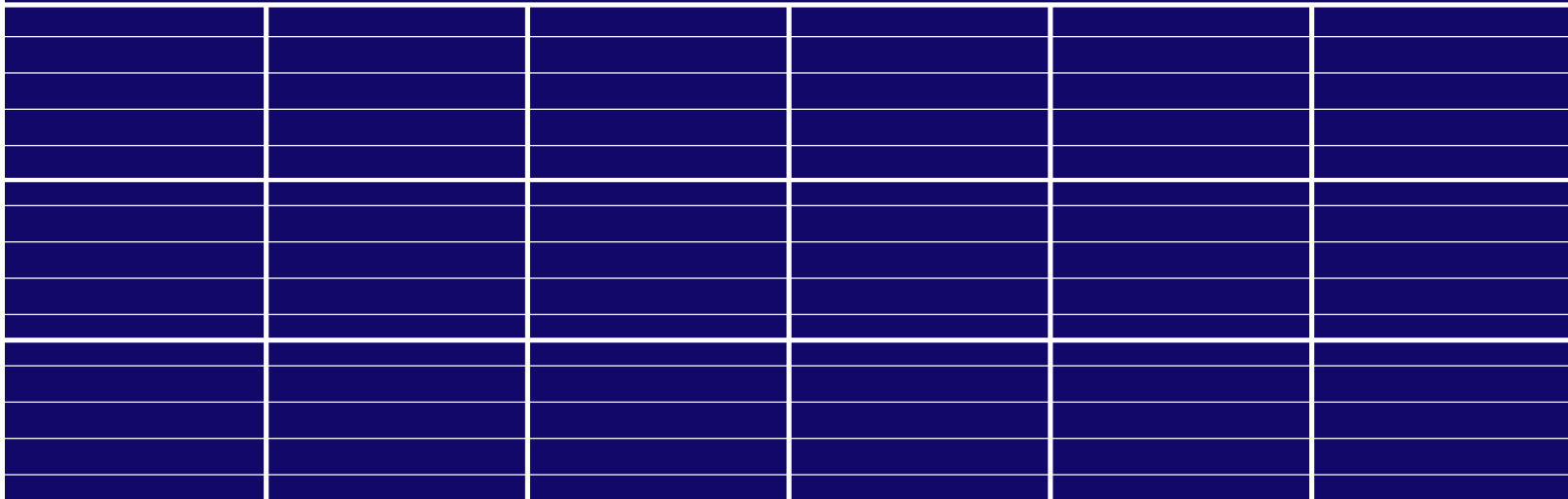
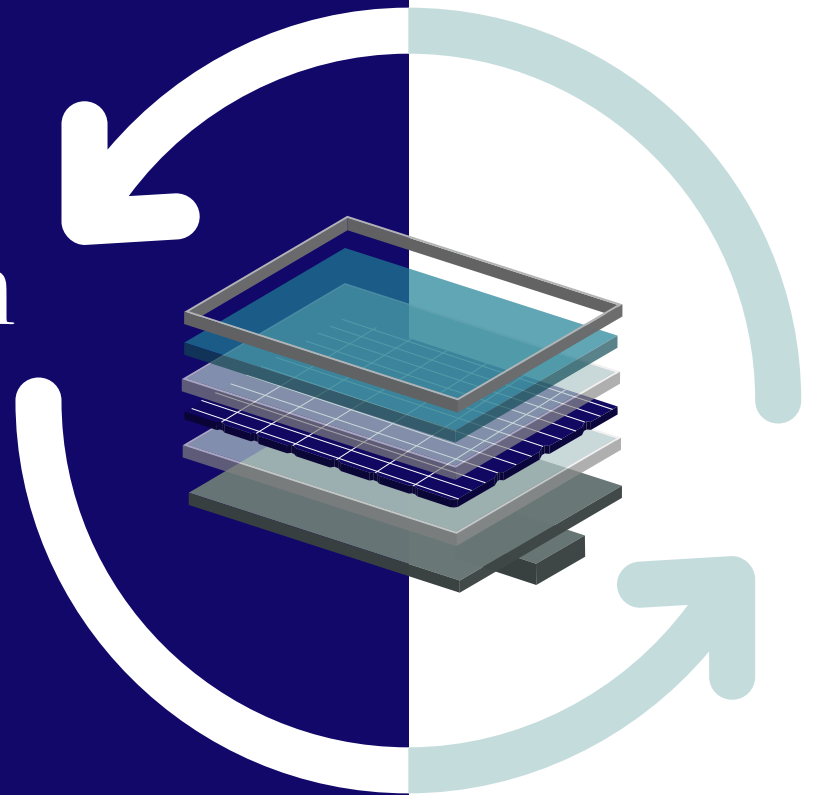


met focus op materiaal en technologie

mei 2021



materials
innovation
institute



Colofon

Auteurs en studie:

Harald Kerp (M2i)

Iris Jönsthövel (M2i)

Vormgeving & layout:

Iris Jönsthövel

Aanleiding:

Dit rapport is opgesteld in opdracht van de provincie Zuid-Holland (PZH) in het kader van de Circulaire Opgave “Circulair Zuid-Holland: Samen versnellen” en het Uitvoeringsprogramma Circulaire Maakindustrie (UPCM). Circulariteit binnen de energietransitie is een belangrijk thema voor beide organisaties. De PZH hanteert een aanpak gebaseerd op transitie management (Rotmans, Loorbach, e.a.) voor grote maatschappelijke veranderingsprocessen die op de lange termijn leiden naar een duurzame circulaire samenleving. Hiervoor is een sturingsmix nodig van opbouw, ombouw en afbouw. Dit rapport draagt bij aan het op orde krijgen van de basiskennis ten behoeve van visie, strategiebepaling en kansen voor innovatieve samenwerkingen. Het UPCM (2019-2023) maakt zich sterk voor de circulaire transitie van de Nederlandse maakindustrie. In het programma werken het ministerie van EZK, FME en Koninklijke Metaalunie, RVO, bedrijven, kennisinstellingen en andere partners samen.

Vanuit de PZH heeft Eefke Schramade, Transitie manager Circulaire Maakindustrie, de ontwikkeling van deze studie begeleid en vanuit het UPCM Bart Jeroen Bierens, Trekker Team Realisatie. Beide partijen zijn (samen) bezig met kennisopbouw, vernieuwersnetwerken en agendavorming ten behoeve van (doorbraak)projecten op het gebied van circulaire PV. In sectie 5 van dit rapport is een overzicht te vinden. Wil je betrokken zijn bij agendavorming, bijvoorbeeld via de [Helpathon Circulaire Zonne-energie](#) of heb je ideeën voor innovatieve circulaire PV projecten, neem dan contact op met circulair@pzh.nl of bart.bierens@rvo.nl.

Meer informatie over de inhoud van het rapport is te verkrijgen bij Harald Kerp van M2i (h.kerp@m2i.nl).

Inhoudsopgave

P4	Lijst met afkortingen
P5	Samenvatting
P7	Inleiding
P8	Overzicht typen PV
P9	01. Ontwikkeling technologiemix
P12	02. Ontwikkeling aantallen en massastromen
P16	03. Hergebruik en recycling
P20	04. Uitdagingen en oplossingsrichtingen
P30	05. Actieplan en informatiecampagne
P34	Annex 1 t/m 7

Lijst met afkortingen

AEEA:	<i>Afgedankte Elektrische en Elektronische Apparatuur</i>
Ag:	<i>Zilver</i>
Al:	<i>Aluminium</i>
AVV:	<i>Algemeen Verbindend Verklaring</i>
a-Si:	<i>Amorf Silicium</i>
BESI:	<i>BE Semiconductor Industries</i>
BIPV:	<i>Building Integrated Photo Voltaics</i>
CdTe:	<i>Cadmium Telluride</i>
CIGS:	<i>Koper Indium Gallium Selenide</i>
c-Si:	<i>Kristallijn Silicium</i>
Cu:	<i>Koper</i>
EoL:	<i>End-of-Life</i>
EVA:	<i>Ethylene-Vinyl Acetate</i>
GW:	<i>GigaWatt</i>
HVC:	<i>HuisVuilCentrale</i>
IRENA:	<i>International Renewable Energy Agency</i>
LCA:	<i>Life Cycle Assessment</i>
M2i:	<i>Materials innovation institute</i>
PERC:	<i>Passivated Emitter Rear Cell</i>
PFAS:	<i>Poly- en per-FluorAlkyl Stoffen</i>
RIVM:	<i>Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu</i>
PZH:	<i>Provincie Zuid-Holland</i>
PV:	<i>Photo Voltaic</i>
RVO:	<i>Rijksdienst voor Ondernemend Nederland</i>
RWS:	<i>Rijkswaterstaat</i>
SDE:	<i>Stimuleringsregeling Duurzame Energieproductie</i>
Tedlar:	<i>Polyvinylfluoride (merknaam)</i>
TKI:	<i>Topconsortia voor Kennis en Innovatie</i>
TNO:	<i>Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek</i>
TUD:	<i>Technische Universiteit Delft</i>
UL:	<i>Universiteit Leiden</i>
UPCM:	<i>Uitvoeringsprogramma Circulaire Maakindustrie</i>
WEEE:	<i>Waste Electrical and Electronic Equipment</i>
Zn:	<i>Zink</i>
ZZS:	<i>Zeer Zorgwekkende Stof</i>

Samenvatting

Grootschalige energieopwekking met behulp van fotonvoltaïsche (PV) zonnepanelen wordt steeds belangrijker en de PV markt groeit exponentieel. De vraag rijst echter ook: wat gebeurt er met al die zonnepanelen aan het einde van hun levensduur? Deze studie brengt de belangrijkste knelpunten in kaart die overwonnen dienen te worden om een circulaire PV waardeketen te bereiken.

Rond 2010 werden in Nederland de eerste grootschalige PV installaties neergezet. Met een gemiddelde levensduur van zonnepanelen tussen 20 en 30 jaar zal dat leiden tot een sterk groeiende PV afvalstroom rond 2030. Bovendien zal dat afval alleen maar sterker gaan groeien, gezien de verwachte toename van het landelijke opgestelde PV vermogen van zo'n 10 GW in 2020 tot rond 200 GW in 2050.

We geven een overzicht van de ontwikkeling van de PV technologiemarkt tot 2050 en laten zien dat kristallijn siliciumpanelen blijven domineren. De algemene verwachting is dat het marktaandeel van 95% in 2020 zal dalen naar nog steeds zo'n 90% in 2050. De overige 5 tot 10% wordt ingenomen door de dunne film technologieën CdTe en CIGS. Onzekerheden die de installaties beïnvloeden zijn o.a. het beschikbaar dak- en veldoppervlak, maatschappelijk draagvlak, milieukundige regelgeving, de capaciteit van

het elektriciteitsnetwerk, en de rol die de relatief nieuwe maar veelbelovende dunne filmtechnologie Perovskiet gaat spelen.

Ondanks deze onzekerheden is de huidige consensus dat de grootste massastromen zullen blijven bestaan uit glas, aluminium, polymeer en silicium, waarbij de totale landelijke afvalstroom zo'n 50.000 ton/jaar zal bereiken in 2030 met een doorgroei tot meer dan 400.000 ton/jaar in 2050.

Terug naar het circulariteitsvraagstuk: Waar de focus van de industrie en overheden tot nu toe vooral lag op het omlaag brengen van de kosten van zonne-energie, zal die verlegd moeten worden naar het ontwikkelen van technologische en beleidsmatige oplossingen voor reparatie, hergebruik en recycling van PV producten.

Zonnepanelen vallen wettelijk onder elektronisch afval en worden als zodanig ingezameld en verwerkt. Sinds 1 maart 2021 heeft de Nederlandse overheid alle PV fabrikanten en importeurs verplicht om via de Stichting OPEN bij te dragen aan de inzameling en recycling van de producten die zij op de markt brengen. Dat is een goede eerste stap maar er is meer nodig, zoals een ketenbreed circulair inkoopbeleid, het verplicht stellen van Eco-design en het toepassen van

minimumhoeveelheden recycleermateriaal bij de productie van nieuwe panelen, kwaliteitslabels voor tweedehands panelen, en een streng controlebeleid.

Naast de noodzakelijke beleid- en regelgeving moet breed worden ingezet op een aantal technologische innovaties. Technieken voor reparatie en hergebruik van panelen staan nog in de kinderschoenen en dienen versneld te worden doorontwikkeld. Recycling is al een stapje verder, maar ondanks dat rond 90% van de PV massa al wordt teruggewonnen is er grotendeels sprake van laagwaardige herinzet, zoals in bulkbouw materiaal of als laagwaardig silicium.

Na het in kaart brengen van materiaal- technologische innovaties met bijbehorende kennispartners doen we suggesties voor kansrijk vervolgonderzoek en nieuwe samenwerkingsverbanden. Als meest urgente onderwerpen worden genoemd:

1. **Vervangen van de lijmfolie EVA;** de verlijming van paneelonderdelen is een serieus probleem voor hergebruik en recycling. Recente innovaties om EVA te vervangen door een makkelijk te onthechten alternatief dienen snel opgeschaald te worden.
2. **Circulair paneelontwerp;** circulariteit moet

in de ontwerpfase worden ingebouwd voor alle paneeltypen.

3. **Opschalen van innovaties voor reparatie en hergebruik;** het versnellen van beschikbare innovaties voor tweedehands panelen in brede consortia.
4. **Circulaire folies en bouwelementen;** doorontwikkeling en opschaling van geïntegreerde PV toepassingen die volledig circulair zijn.
5. **Circulaire PV installaties;** het uitvoeren van pilots om beschikbare innovaties snel te vermarkten in samenwerking met grote zonneparkbeheerders.

Het verslag sluit af met een tweetal Roadmaps, een Actieplan en een 'Keuzekaart' voor de aanschaf van duurzame zonnepanelen, dit alles om ook planmatig een richting te geven aan de uitvoer van de voorgestelde activiteiten.

De Annexen bevatten aanvullende toelichting en diverse bronnen voor achtergrondinformatie. Het rapport is bedoeld om een overzicht te creëren dat kan helpen ter ondersteuning van toekomstige innovatietrajecten. Het UPCM en de provincie Zuid-Holland zijn bezig om bedrijven, kennisinstellingen en andere relevante partijen bij elkaar te brengen en uit te dagen om circulaire PV daadwerkelijk van de grond te krijgen.

Inleiding

De transities naar een duurzaam energiesysteem en naar een circulaire economie zijn twee van de belangrijkste uitdagingen van de komende decennia. Fotovoltaïsche (PV) zonnepanelen spelen een cruciale rol in de eerste opgave en worden tegelijkertijd steeds belangrijker in de circulaire opgave. De komende decennia zullen enorme hoeveelheden zonnepanelen vrijkomen na een eerste gebruiksfase. Het streven is om dit 'afval' als grondstof voor nieuwe producten te gebruiken en ten tweede om nieuwe PV installaties zodanig te ontwerpen dat ze na iedere gebruiksfase opnieuw kunnen worden ingezet voor het opwekken van zonnestroom.

In 2050 ambiëren Nederland en Europa om volledig klimaatneutraal en circulair te zijn. Dat zal ook voor de PV waardeketen moeten gelden. Momenteel wordt verreweg het grootste deel van de zonnepanelen niet op een circulaire manier geproduceerd. Hergebruik van de meeste onderdelen is bijna onmogelijk en er gaan veel kostbare materialen verloren. Daar komt bij dat de hoeveelheid PV installaties wereldwijd, en in Nederland, exponentieel groeit. Om te voorkomen dat we over een aantal jaar een grote afvalberg hebben van afgedankte zonnepanelen waar we niets meer mee kunnen, is het zaak om nu aan de slag te gaan met urgente oplossingen voor zaken als

circulair ontwerp, hergebruik en recycling.

In technisch opzicht is al veel onderzocht. Zonnepanelen die nu vrijkomen kunnen rond 90% worden gerecycled door de inzet van secundair materiaal in andere industrieën waaronder de glas-, aluminium- en halfgeleiderindustrie. Dit betreft echter grotendeels laagwaardige recycling ('downcycling') en er is nog een aanzienlijke inspanning vereist om op grote schaal hoogwaardig hergebruik en recycling te bereiken met rendabele businesscases.

Het Materials innovation institute, M2i, heeft in opdracht van het Uitvoeringsprogramma Circulaire Maakindustrie (UPCM) en de Provincie Zuid-Holland (PZH) een verkennende studie uitgevoerd met als doel om bestaande materiaal- en technologiekennis in kaart te brengen voor hergebruik en recycling van PV producten. Daartoe presenteren we de bevindingen van een kortlopend traject, uitgevoerd van december 2020 tot mei 2021, waarin een globale literatuurstudie is uitgevoerd en een reeks PV experts is geïnterviewd, binnen en buiten het M2i netwerk.

