

Stieltjesweg 1  
2628 CK Delft  
Postbus 155  
2600 AD Delft

[www.tno.nl](http://www.tno.nl)

T +31 88 866 20 00

## TNO-rapport

**TNO 2021 R11099**

# Openbaar Eindrapport Robotisering PV Dakplaten

Datum	7 juni 2021
Auteur(s)	Dr.Ir. M.R. de Rooij
Exemplaarnummer	
Oplage	
Aantal pagina's	20 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	
Opdrachtgever	RVO TEUE117055
Projectnaam	TKI gerobotiseerd PV dakplaten
Projectnummer	060.29734

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.

© 2021 TNO

# Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Gegevens project</b> .....	<b>3</b>
1.1	Penvoerder en medeaanvragers .....	3
1.2	Korte beschrijving partijen .....	3
<b>2</b>	<b>Samenvatting</b> .....	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Inleiding</b> .....	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>Doelstelling</b> .....	<b>8</b>
<b>5</b>	<b>Werkwijze</b> .....	<b>9</b>
5.1	Aanpak en organisatie .....	9
5.2	Werkpakketten .....	9
<b>6</b>	<b>Resultaten</b> .....	<b>14</b>
6.1	Beoogde resultaten.....	14
6.2	Behaalde resultaten.....	14
6.3	Mogelijkheden voor spin off en vervolgactiviteiten .....	19
<b>7</b>	<b>Ondertekening</b> .....	<b>20</b>

# 1 Gegevens project

RVO Projectnummer: TEUE 117055  
 Projecttitel: Robotisering PV Dakplaten  
 Projectperiode: 1-1-2018 t/m 31-3-2021

## 1.1 Penvoerder en medeaanvragers

Naam deelnemer	Type organisatie	Rol in project
TNO	Onderzoeksorganisatie	Onderzoek (niet-economische activiteiten) Penvoerder
Eternit BV	Middelgrote onderneming	Leverancier dakplaat
HyET Solar BV	Klein bedrijf	Leverancier PV dunne film
HyET Solar Netherlands BV	Klein bedrijf	Leverancier PV dunne film
Weijland technologies BV	Klein bedrijf	Leverancier energietransport
Prosigno Beheer B.V.	Klein bedrijf	Aansturing robot
Delmeco group B.V.	Middelgrote onderneming	Systeem integrator machines
Hoondert Staalbouw BV	Middelgrote onderneming	Asbest specialist
Man&Mach BV	Middelgrote onderneming	Asbest specialist
Wisse Holland BV	Klein bedrijf	Systeem ontwikkelaar

## 1.2 Korte beschrijving partijen

### 1.2.1 TNO

TNO is een onafhankelijke onderzoeksorganisatie, dat gezamenlijk met partijen uit de gehele keten, innoveert en bedrijven ondersteunt bij het toepasbaar maken van technologische kennis. De missie van TNO is om mensen en kennis te verbinden om zo de concurrentiekracht van bedrijven en het welzijn van de samenleving duurzaam te versterken. Bij TNO werken circa 3.500 professionals, waarvan het merendeel als onderzoeker.

TNO is initiator van de multifunctionele dakplaat en semi-autonome robot. In de visie van TNO kan de multifunctionele dakplaat in combinatie met de semi-autonome robot de oplossing zijn om versneld op een veilige wijze dakplaten te vervangen en nieuwe functies toevoegen. Dit zal de markt stimuleren om invulling te geven aan de voorliggende opgaven.

### 1.2.2 Eternit BV

Eternit B.V. produceert (golf)plaatmateriaal (5 mm dik). De gemaakte producten bestaan voor ruim 90% uit cement en vulstoffen. Hieraan worden in het proces kunststofvezels toegevoegd voor de procesvoering en wapening van de producten.

De platen kenmerken zich door de geringe kosten, de overspanningsmogelijkheden en het lage gewicht. De producten worden tevens geëxporteerd naar België, Denemarken, Finland, Noorwegen, Zweden, Duitsland en de Nederlandse Antillen.

1.2.3 *HyET Solar BV / HyET Solar Netherlands BV*

HyET Solar is een Nederlands high-tech SME die lichtgewicht en flexibele zonnepanelen ontwikkelt en produceert. Het bedrijf is de volledige eigenaar van een octrooi beschermd en gepatenteerd roll-to-roll productieproces voor de productie van deze lichtgewicht en flexibele modules van grondstoffen tot verhandelbaar product.

HyET Solar werkt actief samen met fabrikanten van bouw- en dakelementen, zoals Eternit, om BIPV-producten te ontwikkelen die kunnen worden toegepast in sectoren buiten het technisch en financieel bereik van traditionele glaspanelen.

1.2.4 *Weijland technologies BV*

Weijland technologies is gespecialiseerd in de integratie en connectie van zonnepanelen. Zij ontwikkelen systemen om zonnepanelen in serie met elkaar te verbinden waardoor toepassing in bouwproducten geoptimaliseerd kan worden. Daarnaast integreren zij optimizers en omvormers in bouwproducten.

