PV, optimizers	605
Regulier werk	515
Projectafhankelijk werk	680
Totaal	1.800

De opstelling is op 18 maart 2019 in bedrijf gesteld en tot 19 maart 2020 werkend geweest. De opstelling heeft goed gefunctioneerd, er zijn geen incidenten geweest en er is geen onderhoud nodig geweest.

De opbrengst is gesimuleerd in SAM-NREL; de geschatte jaaropbrengst van de pilot bedroeg 36 kWh/jr/m², dit op basis van het oorspronkelijke ontwerp waarbij het extra (nadelige) effect van een afdekkap nog niet werd meegewogen. Doen we dit wel (inschatting 20 – 25% verlies) dan bedraagt dit 27,5 kWh/m². Zoals in paragraaf 3.7.2 is aangegeven, is er 18,3 kWh/jr/m² gemeten in de pilot (met extra afdekkap).

Er zijn meerdere verbeteringen mogelijk die de potentie van MESH in de toekomst verhogen. Hierbij gaan we ter verhoging van de elektrische veiligheid allereerst uit van de plaatsing van de optimizers in de ondergrondse put. Deze oplossing is door de veiligheidsexperts goedgekeurd. Potentieel te verbeteren is dan:

- minder materiaalgebruik voor de MESH onderconstructie en afdekkap; nu is zowel een onderconstructie voor PV als een afdekkap toegevoegd; één van beide zou dunner kunnen of vervangen worden door een robuuste meegelamineerde frontsheet op de PV module;
- verlies in lichtdoorlatendheid van de afdekkap beperken van 20% naar 5%, bijvoorbeeld door toepassing van een robuuste frontsheet;
- betere benutting van de ruimte tussen de geleiderails door bedekking met PV: in plaats van 37 cm breedte volledig benutten van de breedte van 60 cm door toepassing van custom made CIGS modules (hiervoor is grote afname nodig);
- toepassen van dunne flexibele (gebogen) silicium cellen i.p.v. CIGS vanwege de goede verkrijgbaarheid en maakbaarheid hiervan.

Potentieel bij opschaling over 5 jaar is:

- lagere kosten door massaproductie;
- hogere efficiëntie van PV van nu 16% naar 22% over 5 jaar (zie bijlage).

Tabel 5 geeft de inschatting van de kostendaling als gevolg van opschaling is per hoofdcomponent (opgave Heijmans).

Tabel 5: Business case update

MESH-onderdeel	Prototype (€m)	Besparing opschaling	Opschaling (€m)
E-cover, PV, optimizers	605	50%	303
Regulier werk	515	5%	489
Projectafhankelijk werk	680	25%	510
Totaal	1.800		1302

Er zitten relatief veel kosten in het werk en minder in de materialen van de E-cover zelf. Op het werk is door opschaling minder te besparen omdat de werkzaamheden – bij gelijkblijvende opstelling – niet wegvallen. Bij de E-cover en PV zijn nog schaalvoordelen en inkoopvoordelen te behalen. Ook is de verwachting dat PV net als afgelopen jaren nog in kosten daalt.

Met bovenstaande gegevens is de businesscase bijgewerkt voor de gemaakte kosten van het prototype, de geraamde kosten met de bovengenoemde ontwikkelingen voor 2020 en voor opschaling naar 100 km in 2022 en 1000 km in 2025, zie Tabel 6. Uitgangspunten:

- discontovoet van 0%;
- levensduur van 20 jaar;
- Capital Recovery Factor⁸ van 0,05;
niet beprijzen van de CO₂-uitstoot gezien de huidige lage prijs.

Tabel 6: Business case update

LCoE (eenvoudige methode, IPCC 2014)	Proto design	Proto realised	1km (2020)	100 km (2022)	1000km (2025)
Investering (€m)	763	1800	1700	1302	1302
Onderhoud (€m/jr)	8	8	8	8	8
Opbrengst (kWh/m/jr)	36	18	80	98	108
LCoE (€/kWh)	1,27	5,85	1,16	0,74	0,67

De LCoE van het MESH systeem is hoog vergeleken met bijvoorbeeld die van PV in wegen (referentie SolaRoad) van 0,12 €/kWh. Ook de hierboven geschetste toekomstige verbeteringen en opschaling geven nog een hoge LCoE.