Het rapport geeft een overzicht van de uitkomsten en sluit af met suggesties voor kansrijke innovaties. De focus ligt op

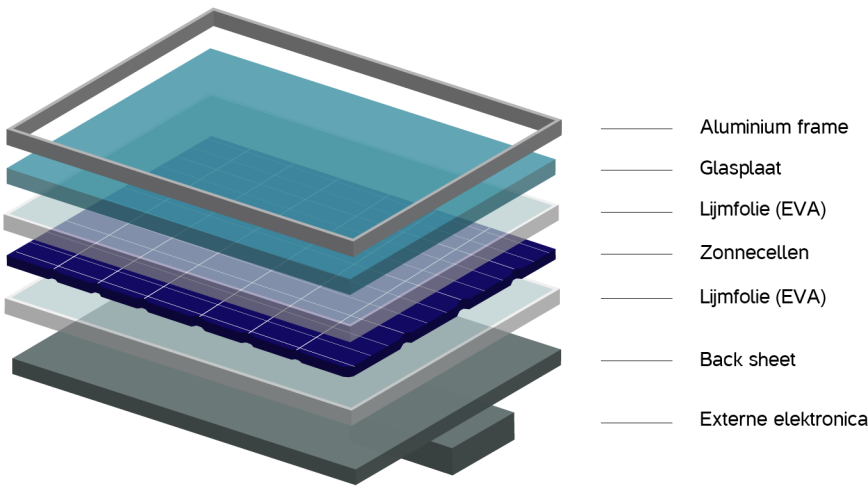
het opwekken van zonne-energie, terwijl *energieopslag* buiten beschouwing wordt gelaten. Het rapport richt zich met name op de volgende deelonderwerpen:

1. In kaart brengen van kennis- en ketenpartners m.b.t. circulaire zonnepanelen;
2. In kaart brengen van geïnstalleerde aantallen en end-of-life massastromen, voor Nederland en Zuid-Holland, inclusief trendverwachtingen;
3. Identificatie van openstaande kennisvragen en lopende innovatietrajecten;
4. Verkennen van circulaire strategieën voor PV producten en onderdelen;
5. Vaststellen van de meest kansrijke innovaties met mogelijke kennispartners.

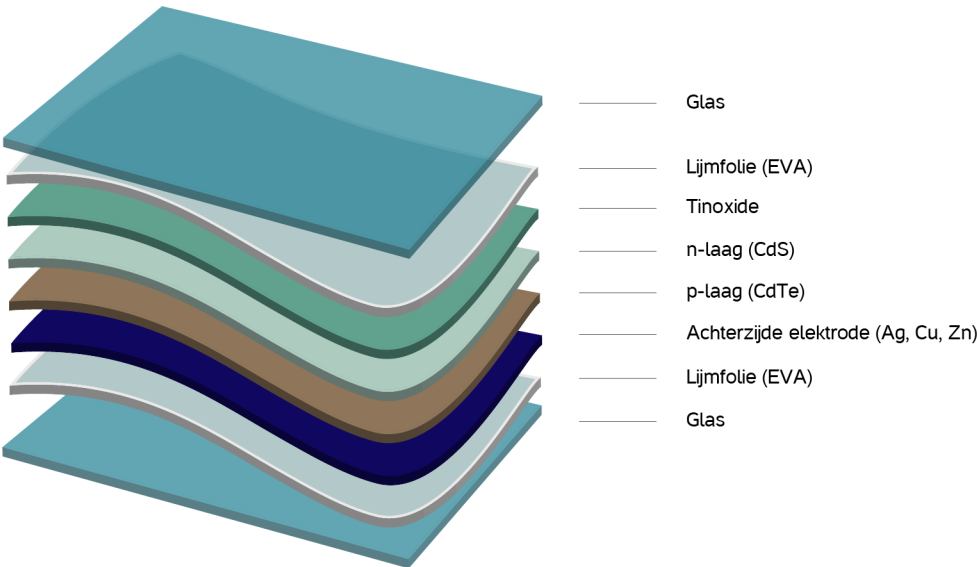
Opgemerkt moet worden dat het rapport niet beoogt een volledig overzicht te geven van de problematiek en het ecosysteem, maar vooral een startpunt biedt voor het versnellen van belangrijke innovaties. Het realiseren van een nieuwe, circulaire economie gebeurt namelijk niet zomaar. Daarvoor is actie en samenwerking nodig.

Overzicht opbouw typen PV

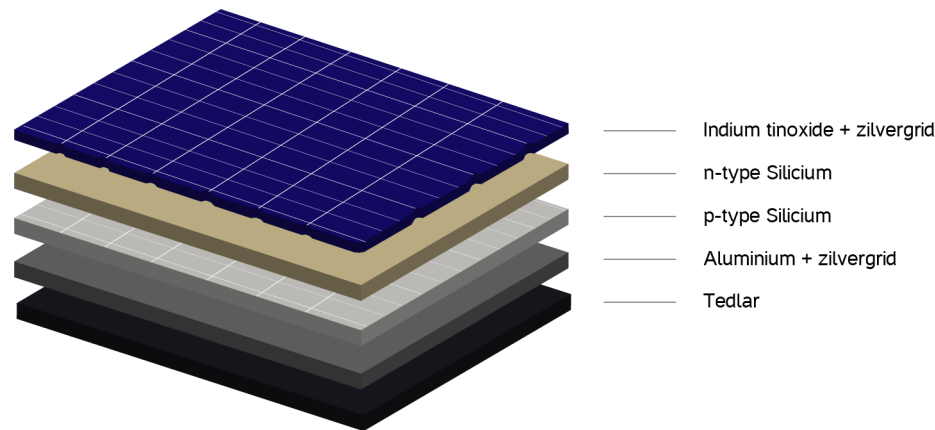
Si-paneel



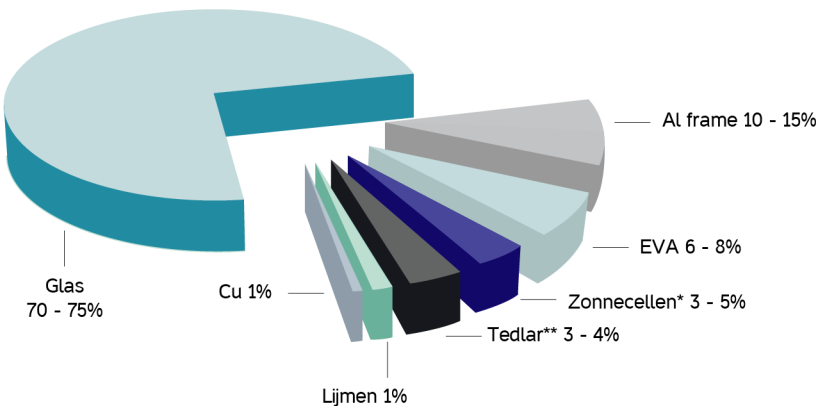
Dunne film (CdTe) Paneel



Si-paneel - opbouw van de cel



Samenstelling Si-paneel



* incl. ZZS lood ** incl. ZZS PFAS

Ontwikkeling technologiemix

01

Zonnepanelen bestaan uit typisch 60 tot 70 zonnecellen die in serie zijn geschakeld. De cellen zijn gemaakt van verschillende (halfgeleidende) materialen. Onder belichting produceren de cellen een elektrische spanning en een stroom, het zogenoemde fotonvoltaïsche (PV) effect. Daarom worden zonnepanelen ook wel PV-installaties genoemd. Zonnepanelen genereren een gelijkstroom van 12 of 24 Volt, wat door een omvormer wordt omgezet in 230 Volt wisselstroom.

De bekendste zonnecel bestaat voor het grootste deel uit silicium (Si). Zonnepanelen op basis van Si-cellen die in een industrieel productieproces worden gemaakt halen een energie-omzettingsrendement van 20% tot 22%. Het maximale rendement voor een enkele Si-cel in het laboratorium ligt rond 29%, terwijl de praktische grens op ongeveer 26% wordt geschat.

Dunne film zonnecellen bestaan uit een stapeling van dunne laagjes halfgeleiders, zoals cadmium en telluride (CdTe) of koper, indium, gallium en selenide (CIGS). Perovskieten zijn een relatief nieuwe klasse dunne film cellen die de afgelopen 10 jaar enorm veel aandacht hebben gekregen. Perovskietcellen kunnen snel en goedkoop op allerlei substraatsoorten worden aangebracht en hebben al een laboratoriumrendement van ruim 25% gehaald.

Bovendien kunnen Perovskietcellen worden gecombineerd met Si-cellen in zogenaamde 'hybride tandems' waarvoor in het laboratorium al 29,5% is gehaald [13].

Metabolic, Copper 8, UL [4]

2020: Si / CdTe / CIGS = 95% / 4% / 1%
2030: Si / CdTe / CIGS = 90% / 5% / 5%

Carrara et al. [6], studentenproject UL-TUD [8]

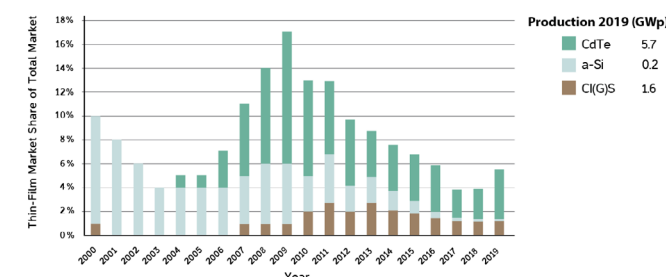
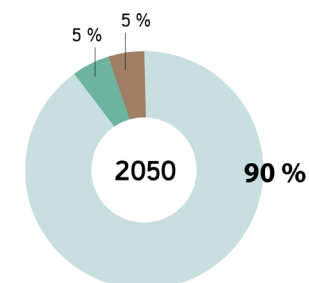
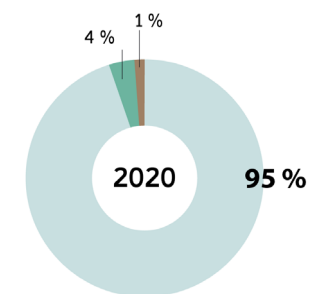
2020: Si / CdTe / CIGS = 95% / 2.4% / 1.9%
2030: Si / CdTe / CIGS = 90% / 5% / 5%
2050: Si / CdTe / CIGS = 90% / 5% / 5%

Fraunhofer ISE annual report 2019/2020 [5]

2019: Si / CdTe / CIGS = 94% / 4.2% / 1.4%

Ontwikkeling technologiemix (wereldwijd)

Kristallijn silicium
CdTe CIGS



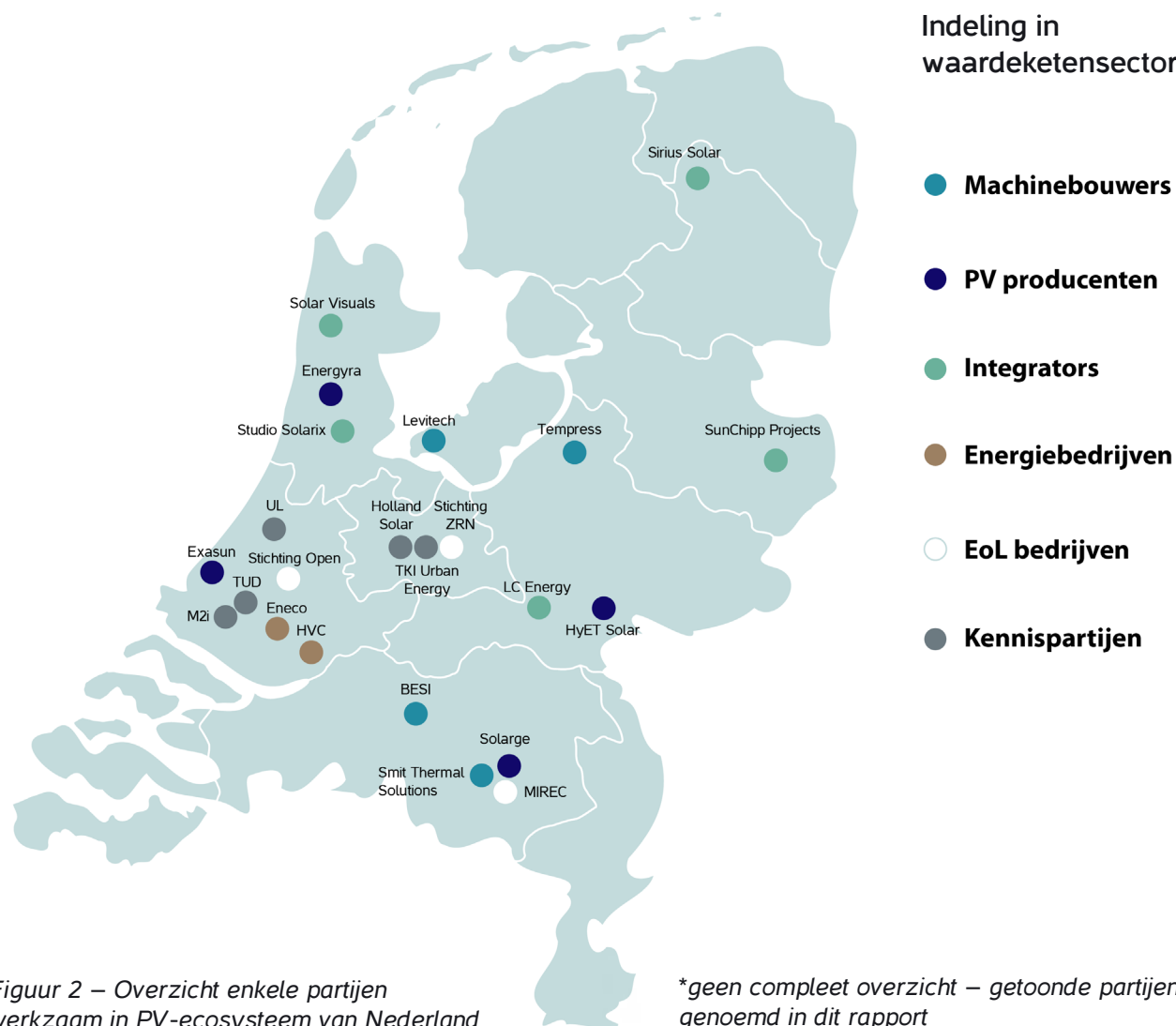
Figuur 1 – Voorspellingen ontwikkeling technologiemix voor nieuwe PV installaties wereldwijd.

Kristallijn silicium (c-Si) technologie is zowel wereldwijd als regionaal het dominerende technologieplatform met een marktaandeel tussen 90 en 95%. De overige 5 tot 10% wordt ingenomen door de dunne film platforms CdTe en CIGS. Er zijn verschillende recente studies beschikbaar die het verloop van de technologiemix voorspellen voor de komende decennia.

De geschatte voorspellingen leveren de volgende observaties op:

- Kristallijn silicium (c-Si) technologie blijft ook na 2030 het dominante technologieplatform; de belangrijkste PV technologieën zullen blijven meegroeien met de markt.
- CdTe en CIGS zijn de twee dominante dunne film technologieën; de meeste studies voorspellen een lichte groei van dunne film voor de komende decennia, maar binnen 10% van het totaal.
- De precieze ontwikkeling van de technologiemix na 2030 is onzeker en hangt af van verschillende factoren. Waarschijnlijk zal een steeds verdere integratie plaatsvinden van conventionele Si-technologie en (nieuwe) dunne film technologieën, zoals Si-Perovskiet hybride tandems (zie volgende pagina's).

Selectie* Kennis- en Innovatiepartijen PV-ecosysteem



Figuur 2 – Overzicht enkele partijen werkzaam in PV-ecosysteem van Nederland

*geen compleet overzicht – getoonde partijen worden genoemd in dit rapport

- De rol van amorf silicium (a-Si) dunne film technologie is sinds 2015 zo goed als uitgespeeld. Echter, de ontwikkeling van dunne film folietechnologie vindt nog steeds doorgang, onder meer bij [HyET Solar](#).

Onderzoek, ontwikkeling en productie in Nederland is vooral gericht op de volgende productgroepen:

Siliciumpanelen

Kristallijn silicium, de standaardtechnologie met verreweg het grootste marktaandeel wordt vertegenwoordigd door Nederlandse paneelproducenten als [Exasun](#), [Solarge](#), [Energyra](#), en leveranciers van depositiesystemen voor de globale zonnecelproductiemarkt zoals [Levitech](#), [Tempress](#), [BE Semiconductor Industries \(BESI\)](#) en [Smit Thermal Solutions](#).

Huidige technologieontwikkelingen zijn in de eerste plaats gericht op het incrementeel verhogen van het energierendement m.b.v. concepten als bifaciaal (glas-glas panelen), PERC (geavanceerde achterzijdepassivatie), heterojuncties (siliciumlagen van verschillende kristalliniteit) en hybride tandems.

Hybride tandems combineren de hoge rendementen van silicium en Perovskiet door een stapeling van twee of meerdere celtypen in een enkel geïntegreerd paneel, en worden

gezien als een veelbelovende innovatie die binnen enkele jaren een dominante marktpositie kan gaan opeisen.

Een tweede grote ontwikkelingsrichting bestaat uit het ontwerpen van BIPV panelen (PV geïntegreerd in bouwkundige constructies) met de daarvoor benodigde esthetische en materiaalkundige eigenschappen. Innovatieve partijen zoals [Studio Solarix](#), [ZigZag Solar](#), [Sirius Solar](#), [SunChip Projects](#), [Exasun](#), en de TNO spin-off [Solar Visuals](#) spelen op dit vlak een belangrijke rol.

Dunne film technologie

In Nederland is veel expertise aanwezig op het gebied van CIGS technologie, o.a. [TNO Solliance](#), [Smit Thermal Solutions](#), en BESI. Net als bij siliciumpanelen ligt de focus op zowel het verhogen van het energierendement als het ontwikkelen van BIPV toepassingen.

Daarnaast wordt gewerkt aan de doorontwikkeling van PV folies, met name door HyET Solar en TNO Solliance. Folietechnologie is relevant voor BIPV toepassingen waarbij flexibiliteit en grote oppervlakteafmetingen een rol spelen, en daarnaast ook voor mogelijke introductie van a-Si / Perovskiet hoogrendementsfolies.