1.2.5 *Prosigno Beheer B.V.*

Prosigno Beheer B.V. is het moederbedrijf van BE Precision Technology met meer dan 20 jaar ervaring in de fijnmechanica instrumentatie industrie. Het team bestaat uit ingenieurs met diverse vaardigheden, waaronder ontwerp voor elektronische tests, software-integratie, vision-systemen, mechanica, menselijke interface en robotica. Ze ontwikkelen geautomatiseerde robotsystemen voor testen en controle.

1.2.6 *Delmeco group BV*

Delmeco levert advies, engineering, uitvoering, onderhoud en projectbegeleiding op het gebied van machinebouw. Zowel elektrotechniek, industriële automatisering en werktuigbouwkunde vallen onder het dienstenpakket. De machines werken (semi-) autonoom in een proces. Hiermee wordt het proces versneld en veiliger voor de medewerkers.

1.2.7 *Hoondert Staalbouw BV*

Hoondert is gespecialiseerd in de ontwikkeling, realisatie en renovatie van loodsen en bedrijfshallen. Hierbij plaatsen zij grote hoeveelheden golfplaten en brengen praktijkervaring in. Naast de bouwontwikkelingen zijn zij tevens gespecialiseerd in asbestverwijdering. Deze achtergrondkennis wordt gebruikt om het proces in te passen in het programma.

1.2.8 *Man&Mach BV*

Man&Mach is een gecertificeerde asbestsanering actief in Noord- en Midden-Nederland in de provincies Groningen, Friesland, Drenthe, Flevoland, Overijssel, Gelderland en Noord-Holland. Zij zijn gespecialiseerd in de agrarische sector. Naast asbestsanering renoveren zij en voeren zij herstelwerkzaamheden uit. Zij brengen praktische achtergrondkennis in over de asbestsaneringsopgave en kennis over renovatie en plaatsing van dakplaten.

### 1.2.9 *Wisse Holland BV*

Wisse Holland BV is een technisch bedrijf gespecialiseerd in conditiebewaking en beveiligingsoplossingen voor roterende apparatuur. Zij zijn een onafhankelijke partij voor automatisering om ontwikkelde systemen te toetsen en kan het concept ontwikkelingsproces begeleiden. Tenslotte zijn zij sterk in het vermarkten van het robotiseringssysteem.

## 2 Samenvatting

In het project Robotisering PV Dakplaten (TEUE 117055) is met een consortium van acht partijen gewerkt aan een prototype legrobot. Deze robot kan, zonder dat er mensen op het dak nodig zijn, dakplaten met zonnefolie leggen, en deze dakplaten elektronisch aan elkaar doorverbinden. Ook de dakplaat met zonnefolie en de elektrische doorverbinding zijn binnen het project ontwikkeld. Met de resultaten van dit project komt grootschalige vervanging van daken van boerderijen, stallen en schuren een stap dichterbij.

Grote winstpunten van het project zijn:

- Vergroting van de veiligheid voor arbeiders doordat de robot het dak op gaat in plaats van mensen.
- Sterke vermindering van het aantal arbeidsintensieve procesgangen om zonnepanelen op agrarische daken te monteren.
- verlaging kosten door vermindering arbeid en verlaging van kosten van PV-op-dak-systeem

Met de resultaten van het project hopen de projectpartners een belangrijke versnellingsimpuls te kunnen geven om de energiedoelstellingen, zoals die zijn vastgelegd in het SER-Energieakkoord van 2023, te halen.



### 3 Inleiding

Om de energiedoelen die vastgelegd zijn in het SER-Energieakkoord in 2023 te kunnen behalen moet met de uitrol van hernieuwbare energie via zonneceltechnologie worden opgeschaald en versneld. Eén van de oplossingen is het plaatsen van PV panelen. Daken van boerderijen, stallen en schuren zijn goed geschikt voor het installeren van grootschalige PV-installaties door het grote oppervlakte en beperkte complexiteit van de dakopbouw en de vrije ligging van de gebouwen.

In de afgelopen jaren is de vervanging van asbesthoudende daken teruggelopen tot 4 miljoen m<sup>2</sup> per jaar, mede omdat stimuleringsprogramma's van de sanering inmiddels beëindigd zijn. Er was echter juist een versnelling noodzakelijk is om de doelstelling met betrekking tot (1) het realiseren van duurzame energiebronnen en (2) het vervangen van asbestdaken te halen. De vervangende investeringen van asbesthoudende daken worden geraamd op ca. € 3,25 miljard<sup>1</sup>. en er is vaak geen investeringsruimte in deze sector. Dit maakt de noodzaak tot innovatie om de investeringen in PV-daken te reduceren, groot.

---

<sup>1</sup> Bron: LTO Nederland.

## 4 Doelstelling

Met het project wordt beoogd een bijdrage te leveren aan het ontwikkelen van bouwstenen voor het opschalen van PV-installatie. Dit zal gebeuren door het ontwikkelen van een innovatieve, energieleverende dakplaat en een innovatie in het proces van leggen van de dakplaat en innovatieve elektrische infrastructuur voor de energieafvoer van de dakplaat.