⁸ De Capital Recovery Factor is de factor ter bepaling van het bedrag dat benodigd is aan het einde van elke periode (1 jaar) van een reeks perioden (jaren); de som van de bedragen is gelijk aan het oorspronkelijk geïnvesteerde bedrag vermeerderd met de samengestelde interest over de nog openstaande perioden. Uit "Begrippenlijst Handboek Cost Engineering", zie <https://www.dace.nl/download/?id=17693255> (opgevraagd op 28 mei 2020).

4 Conclusies en verbetermogelijkheden

4.1 Conclusies

De MESH-opstelling is in juli 2018 gebouwd en heeft vanaf maart 2019 gedurende 12 maanden goed gefunctioneerd. De constructie is in die tijd robuust gebleken; er is geen achteruitgang in elektronica, PV-cellen of PV-opbrengst geconstateerd en er was geen onderhoud of vervanging van elementen nodig, terwijl er geen reiniging heeft plaatsgevonden.

Er is veel nieuwe kennis verzameld over dit ontwerp en de praktische implementatie van flexibele PV-cellen gekoppeld aan de infrastructuur. Deze praktijkproef heeft inzicht gegeven in welke problemen kunnen optreden en waar oplossingen liggen, zie ook paragraaf 4.2.

De levering is totaal 1.200 kWh geweest, dus ca. 67% van de verwachte 1.800 kWh. Daarvoor zijn mogelijke oorzaken onderzocht. Hierover worden de volgende conclusies getrokken:

- er is geen sprake geweest van slecht functionerende individuele panelen en/of systeemcomponenten in het systeem;
- er is geen significante drempelwaarde bij de optimizers te constateren waardoor bij lage instraling geen vermogen wordt opgewekt;
- de Performance Ratio van de PV-modulen ligt tussen 30% en 50%; dit is relatief laag t.o.v. het Nederlands gemiddelde van 77% voor PV systemen op daken;
- kabel-/transportverliezen hebben enige invloed gehad: het verschil tussen de door de kWh-meter geregistreerde energie (zijnde de som van levering en het eigen verbruik) en de door het DC-systeem geproduceerde energie bedraagt ca.10%;
- het effect van het toevoegen van de polycarbonaat afdekkap is groter dan ingeschat, er was een verlies van ~20-25 % aangenomen.

Dit laatste lijkt nu de meest waarschijnlijke hoofdoorzaak van de relatief lage opbrengst t.o.v. de berekende en verwachte prognose. De effecten van de afdekkap kunnen betrekking hebben op materiaal, vorm, textuur en optische eigenschappen. Aanvullend onderzoek (zoals metingen onder een zonn simulator) kunnen hier verder inzicht geven. Bij toekomstige opschaling kan een afdekkap vervallen door het toepassen van een robuuste mee-gelamineerde frontsheet op de PV-modulen.

Als deze toepassing vergeleken moet worden met netstroom is de LCoE van het MESH systeem nu te hoog. Bij opschaling in de toekomst zal het verschil kleiner zijn, maar naar verwachting nog te hoog. Verbeteringen aan de opstelling en de installatiemethoden (zie paragraaf 4.2) kunnen de LCoE verder verlagen.

Als de waardering ook kan zitten in vermijden van installeren van windmolens of zonneparken op schaarse grond kan de discussie een andere dimensie krijgen. Deze is echter nog niet in geld uit te drukken.

Andere denkrichtingen zijn het plaatsen van PV direct achter de geleiderail of als autonoom systeem voor mobiele barriers, waarbij de PV zorgt voor additionele

functionaliteit. Lessen van MESH met betrekking tot toegepaste materialen en het ontwerp kunnen hierbij worden toegepast.

De positieve ervaringen in het MESH-project gecombineerd met de geïdentificeerde verbetermogelijkheden maken het denkbaar dat in een vervolgproject een complete re-design van de geleiderail met geïntegreerde zonnepanelen plaatsvindt.

4.2 Verbetermogelijkheden

De ontwikkeling, bouw en functionele periode van de MESH-opstelling hebben veel informatie opgeleverd over mogelijkheden voor opwekking van zonne-energie langs de weg door flexibele PV-modulen. Er zijn ook dilemma's en aanpassingen geweest gedurende het project. Daaruit komt een aantal mogelijkheden voor verbetering voort, waarmee in vervolg- of soortgelijke projecten rekening gehouden kan worden.