Opgemerkt moet worden dat voor de grootste dunne filmtechnologie CdTe geen specifieke Nederlandse industrie bestaat en voor afgedankte panelen een goed wereldwijd retoursysteem beschikbaar is.

Perovskiet technologie wordt daarentegen gezien als een grote kans voor Nederland. TNO verwacht dat Nederland en Europa een leidende rol kunnen nemen bij de ontwikkeling van Perovskiet-silicium tandems [13, 15], waarbij het niet uitgesloten is dat geavanceerde PV maakindustrie (opnieuw) in de regio kan worden opgebouwd.

Ontwikkeling aantallen en massastromen

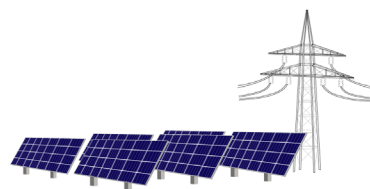
02

Begin 2020 is het totale opgestelde vermogen van zonnepanelen in Nederland ruim 10 GW [7, 13]. Volgens schattingen van TNO zal dit in 2050 vertwintigvoudigd zijn tot 200 GW gigawatt: 80 GW op en aan gebouwen, 40 GW op land, 30 GW op infrastructuur en 50 GW op water.

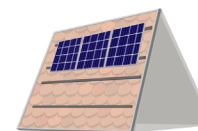
Zoals eerder opgemerkt blijft kristallijn siliciumtechnologie ook na 2030 het dominante technologieplatform; de belangrijkste secundaire technologieën blijven hoogstwaarschijnlijk CdTe en CIGS. Hoe de toekomstige PV installaties zich precies ontwikkelen, zowel wereldwijd als binnen de landsgrenzen, is vrij lastig te voorspellen en wordt beïnvloed door een combinatie van verschillende onzekerheden, zoals:

- Ontwikkeling van kosten van klein- en grootschalige PV installaties, in combinatie met subsidie- en stimuleringsmaatregelen van de publieke overheid. PV op utiliteitsschaal is anno 2021 zonder subsidies reeds goedkoper dan fossiele energieopwekking, PV op daken is (bijna) concurrerend [7].
- Capaciteit van het elektriciteitsnet; met name in het oosten en noorden van Nederland lopen PV projecten regelmatig vertraging op als gevolg van beperkte netcapaciteit. In de Provincie Zuid-Holland is de capaciteit grotendeels toereikend [11], al lopen

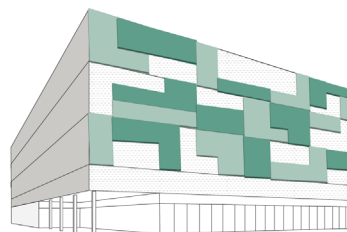
Onzekerheden bij toekomstige installaties



Capaciteit van het landelijke elektriciteitsnet.



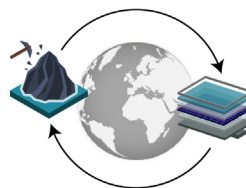
Beschikbaar dakoppervlak.



Doorontwikkeling van BIPV.



Beschikbaar veldoppervlak en maatschappelijk draagvlak.



Beschikbaarheid hoogwaardige secundaire grondstoffen.



Circulariteit in de keten.



Milieukundige regelgeving.

Figuur 3 – Toekomstige onzekerheden PV installaties

sommige regio's al tegen de maximale capaciteit aan.

- Beleid en regelgeving t.a.v. geografische inpassing van zonne-energie; recent is de 'zonneladder' geïntroduceerd waarbij eerst serieus dient te worden gekeken naar plaatsing van zonnepanelen op daken, daarna naar 'restgronden' en tenslotte naar weilanden en groen gebied. Pas wanneer niet voldoende daken geschikt zijn voor het realiseren van de lokale klimaatambities kan worden besloten om velden in te zetten.
- Hiermee samenhangend:
 1. Beschikbaar dakoppervlak voor zonnepanelen; de ontwikkeling van lichtgewicht panelen wordt steeds belangrijker voor benutting van zoveel mogelijk dakoppervlak.
 2. Beschikbaar veldoppervlak voor grootschalige PV; dit hangt met name af van maatschappelijk draagvlak, milieuaspecten, gebruik van landbouwgrond.
 3. Doorontwikkeling van BIPV en draagvlak voor 'esthetisch' gebruik in gevels, wegen, bruggen, dijken, geluidsschermen, etc.
- PV mass customization; een concept ontwikkeld door TNO [13], met als doel om PV-bouwelementen goedkoop en grootschalig te produceren. Dit concept kan de Nederlandse en Europese PV

markt langzaam doen verschuiven van het importeren van volledige panelen (grotendeels uit Azië) naar de import van losse cellen. Verwerking tot halffabrikaten en eindproducten, zoals dakpannen en geluidsschermen, vindt dan steeds meer plaats bij regionale PV-leveranciers, bouwbedrijven, autofabrikanten, etc.

- Het ontstaan van een lokale waardeketen voor goedkoop hergebruik en reparaties van tweedehands PV producten.
- De beschikbaarheid van grondstoffen voor de groeiende productie van panelen, mogelijkheden voor tweedehands gebruik (zie vorige punt) en verbeteringen in recyclingtechnieken om aan de steeds toenemende vraag aan grondstoffen te voldoen.

Met inachtneming van bovenstaande onzekerheden zijn verschillende schattingen gemaakt voor te verwachten EoL massastromen op globaal, landelijk en regionaal niveau. Gezien het internationale karakter van de productie en handel in zonnepanelen bestaan er wereldwijd tussen verschillende regio's geen grote variaties in toegepaste technologie. De groeisnelheid van installaties kan wel significant verschillen afhankelijk van regionaal beleid, draagvlak, etc.

De volgende tabellen geven de (gecombineerde) resultaten van enkele recente publicaties en databases, vertaald naar een trendverwachting voor Nederland en de provincie Zuid-Holland.

a. RWS Klimaatmonitor, Nationaal Solar Trendrapport [7], Duflou et al. [1]

b. RWS Klimaatmonitor, Nationaal Solar Trendrapport [7], IRENA report - 'regular loss scenario' [2]

c. RWS Klimaatmonitor, Nationaal Solar Trendrapport [7], Studentenrapport UL-TUD [8]

Tabel 1: Te verwachten EoL PV massastromen voor Nederland (ton/jaar)

2030	Totaal	Glas (70%)	Al (15%)	Polymeer (10%)	Si (5%)	Ag (0.1%)
a	15.000	11.000	2.300	1.500	800	15
b	15.000	11.000	2.300	1.500	800	15
c	135.000	95.000	20.300	13.500	6.800	135
Gemiddeld	55.000	38.500	8.300	5.500	2.800	55

2040	Totaal	Glas (70%)	Al (15%)	Polymeer (10%)	Si (5%)	Ag (0.1%)
a	60.000	42.000	9.000	6.000	3.000	60
b	150.000	105.000	23.000	15.000	7.500	150
c	189.000	132.000	28.000	19.000	9.500	189
Gemiddeld	133.000	93.100	20.000	13.300	6.700	133

2050	Totaal	Glas (70%)	Al (15%)	Polymeer (10%)	Si (5%)	Ag (0.1%)
b	488.000	342.000	73.000	49.000	24.000	488
c	432.000	302.000	65.000	43.000	22.000	432
Gemiddeld	460.000	322.000	69.000	46.000	23.000	460

Tabel 2: Te verwachten EoL PV massastromen voor de provincie Zuid-Holland (ton/jaar)

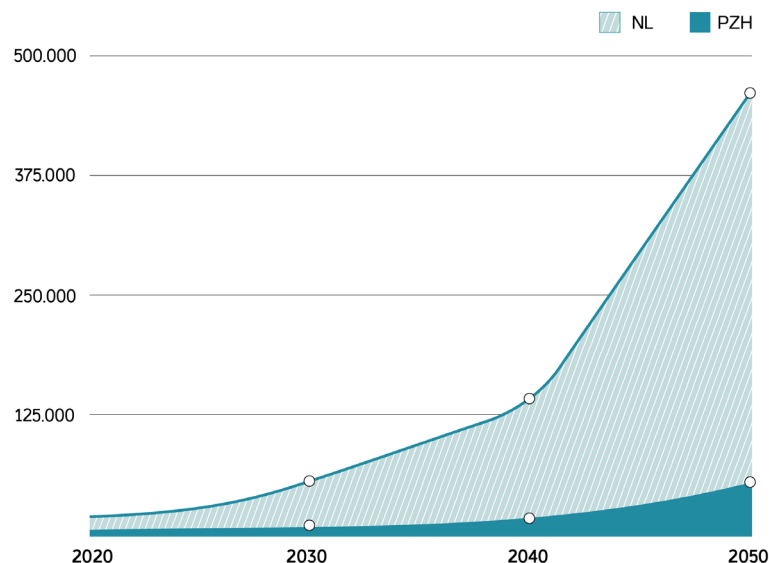
2030	Totaal	Glas (70%)	Al (15%)	Polymeer (10%)	Si (5%)	Ag (0.1%)
a	1.700	1.200	300	200	100	2
b	1.700	1.200	300	200	100	2
c	15.000	10.900	2.300	1.500	800	15
Gemiddeld	6.100	4.300	900	600	300	6

2040	Totaal	Glas (70%)	Al (15%)	Polymeer (10%)	Si (5%)	Ag (0.1%)
a	6.700	4.700	1.000	700	300	7
b	16.700	11.700	2.500	1.700	800	17
c	21.000	14.700	3.200	2.100	1.100	21
Gemiddeld	15.000	10.400	2.200	1.500	700	15

2050	Totaal	Glas (70%)	Al (15%)	Polymeer (10%)	Si (5%)	Ag (0.1%)
b	54.000	37.800	8.100	5.400	2.700	54
c	48.000	33.600	7.200	4.800	2.400	48
Gemiddeld	51.000	35.700	7.700	5.100	2.600	51

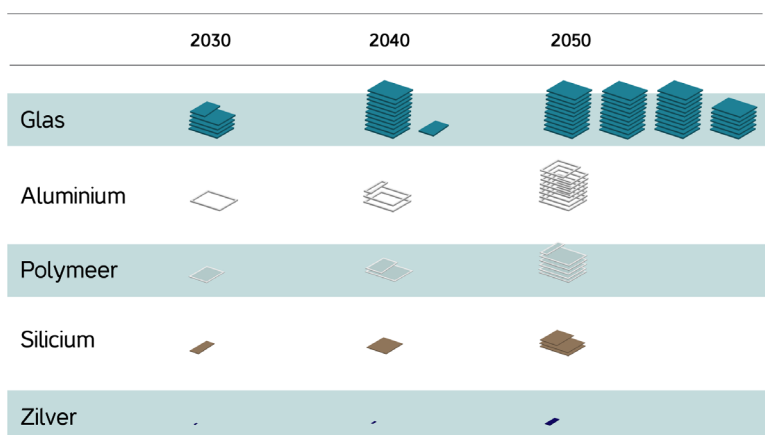
Massastromen Nederland en Zuid-Holland

Te verwachten EoL PV massastromen totaal voor Nederland en de provincie Zuid-Holland (ton/jaar).



Te verwachten EoL PV massastromen opgesplitst per materiaal voor de provincie Zuid-Holland (ton/jaar).

◆ = 1000 ton/jaar



Opgemerkt dient te worden:

- De grootste massastromen bestaan uit glas (ca. 70%), gevolgd door aluminium (~15%) en polymeer (~10%).
- Zilver vertegenwoordigt slechts 0,1% maar vertegenwoordigt ca. 65% van de waarde.
- De waarden in de tabel moeten worden beschouwd als indicatieve grootteorde schattingen.
- De curve voor materiaalstromen begint eind jaren 20 exponentieel te groeien. Dit is het gevolg van het vrijkomen van de eerste grote series panelen die in 2010-2015 zijn opgesteld.
- Studies a,b,c (zie p. 13-14) laten significante verschillen zien; (a) is meest conservatief; (c) voorspelt de sterkste groei rond 2030; (b) de sterkste doorgroei in de jaren 2040-2050.
- (a) en (b) verwachten een tijdelijke afvlakking eind jaren 30, de overall trend voorziet echter een forse doorgroei tot landelijke EoL massa's van 100.000 – 200.000 ton/jaar in 2040 en 400.000 – 500.000 ton/jaar in 2050.
- De schattingen voor de provincie Zuid-Holland zijn gemaakt onder de aanname dat de aantallen zich ontwikkelen als een vast aandeel (11 %) van de landelijke trend. In de praktijk kunnen echter significante fluctuaties optreden als functie van regionale verschillen in beschikbaar dak- en veldoppervlak, netcapaciteit, etc.

Figuur 4 – Massastromen Nederland en Zuid-Holland

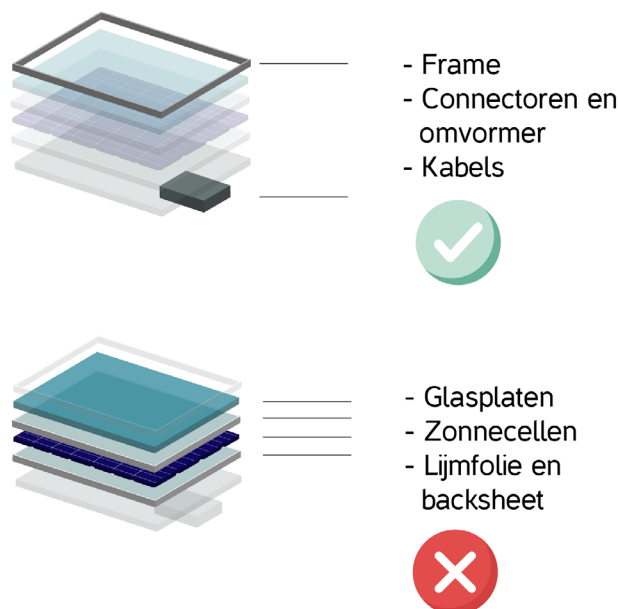
Het belang van een circulaire PV sector wordt in toenemende mate erkend binnen Europa en Nederland. In september 2020 heeft de EU een lijst met 30 kritieke grondstoffen gepresenteerd die belangrijk zijn voor de ontwikkeling van strategische (duurzame) technologieën en waarvan de toekomstige aanvoer in het gedrang kan komen omdat de winning grotendeels buiten Europa plaatsvindt. De lijst bevat de volgende grondstoffen voor zonnecellen: silicium, indium, tellurium, gallium. Bovendien worden cadmium, selenium en zilver vanwege hun schaarste ook als ‘kritiek’ aangemerkt voor de productie van zonnecellen [4]. De EU heeft een actieplan opgesteld om de voorziening van kritieke stoffen te verbeteren. Daarnaast werkt de EU aan de introductie van [beleidsinstrumenten](#) om de PV sector circulair te maken, zoals groene inkoopcriteria en een [Eco-design](#) richtlijn. Het laatste staat nog in de kinderschoenen maar zal uiteindelijk een uniforme set criteria bevatten voor zaken als repareerbaarheid, levensduurverlenging en duurzame materiaalkeuze.

Nederlandse fabrikanten en importeurs van PV producten zijn sinds 2014 wettelijk verplicht te voldoen aan de richtlijn Afgedankt Elektrisch en Elektronisch Afval (AEEA), de Nederlandse implementatie van de [Europese WEEE-richtlijn](#). Tot 1 maart 2021 konden PV gebruikers zich voor inzameling

en retourlogistiek laten ondersteunen door de [Stichting Zonne-energie Recycling Nederland \(ZRN\)](#), onderdeel van de bredere [Stichting OPEN](#), het internationaal opererende [PV Cycle](#), en door [Weee Nederland](#).

Sinds 1 maart heeft OPEN een Algemeen Verbindend Verklaring (AVV) gekregen [12], en daarmee de centrale regie over de inzameling en recycling van alle e-waste inclusief zonnepanelen. Dat houdt in dat ieder

Hergebruik & reparatie



Figuur 5 – Status hergebruik & reparatie

zonnepaneel via OPEN wordt ingezameld, dat OPEN verplicht gestelde tarieven voor recycling int bij de producent en inzamelpunten, inzamelbedrijven en verwerkers contracteert. Eén van de inzamelaars is Weee Nederland, terwijl ZRN en PV Cycle formeel geen uitvoerende rol meer hebben bij de inzameling.

Naast de verbeterde inzamelsystemen en de strengere richtlijnen voor producenten en importeurs bestaat in Nederland nog geen verplichte verwijderingsbijdrage voor consumenten. Zo'n systeem bestaat bijvoorbeeld wel in België, met als doel om te sparen en investeren in goede toekomstige recyclingfaciliteiten. Het gaat om een verwijderingsbijdrage van 2 euro per zonnepaneel op de factuur voor consumenten.

De huidige status t.a.v. hergebruik, reparatie en recycling van zonnepanelen, inclusief de rol van relevante materialen, is hieronder puntsgewijs samengevat.

- Het aluminium frame en externe elektronica waaronder omvormers, connectoren en bekabeling, onderdelen die koper bevatten, zijn simpel demonteerbaar en kunnen als geheel worden hergebruikt.
- De panelen zelf zijn “dichtgelijmd” met EVA laminaatfolie, de zogenaamde

encapsulant. EVA staat voor Ethyleen Vinyl Acetaat en is een rubberachtige kunststof die zorgt voor een uitstekende hechting tussen de paneelcomponenten. Bovendien is EVA optisch transparant, slijtvast en goed bestand tegen externe condities zoals temperatuurschommelingen en luchtvochtigheid. EVA heeft echter als nadeel dat het reparatie of hergebruik van panelen moeilijk maakt. Meestal moet het hele paneel worden afgedankt als een enkel onderdeel defect is. De ontwikkeling van alternatieve encapsulanten kan een sleutelrol spelen t.b.v. hergebruik en reparatie.