Met de huidige producten en processen is de noodzakelijke investering te groot voor de gebouweigenaren. Door het realiseren van dit project kan een bijdrage worden geleverd aan:

- Realiseren van rendabele vervanging van de asbestdaken;
- Mogelijk maken van de enorme vervangingsopgave;
- Bijdrage leveren aan het kunnen versnellen van het vervangingsprogramma;
- Toevoegen van de waarde aan een nieuw dak met PV, waardoor benodigde investeringen renderen.

Met het TKI-project wordt beoogd een businesscase met terugverdiencapaciteit te realiseren waarbij voldaan wordt aan de volgende randvoorwaarden:

- geringe investeringskosten;
- grote capaciteit ;
- korte doorlooptijden.

Dit zou gerealiseerd kunnen worden als een aantal innovaties ontwikkeld en geïmplementeerd blijken te kunnen worden:

- geïntegreerde systemen om handelingen te beperken;
- automatisering om het proces te versnellen en met minder mensen uit te voeren.

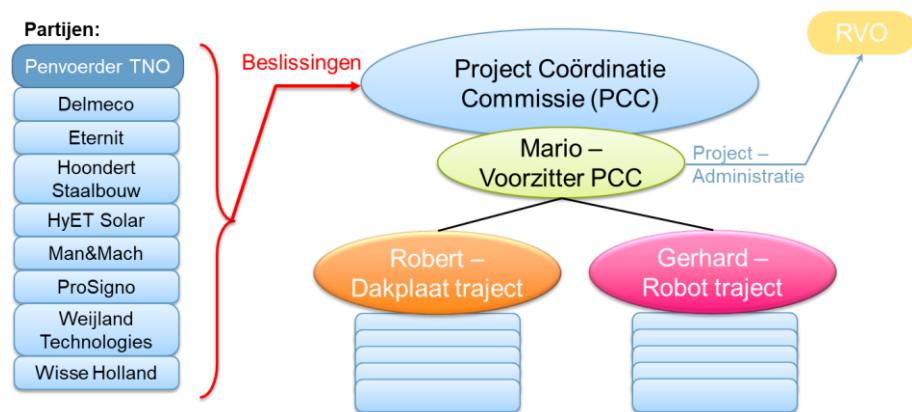


## 5 Werkwijze

### 5.1 Aanpak en organisatie

De gerobotiseerde PV dakplaten zijn ontwikkeld volgens een methodische en systematische aanpak (systems engineering SE). Hierbij is ruimte gegeven om de innovatie door een iteratief proces te volgen waarbij herhaaldelijk geëvalueerd is en wijzigingen zijn doorgevoerd op basis van de uitkomsten in voorgaande cycli en randvoorwaarden van budget mogelijkheden.

Om een integrale ontwikkeling te realiseren is een stuurgroep ingericht bestaande uit de algeheel projectleider met daaronder twee deelprojecten, een voor de multifunctionele dakplaat en een voor het robottraject. Ingrijpende beslissingen werden genomen tijdens consortia vergaderingen. Beslissingsbevoegdheid lag daarbij bij de project coördinatie commissie. Schematisch is de projectorganisatie weergegeven in Figuur 5.1.



Figuur 5.1 Weergave van de projectorganisatie.

Buiten de consortiavergaderingen om werden de zaken in afzonderlijke vergaderingen van de deeltrajecten aangestuurd en opgelost.

### 5.2 Werkpakketten

Hieronder staan kort de verschillende werkpakketten toegelicht.

De resultaten van wat uit de verschillende werkpakketten gekomen is, staat beschreven in hoofdstuk 6.2.

#### 5.2.1 *Werkpakket 1 Specificatie van de functies*

In dit werkpakket is een zo compleet mogelijk Programma van Eisen (PvE) opgesteld voor de geïntegreerde dakplaten en de semi-autonome robot. Specificaties van de functies van het totale systeem zijn onderzocht, zowel wat betreft het leggen van de dakplaten en ook wat betreft de samenstellende onderdelen zoals bijvoorbeeld de geïntegreerde dakplaat, de bevestiging ervan op het dak en stroomdoorgave. Het doel is inzicht verkrijgen in en vastleggen van alle relevante ontwerpcriteria waaraan ontwerp-oplossingen getoetst moeten worden.

De betrokken partijen leveren hier een gezamenlijke bijdrage aan op basis van kennis en ervaring en waar nodig zal aanvullend onderzoek worden gedefinieerd.

### 5.2.2 *Werkpakket 2a Engineering Energieopwekking dakplaat*

In dit werkpakket is gekeken welk type dakplaat de energieopbrengst optimaliseert en waarbij voldoende stijfheid gegarandeerd wordt. De dakplaten worden ontwikkeld voor montage op een bestaande dakconstructie. Onderzocht wordt welke varianten aan dakconstructies in de praktijk voorkomen. Hierbij wordt aangesloten op bestaande TNO-onderzoekstrajecten zoals PV-opmaat<sup>2</sup>.