4.2.1 *Integratie in de geleiderail?*

Geleerde les is dat door veiligheidseisen de kosten in de pilot hoger zijn geworden dan verwacht, ook als herontwerp en opschalingsvoordelen meegenomen worden. Het oorspronkelijke ontwerp – alle elektronica tussen de geleiderails – is kostentechnisch en esthetisch aantrekkelijker dan het aanleggen van ondergrondse putten of bovengrondse kastjes. Het eerste ontwerp was hierop gericht, met inachtneming van de bestaande normen voor elektrische veiligheid. Het feit dat het ontwerp gewijzigd moest worden, suggereert dat het integreren van PV met de primaire functie van de geleiderail dusdanig complex is dat de kostenvoordelen die er leken te zijn teniet gedaan worden.

Hierbij wordt opgemerkt dat niet alle oplossingen volledig onderzocht zijn in het kader van dit onderzoeksproject. Hieronder zijn nog mogelijke aanpassingen benoemd die tot kostenverlaging kunnen leiden.

In plaats van het onder het maaiveld plaatsen van optimizers (of micro-inverters) zouden deze achter de geleiderails in een kast te plaatsen zijn. Dit is elektrisch veilig uit te voeren en geeft wat minder kosten voor het watervrij houden van apparatuur. In de pilot is dit niet zo uitgevoerd omdat deze oplossing het maaien arbeidsintensiever maakt.

Mogelijk zijn er ook nog ontwerpen denkbaar waarbij de optimizers (of micro-inverters) in de onderconstructie zijn geïntegreerd zonder dat dit tot onveiligere situaties leidt bij een aanrijding van een voertuig met de geleiderail. Gezien de discussie met de experts zou van een dergelijk ontwerp zowel de mechanische veiligheid (loskomen van componenten) als de elektrische veiligheid (afschakelen van het systeem bij impact) door middel van botsproeven moeten worden aangetoond. Dit was binnen het huidige project niet realiseerbaar.

4.2.2 *Constructieve aspecten*

- Elektronica onder- of bovengronds?

De opstelling met elektronica onder het maaiveld in een 'duikersklok' is elegant en effectief. Er bestaat een risico dat door opwaartse druk water kan indringen in het geval van kleine lekken door bijvoorbeeld scheurtjes; daarop kan getest worden. Om dit risico te voorkomen is een alternatief het gebruik van bovengrondse kastjes nabij de geleiderail.

De ondergrondse oplossing geeft wel een esthetisch beter resultaat en hindert het maaien niet; de bovengrondse oplossing voorkomt de noodzaak om opwaartse krachten van grondwater te weerstaan, is goed bereikbaar en weinig gevoelig voor vocht bij gaatjes/scheurtjes in de omhulling.

- Lichtere draagconstructie

De kunststof constructie die de PV-modulen met de geleiderail verbindt, vraagt relatief veel materiaal. Deze is ontworpen met het oog op de plaatsing van alle elektronica (m.n. de optimizers) tussen de geleiderails. Nu bevinden zich alleen kabels tussen de geleiderails, dus kan de onderconstructie waarschijnlijk vereenvoudigd worden. Aandachtspunten daarbij zijn:

- de constructie moet stevig genoeg zijn voor personen die over de geleiderail klimmen of erop zitten;
- het is wenselijk dat de beschermende functie van de bovenzijde voor motorrijders in geval van een ongeluk intact blijft.

- Aanpassing afdekkap voor hogere energieopbrengst

De harde afdekkap tegen beschadigingen en schitteringen functioneert goed: er is geen sprake geweest van vandalisme of klachten over reflecties. De afdekkap neemt wel licht weg. Onderzocht kan worden of deze lichter uitgevoerd kan worden. Onderzocht kan ook worden of de afdekkap optisch te koppelen is met de PV-folie, bijvoorbeeld door toepassing van een robuuste mee-gelamineerde frontsheet op de PV-module.