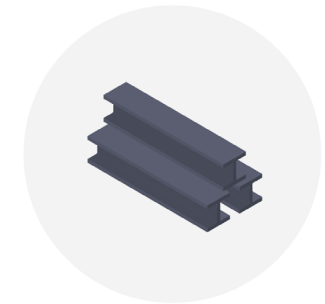
- Daarnaast is hergebruik of revisie niet interessant voor de meeste paneelproducenten, aangezien zij niet verantwoordelijk willen zijn voor panelen die onder hun merknaam opnieuw op de markt worden gebracht.
- Een uitzondering vormt de Zuid-Hollandse producent Exasun, die heeft aangekondigd om eind 2021 met circulaire zonnepanelen op de markt te komen. De zonnepanelen zullen worden verkocht met statiegeld en aan het einde van de levensduur weer ingezameld. De ontwikkelingen vinden voor een groot deel plaats in het ontwikkelproject PARSEC (zie Annex 2).

Downcycling

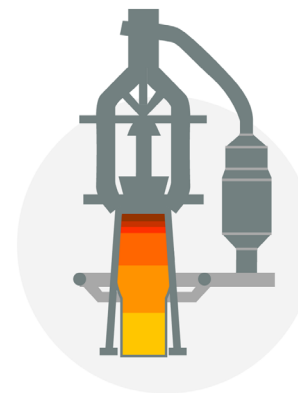
De verschillende fracties worden grotendeels gedowncycled vanwege de lage zuiverheid:



Glas → flessen, bouwmetaal



Silicium → metaal- & halfgeleiderindustrie



Zilver → voorlopig onrendabel



Polymeer → thermische recycling

Figuur 6 – Status van recycling opbrengsten

Recycling

- De gangbare methode is om, na demontage van koperen kabels, externe elektronica en aluminium frame, de gehele gelamineerde panelen tot korrels te vermalen en de korrels vervolgens te scheiden in laagwaardige fracties. Voor Si panelen houdt dit in: fracties glas, silicium, metalen, polymeer.
- Na de eerste demontage stap kan het laminaat ook gecontroleerd worden weggebrand, waarbij de vrijgekomen warmte-energie wordt opgevangen ('thermische recycling'). Daarna worden de polymeervrije cellen gescheiden in fracties glas, silicium, metalen. Zie Annex 6 voor nadere toelichting.
- De verschillende fracties worden grotendeels gedowncycled vanwege de lage zuiverheid:
 - Glas wordt naar de glasflessenindustrie gestuurd, verwerkt tot glaswol, of gebruikt als vuller in betonachtig bouw materiaal.
 - Silicium wordt als laagwaardige grondstof ingezet in de metaalindustrie. Hoogwaardige recycling is mogelijk, bijvoorbeeld in een pyrolyseproces, maar vooralsnog niet rendabel.
 - Zilver kan hoogwaardig worden teruggewonnen uit de metaalsmelt bij

hoge temperatuur, maar dit is te energie-intensief en dus onrendabel gezien de lage hoeveelheden.

- De overige reststromen worden gestort en via verbranding in warmte omgezet, zoals de polymeerfracties.

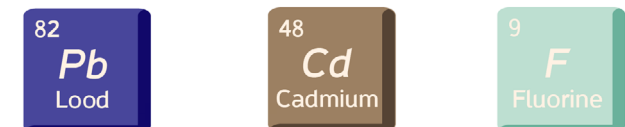
Zoals hergebruik en reparatie niet interessant zijn voor de meeste paneelproducenten vanwege het ontbreken van een aantrekkelijk business model, zo geldt dat ook voor recyclers. Technisch is veel mogelijk, maar de EoL volumes zijn (nog) te laag om break-even te kunnen draaien. In 2020 werd slechts [124 ton aan panelen](#) aangeboden voor recycling. Om een installatie break-even te laten draaien, moet minimaal 4.000 ton PV-afval per jaar beschikbaar zijn. Dit volume zal in Nederland voor 2030 ruimschoots voorhanden zijn (tabel 1, [8], Annex 7 interview 10). Momenteel kent Nederland geen eigen PV-recyclingfaciliteit en wordt al het ingezamelde materiaal naar installaties in België, Frankrijk en Duitsland gestuurd, waar grote recyclers PV-lijnen hebben opgezet als een investering t.a.v. de verwachte grote instroom rond 2030. Inzamelaars slaan afgedankte PV panelen op totdat de volumes economisch rendabel kunnen worden vervoerd naar een recyclingfaciliteit. De groeiende volumes in combinatie met het recent verplicht gestelde inzamelingsstelsel via de stichting OPEN (zie p. 16), maken het in

Kritieke stoffen



Figuur 7 – Overzicht kritieke stoffen

Toxische stoffen



* in PFAS
verbindingen

Figuur 8 – Overzicht toxische stoffen

de nabije toekomst mogelijk om doelgericht gebruik te maken van de meest rendabele recyclingroute, inclusief de mogelijkheid om panelen en BIPV bouwelementen op afroep terug te leveren aan specifieke producenten met het oog op hun eigen circulaire productontwikkelingen.

Recent is een plan bekendgemaakt van o.a. TNO en Stichting Weee om binnen 1 jaar een fabriek voor hoogwaardige recycling van zonnepanelen op te zetten [12]. Naast het “schoon” scheiden van de glasplaten zal worden ingezet op het terugwinnen van silicium en zilver met een zuiverheid die toepassing in nieuwe zonnepanelen mogelijk maakt. Technologische details zijn (nog) niet beschikbaar. Annex 6 bevat een verdere toelichting op de huidige stand van PV recycling met een aantal veelbelovende innovaties.

Kritieke en toxische materialen

De huidige generatie zonnepanelen bevat kritieke en toxische materialen. Met toxische materialen bedoelen we stoffen die als zeer zorgwekkend stoffen geclassificeerd zijn (ZZS). De kritieke materialen (zie p. 16) zijn silicium en zilver voor Si-panelen, tellurium en cadmium voor CdTe, en indium, gallium en selenium voor CIGS. Toxische materialen zijn lood en PFAS voor Si en cadmium voor CdTe. Het is dus van

belang dat inzameling, opslag en recycling van panelen zorgvuldig plaatsvindt. Daarnaast is actie vereist om een aantal kritieke en toxische materialen te vervangen, meer hierover in sectie 5. Hieronder nog enkele feiten over kritieke materialen in zonnepanelen:

- Zilver, slechts 0,1% van de totale PV-massa maar 65% van de waarde, wordt nauwelijks teruggewonnen omdat het economisch niet rendabel is.
- De groei van de CdTe markt wordt al gehinderd door de beperkte beschikbaarheid van tellurium en cadmium. Tellurium geldt als één van de meest zeldzame metalloïden.
- Rond 2050 is twaalf keer meer indium nodig dan de huidige jaarproductie, uitsluitend voor toepassing in met name CIGS zonnepanelen [4].
- Indium, cadmium, tellurium en selenium worden niet gedolven maar zijn bijproducten van raffinage. Tellurium is een bijproduct van koperproductie, indium van zinkproductie.
- De wereldwijde productie aan indium is beperkt tot een 1000 ton per jaar. Bolivia is rijk aan zinkhoudend slib, en exporteert dat naar o.a. de haven van Antwerpen. Vanuit

daar gaat het verder naar de raffinaderijen van Nyrstar en Umicore (België).

Hiernaast moet ook rekening worden gehouden met dreigende beperkingen van de productiecapaciteit van het voor zonnepanelen benodigde (extra zuivere) ‘solargrade’ silicium en ‘solar glass’ [10].

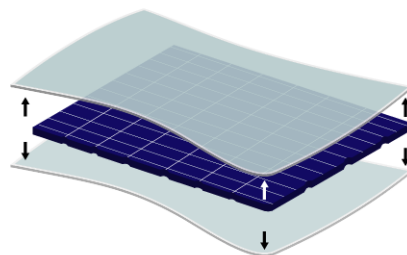
Begin 2021 is ook onrust ontstaan over ‘foute zonnepanelen’. Hiermee wordt bedoeld op het feit dat de grondstof polysilicium van toonaangevende paneelproducenten afkomstig is van Chinese leveranciers die gebruik zouden maken van dwangarbeid door Oeigoeren [16].

Om de circulariteit van PV systemen te bevorderen dient een aantal significante uitdagingen te worden aangegaan. Op basis van recente publicaties en nieuwsberichten (Annex 1) en een reeks expertinterviews (Annex 7) zetten wij hier de belangrijkste op een rij. De uitdagingen zijn onder te verdelen in de hoofdthema's **Materiaal en Technologie** en **Beleid en Regelgeving**, die beide meerdere subthema's bevatten.

Materiaal en technologie

De uitdagingen op het gebied van materiaal en technologie kunnen ruwweg worden onderverdeeld in drie subthema's die in het vervolg worden toegelicht. Zoals eerder opgemerkt ligt de focus op de (circulaire) productie van zonne-energie, terwijl energieopslag buiten beschouwing is gelaten.

1. Ontwerp voor circulariteit



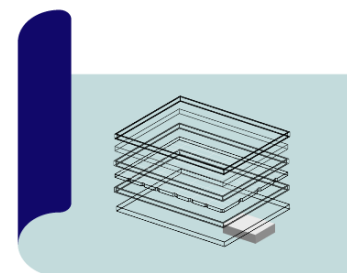
M1A: Encapsulant vervangen door 'release folie'

[Annex 7: interviews 4, 5, 6, 8, 10, 13]

De thermoplast EVA is de goedkope standaardoplossing voor het verlijmen van panelen maar is nauwelijks te onthechten en zorgt voor serieuze EoL uitdagingen. Een consortium met o.a. TNO, DSM, Exasun heeft recent een 'release folie' ontwikkeld ter vervanging van EVA om cellen en glas zuiver van elkaar te kunnen scheiden op externe triggermechanismes.

- **Urgentie = hoog:** Verlijming vormt een grote bottleneck voor reparatie, hergebruik en recycling van glas en celmateriaal.
- **Lopende activiteiten:** Annex 2: PARSEC project, 2020 – 2022, met o.a. TNO, DSM, Exasun, heeft als doel om de technologie verder te ontwikkelen (optimalisatie proces en materialen, opschaling, hergebruik).

- **Mogelijke vervolgacties:** Opzetten breed consortium, optimalisatie technologie en materialen, aansluiten EoL partijen voor testen hergebruik en recycling, verdere opschaling, testen van businesscases.



M1B: Circulair paneelontwerp

[Annex 7: interviews 1, 4, 5, 6, 8, 13]

Ontwerp voor circulariteit is een breed overkoepelend thema. Om een paar voorbeelden te noemen: Lopende inspanningen om minder duurzame PV materialen te vervangen, zoals EVA en Tedlar, kunnen deels worden gezien als ontwerpuitdagingen (zie M1A en M3A); De ontwikkeling van lichtgewicht panelen, zoals Solarge's "organosandwich" concept, een constructie met polymeersheets die maximale stijfheid biedt bij minimaal gewicht, is in belangrijke mate een ontwerpuitdaging; de veelbelovende Si-Perovskiet tandempanelen die binnen enkele jaren de markt zullen betreden, dienen een modulaire opbouw te hebben

voor het simpel uitvoeren van reparaties, en vervanging van defecte onderdelen.

De Europese Eco-design richtlijn voor PV producten staat nog in de kinderschoenen. Producenten kunnen echter al aan de slag met concrete ontwerp vragen, zoals:

- Wat is de ideale levensduur en gebruikstermijn van een specifiek PV paneel en hoe kan hiervoor worden ontworpen?
- Moeten panelen worden ontworpen voor de totale levensduur of voor een bepaalde periode, met ruimte voor reparatie en hergebruik?
- Wat is nodig om het gehele productie- en installatieproces 100% circulair en CO₂ neutraal te maken?

- **Urgentie = hoog:** Circulariteit van toekomstige panelen moet NU geregeld worden.
- **Lopende activiteiten:** Annex 2: Meerdere projecten, zoals nr. 1, 2, 3, 9, 10.
- **Mogelijke vervolgacties** Opzetten breed consortium om circulaire kennis van afzonderlijke paneeltypen bij elkaar te brengen; opstellen van brede gebruiks- en circulariteitscriteria voor verschillende paneeltoepassingen en business cases; aansluiten academia, EoL partijen en grote PV installateurs voor opschaling.



M1C: Circulaire BIPV en folies

[Annex 7: interviews 1, 4, 5, 9, 11]

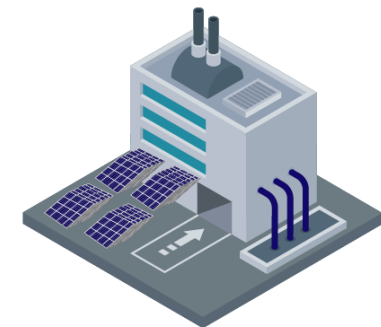
In de toekomst groeien silicium en dunne film PV steeds meer naar elkaar toe. Dunne laag PV producten zijn in de regel moeilijker te recycleren door een lager materiaalverbruik in combinatie met een hoge mate van integratie. Daarnaast worden BIPV elementen steeds verder gecombineerd met uiteenlopende bouwmaterialen (zie mass customization concept, sectie 2).

- **Urgentie = medium-hoog:** BIPV en PV-folies zijn groeiende sectoren, met toepassing van nieuwe materialen zoals Perovskieten, in steeds kleinere hoeveelheden met toenemende integratie; circulariteit moet van meet af aan worden ingebouwd.
- **Lopende activiteiten:** BIPV bij TNO, folies bij TNO Solliance en HyET Solar; daarnaast

hebben partijen als Studio Solarix, ZigZag Solar en Solar Visuals een sterke focus op circulariteit en ontwerp van BIPV producten. Daarnaast: Annex 2: PARSEC, RAPID, DIRECT, Circusol.

- **Mogelijke vervolgacties:** Bij elkaar brengen 'productie' (gevestigde bedrijven) en 'ontwerp' expertise (academia en innovatieve startups); aansluiten EoL partijen en polymeer-/ folieproducenten, opstellen breed overzicht van gebruiks- en circulariteitscriteria, opschaling en business cases.

2. Innovaties voor hergebruik en/of recycling



M2A: Faciliteit voor hergebruik en/of recycling

[Annex 7: interviews 5, 10, 15, 16]

Bij recycling dient de korte termijn focus te liggen op het zuiver scheiden van glasplaten

en celmateriaal, de volgende stap is het hoogwaardig terughalen van de verschillende celmaterialen tegen zo laag mogelijke kosten. Er is een breed scala aan recyclingtechnieken beschikbaar (mechanisch, chemisch, optisch, magnetisch, metallurgisch, etc.) met fundamentele expertise bij met name TU Delft en TNO. Relevante kennisvragen zijn onder meer: Wat is per afzonderlijk element de beste recyclingmethode voor hoogwaardige recycling? Welke combinatie van technieken levert in een commerciële plant de meest hoogwaardige recyclaatstromen tegen zo laag mogelijke kosten? Welke technologieën zijn kansrijk om in de regio verder te ontwikkelen door mobiliseren van kennis- en ketenpartners? Is het zinvol om een tweede recycling fabriek op te zetten naast het recent aangekondigde plan van o.a. TNO en Stichting Weee?

- **Urgentie = medium:** Uitsluitend zinvol met nationale samenwerking; solide businesscase gewenst i.v.m. benodigde recyclaatstromen voor break-even operatie.
- **Lopende activiteiten:** Plan voor recyclingfaciliteit, met o.a. TNO en Stichting Weee [12].
- **Mogelijke vervolgacties:** Veel fundamentele kennis is reeds aanwezig; het opzetten van pilots zal helpen kennisvragen experimenteel te testen; zie o.a. Annex 6 voor suggesties; Verbreding van recent

aangekondigd initiatief [12] in landelijke samenwerking; aansluiting van academia, RIVM.



M2B: Innovaties voor reparatie, hergebruik, repowering

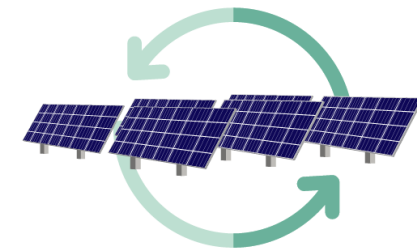
[Annex 7: interviews 3, 4, 6, 7, 8, 12, 14, 16]

Relevante kennisvragen betreffen o.a.: Hoe vaak gaan verschillende typen panelen kapot? Is het mogelijk om alleen de kritieke onderdelen te vervangen? Kunnen naast externe delen ook onderdelen van de zonnecel zelf worden gerepareerd wanneer de encapsulant simpel los te trekken is? Het ontwikkelen van geavanceerde monitoring op paneelniveau is belangrijk om te bepalen wanneer reparatie of vervanging van afzonderlijke panelen noodzakelijk is. Onder welke condities is het rendabel om oude laag-rendement panelen naar zonnige regio's te vervoeren t.b.v. hergebruik ('repowering')?

- **Urgentie = hoog:** Reparatie, hergebruik, repowering staan hoger op de R-ladder dan

recycling, dus verdienen minimaal evenveel aandacht.