In dit werkpakket is het eerste prototype verder ontwikkeld voor grootschalige productie van de PV-geïntegreerde dakplaat. Hierbij heeft de focus gelegen op mogelijkheden voor opschalen van de integratie van de dakplaat met de flexibele PV-folie. HyET werkt samen met Solliance aan de engineering van de PV-folie. Eternit werkt samen met TNO aan de engineering van de dakplaat.

### 5.2.3 *Werkpakket 2b Engineering Geïntegreerd energietransport*

In dit werkpakket zijn onderzoeken uitgevoerd om het energietransport optimaal te integreren. De energie-aansluiting wordt per dakplaat gerealiseerd aan de onderzijde in één van de golven van de dakplaat. Door middel van een stekker op de beugel van de onderliggende plaat worden de platen in serie-geschakeld bij het leggen van de platen door de robot.

### 5.2.4 *Werkpakket 2c Engineering Docking*

In dit werkpakket is de docking, dit is de bevestiging van de dakplaat aan de gordingen van de dakconstructie onderzocht. Normaliter worden gaten in de dakplaten geboord en met een bout gefixeerd. In dit WP is onderzocht of dit, gegeven de functies van de dakplaten en eisen die aan het gemechaniseerd leggen van de dakplaten, nog steeds de beste methode is.

### 5.2.5 *Werkpakket 2d Engineering snelle montage*

In dit werkpakket is onderzocht of snelle montage mogelijk is. Omdat de platen niet meer door werknemers hoeven te worden getild bij het gebruik van de legrobot, is de grens van 23 kg voor het tillen door werknemers in het kader van de ARBO-wetgeving niet meer van toepassing. Onderzocht is welke voorzieningen nodig zijn en welke voordelen behaald kunnen worden met grotere afmetingen van de dakplaten en of/hoe deze geproduceerd kunnen worden. In verband met de bestaande dakconstructie van gordingen en spanten mag het gewicht niet te hoog worden. Daarbij moet de plaat voldoende stijfheid hebben tijdens het hijsen. Eternit onderzoekt samen met TNO diverse alternatieve afmetingen en hijsmethoden.

Tevens is in dit werkpakket een inventarisatie uitgevoerd naar eerder ontwikkelde systemen voor het leggen van dakplaten en het verwijderen van asbesthoudende beplating. De technieken en hulpsystemen die reeds ontwikkeld zijn en ook toepasbaar zijn voor het leggen van de dakplaten, behoeven niet opnieuw ontwikkeld te worden. Ook zou geleerd kunnen worden uit eerdere onderzoeken en eventueel gebruik worden gemaakt van bestaande technologie. Deze inventarisatie wordt gecoördineerd door Wise Holland BV met ondersteuning van andere partners.

## Onderdeel 1 Beeldherkenning

Om de dakplaten te positioneren en vast te schroeven zou beeldherkenning noodzakelijk kunnen zijn. Hiervoor was de ontwikkeling van software en hardware voorzien.

---

<sup>2</sup> Eind 2017 worden in dat project de eerste prototypes opgeleverd waarna het rendement van dat systeem in 2018 onderzocht wordt. Dit sluit aan op de TKI

### Onderdeel 2 Mechanische handelingen

Nadat de geometrie van de dakconstructie in kaart is gebracht, voert een robot een mechanische handeling uit. Op verschillende posities moeten de dakplaten immers gepositioneerd en vervolgens gefixeerd worden. Onderzocht wordt of een grote robotarm danwel een aantal kleinere robotarmen de handelingen kunnen verrichten. TNO, Delmeco en Wisse Holland ontwerpen gezamenlijk het mechanische systeem.

### Onderdeel 3 Aansturing

Onderzocht wordt welke aansturing voor welke functie noodzakelijk is. Aansturing kan semi-autonoom (op afstand bediend) gebeuren, maar ook wordt onderzocht welke functies volledig geautomatiseerd kunnen worden. Doel is om het aantal handelingen door mensen te minimaliseren en de operator zich geheel te laten richten op waarneming en aansturing van de robot. Door deze aansturing is het mogelijk dat de operator handelingen verricht alsof hij op het dak is, terwijl veiligheid niet in het geding komt. Delmeco focust zich op systeem integratie/ontwerp, TNO (i-Botics) op Human Machine Interface en Prosigno op de aansturing van de actuatoren.

#### 5.2.6 *Go/No-Go beslissing 1 – deelaspecten*

In het project is een drietal Go/No-Go beslissingen ingebouwd. De partners bepalen op basis van de deelaspecten en het totaalontwerp of doorgegaan wordt met de volgende fase. Overwegingen zijn of de technische oplossingen voldoende perspectief bieden en er een positieve businesscase te maken is. De resultaten uit de Go/No-Go beslissing worden gedeeld met RVO. De deelaspecten worden beoordeeld door een stuurgroep bestaande uit de partners. In een later stadium vindt de Go/No-Go beslissing plaats voor het totaalconcept alvorens tot het pilot-project over te gaan. Mocht er een No-Go besluit vallen op een niet kritiek onderdeel van het totale project, dan wordt dat onderdeel niet verder uitgewerkt en wordt het resterende deel van de subsidie voor dit aspect niet gebruikt. Hierover wordt in contact getreden met RVO.