4.2.3 *Productie, aanleg, onderhoud*

- Mechanisering van seriematige productie

Productie en assemblage van de onderconstructie kostte veel inspanning; er was sprake van veel handwerk. De productie-/assemblagetijd moet beduidend verkort worden, wat goed mogelijk is bij een seriematige aanpak en door mechanisering van (delen van) het productieproces.

- Versnelling door constructieve vereenvoudiging

De installatie op locatie kost nu nog veel tijd per strekkende meter (bevestigingsbeugels onderconstructie schroeven, grondwerk, bekabeling). Constructieve vereenvoudigingen en lokale (DC) toepassing van het opgewekte vermogen kan daar verbetering in brengen. Bovendien kan montage van de onderconstructie deels elders plaatsvinden, zodat die stappen meer gemechaniseerd kunnen worden.

- Onderhoud

Onderhoud is gedurende de pilot niet nodig geweest, dus daarmee is geen ervaring opgedaan. Wel duidelijk is dat de optimizers (in de grond) niet gemakkelijk bereikbaar zijn; vanuit onderhoudspunt zijn bovengrondse kastjes te verkiezen. Daartegenover staat dat die periodiek gereinigd moeten worden.

- Toewerken naar plug & play

Als vervanging van complete elementen in de geleiderail nodig is, moet dat het liefst plug & play om onderhoudskosten te minimaliseren. Daarmee is in de pilot nog geen ervaring opgedaan.

4.2.4 *Energieopbrengst*

- Bredere PV-stroken, efficiëntere PV-cellen

De flexibele PV-modulen kunnen tussen de gangbare geleiderails meer vermogen per strekkende meter opwekken: a) de technologische ontwikkelingen leiden tot efficiëntere PV-cellen (inmiddels is experimenteel al

een efficiency van 30% bereikt) en b) de breedte kan preciezer afgestemd worden op de breedte van de geleiderails.

- Cover integreren met toplaag van PV-cellen

Het achterwege laten van een aparte afdekkap en het integreren van de afdekkap en de beschermingslaag in een voldoende stevige afdeklaag zal het transmissieverlies sterk beperken, waardoor de energieopbrengst toeneemt.

- Lokale toepassing van opgewekte energie

Het opgewekte vermogen wordt nu aan het elektriciteitsnet geleverd, wat veel (kostbare) kabellengte vereist. Deze opstelling komt juist goed tot zijn recht bij lokale DC-toepassingen zoals lichtmasten, wegdekverlichting, verkeerslichten, matrixborden of nabijgelegen gebouwen of woningen. Dan worden geen omvormers toegepast, maar wordt energie opgeslagen in lokale (kleinere) batterijen. De units zijn dan gemakkelijk schaalbaar afhankelijk van de lokale toepassing: lengte / energieopslag / bekabeling zijn gemakkelijk op- of af te schalen. Daarbij moeten wel de kosten van energieopslag meegewogen worden.

5 Ondertekening

Delft, 8 juni 2020

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and a final flourish.

Ir. A.C. Westerlaken
Afdelingshoofd

TNO

A handwritten signature in blue ink, featuring a stylized 'R' and 'A' followed by a long horizontal line.

R.A. Bezemer, TNO
K.E. Sewalt, TNO
E.M.B. Heller, Hogeschool van
Amsterdam
D.A. Roosen, Solliance
V. de Waal, Heijmans
M. Arnoldy, Femtogrid

Auteurs

Bijlage: Business case en ontwikkelingen in de efficiëntie van PV

Deze bijlage is opgesteld door Renee Heller, Hogeschool van Amsterdam

Het MESH project heeft voor de realisatie van de pilot een business case opgesteld ter ondersteuning van de Go-No go beslissing. Deze is in mei 2018 opgesteld (zie document "180501 business case MESH FINAL.pdf"). In september 2018 is de Go gegeven door het consortium m.b.t. de business case voor realisatie van de pilot. De kosten-baten analyse gaf voldoende vertrouwen om de pilot te starten.

Realisatie van de pilot zou verder inzicht geven in:

- Realisatiekosten;
- baten uit de monitoring van het PV systeem (zowel opbrengst als vervuiling);
- levensduurverwachting en onderhoudskosten;
- incidenten en veiligheid.

Hieronder wordt ingegaan op de resultaten uit de realisatie van de pilot en de monitoring voor zover deze van belang zijn voor de business case. Potentiële verbeteringen in het ontwerp zullen besproken worden en verwerkt in de business case voor opschaling in de toekomst.