- **Lopende activiteiten:** Alternatieve encapsulanten (zie M1A) zijn nodig voor hergebruik van gelamineerde paneelcomponenten; voorbereiding retoursysteem Exasun; daarnaast verschillende start-ups en innovatieve installatiebedrijven die zich bezighouden met defectmonitoring, reparatie, opties voor hergebruik, opzetten van circulair zonnepark (zie Annex 2).
- **Mogelijke vervolgacties:** Brede inventarisatie van (start-up) innovaties voor hergebruik, reparatietechnieken, monitoring, etc. Input gebruiken om pilots op te zetten met tweedehands panelen in samenwerking met grote marktpartijen en gemeentes (EoL bedrijven, grote installateurs), academia, gemeenten.



M2C: Circulaire PV installaties

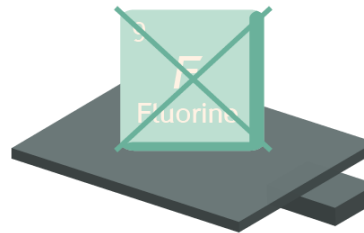
[Annex 7: interviews 2, 5, 7, 16]

Om beter inzicht te krijgen in de werking van

circulaire PV kan een deel van een bestaand of nieuw aan te leggen zonnepark bij wijze van pilot worden uitgerust met een 100% circulair gedeelte, bijvoorbeeld ter grootte van 1 hectare. De aldus verkregen informatie tijdens de voorbereidings- en gebruiksfase levert gegevens op over hoe lang de tweedehands panelen en andere onderdelen nog meegaan en hoe makkelijk of moeilijk het is om de levensduur van een zonnepark te verlengen.

- **Urgentie = medium-hoog:** Vergroten praktijkkennis van innovaties die al beschikbaar zijn.
- **Lopende activiteiten:** LC Energy, Solarge, Hydro en Mirec starten met het inrichten van 1 hectare binnen een 10 hectare groot zonnepark, met uitsluitend al eerder gebruikte materialen en onderdelen zoals oude panelen en gebruikte transformatoren en omvormers: zie project 12, Annex 2.
- **Mogelijke vervolgacties:** Verdere opschaling met deelname van gemeenten, grote zonneparkbeheerders en installatiebedrijven.

3. Vervanging kritieke en toxische materialen



M3A: Fluorvrij zonnepaneel (ZZS-vrij backsheet)

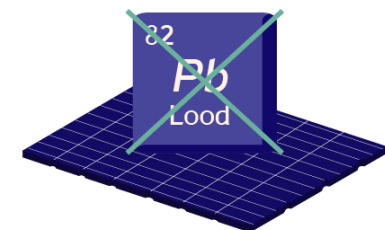
[Annex 7: interviews 4, 5, 9]

De thermoharder Tedlar, oftewel polyvinylfluoride, is de goedkope standaardoplossing voor de backsheet van een siliciumpaneel. Het biedt de gewenste stijfheid en is waterdicht door de verwerking van fluor. Tedlar is echter een PFAS en wordt derhalve als zeer zorgwekkend stof (ZZS) aangemerkt. Bijkomend nadeel is dat het moeilijk recyclebaar is waardoor schadelijke fluorverbindingen als afval in het milieu terecht kunnen komen. De uitdaging is om een fluor-vrij alternatief te ontwikkelen dat liefst 100% circulair is.

- **Urgentie = medium:** Relevant voor ontwikkeling ZZS-vrije panelen.
- **Lopende activiteiten:** Annex 2: RAPID,

PARSEC: Solarge heeft in samenwerking met Sabic polymeren voor de backsheet ontwikkeld die geen PFAS bevatten, niet-toxisch zijn en volledig te recyclen. Exasun heeft het Tedlar vervangen door een glasplaat, dat weliswaar zwaarder en duurder is, maar de gewenste stijfheid en waterdichtheid biedt.

- **Mogelijke vervolgacties:** Doorontwikkeling, kostenverlaging; ontwikkeling van nieuwe niet-toxische polymeren met volledig CO₂-neutraal productieproces, bijvoorbeeld d.m.v. CO₂ afvangst; vergelijking polymeer-glas concepten; aansluiten EoL bedrijven, academia, RIVM.



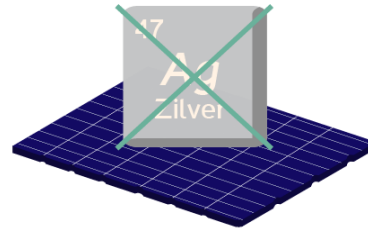
M3B: Loodvrij zonnepaneel (ZZS-vrije contacten)

[Annex 7: interviews 4, 5, 9]

Lood is aanwezig in interconnecties van cellen en panelen, met name in soldeermateriaal. Zelfs in kleine hoeveelheden geldt lood als giftig en het gebruik zou liefst volledig

geëlimineerd worden. Technologisch gezien zijn loodvrije panelen haalbaar en loodvrij solderen op printplaten is common practice. Gebruik van puur tin of tin-bismutlegeringen zijn redelijke alternatieven, maar tin verhoogt de soldeertemperatuur en daarmee de kans op celbreuk. Dit risico, en de lichtelijk hogere kosten van loodvrij solderen, staan de grootschalige productie van loodvrije zonnepanelen vooralsnog in de weg.

- **Urgentie = medium:** Relevant voor ontwikkeling ZZS-vrije panelen.
- **Lopende activiteiten:** Annex 2: PARSEC: Het bedrijf Mat-Tech heeft recent een nieuw loodvrij soldeerproces ontwikkeld met o.a. Exasun en TNO.
- **Mogelijke vervolgacties:** Doorontwikkeling van alternatieve soldeerprocessen; ook kijken naar elektrisch geleidende lijmen ter vervanging van soldeerproces; betrekken van RIVM en academia voor uitvoeren milieukundige analyses.



M3C: Zilvervrij zonnepaneel (zilvervrije elektrodes)

[Annex 7: interview 5, website [BESI](#)]

De standaard voorzijde elektrode van siliciumpanelen bestaat uit dunne laagjes zilver, dat duur en relatief schaars is [4]. Het is technisch mogelijk om zilver door koper of koper-tin te vervangen, bij voorkeur in een lage temperatuurproces zoals elektrochemische plating, waarbij het koper niet het silicium binnendringt. Commerciële alternatieven zijn beschikbaar (zie onder), maar net als bij loodsolderen lijkt de industrie zo lang mogelijk vast te houden aan traditionele productieprocessen.

- **Urgentie = medium:** Risico toekomstig zilvertekort bij groeiende PV productie; urgentie gaat omlaag als zilver kosteneffectief kan worden gerecycled.
- **Lopende activiteiten:** Koperplating is reeds een commercieel alternatief voor zilvervrije cellen; BESI verkoopt op beperkte schaal PV plating systemen.

- **Mogelijke vervolgacties:** Doorontwikkeling van zilvervrije PV elektrodes; in parallel hoogwaardige, kosteneffectieve zilverrecycling ontwikkelen uit afgeschreven panelen.

Beleid en Regelgeving

De uitdagingen op het gebied van beleid en regelgeving zijn ook onderverdeeld in drie subthema's die in het vervolg worden toegelicht. De beleidsmatige uitdagingen zijn minder gedetailleerd uitgewerkt dan Materiaal en Technologie.

1. Circulair inkoopbeleid



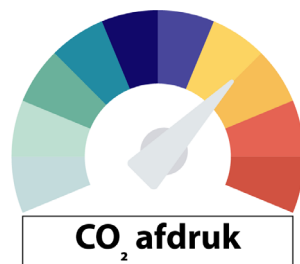
Duurzaam inkoopbeleid: ketenbrede eisen

[Annex 7: interviews 5, 6, 14, Annex 5]

- De publieke sector stelt circulaire kaders op om de PV markt uit te dagen een

ketenbreed duurzaam inkoopbeleid te voeren, bijvoorbeeld door criteria te formuleren op basis van AEEA en Eco-design richtlijnen.

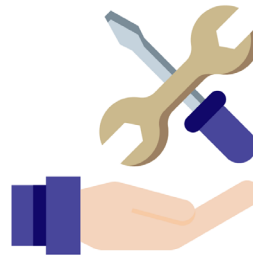
- Grote energiebedrijven hebben een belangrijke rol bij het opstellen van ketenbrede circulaire criteria, bijvoorbeeld op het gebied van Eco-design, regulatie van grondstoffen en urban mining.
- Het gevolg is dat PV modules die in de toekomst op de markt komen makkelijker recyclebaar zijn dankzij de introductie van gestandaardiseerde voorschriften.



Ontwikkelen meetinstrumenten voor bepalen CO₂ afdruk PV producten tijdens totale levensduur

[Annex 7: interviews 5, 14]

- De overheid kan meetinstrumenten (laten) inrichten om de totale CO₂ afdruk van PV producten te meten om te stimuleren dat de meest circulaire processen en materialen worden gebruikt.



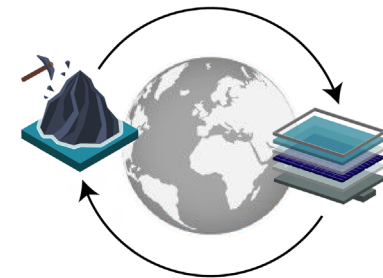
Circulair eigendom of gebruik

[Annex 7: interviews 2, 6, 14, 16]

- Grote energiebedrijven zijn begonnen met het aanbieden van PV as-a-service aan particulieren. Zij leveren de panelen als hoofdafnemer en zorgen dat onderaannemers onderhoud uitvoeren en EoL zaken regelen. Verdere doorontwikkeling van PV as-a-service vergt verregaande afspraken tussen ketenpartners over zaken als vervanging, onderhoud, garantie, etc.
- Het is interessant om te zien of deze vorm van samenwerken kan worden uitgebreid om collectieve zonnestroomvoorziening op grote schaal te faciliteren, bijv. via buurtcollectieven en bedrijfsterreinen.
- De rol van overheden bestaat uit het kritisch volgen van de ontwikkelingen. Indien nodig kan verplichte samenwerking worden overwogen tussen de betrokken stakeholders binnen (bijvoorbeeld) het

inzamelingsproces, zoals gemeenten, inzamelaars, paneelproducenten, distributeurs, organisaties voor hergebruik.

2. Stimuleringsmaatregelen



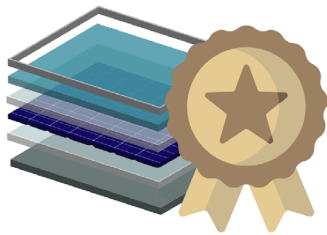
Bevorderen circulaire marktwerving

[Annex 7: interviews 2, 3, 5, 8, 10, 14, Annex 5]

- De overheid regelt een centrale regie over de inzameling, met voldoende inzamelpunten en standaardcondities voor terugname. Het uitgeven van een AVV aan Stichting OPEN, zoals beschreven in sectie 3, is een goede eerste stap waarvan de implementatie nauwgezet dient te worden gevolgd.
- Teneinde hoogwaardige recycling en minder primair grondstofgebruik te realiseren dient de afzetmarkt voor retourstromen en secundaire grondstoffen te worden gestimuleerd, inclusief de verplichting om

recyclee in productieprocessen toe te passen.

- Een circulair paneel lanceren, en hiervoor investeren, vereist een grote markt. Die creëer je niet in één dag. Introductie van een label of certificering die de mate van circulariteit van een paneel onafhankelijk én betrouwbaar weergeeft zou een 'quick win' kunnen opleveren.



Kwaliteitslabel voor tweedehands panelen

[Annex 7: interviews 2, 5, 6, 13, 14, Annex 5]

- Specifieke recyclingvereisten worden gesteld via AEEA & WEEE richtlijnen voor materialen als silicium en glas, om te leiden tot een hogere kwaliteit van panelen bestaand uit recycleermaterialen.
- Daarnaast dient serieus te worden gekeken naar een kwaliteitslabel voor tweedehands panelen, praktisch toepasbare rekenmodellen om te bepalen wanneer het loont om panelen te vervangen, en statiegeld retoursystemen. De producent

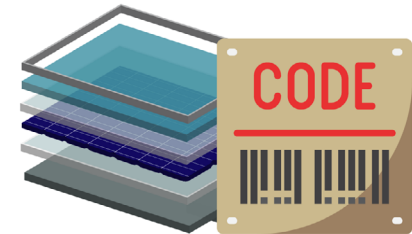
Exasun heeft het laatste concept in voorbereiding met als doel om gebruikte panelen naar de fabriek te laten terugkomen voor upgradering of recycling.



Informatiecampagne verwijderingsverplichtingen

[Annex 7: interview 10, Annex 5]

- Gebruikers van panelen moeten volledig op de hoogte zijn van alle geldende verwijderingsverplichtingen. OPEN organiseert hiertoe informatiecampagnes en zal idealiter gebruikers die EoL panelen aanmelden automatisch informeren. Een branchevereniging als Holland Solar kan hierin ondersteunen.
- In België wordt een verwijderingsbijdrage gerekend in de factuur aan de gebruiker met het oog op het bekostigen van de toekomstige recycling. In Nederland en Duitsland gebeurt dit niet; voor- en nadelen van beide modellen dienen kritisch te worden vergeleken.

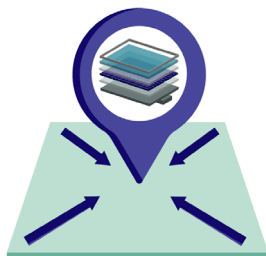


Controlesysteem met afval-identificatienummers

[Annex 7: interviews 5, 10, Annex 5]

- Overheden houden toezicht op primaire en secundaire markten van zonnepanelen en bestraffen producenten die verplichtingen proberen te omzeilen, bijvoorbeeld door het ongeautoriseerd op de markt brengen van panelen.
- Illegale export van defecte panelen moet worden voorkomen d.m.v. gestandaardiseerde protocollen, frequente controles en een systeem van afvalidentificatienummers.

3. Retourinfrastructuur



Opzetten centraal inzamelsysteem

Annex 7: interviews 5, 6, 14, Annex 5]

- Producenten sluiten zich verplicht aan bij het publieke inzamelingssysteem van OPEN, of creëren zelf even goede retourmogelijkheden met voldoende inzamelpunten.
- Een organisatie als de Haven van Rotterdam zou een leidende rol kunnen nemen t.a.v. logistiek, inzameling en verwerking van afgedankte panelen, of een deel van deze activiteiten, afhankelijk van wat mogelijk is binnen de kaders van het milieu- en omgevingsbeleid.



Professionalisering transport en opslag

[Annex 7: interview 9, Annex 5]

- Transport en opslag van gebruikte panelen dient via OPEN verder te worden geprofessionaliseerd en gestandaardiseerd, inclusief verplicht gebruik van de juiste inzamelcontainers, protocollen voor omgang met zeer zorgwekkende stoffen (ZZS), logistieke processen en beveiligingsmaatregelen.
- Informatievoorziening is van belang. Zo is in Zuid-Holland recent een [‘kennisschakelpunt’](#) opgezet voor kennis over ZZS in een circulaire economie, een samenwerkingsverband tussen regionale overheden en milieudiensten als Omgevingsdienst West Holland, Omgevingsdienst Haaglanden en DCMR Milieudienst Rijnmond.



Training en certificering EoL paneelspecialisten

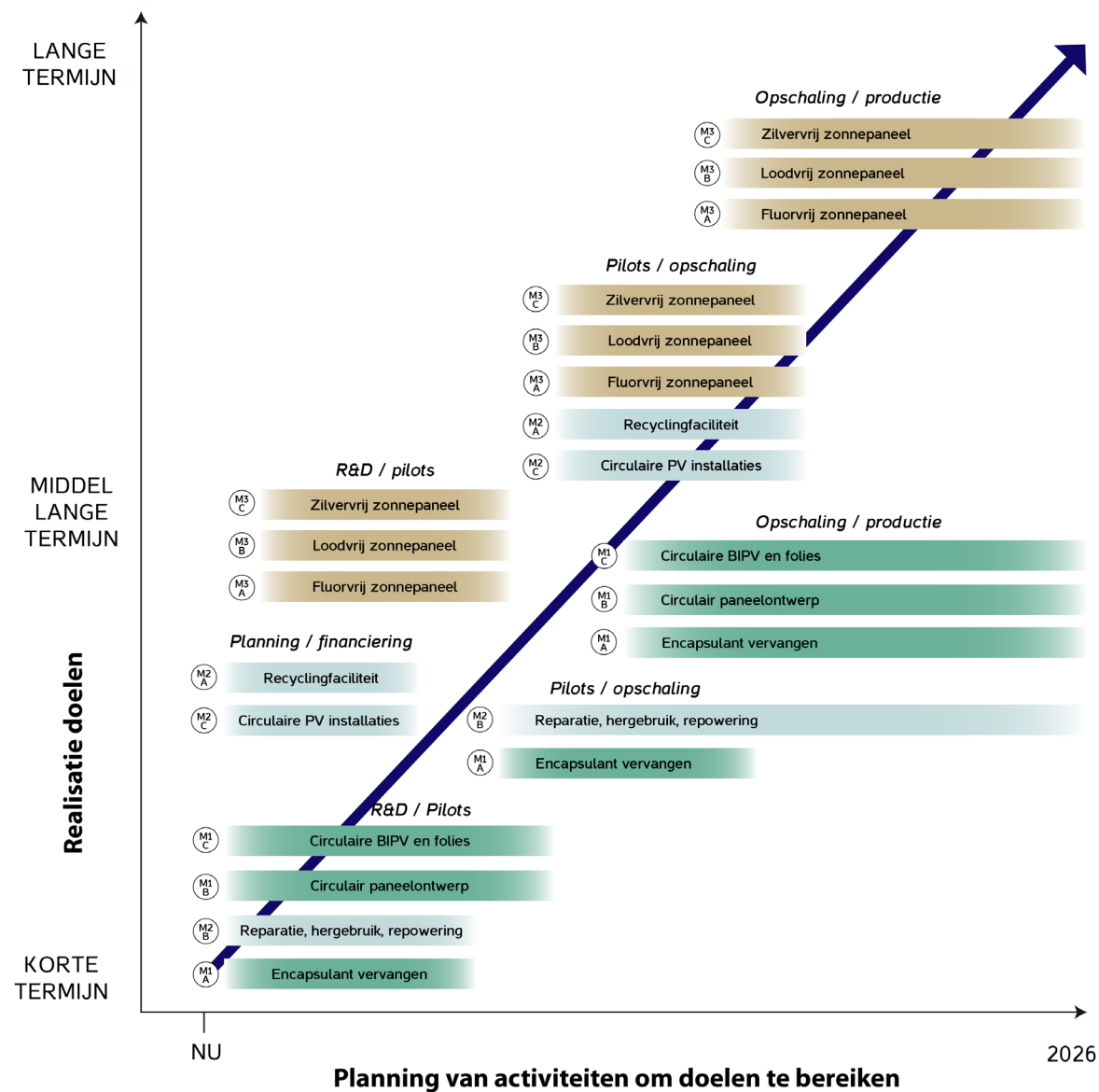
[Annex 7: interview 6, 16, Annex 5]

- Gebruikte panelen zijn vaak nog functioneel maar gaan verloren voor hergebruik door onzorgvuldige behandeling. Daarom is ontwikkeling van een gespecialiseerde opleiding en certificering voor EoL paneelspecialisten van groot belang.