#### 5.2.7 *Werkpakket 3 Ontwikkeling prototype*

Op basis van de engineering wordt door de dakplatenleverancier en de PV-folie leverancier een prototype gebouwd: er worden handmatig minimaal 3 PV-geïntegreerde dakplaten geproduceerd. Eternit en HyET Solar produceren het prototype in samenwerking met de toeleveranciers.

Op basis van de engineering wordt door de gespecialiseerde bedrijven een prototype van de legrobot gebouwd.

#### 5.2.8 *Werkpakket 4 Beproeving deel concepten (product en plaatsing)*

De volgende zaken worden beproefd:

- De prototypen van de dakplaten worden geplaatst op een proefstuk van de dakplatenleverancier. Vervolgens wordt de productie en het plaatsingsproces geëvalueerd en wordt er een terugkoppeling gegeven naar het engineeringsteam. Dit team voert eventueel gewenste detailwijzigingen door in het prototype van de PV-geïntegreerde dakplaat als het plaatsingsproces en -robot van de dakplaten.
- Vroeg in het project wordt een testinstallatie gerealiseerd op de locatie van de leverancier van de PV-folie waarmee de duurzaamheid van de PV-geïntegreerde

dakplaat getest wordt. De stroomopbrengst zal worden gemonitord en de installatie zal regelmatig worden geïnspecteerd op functionaliteit. Kennis en ervaringen worden meegenomen in het pilot project.

- Daarnaast wordt een testprogramma uitgevoerd waarin het prototype wordt getest op de eisen die gesteld worden aan:
  - dakplaten (Eternit specificeert de betreffende normen),
  - geïntegreerde PV-installaties (o.a. NEN7250),
  - duurzaamheid en veiligheid van dunne film PV-systemen ( IEC61646 en IEC61730) inclusief hageltesten en mechanische belasting.

De robot wordt beproefd op basis van de vooraf vastgestelde specificaties. Hierbij moeten een operator en de robot fictieve handelingen uitvoeren. Na aanpassing en optimalisatie wordt de robot beproefd bij de proefopstelling voor de dakelementen. Hierbij worden in een praktijkopstelling meerdere malen de dakelementen geplaatst en handmatig verwijderd. De beproeving wordt door TNO, Solliance en i-Botics uitgevoerd.

#### 5.2.9 *Go/No-Go beslissing 2 – prototype*

De ontwikkeling van de prototypes vormt de eerste praktijktoets voor eventuele opschaling van de productie. Verwacht wordt dat dit leermomenten genereert om het productieproces in te vullen, mogelijk moet de engineering aangepast worden. De Go/No-Go beslissing vindt plaats door de stuurgroep en betreft het totaal beeld op de businesscase van het vervangen van de dakplaten. De resultaten uit de Go/No-Go beslissing worden gedeeld met RVO.

#### 5.2.10 *Werkpakket 5 Pilot project*

Er wordt een pilot team samengesteld bestaande uit vertegenwoordigers van de gespecialiseerde bedrijven, LTO-projecten, TNO en i-Botics. Op een locatie wordt een dak verwijderd en vervolgens wordt een deel van het dak gerobotiseerd voorzien van PV-dakplaten. Afhankelijk van het project wordt minimaal 100 m<sup>2</sup> op deze wijze voorzien. Indien de omstandigheden dit toelaten kan dit vergroot worden. Het overige deel van het dak kan op traditionele wijze uitgevoerd worden. Doelstelling van de pilot is om inzicht te verkrijgen in welke efficiency slag gemaakt kan worden onder praktijkomstandigheden en op welke technische wijze de business case te verbeteren is. Voor het functioneren van de elektriciteitsproductie is van belang te onderzoeken en kennis te verkrijgen wat de levensduur van dakplaten is. Voor de business case is inzicht nodig in de realisatiekosten, onderhoudskosten en opbrengsten van het systeem. Dit is richtinggevend voor mogelijk te realiseren kostenreductie. Hiervoor wordt zowel de uitvoering als de exploitatie gemonitord. Het pilotproject wordt door TNO, Man&Mach en Eternit met ondersteuning door het pilot-team uitgevoerd.

#### 5.2.11 *Werkpakket 6 Businesscase*

Voor het opschalen van een proefopstelling en pilotproject naar het grootschalig vervangen van dakelementen wordt een businesscase opgesteld. Dakplaten moeten op een productielijn geproduceerd worden. Meerdere robots zullen geproduceerd moeten worden.

Opleiding van operators, toezicht, keuring, etc. zal mogelijk organisatorisch vormgegeven moeten worden. TNO ontwikkelt samen met de deelnemende bedrijven de businesscase en zullen eventueel externe partijen worden geconsulteerd.