Ontwerp pilot installatie en realisatiekosten

Het oorspronkelijke idee van het MESH systeem was doordat de zonnecellen op de geleiderails gemonteerd kunnen worden er bespaard wordt op een onderconstructie voor de PV. Tevens zouden in het ontwerp onderdelen als optimizers (of micro-inverters) in een onderbak tussen de geleiderails passen.

In de veiligheidssessies kwamen de volgende zaken naar voren die verbeterd diende te worden:

1. verder voorkomen van reflectie van zonstraling naar weggebruikers;
2. voorkomen van rondvliegen van losse onderdelen van MESH systeem bij aanrijding;
3. ervmijden van hoge elektrische spanningen, aanraakveilige laagspanning garanderen (42VAC– 60 VDC).

Het ontwerp is hierop als volgt aangepast:

1. MESH heeft een extra anti reflectie top cover gekregen bovenop de PV;
2. plaatsing van de optimizers in een ondergrondse put.

Hiermee waren de veiligheidsaspecten volgens de experts voldoende verbeterd. Dit heeft de volgende consequenties voor de business case van de pilot installatie:

1. Antireflectie cover:
 - a. extra kosten door de top cover;
 - b. verminderde opbrengst van de PV door de verminderde doorlatendheid. Dit is ingeschat op 20%.
2. Extra kosten voor de put door ontwerpkosten, tekeningen, grond en graafwerk, waterbeschermende uitvoering ter bescherming van de apparatuur. Voor de pilot is dit uitgekomen op totale realisatiekosten van € 1800,-/m' (opgave Heijmans). Deze kosten zijn als volgt verdeeld over de hoofdcomponenten van het systeem:

MESH onderdeel	Euro/m'
Ecover, PV en optimizers	€ 605
regulier werk	€ 515
project afhankelijk werk	€ 680
	€ 1.800

Resultaten monitoring

De opstelling is 18 maart 2019 in bedrijf gesteld en tot 19 maart 2020 werkend geweest. De opstelling functioneert goed, er zijn geen incidenten geweest (zie monitoring verslag).

De opbrengst is gesimuleerd in SAM-NREL, de geschatte jaaropbrengst van de pilot 36 kWh/jr/m' is. Zoals in het monitoringrapport is aangegeven is er 18,3 kWh/jr/m' gemeten. Discussie hierover staat in het monitoringsrapport.

Er is geen onderhoud nodig geweest. De ingeschatte kosten hiervoor worden gelijk gehouden aan de aannames van 2018.

Potentieel MESH in toekomst

Er zijn meerdere verbeteringen mogelijk die de potentie van MESH in de toekomst verbeteren. Hierbij gaan we allereerst uit van de plaatsing van de optimizers (of micro-inverters) in de ondergrondse put omdat deze oplossing door de veiligheidsexperts is goedgekeurd. Potentieel te verbeteren in het ontwerp en materiaalkeuze t.o.v. gerealiseerde prototype is dan:

- minder materiaalgebruik voor de MESH bak en cover; nu is zowel onderconstructie voor PV als een cover toegevoegd, één van beide zou dunner kunnen of vervangen door robuust meegelamineerd frontsheet op de PV module;
- cover doorlatendheid verbeteren naar 5% i.p.v. 20% bv. door toepassing van een frontsheet;
- betere bedekking van PV op de cover van 37cm breedte benutting naar 60 cm door toepassing van custom made CIGS modules (hiervoor is grote afname nodig);
- toepassen van dunne flexibele (gebogen) silicium cellen i.p.v. CIGS vanwege de goede verkrijgbaarheid en maakbaarheid hiervan.

Potentieel bij opschaling over 5 jaar is:

- lager kosten door massa productie;
- hogere opbrengst PV van nu 16% naar 22% over 5 jaar (zie bijlage over verwachtingen).

Grondwerk voor aanleg van de putten zal echter nog nodig blijven en weinig in kosten dalen.