Figuur 9 en 10 geven een visuele weergave van de op de vorige pagina's beschreven uitdagingen op het gebied van Materiaal en Technologie en Beleid en Regelgeving in de vorm van twee Roadmaps om te komen tot een circulaire PV sector. De Roadmaps geven een beeld van het mogelijke tijdspad voor het aanpakken van de uiteenlopende uitdagingen met een onderverdeling in korte, middellange en lange termijn. De belangrijkste materiaal- en technologische uitdagingen worden verder toegelicht in sectie 5 aan de hand van een Actieplan.

Roadmap: Materiaal- en technologieuitdagingen voor circulaire PV

Figuur 9

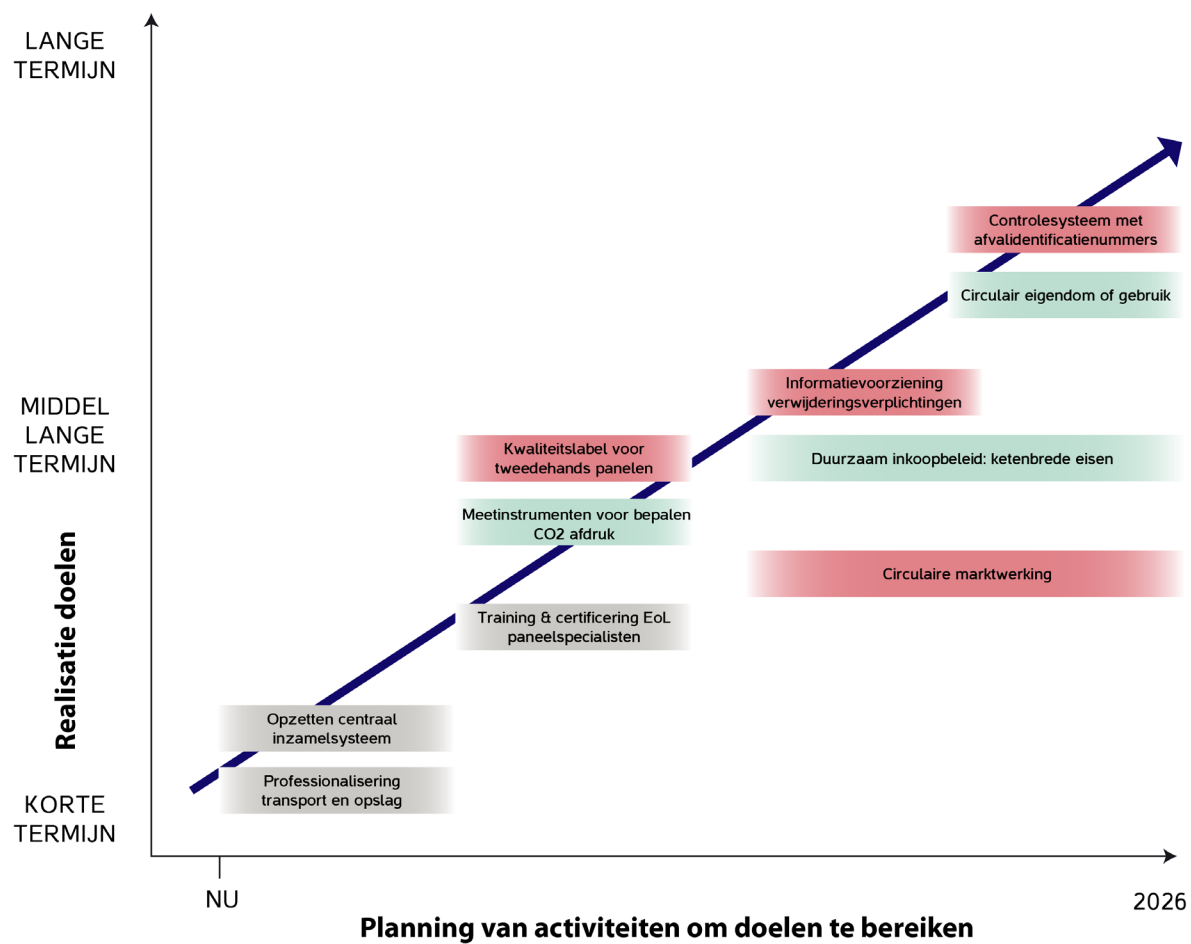


Ontwerp voor circulariteit	
Uitdagingen	Urgentie & toelichting
M1 A	Hoog: Grootste circulariteitsbottleneck; snelle optimalisatie en opschaling
M1 B	Hoog: Uitbouw bestaande kennis, pilots, opschaling
M1 C	Medium-hoog: Snel groeiende sector, circulariteitscriteria nodig
Innovaties voor hergebruik en/of recycling	
M2 A	Medium-hoog: Pilots opzetten, nationale synergie en business cases
M2 B	Hoog: Uitbouw bestaande kennis, pilots, opschaling
M2 C	Medium-hoog: Pilots, aanhaken grote marktpartijen nodig
Vervanging kritieke en toxische materialen	
M3 A	Medium: Doorontwikkeling panelen zonder toxische stoffen
M3 B	Medium: Doorontwikkeling panelen zonder toxische stoffen
M3 C	Medium: Dreigende schaarste zilver

Tabel 4: Urgentie van de Materiaal- en technologieuitdagingen

Roadmap: Beleid en Regelgeving voor bevorderen circulaire PV

Figuur 10



Om alle circulariteitsuitdagingen genoemd in de vorige sectie voortvarend te kunnen aanpakken is regie vanuit de overheid nodig in combinatie met intensieve samenwerking binnen de innovatieketen en goede informatievoorzieningen. Het proces begint met het formuleren van de relevante kennis- en innovatievragen en een overzicht van het Nederlandse PV ecosysteem.

Vanuit het UPCM en de provincie Zuid-Holland wordt sinds 2020 gewerkt aan kennisdeling, kennisopbouw en (vernieuwers)netwerken ten behoeve van toekomstagenda en een uitvoeringsprogramma met (doorbraak)projecten en kennis- en innovatie, waaronder de volgende initiatieven:

- [Helpathon Circulaire Zonne-energie](#), 26-27-28 mei 2021. Co-creatie sessie voor kennisexperts, pioniers, bedrijfsleven en overheid opgezet door PZH in samenwerking met bureau [Meneer de Leeuw](#). De Helpathon is een hulpmiddel om vanuit het netwerk te komen tot een gedragen (transitie)agenda en daarbij behorende (doorbraak)projecten voor circulaire zonne-energie in Zuid-Holland en/of breder.
- **Kennisnetwerk Zon & Circulair**, PZH in samenwerking met bureau [World of Minds](#); waarin regionale kennisexperts zijn

bijeengebracht om kennis & kansen uit te wisselen ten behoeve van toekomstige kennisopbouw, en kennis samenwerking rondom innovatie, (doorbraak)projecten en systeemverandering.

- PZH heeft **verkennende studies** laten uitvoeren met als doel kennis te verzamelen, het ecosysteem te verbreden door middel van samenwerking en kennispartijen te koppelen aan de praktijk. Voorbeelden van recente rapporten zijn de [Kennisnotitie Zonnepanelen Circulair](#) (bureau CE Delft) en het afstudeerproject van studenten van Universiteit Leiden en TU Delft “Circular PV fort he Province of South-Holland” [8].
- **Gemeenteleerkring Gemeenten**, PZH in samenwerking met [Platform31](#); waarin zes Zuid-Hollandse gemeenten – Capelle a/d IJssel, Rotterdam, Den Haag, Schiedam, Leiden en Hoeksche Waard, de eerste stappen zetten om een beeld te krijgen van [Circulaire kansen binnen de zonne-energie](#).
- Het **Team Realisatie** van het UPCM heeft Zon PV aangewezen als één van zes prioriteitsonderwerpen; recent is een breed toegankelijk [Kennisdossier Circulaire Zonnepanelen](#) opgesteld.
- Het UPCM werkt daarnaast aan het opzetten van [projecten en strategieën](#) voor de korte, middellange en lange termijn ter ondersteuning van een circulaire PV sector.

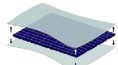
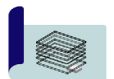
- Eind 2020 heeft de **Circo track Circulaire Zonnepanelen** plaatsgevonden, georganiseerd door het UPCM in samenwerking met PZH, Omgevingsdienst West Holland, Omgevingsdienst Haaglanden en DCMR Milieudienst Rijnmond. In de track zijn door regionale ketenpartners een aantal concrete projectideeën opgesteld om op korte termijn gezamenlijke circulaire kansen te realiseren. Een voorbeeld is het project **Circulair Zonnepark** (Annex 2).
- Het opzetten van een [Kennischakelpunt](#) voor het verzamelen van kennis over zeer zorgwekkende stoffen (ZZS) in een circulaire economie, waaronder in zonnepanelen

Europese verbindingen

Naast het organiseren van regionale platforms en initiatieven is het van belang om stevig in verbinding te staan met, en wanneer nodig informatie op te halen uit, grote internationale kennisplatforms zoals de European Technology and Innovation Platform for Photovoltaics ([ETIP PV](#)), de [task force Solar](#) van de European Raw Materials Alliance (ERMA), [Solar Power Europe](#), en Europese projecten als Circusol en CiTaSol (Annex 2).

Om de gebundelde kennis- en innovatievragen een stap verder te brengen in een regionale context dienen de afzonderlijke uitdagingen geprioriteerd te worden en vertaald naar een

Tabel 5: Actieplan Materiaal en Technologie

Uitdagingen	M1 A	M1 B	M2 B	M1 C	M2 C	M2 A	M3 A
							
Urgentie	hoog						
Tijdslijn	t/m 2022: R&D (lopend) 2022-2024: pilots en opschaling	t/m 2023: R&D (lopend) 2023-2026: pilots en opschaling	t/m 2022: R&D (lopend) 2022-2026: pilots en opschaling	t/m 2022: R&D (lopend) 2022-2026: pilots en opschaling	2021: planning & financiering 2022-2023: pilots en opschaling	2021: planning & financiering 2022-2023: pilots en opschaling	t/m 2022: R&D (lopend) 2022-2026: pilots en opschaling
Mogelijke Partners	<i>Lopend:</i> Annex 2: PARSEC project. <i>Aanvullend:</i> EoL bedrijven, academia (materiaalkunde, recycling, business), polymeerproducenten, RIVM	<i>Lopend:</i> Annex 2: PARSEC, RAPID, DIRECT, CircuSol, Sitasol <i>Aanvullend:</i> EoL bedrijven, PV installatiebedrijven, academia (business, materiaalkunde, recycling, ontwerp)	<i>Lopend:</i> Annex 2: Circulair zonnepark, diverse startups <i>Aanvullend:</i> EoL bedrijven, PV installatiebedrijven, academia (ontwerp, business, materiaalkunde), gemeenten.	<i>Lopend:</i> Annex 2: PARSEC, RAPID, DIRECT, Solliance defectonderzoek, CircuSol <i>Aanvullend:</i> EoL bedrijven, academia (materiaalkunde, recycling, LCA, business), folie-/polymeerproducenten, gemeenten	<i>Lopend:</i> Annex 2: Circulair zonnepark <i>Aanvullend:</i> Gemeenten, RVO, PV installatiebedrijven	<i>Lopend:</i> Annex 1: ref. 12 <i>Aanvullend:</i> EoL bedrijven, RIVM, academia (materiaalkunde, recycling, LCA, business), RVO, provincies	<i>Lopend:</i> Annex 2: RAPID, PARSEC <i>Aanvullend:</i> RIVM, EoL bedrijven, academia (materiaalkunde, LCA, business)
Gewenste acties	Optimalisatie technologie en materialen, testen hergebruik en recycling, verdere opschaling, opstellen business cases.	Bij elkaar brengen circulaire kennis van afzonderlijke paneeltypen; opstellen overzicht circulaire criteria voor verschillende toepassingen; opschaling en business cases.	Brede inventarisatie van innovaties voor hergebruik, reparatietechnieken, monitoring; opzetten pilots tweedehands panelen met grote marktpartijen, testen van business cases.	Bij elkaar brengen productie-expertise en ontwerp-expertise; EoL partijen nadrukkelijk laten meekijken bij geïntegreerde toepassingen; opstellen circulariteitscriteria (zie M1B); opschaling en business cases.	Uitbouwen praktijkkennis van beschikbare innovaties; verdere opschaling met deelname van grote zonneparkbeheerders.	Beantwoorden kennisvragen (zie sectie 4) aan de hand van pilots; opzetten nationale samenwerking met solide businesscase voor break-even operatie.	Doorontwikkeling, kostenverlaging; vergelijking polymeer-glas concepten, ontwikkeling volledig niet-toxische en CO2-neutrale producten.

‘Actieplan’. Hiernaast geven we een eerste aanzet voor een Actieplan Materiaal en Technologie, dat is gebaseerd op de meest urgente kennis- en innovatie-uitdagingen gedefinieerd in sectie 4 van dit rapport. Bij de uitvoer van het Actieplan dienen de uitkomsten nauwkeurig te worden gemonitord door een centrale commissie, bijvoorbeeld afgevaardigden van grote innovatiepartners zoals de universiteiten, TNO, en experts van grote ondernemingen. Zodoende kan direct worden ingegrepen wanneer bottlenecks, of juist opschalingsmogelijkheden, zich voordoen.

Opgemerkt dient te worden dat de PV maakindustrie voor het grootste deel in China zit. Om daar impact te realiseren is (vooral) óók Europese slagkracht nodig, bijvoorbeeld door het invoeren van één beleid rondom Eco-design of het stimuleren van een Europese PV industrie.

Naast het regisseren van technologieontwikkeling is het van belang om bij eindgebruikers een sterke bewustwording te creëren t.a.v. gebruik en aanschaf van PV producten, inclusief de verwijderingsverplichtingen zoals beschreven in sectie 4.

RVO heeft circulaire zonnepanelen recentelijk op de [Energijijst en Milieulijst](#)

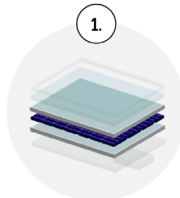
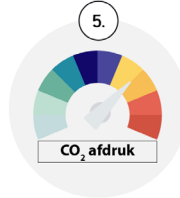
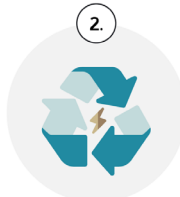
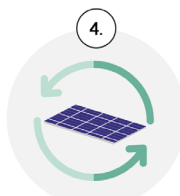
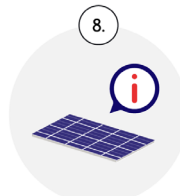
geplaatst, waardoor bedrijven tot 75% van de aanschafkosten mogen afschrijven van panelen die voldoen aan één of meerdere circulariteitscriteria.

Naast de gebruikers zijn er bovendien twee belangrijke stakeholders die óók bewust moeten worden gemaakt van de voordelen van circulaire PV, namelijk verzekeraars en banken. Juist banken zullen voorzichtig zijn met circulaire zonnepanelen want zij investeren op de lange termijn, en hechten veel waarde aan de betrouwbaarheid van nieuwe technologie.

Daarom kan worden gedacht aan het opstellen van een ‘keuzekaart’ die eindgebruikers en financiële stakeholders met behulp van een set criteria helpt om te kiezen voor de meest circulaire panelen.

Tabel 6 bevat een eerste concept Keuzekaart en kan worden gebruikt om een discussie op gang te brengen over de rol van particuliere en commerciële gebruikers in de transitie naar een circulaire PV sector. De actieve betrokkenheid van de volledige waardeketen bij dit soort discussies, inclusief de gebruikers, vergroot de kans dat circulaire PV niet in het abstracte, beleidsmatige domein blijft hangen en dat er een brede maatschappelijke urgentie ontstaat richting een mensgerichte, duurzame economie met daarin een prominente plek voor circulaire

zonne-energie.