## 6 Resultaten

### 6.1 Beoogde resultaten

Voor de vervanging van dakplaten op agrarisch vastgoed wordt een geïntegreerde<sup>3</sup> totaaloplossing ontwikkeld. Hiervoor wordt een energieleverende dakplaat ontwikkeld die de functionaliteit van het dak vergroot. Voor het plaatsen van de dakplaat wordt een semiautonome robot ontwikkeld, waardoor het aantal arbeidsgangen voor plaatsing kan worden vermindert en versneld.

Kortom: de dakplaat eraf en geautomatiseerd een nieuwe plug en play PV-geïntegreerde dakplaat erop.

Het project resulteert in een totaaloplossing met een aantal extra functionaliteiten:

- *Dakplaat*  
Onderzocht wordt welk type dakplaat (met de benodigde mechanische eigenschappen) de energieopbrengst optimaliseert;
- *Energieopwekking (PV-panelen)*  
Toepassen van low-cost dunne film zonnecellen, die 'en masse' geproduceerd kunnen worden;
- *Geïntegreerd energietransport*  
Een robuuste oplossing voor het afnemen van de opgewekte elektriciteit van een dakplaat en aan elkaar schakelen van dakplaten. Daarmee vervalt de noodzaak van de lange bekabelingen, die noodzakelijk zijn bij de huidige zonnepanelen;
- *Docking*  
De voorzieningen voor montage van de dakplaten op de aanwezige dakconstructie wordt geïntegreerd in de dakplaten;
- *Snelle montage door middel van robot*  
Naast de dockingvoorziening wordt een hijsvoorziening geïntegreerd. Dit maakt grotere afmetingen en snellere montage mogelijk. Hierdoor wordt het proces van verwijderen van de aanwezige dakplaten en aanbrengen van de nieuwe dakplaten met een semi-autonome robot veiliger. Hiermee wordt het valgevaar van de uitvoerende menskrachten geëlimineerd en voldaan aan de ARBO-eisen.

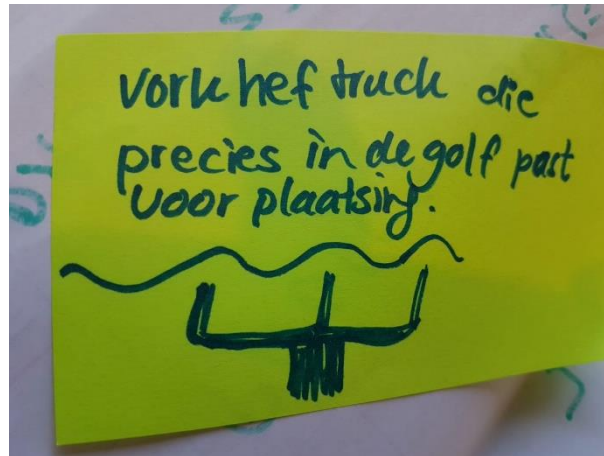
### 6.2 Behaalde resultaten

Werkpakket 1 heeft resultaten opgeleverd en inzicht gegeven voor de verdere ontwikkelrichting van zowel de multifunctionele dakplaat als de testrobot. Er is gestart met een creatief proces in brainstorms zie ook Figuur 6.1. Na deze 1<sup>e</sup> brainstorm is vrij snel 'doorgepakt' naar praktische zaken, zoals inventarisatie van de bestaande praktijk en beschikbare dakplaten die doorontwikkeld zouden kunnen worden. De eerste toepassing van de te ontwikkelen geïntegreerde dakplaten zal worden gezocht in de renovatiemarkt, gezien de toenmalige verplichting voor de asbestdaken vervanging. Dat maakte het voor de hand liggend om in eerste instantie te onderzoeken of de Eternit-platen doorontwikkeld zouden kunnen worden omdat de te verwijderen dakplaten over het algemeen ook de afmetingen van de dakplaten van Eternit hebben.

---

<sup>3</sup> Afzonderlijke onderdelen van deze geïntegreerde oplossing worden door verschillende toeleveranciers wel reeds aangeboden

Met deze randvoorwaarden is vervolgens in deeltrajecten op onderdelen ingezoomd om verder uit te werken. Deze onderdelen zijn met name in werkpakket 2 iteratief ontwikkeld.



Figuur 6.1 Voorbeeld van de brainstorm ideeën tijdens de eerste kick-off.

Werkpakket 2a heeft geresulteerd in een Eternit golfplaat met daarop een HyET Solar PV-film. Er is daarbij vooral gekeken naar opschaling van de lijmtechniek, die gevonden is in een zogenaamde laminator zoals die bij het bedrijf Plano Plastics wordt toegepast.

Omdat de Eternit golfplaat een beproefd product is, is niet intensief gezocht naar andere producten om die als basis te nemen voor de doorontwikkeling tot PV geïntegreerde dakplaten. Vanuit een eerder project (PV OpMaat) was bovendien al bekend dat het goed mogelijk was om met de HyET Solar folie toe te passen op de geometrie van de golfplaat van Eternit.