De kostendaling als gevolg van opschaling is per hoofdcomponent als volgt ingeschat (opgave Heijmans):

MESH onderdeel	prototype (Euro/m')	besparing opschaling	opschaling (Euro/m')
Ecover, PV en optimizers	€ 605	50%	€ 303
regulier werk	€ 515	5%	€ 489
project afhankelijk werk	€ 680	25%	€ 510
	€ 1.800		€ 1.302

Er zitten relatief veel kosten in het werk en minder in de materialen van de Ecover zelf. Op het werk is door opschaling minder te besparen omdat de werkzaamheden niet wegvallen. Bij de Ecover en PV zijn nog schaalvoordelen en inkoopvoordelen te behalen. Ook is de verwachting dat de PV net als afgelopen jaren nog in kosten daalt.

Business case update

Met bovenstaande gegevens is de business case geüpdate voor de gemaakte kosten van het prototype, de geraamde kosten met de bovengenoemde ontwikkelingen voor 2020 en voor opschaling naar 100 km in 2022 en 1000 km in 2025.

1 m				LCoE eenvoudige methode IPCC(2014)			
			proto design	proto realised	2020 1 km	2022 100 km	2025 1000 km
investering	Euro		763	1800	1700	1302	1302
onderhoud	Euro/jr	1,0%	8	8	8	8	8
energie opbreng	kWh/jr		36	18	80	98	108
discontovoet		0,0%					
levensduur	jaar	20					
Capital Recovery Factor			0,05				
LCOE	Euro/kWh		1,27	5,34	1,16	0,74	0,67

DE LCOE van het MESH systeem is hoog vergeleken met bv. die van PV in wegen (referentie SolaRoad) van 0.12 €/kWh. Ook de hierboven geschetste toekomstige verbeteringen en opschaling geven nog een hoge LCOE.

Discussie

Geleerde les is dat door veiligheidseisen de kosten in de pilot hoger zijn geworden dan verwacht, ook als herontwerp en opschalingsvoordelen meegenomen worden. Dit suggereert dat het integreren van PV met de functie van de geleiderail dusdanig complex is dat de kostenvoordelen die er leken te zijn teniet gedaan worden.

Dit wil niet zeggen dat alle oplossingen volledig onderzocht zijn. Hieronder zijn nog mogelijke aanpassingen die tot kostenverlaging kan leiden.

I.p.v. het onder het maaiveld plaatsen van optimizers (of micro-inverters) zouden deze achter de geleiderails in een kast te plaatsen zijn. Dit is elektrisch veilig uit te voeren en minder kostbaar, terwijl de apparatuur watervrij gehouden wordt.

Mogelijk zijn er ook nog ontwerpen denkbaar waarbij de optimizers (of micro-inverters) in de MESH onderbak zijn geïntegreerd zonder dat dit tot onveiligere situaties leidt bij een botsing van een voertuig met de geleiderail. Gezien de discussie met de experts zou van een dergelijk ontwerp zowel de mechanische veiligheid (loskomen van componenten) als de elektrische veiligheid (afschakelen

van het systeem bij impact) d.m.v. botsproeven moeten worden aangetoond. Dit was binnen het huidige project niet realiseerbaar.

Als deze toepassing vergeleken moet worden met netstroom is de LCOE van het MESH systeem nu te hoog. Als de waardering ook kan zitten in vermijden van installeren van windmolens of zonneparken op schaarse grond kan de discussie een andere dimensie krijgen. Deze is echter nog niet in geld uit te drukken.

Andere denkrichtingen zijn het plaatsen van PV rondom de snelweg (achter de geleiderail) of als autonoom systeem voor mobiele barriers waarbij de PV zorgt voor additionele functionaliteit. Lessen van MESH m.b.t. toegepaste materialen en het ontwerp kunnen hierbij worden toegepast.