Criteria		Score (schaal 1 tot 3)	Criteria	
		1 = slecht 2 = redelijk 3 = goed		
1.  Verlijming celmateriaal	1 = onthechting niet mogelijk zonder breken 2 = schone onthechting, laminaat niet herbruikbaar 3 = schone onthechting, laminaat 100% circulair	1 = geen gegevens bekend 2 = gegevens deels bekend, bv. Solar Scorecard (huidige marktleiders) 3 = (bijna) neutrale CO₂ footprint; certificaat aanwezig	5.  Totale CO₂ footprint productie en installatie	
2.  Modulaire opbouw, gemak van demontage, reparatie, hergebruik	1 = volledige integratie componenten 2 = paneelcomponenten deels demontabel 3 = paneelcomponenten volledig demontabel, incl. glasplaten en polymeersheets	1 = geen gegevens bekend 2 = gegevens deels bekend, bv. Solar Scorecard (huidige marktleiders) 3 = volledige transparantie gebruik materialen; hoog aandeel recycalaat	6.  Beschikbaarheid gegevens gebruikte materialen en aandeel recycalaat	
3.  Gebruik van kritieke en/of toxische stoffen" (KTS)	1 = paneel bevat meerdere KTS (lood, cadmium, fluor, zilver, indium, etc.) 2 = paneel bevat max. 2 KTS met effectief retoursysteem (bv. cadmium en tellurium bij First Solar) 3 = paneel is vrij van KTS	1 = weinig of geen samenwerking; beperkte service 2 = redelijke samenwerking, transparantie, service 3 = volledige samenwerking en transparantie; 25 jaar gegarandeerde service en onderhoud	7.  Samenwerking binnen waardeketen, service aan gebruikers	
4.  Levensduur en mogelijkheid tot verlenging	1 = standaard levensduur (25 jaar) met standaard omvormer 2 = standaard levensduur (25 jaar) met hoge kwaliteit omvormer 3 = hoge kwaliteitspanelen (bv. Sunpower, Exasun) met levensduur 30 tot 40 jaar NB: Kritisch kijken naar levensduurverlengende opties zoals vuilafstotende coatings.	1 = geen tweedehands markt aanwezig 2 = tweedehands markt in opstartfase 3 = tweedehandsmarkt volledig operationeel	8.  Status tweedehandsmarkt	

Tabel 6: Concept Keuzekaart circulaire zonnepanelen

Annex 1: Referenties

1. J.R. Duflou et al., “Demufacturing photovoltaic panels: Comparison of end-of-life treatment strategies for improved resource recovery”, Manufacturing Technology (2018)
2. “End-of-Life management of solar photovoltaic panels”, International Renewable Energy Agency (IRENA) report (2016)
3. L. Mancini et al. “Analysis of Material Recovery from Silicon Photovoltaic Panels”, JRC Technical Report (2016)
4. “Metaalvraag van de Nederlandse energietransitie”, Metabolic, Copper8, Universiteit Leiden (2018)
5. Fraunhofer ISE, Photovoltaics Annual Report 2019/2020
6. S. Carrara et al., “Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system”, JRC report (2020)
7. Nationaal Solar Trendrapport 2021, DNE Research (2021)
8. “Circular PV for the Province of Zuid-Holland”, IPG MSc students project Leiden University and TU Delft (2021)
9. “Recycling WEEE: Extraction and concentration of silver from waste crystalline silicon photovoltaic modules”, P. Dias et al., UNSW Sydney (2016)
10. “China’s solar glass shortage to drag on panel output into 2021”, <https://www.reuters.com/article/china-solar-glass-idINL1N2IJ0GU>, Reuters, dec. 2020.
11. Jaarverslag Stedin Groep 2020.
12. Solar Magazine maart 2021, p. 19: ‘Consortium wil binnen 1 jaar recyclingfabriek voor zonnepanelen bouwen’
13. TNO white paper “ZONPOSITIEF: ZONNE-ENERGIE OP WEG NAAR IMPACT”, maart 2021.
14. Deutsche Umwelthilfe white paper “Strengthening circularity in photovoltaics”, maart 2021.
15. Solar Magazine maart 2021, p. 83: ‘Bifacial perovskiet-silicium tandemzonnecellen: meer opbrengst per vierkante meter’
16. Financieel Dagblad april 2021, ‘De rode vlaggen bij ‘foute’ Chinese zonnepanelen’.
17. M. Lunardi et al., “A Review of Recycling Processes for Photovoltaic Modules”, chapter 2 in “Solar Panels and Photovoltaic Materials” (2018).

Annex 2: Actuele onderzoeksprojecten en onderzoeksgroepen

1. PV And Recycling for leadfree Solar panels (PARSEC), TKI Urban Energy subsidie

Link: <https://solarmagazine.nl/u/magazine/sm4-2020.pdf>, p. 39.

Partners: TNO, DSM, Exasun, Mat-Tech

Scope: Ontwikkeling glas-glas zonnepaneel, framelos, goed te ontmantelen door lijm die met extern triggermechanisme delamineert, geen gebruik toxische stoffen.

Achtergrond: *[Annex 7, interview 4]*

Nederlands consortium ontwikkelt nieuw 'design for recycling' zonnepaneel. Zonnepanelenproducent Exasun maakte een variant met aan weerszijden glasplaten, dat een langere levensduur heeft. Kunststof is weliswaar goedkoper, maar minder waterdicht dan glas, en producenten lossen dat op door er fluor in te verwerken.

Ook gebruiken de meeste producenten een hechtfolie die alleen bij zeer hoge temperaturen te recycleren is. Door DSM en TNO is echter een nieuwe, PFAS-vrije hechtfolie ontwikkeld, met een intern 'trigger mechanisme', dat onder bepaalde omstandigheden terugschiet in de oorspronkelijke vorm. Hierdoor kunnen

materialen makkelijker gescheiden worden.

Momenteel wordt gezamenlijk een volledig nieuw zonnepaneel ontwikkeld. Bovendien is daarin nog een element aangepast: loodvrij soldeermateriaal, ontwikkeld door het bedrijf Mat-Tech. Lood wordt normaal gebruikt om de soldeer flexibel en sterk te houden. Maar door een nieuwe techniek toe te passen, vergelijkbaar met het solderen op printplaten en door een slimme materiaalkeuze, is het gebruik van lood niet nodig.

2. RAPID project, RVO MOOI subsidie

Link: <https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:6769578658408529920/>

Partners: Solarge, Solarfields, RKT, ELRO, TU/e

Scope: Ontwikkeling nieuw type lichtgewicht PV paneel op basis van kunststof, toepasbaar op daken met weinig draagvermogen, 100% recyclebaar.

Achtergrond: *[Annex 7: interview 4]*

Het PV systeem is gemaakt van hoogwaardige kunststoffen waardoor vorm en maatvoering veel vrijer kunnen worden gekozen. Door een slim aerodynamisch ontwerp worden zo de installatietijd en materiaalkosten met 75%

gereduceerd. Dankzij de gebruikte kunststoffen is het een lichtgewicht systeem, waardoor het ook toepasbaar is op daken die weinig draagvermogen hebben, en is het ook 100% recyclebaar.

3. DIRECT project

Link: <https://solarmagazine.nl/nieuws-zonne-energie/i23121/rivm-onderzoekt-circulariteit-zonnepanelen-focus-op-recycling-en-vrijkomen-zorgstoffen>

Partners: RIVM

Scope: Circulariteit zonnepanelen met focus op gebruik, recycling en vrijkomen zorgstoffen.

Achtergrond: *[Annex 7 interview 9]*

Binnen DIRECT ontwikkelen en implementeren we een methode om al tijdens het ontwerpproces te kunnen inschatten hoe veilig en duurzaam een product feitelijk is. In dit traject wordt onder meer gekeken naar de toepassing van specifieke elementen in zonnepanelen, met name de zorgwekkende.

4. Bifacial plated silicon cells, TKI Urban Energy subsidie

Link: <https://projecten.topsectorenergie.nl/>

[projecten/2-sided-poly-si-passivated-contacts-towards-24-bifacial-plated-si-cells-00031721](#)

Partners: Tempres, HaskoningDHV, EAM Netherlands, IMEC (BE).

Scope: Innovatieve bifacial siliciumcellen met zilver-nikkel plating contacten.

5. CHAMP project, TKI Urban Energy subsidie

Link: <https://projecten.topsectorenergie.nl/projecten/world-champion-60-cell-format-modules-00024427>

Partners: DSM, TNO, Exasun, Helios Solar, Tempres

Scope: Hoog-efficiënte bifacial achtercontactmodule met geavanceerd lichtmanagement.

6. HYPER XL, subsidie TKI Urban Energy + SOLAR-ERA.NET

Link: <https://solarmagazine.nl/nieuws-zonne-energie/i23787/hiper-xl-bifacial-perovskiet-silicium-tandemzonnecellen-meer-opbrengst-per-vierkante-meter>

Partners: TNO Solliance, Smit Thermal Solutions, Universitat de València (ES), Middle East Technical University (TR), iTechSolar (TR), Oxford PV (UK)

Scope: Bifacial perovskiet-silicium tandemzonnecellen: optimalisatie en opschaling.

7. SUCCES project, EU subsidie SOLAR-ERA.NET

Link: <https://www.solliance.eu/nl/2019/sterk-consortium-werkt-aan-doorbraak-voor-hogere-cigs-efficientie/>

Partners: TNO Solliance, Smit Thermal Solutions, AVANCIS (DE), HZB (DE), CNRS (FR)

Scope: Hoog-efficiënte (>20%) en kosteneffectieve CIGS oplossing voor 30x30cm AVANCIS modules.

8. Defect-onderzoek aan zonnepanelen op nanoschaal

Link: <https://www.solliance.eu/nl/2020/nanoschaal-onderzoek-op-kilometers-zonnepanelen/>

Partners: TNO Solliance, UT, PI Berlin (DE)
Scope: Onderzoek naar oorzaken defecten in

zonnepanelen, zowel dunne film als kristallijn silicium; ontwikkeling van demontageproces om bovenliggende lagen te verwijderen zonder cel te beschadigen.

9. SiTaSol, H2020 EU project

Link: <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-projects/science/cml-sitasol>

Partners: Universiteit Leiden, Fraunhofer ISE (DE), Topsil Semiconductor Materials (DK), Aixtron (UK, DE), Joanneum Research (AT), Azur Space Solar Power (DE)

Scope: c-Si tandem modules met 30% efficiëntie en mogelijkheid tot recycling

10. Circusol, H2020 EU project

Link: <https://www.circusol.eu/en>

Partners: 15 EU partners, onder meer VITO (BE) (coördinator), IMEC (BE), PV Cycle

Scope: Circulaire businessmodellen voor de PV industrie.

11. Circulair zonnepark

Link: <https://www.lcenergy.nl/blog-lc-energy->

[onderzoekt-mogelijkheden-circulair-zonnepark/](#)

Partners: LC Energy, Solarge, Hydro, Mirec

Scope: Opzetten 1 hectare circulair zonnepark als onderdeel van een groter zonnepark.

Selectie Zuid-Hollandse academische onderzoeksgroepen:

- **TU Delft Photovoltaic Materials and Devices**, Faculteit Elektrotechniek, Wiskunde & Informatica (EWI)

Onderzoekers (o.a.): Prof. dr. ir. Miro Zeman, dr. ir. Olindo Isabella

Expertise (o.a.): Hoog-efficiënte silicium zonnecellen, Modelleren van PV-systemen.

- **TU Delft Metals Production, Refining and Recycling**, Faculteit Materiaalkunde en Werktuigbouw (3mE)

Onderzoeker (o.a.): dr. Yongxiang Yang

Expertise (o.a.): Terugwinning en recyclen van metalen, Efficiënt gebruik van grondstoffen en kritieke materialen.

- **TU Delft Optoelectronic Materials**, Chemische Technologie, Faculteit Toegepaste Natuurwetenschappen

Onderzoeker (o.a.): dr. ir. Tom Savenije

Expertise (o.a.): Opto-elektronische eigenschappen van (an)organische halfgeleiders, Perovskiet zonnecellen.

- **TU Delft Industrieel Productontwerp**, Faculteit Industrieel Ontwerpen

Onderzoeker (o.a.): Prof. dr. Ruud Balkenende
Expertise (o.a.): Ontwerpmethoden voor reparatie, hergebruik, recycling van elektronische producten.

- **Universiteit Leiden Centrum voor Milieuwetenschappen (CML)**

Onderzoekers (o.a.): Prof. dr. Arnold Tukker, dr. Carlos Blanco Rocha

Expertise (o.a.): Life Cycle Assessment, Circulaire economie, Analyse van materiaalstromen

- **Universiteit Leiden, Biofysische Organische Chemie**, Faculteit Chemie

Onderzoekers (o.a.): Prof. dr. Huub de Groot

Expertise (o.a.): Organische PV, Kunstmatige fotosynthese

- **Erasmus Universiteit Rotterdam**, Faculteit Technologie en Operations Management

Onderzoeker (o.a.): Dr. Koen Dittrich

Expertise (o.a.): Circulaire businessmodellen, regionale co-creatie.

Annex 3: Overige PV bedrijven Zuid-Holland

Onderstaande lijst geeft een overzicht van bedrijven die PV-gerelateerde producten of services aanbieden met tenminste één vestiging in de provincie Zuid-Holland. De bedrijven zijn niet geïnterviewd binnen de looptijd van het project (gezien de beperkte projectomvang en het ruime aanbod van voor handen zijnde gesprekspartners) maar kunnen worden gezien als potentiële deelnemers aan vervolgvactiteiten zoals gepresenteerd in secties 4 en 5.

Bron: <https://solarmagazine.nl/industry-register?categorie=1--zonnepanelen--zonnestroom-zon-pv>

PV bedrijven Zuid-Holland		PV bedrijven Zuid-Holland	
Bedrijf	Activiteiten	Bedrijf	Activiteiten
Batenburg Techniek	Omvormers, inverterstations	Power Q	Collectieve inkoop zonnepanelen
BDA Opleidingen	Opleidingen ontwerp, beheer van daken, gevels met zonne-energie	Groendus	Advies en inkoop zonne-energie voor bedrijven
By Projects	Installatie zonnepanelen	Solar Construct	Montagesystemen voor zonnepanelen
Conduct Technical Solutions	Brandveiligheid PV-installaties	SolarNRG	Collectieve inkoop zonnepanelen
Coolblue Zonnepanelen	Installatie zonnepanelen	Solar Traders	Online marktplaats voor zonnepanelen
De Centrale BTW Teruggave	Advies over BTW teruggave zonnepanelen	Sunbound	Grootschalige zonne-energiesystemen op gebouwen
Exasun	Producent zonnepanelen	Trio Invest	PV projecten op land, daken, kassen, water en parkeerterreinen
Fimer	Omvormers en energieopslagsystemen	Unisun Energy	Grootschalige zonne-energieprojecten
Hartclass	Reiniging zonnepanelen	Van der Valk Solar Systems	Zonnepaneel montagesystemen
Longi Solar	Leverancier zonnepanelen	VHD Solar	Leverancier zonnepanelen
Navetto	Leverancier zonnepanelen, omvormers, kabelsystemen	Zon&Zo	Leverancier zonnepanelen
Oranjedak Energy	Grootschalige zonne-energiesystemen op daken	Rads Global	Vuilafstotende coatings en beglazing voor zonnepanelen

Annex 4: Databases PV installaties

1. **SDE+ overzicht:** <https://www.rvo.nl/subsidie-en-financieringswijzer/stimulering-duurzame-energieproductie-en-klimaattransitie-sde/feiten-en-cijfers-sde-algemeen>
2. **The Dutch PV Portal 2.0:** <https://pvportal-2.ewi.tudelft.nl/>
3. **RWS Klimaatmonitor:** https://klimaatmonitor.databank.nl/Jive?workspace_guid=5ac1983d-9f5d-44e6-9838-b6d560364a3c. Overzicht van geregistreerde zonnepanelen Nederland.
4. **Nationale Energie Atlas (NEA):** <https://www.nationaleenergieatlas.nl/kaarten?config=418d0f56-0f0c-4fd4-9001-2ead4e1e22d6%3F%3Fconfig&gm-x=146095.199999999998&gm-y=447035.200000000007&gm-z=5&gm-b=1542632922900%2Ctrue%-2C1%3B1555073323297%2Ctrue%2C0.8%3B>
Zonpotentie voor velden in Nederland.
5. **Nationaal Georegister (NGR):** <http://nationaalgeoregister.nl/geonetwork/srv/dut/catalog.search#/metadata/958031bb-2a3c-40ed-85e1-7dcb6b93a563> Zonpotentie voor gebouwen in Nederland (zie Zonatlas).

Annex 5: Hoe kijkt Duitsland aan tegen circulaire PV?

Duitsland is sinds het begin van het millennium Europees koploper wat betreft beleid en regelgeving t.a.v. zonnestroom, aantallen installaties en industriële bedrijvigheid in de PV sector. In maart 2021 verscheen een white paper van de invloedrijke milieubeschermingsorganisatie Deutsche Umwelthilfe [14].

De belangrijkste uitdagingen en aanbevelingen worden als volgt samengevat:

Uitdaging 1: Vanwege kosten en inspanningen zijn bestaande inzamelingsprocessen vaak niet aantrekkelijk voor eigenaren van gebruikte PV-panelen, dus zoeken ze naar alternatieven zoals illegale export, wat leidt tot negatieve milieueffecten.