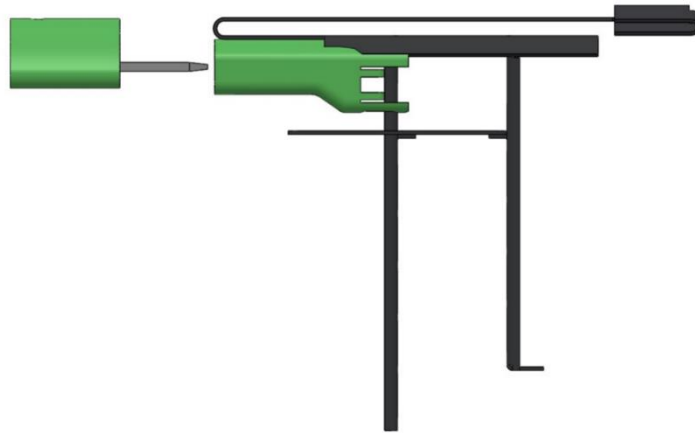
Er moest veel tijd besteed worden aan het deugdelijk aanbrengen van de PV-folie op de golfplaat. Bij het identificeren van een oplossing daarvoor is vooral de mogelijkheid tot opschaling van productie PV-geïntegreerde dakplaten een belangrijke factor geweest. De oplossingsrichting die hiervoor gevonden is, is laminator tafel, waarbij de stalen mallen van Eternit (die gebruikt worden om de Eternit dakplaten op te laten uitharden) te gebruiken om de PV-folie in de juiste vorm op de dakplaten te drukken. In Figuur 6.2 is aangegeven welke variaties binnen het project gemaakt zijn. Met de uitgewerkte methode is een schaalbaar proces mogelijk.



Figuur 6.2 Voorbeelden van de modulaire opbouw van PV-folie op Eternit golfplaten.

Het ontwikkeltraject van Werkpakket 2b was uitdagend. Het heeft uiteindelijk een connector stekkersysteem opgeleverd. De ene kant van de stekkercombinatie is als vrouwtje aan de onderkant van de bevestigingsbeugel waarmee de bovenliggende dakplaat op de gording wordt bevestigd. De andere kant is als mannetje van de stekkercombinatie aan de bevestigingsbeugel van de onderliggende dakplaat bevestigd. Hierdoor is het mogelijk om automatisch de elektrische koppeling te maken bij het leggen van de dakplaten.

Veel effort is gestoken in de ontwikkeling van een robuuste koppeling: de 2 delen van het connector systeem moeten met minimale failure passen bij toekomstige opschaling. Ook moet het systeem dusdanig zijn dat transport van de kwetsbare dakplaten en de connectordelen niet een bottleneck zou worden. Dit heeft geresulteerd in een puck die aan de onderkant van de plaat vast zit en een stekker, die pas bij het leggen van de dakplaat aangebracht wordt. De stekker wordt pas op de bouwplaats aan de haak vastgemaakt waarmee de plaat aan het dak gemonteerd wordt. Zie ook Figuur 6.3.



Figuur 6.3 Zij-aanzicht van het stekkerconcept (groen) op de beugel. De puck (linksboven) zit vast aan de plaat. De stekker wordt pas op de bouwplaats aan de plaatsingsbeugel geklikt.

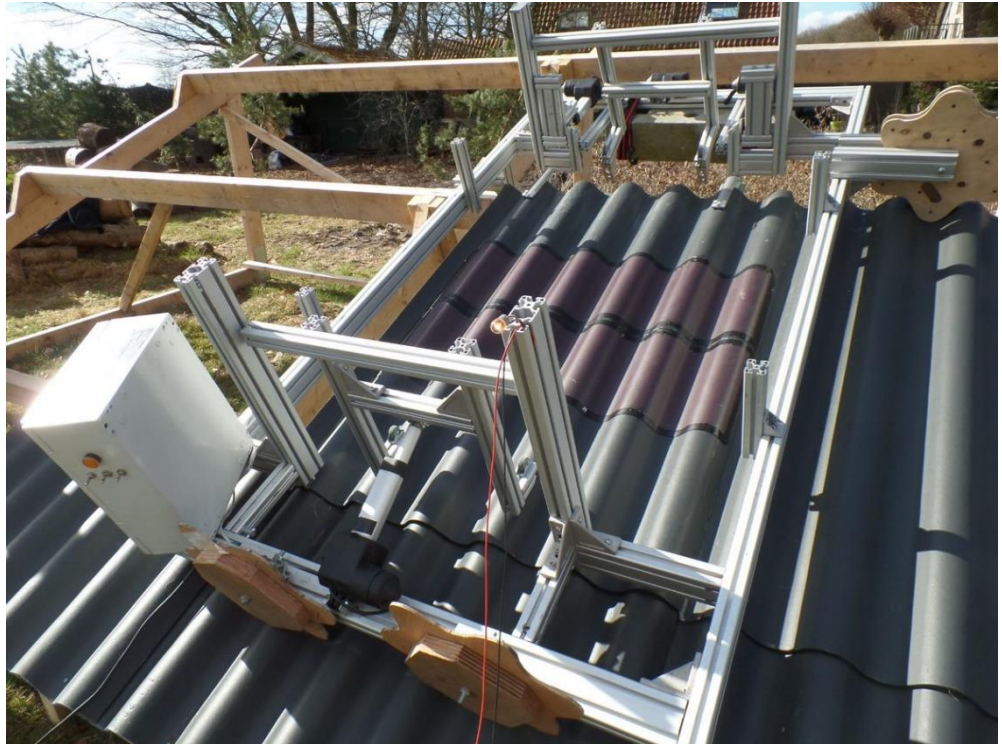
Werkpakket 2c heeft geresulteerd in een beugel concept, waarmee de plaat vastgemaakt kan worden op de gording. Bovendien is deze beugel zodanig ontworpen dat goede positionering van de dakplaat hiermee gewaarborgd is. Hierdoor zijn camera's niet noodzakelijk voor goede positionering van de dakplaat.