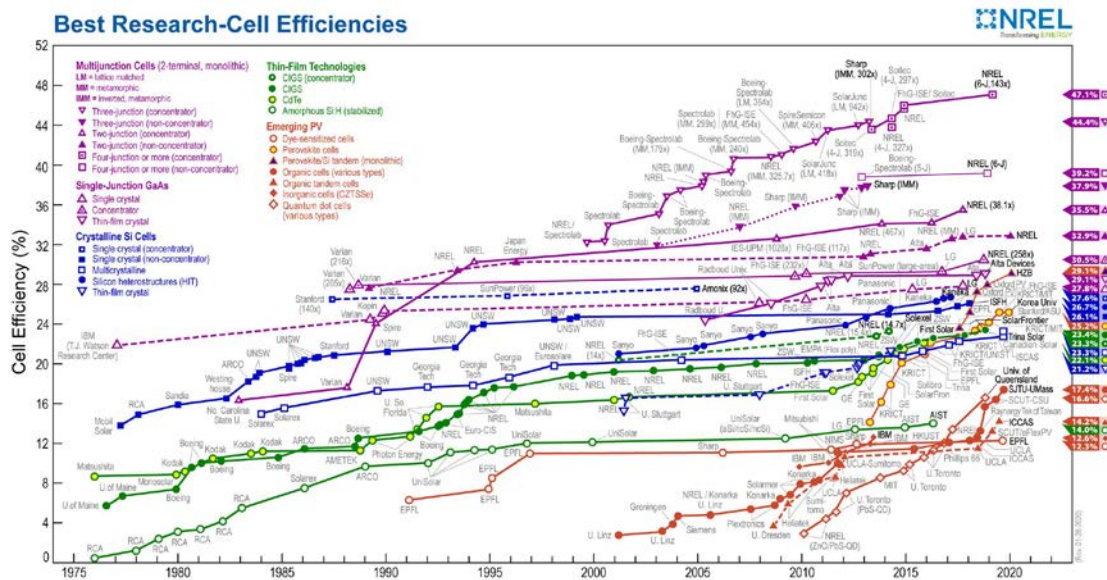
Conclusie

De LCOE van het MESH systeem is door de voor de pilot benodigde veiligheidsmaatregelen hoger uitgekomen dan eerder ingeschat.

We zien mogelijkheden om in een herontwerp de LCOE verder te verlagen: door het vervangen van de afdekkap door een meegelamineerde sheet op de PV, door optimizers (of micro-inverters) in een kast achter de geleiderail te plaatsen of door een herontwerp waarbij de optimizers (of micro-inverters) vast in de MESH onderbak bevestigd worden. Hiervoor zijn waarschijnlijk wel botsproeven nodig om de veiligheid aan te tonen.

Bijlage: ontwikkelingen in de efficiency van PV

Uit historische data van de verbeteringen in cel efficiency (Figuur 32) is te zien dat in alle type PV elk jaar efficiency verbeteringen zijn.



Figuur 32: Historische PV cel efficiency ontwikkeling (bron: NREL)

Nu zijn cel efficiency behaald op kleine oppervlakken in het lab, voor toepassingen is het belangrijk te zien hoe efficiënt hele modules zijn. Dit is te zien in Figuur 33.

Figuur 33: Historische module efficiënties (bron NREL)

Als voorbeeld zie je dat bij CIGS de beste cel efficiëntie ~22% is en de module efficiëntie 19,2% (in 2017). Voor multi c-Si (standaard panelen) zit dit op 23,3 en 20,4% (beide in 2019).

Recent heeft Mia Solé met een efficiency van 18,64% het wereldrecord voor grote oppervlakte flexibele cellen verbroken (nov 2019). Een half jaar eerder had Mia Solé het wereld record op 17,44% gezet. In 2020 halen Mia Solé commerciële CIGS cellen 16,5%.

Om uit de historische data een voorspelling te doen is lastig omdat je ziet dat de ontwikkeling voor elk type cel een verschillende snelheid heeft. Wel kan je verwachten dat als de cel efficiency de afgelopen jaren verbeterd is dit in de module efficiëntie een paar jaar later te zien moet zijn.

Literatuur

- NREL, "cell-efficiency", opgehaald 2-2-2020 van <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- NREL, "module-efficiency", opgehaald 2-2-1010 van <https://www.nrel.gov/pv/module-efficiency.html>
- Miasole, "miasole breaks world record again", opgehaald 2-2-2020 van <http://miasole.com/miasole-breaks-world-record-again-large-area-flexible-photovoltaic-module-with-18-64-efficiency/>
- Solarpowerworldonline, "miasole-reaches-17-44-efficiency-on-commercial-sized-cigs-thin-film-solar-module", opgehaald 2-2-2020 van

<https://www.solarpowerworldonline.com/2019/07/miasole-reaches-17-44-efficiency-on-commercial-sized-cigs-thin-film-solar-module/>