Aanbevelingen:

- publieke sector neemt de regie over inzamelen van particuliere zonnepanelen, met voldoende inzamelpunten en uniforme normen voor terugname, zoals een minimumhoeveelheid van 30 panelen
- producenten sluiten zich verplicht aan bij een publiek inzamelingssysteem of creëren zelf even goede retourmogelijkheden met voldoende inzamelpunten.
- overheden houden toezicht op primaire en secundaire markten van zonnepanelen en

bestrafen producenten die verplichtingen proberen te omzeilen, bijvoorbeeld door het illegaal op de markt brengen van panelen

- eigenaars die EoL panelen aanmelden bij de publieke toezichthouder worden automatisch op de hoogte gebracht van hun verwijderingsverplichtingen.
- Illegale export van defecte panelen moet worden voorkomen d.m.v. gestandaardiseerde tests, frequente controles en een systeem van afvalidatienummers.

Uitdaging 2: Gebruikte modules zijn vaak nog functioneel, maar gaan verloren voor hergebruik door onzorgvuldige behandeling.

Aanbevelingen:

- Verplichte training voor EoL paneelspecialisten en gebruik van geschikte inzamelcontainers en beveiligingsmaatregelen tijdens transport en opslag.
- Ontwikkeling van een gespecialiseerde opleiding en certificering voor EoL paneelspecialisten.
- Implementatie van sorteerprocessen en functionaliteitscontroles per paneeltype
- Verplichte samenwerking tussen alle waardeketenpartners binnen het inzamelingsproces, zoals gemeenten,

inzamelaars, paneelproducenten, distributeurs, organisaties voor hergebruik.

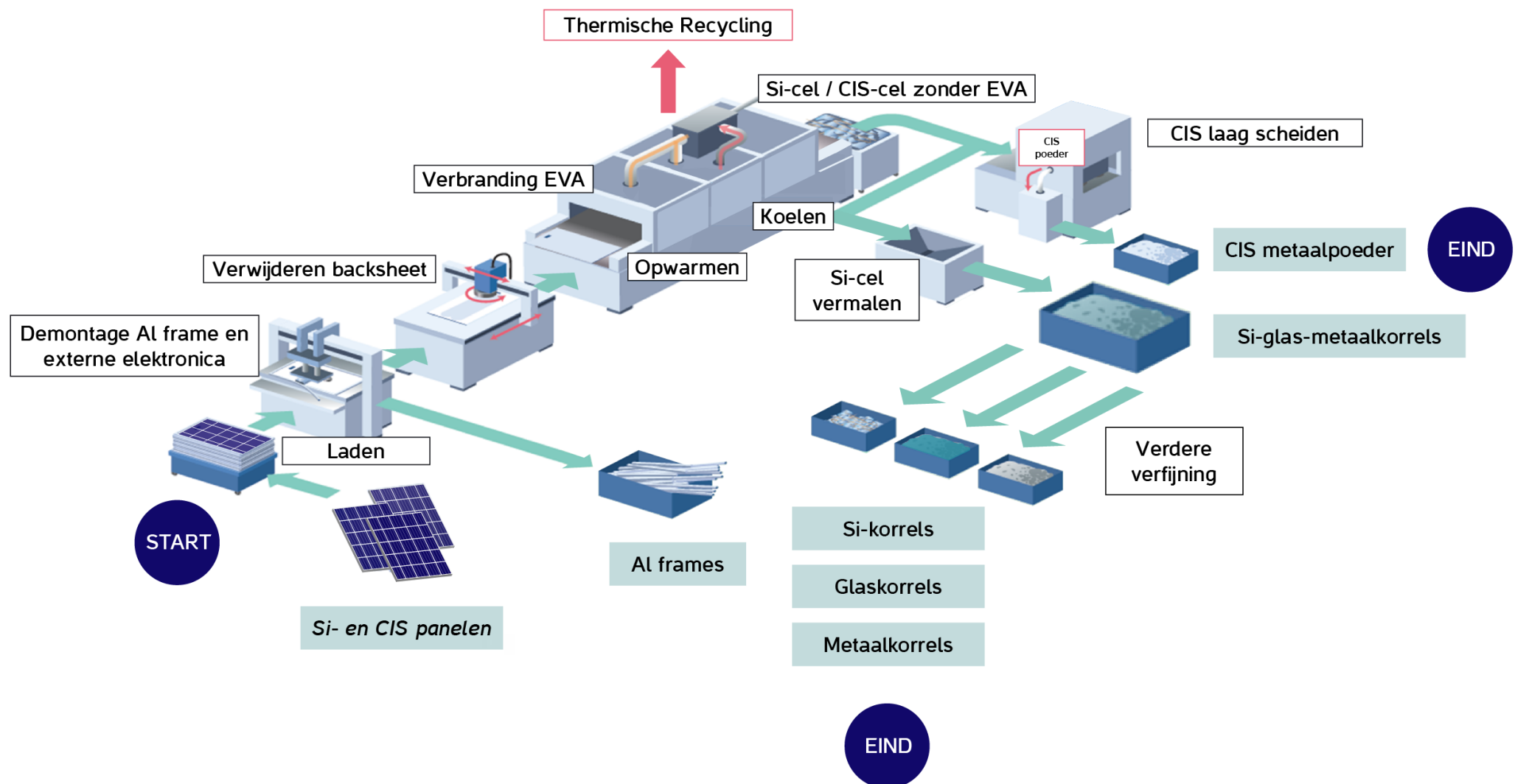
Uitdaging 3: Modules zijn moeilijk te recyclen en het recyclen van modules leidt vaak tot verlies van waardevolle materialen en downcycling, hoewel betere technische opties beschikbaar zijn.

Aanbevelingen:

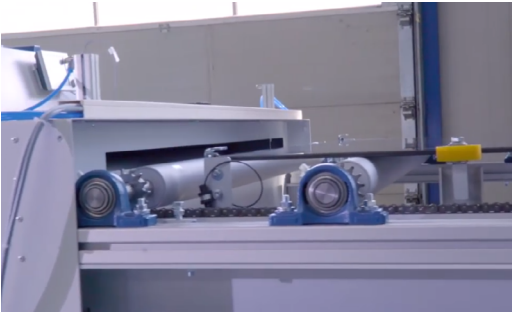
- Modules die in de toekomst op de markt komen moeten makkelijker recyclebaar zijn dankzij Eco-design-voorschriften.
- Groeiende EoL massa's zullen leiden tot een hogere investeringszekerheid voor recyclers.
- Specifieke recyclingvereisten, bijv. voor silicium en glas, moeten leiden tot een hogere kwaliteit van panelen bestaand uit recycleermaterialen.

Annex 6: Recyclingtechnieken

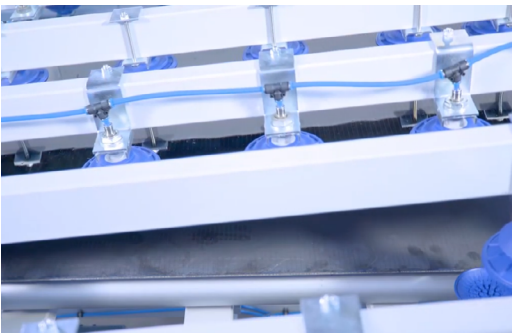
Het huidige PV recycling proces en bijbehorende uitdagingen worden omschreven in secties 3 en 4. Onderstaande figuur bevat een schematische weergave benchmark processen – eigen interpretatie Si recyclinglijn Veolia (FR) en CIGS recyclinglijn Solar Frontier (J) – deels gebaseerd op bron: https://www.photovoltatic-conference.com/images/2016/2_Programme/parallel_events/PvProductionQualityInnovation/Keiichi_KOMOTO.pdf



Stap 1: Frame en externe elektronica verwijderen



Stap 2: Paneel op rolband plaatsen en belichten in laserkamer, zodat hechting minder sterk wordt



Stap 3 en 4: Glasplaten gecontroleerd uit elkaar trekken, platen in chemisch bad plaatsen om halfgeleiderlagen op te lossen, metaalfractionen (zoals Cd, Te) uit de oplossing terugwinnen



Stap 5: Naspoelen glasplaten met water, na drogen geschikt voor hoogwaardig hergebruik

Doorontwikkeling van PV recycling

De grootste bottleneck bij recycling van de huidige generatie zonnepanelen bestaat uit het verwijderen van de lijmfolie. De thermoplast EVA moet bij een temperatuur van rond 600 C worden verhit, waardoor de hechting met de paneelcomponenten wegvalt. Naast het ontwikkelen van nieuwe folies die bij lagere temperatuur of onder externe triggers loslaten, dient de korte termijn focus (tot 2025) te liggen op het zuiver scheiden van glasplaten en celmateriaal.

Als voorbeeld kan worden gekeken naar de volgende twee technieken:

“Hot knife” methode, ontwikkeld door het Japanse NPC, waarin de glasplaten mechanisch worden gescheiden van het celmateriaal d.m.v. een dunne metaalplaat op 180 – 200 C.

Het Duitse Loser Chemie heeft een methode ontwikkeld waarbij de panelen eerst worden blootgesteld aan laserbelichting om de hechting van de glasplaten te verzwakken, Na het gecontroleerd lostrekken van de glasplaten worden de halfgeleiderlagen opgelost en teruggewonnen in een chemische oplossing. Zie fotoweergave.

Op de **medium-lange termijn (tot 2030-2035)** dient de focus te liggen op het hoogwaardig terughalen van de verschillende celmaterialen tegen zo laag mogelijke kosten. Er is een breed scala aan recyclingtechnieken beschikbaar (mechanisch, chemisch, optisch, magnetisch, metallurgisch, etc.) die na verdere doorontwikkeling geëvalueerd moeten worden op commerciële potentie in een recyclingfabriek.

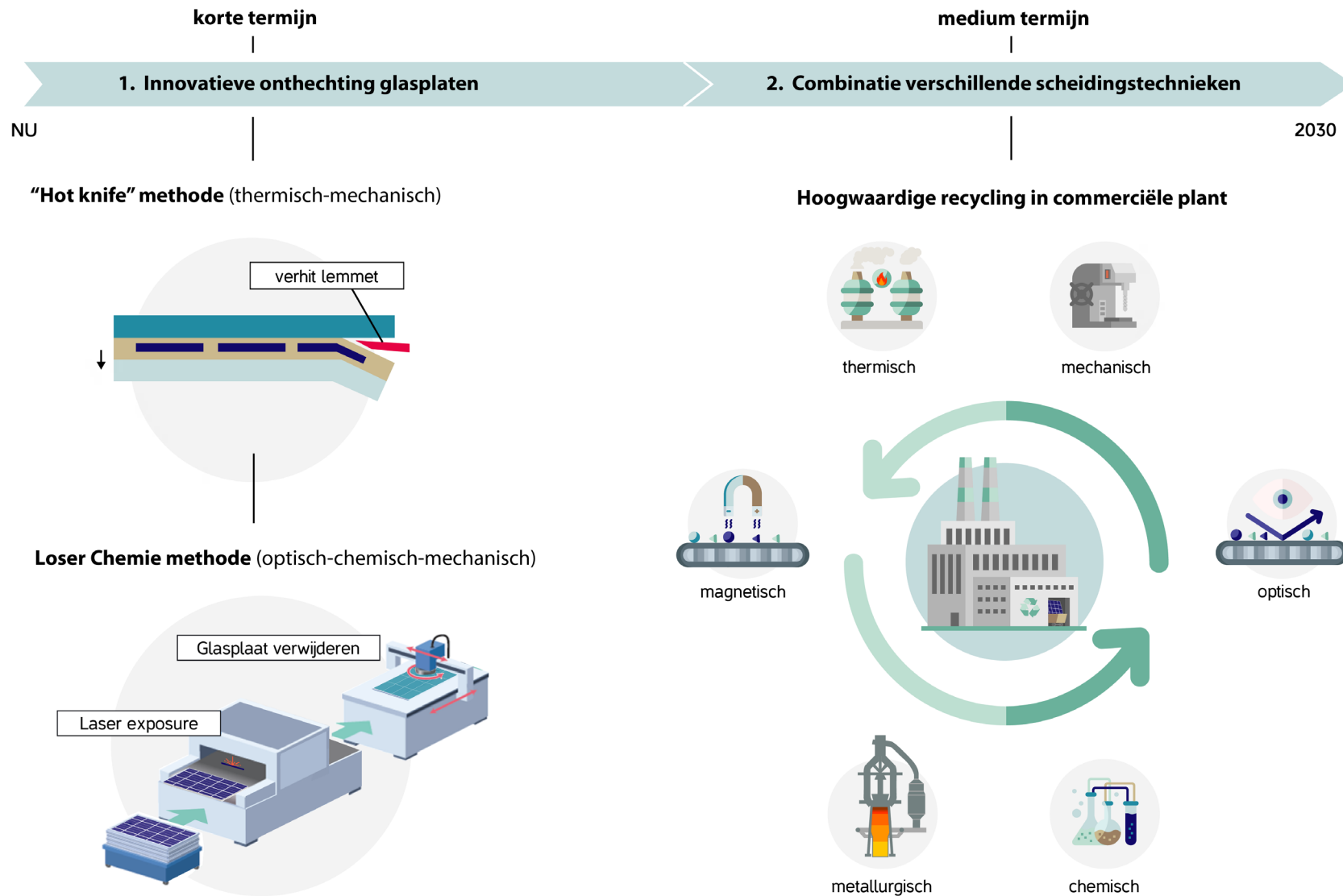
De kernvraag is, welke combinatie van technieken levert in een commerciële plant de meest hoogwaardige recyclaatstromen tegen zo laag mogelijke kosten? Veel innovatieve recyclingtechnieken maken gebruik van pyrolyse, het verhitten van materialen in afwezigheid van zuurstof, met gecontroleerde decompositie als gevolg. Enkele voorbeelden van processen die al deels commercieel worden toegepast [17]:

- Het Duitse SolarWorld heeft een thermisch pyrolyseproces ontwikkeld waarbij de polymeren worden verwijderd bij 600 C en de cellen gedeeltelijk intact blijven. Het huidige recyclingrendement is minimaal 84%.
- Het pyrolyseproces van het Australische Reclaim omvat het verwarmen van de panelen onder gereguleerde omstandigheden, resulterend in scheiding van alle paneelcomponenten inclusief het

zilver maar exclusief het polymeer. Een speciale thermische nabehandeling leidt tot optimale zuiverheid van de verschillende recyclaatstromen.

- Het Duitse ANTEC Solar hanteert een droog-chemisch etsproces bij 400 C om de halfgeleider- en metaalfracties van een CdTe paneel terug te winnen.
- Dias [9] laat zien dat pyrolyse niet noodzakelijk is om geconcentreerd zilver terug te halen. In een test werden de panelen tot korrels vermalen, waarna het zilver chemisch werd teruggewonnen, met en zonder pyrolysestap. Het laatste gaf een hogere opbrengst (94% tegen 92%) bij een lager energieverbruik.

Doorontwikkeling PV recycling



Annex 7: Interviewlijst van gesproken experts

Interviews 2020

Interview #	Datum	Naam	Organisatie	Rol
1	30 nov. 2020	Carlos Felipe Blanco	CML - Institute of Environmental Sciences, Univ. Leiden	Postdoc onderzoeker
2	1 dec. 2020	Friso Huizinga	LC Energy	Directeur
3	3 dec. 2020	Mathijs Tas	Boldz, UU	Oprichter
4	3 dec. 2020	Martin Späth	TNO	Senior onderzoeker
5	7 dec. 2020	Gerard de Leede, Menno van den Donker	Solarge	De Leede: CTO Solarge, hoogleraar Smart Cities (Univ. Tilburg) Van den Donker: Onderzoeker
6	9 dec. 2020	Florens Slob	TNO	Consultant circulaire economie
7	10 dec. 2020	Martin Bruins Slot, Yon van den Oever	Hydro Extrusion	Bruins Slot: Accountmanager Van den Oever: Innovation manager
8	16 dec. 2020	Geert Bergsma, Mart Beefink	CE Delft	Bergsma: Manager LCA groep Beefink: Onderzoeker/adviseur

Interviews 2021

Interview #	Datum	Naam	Organisatie	Rol
9	20 jan. 2021	Joris Quik, Matthias Hof	RIVM	Quick: Milieukundig onderzoeker Hof: Student
10	20 jan. 2021	Eric Dirkx	PV Cycle	Manager Operations & Treatment
11	27 jan. 2021	Mirjam Theelen, Ando Kuypers	TNO Solliance	Theelen: Onderzoeker Kuypers: Program manager
12	1 feb. 2021	Sara Wieclawska	TNO	Consultant duurzaamheid
13	6 feb. 2021	Thije Wubs, Noor Iftikhar, Stephanie Cap, Youri Haak	TU Delft & Univ. Leiden	Studenten
14	18 feb. 2021	Ilse van Andel	Eneco	Business analyst
15	19 feb. 2021	Yongxiang Yang	TU Delft materiaalkunde, Extractive Metallurgy and Recycling	Associate professor
16	11 maart 2021	Herman Verhagen, Lukas Sloet	HVC	Verhagen: Senior Adviseur Lokale Energietransitie Sloet: Business ontwikkelaar
17	10 mei 2021	Jan-Willem Jehee	Stichting Zonne-energie Recycling Nederland (ZRN)	Specialist Solar Energy