Het concept van de beugel is weergegeven in Figuur 6.3. f is de en de foto van de gefabriceerde beugel.





Figuur 6.4 Ontwikkelde versie van de gerealiseerde beugel als docking concept.



Figuur 6.5 Prototype plaatsingsrobot met een net geplaatste plaat met PV-folie. Lampje op de voorste staander is gebruikt om aan te tonen dat ook de elektrische aansluiting door de robot is gemaakt.

Werkpakket 2d/3 heeft een prototype van de plaatsingsrobot opgeleverd, waarvan een foto getoond wordt in Figuur 6.5. Deze versie van de robot legt per arbeidsgang één plaat. Om het leggen van de platen te versnellen zal een cartridge moeten worden ontwikkeld waarin meerdere platen in één arbeidsgang op het dak worden gezet. Daar is over gebrainstormd en zijn ideeën ontwikkeld, maar dit moet echter nog verder uitontwikkeld worden.

De robot kan zich lateraal over het dak bewegen. Bij dit prototype moet dat nog handmatig gebeuren maar bij een volgende versie is elektrische aandrijving op het huidige ontwerp mogelijk.

In werkpakket 3 is een aantal versies van dakplaten met PV-folie en elektrische aansluiting gemaakt.

In werkpakket 4 zijn in eerst de deelconcepten afzonderlijk getest. Ook het totaal concept is getest. Daarvan is een filmpje gemaakt. In Figuur 6.6 is een overzicht te zien van de opstelling waar de concepten getest zijn en uiteindelijk ook de promotiefilm is opgenomen.



Figuur 6.6 De opstelling die gebouwd is om de verschillende concepten te testen.

Werkpakket 5 is gedurende de uitvoering van het project geschrapt en daarover is eerder met RVO gecommuniceerd

Als uitkomst van werkpakket 6 is een eerste business case opgezet voor de componenten zoals die uit het huidige project gekomen zijn.

Wanneer de uitkomsten van de werkpakketten worden afgezet tegen de oorspronkelijk beoogde resultaten dan komt daar het overzicht uit zoals is weergegeven in Tabel 6-1.

Tabel 6-1 Overzicht belangrijkste beoogde en gerealiseerde resultaten

RESULTAAT	BEOOGD	GEREALISEERD
Dakplaat	✓	✓
Met energie opwekking (pv)	✓	✓
Geïntegreerd energietransport (stekker)	✓	✓
Plaatsing systeem (beugel)	✓	✓
Legrobot	✓	✓

### **6.3 Mogelijkheden voor spin off en vervolgactiviteiten**

Met het huidige project is aangetoond dat het mogelijk is met een robot PV-geïntegreerde dakplaten te plaatsen en tegelijkertijd elektrische verbinding tussen de dakplaten te maken. Deze is ook te gebruiken voor gewone golfplaten zonder PV-folie.

Doordat het systeem modulair is opgebouwd, kunnen niet alleen dakplaten van Eternit zonder PV folie gelegd worden, maar ook van andere leveranciers van dakplaten. Ook kunnen dakplaten met andere soorten en hoeveelheden PV folie worden gebruikt. Wat daarbij veranderd moet worden is het vullen van de cartridges met andere dakplaten.

In het project is de wijze van het bevestigen van de dakplaten op de gordingen principieel veranderd door het gebruik van de ontwikkelde beugel. De huidige/gangbare manier waarbij de dakplaten door het boren van gaten en vervolgens fixeren met schroeven gebeurt, zou door het nieuwe concept overbodig worden. Er is reeds interesse getoond om te onderzoeken of deze innovatie (separaat) doorontwikkeld kan worden.

## 7 Ondertekening

Delft, juni 2021

TNO

Dr.Ir. M.R. de Rooij  
Auteur

Dr. P.C. Rasker  
Research manager  
Structural Reliability