



Circulair
Zuid-Holland

Kennisnotitie **Zonnepanelen circulair**



provincie
Zuid Holland





Circulair
Zuid-Holland

Kennisnotitie ***Zonnepanelen*** ***circulair***



2021

Colofon:

CE Delft, Mart Beeftink, Geert Bergsma

Een tussenconcept is gereviewed door Wim Sinke van TNO.

Vormgeving en illustraties door Yulia Kryazheva van Yulia Ink.

Deze kennisnotitie is geschreven in het kader van het Circulaire economie programma van de provincie Zuid-Holland. Meer over dit programma (Transitiemanager circulaire economie – maakindustrie) vind u [hier](#).

Vanuit de provincie Zuid-Holland heeft Eefke Schramade, Transitiemanager Maakindustrie, de ontwikkeling van deze kennisnotitie begeleid. De provincie gaat graag het gesprek aan. Denkt u kansen te zien in het circulair maken van zonnepanelen? Of wilt u graag verder in gesprek? Neem dan contact op via circulair@pzh.nl

Delft, CE Delft, 1 februari 2021

Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de projectleider Geert Bergsma (CE Delft) of bij het team Circulaire economie van de provincie Zuid-Holland via circulair@pzh.nl

© copyright, CE Delft, Delft

CE Delft

Committed to the Environment

CE Delft draagt met onafhankelijk onderzoek en advies bij aan een duurzame samenleving. Wij zijn toonaangevend op het gebied van energie, transport en grondstoffen. Met onze kennis van techniek, beleid en economie helpen we overheden, NGO's en bedrijven structurele veranderingen te realiseren. Al 40 jaar werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.

Inhoudsopgave

Samenvatting.....	7
1. Twee transitie uitdagingen	11
1.1. <i>Zonnepanelen belangrijk voor energietransitie, circulair nog beter.....</i>	<i>11</i>
1.2. <i>De Zonnepaneel keten.....</i>	<i>13</i>
1.3. <i>Ontwikkeling aantal zonnepanelen in Zuid-Holland.....</i>	<i>14</i>
2. Levensfasen zonnepanelen.....	21
2.1. <i>Productiefase: over (modulair) ontwerpen, materialen en productie.....</i>	<i>21</i>
2.2. <i>Gebruiksfase.....</i>	<i>28</i>
2.3. <i>Einde levensduur.....</i>	<i>31</i>
2.4. <i>Tekort aan netcapaciteit.....</i>	<i>35</i>
3. Ontbrekende Kennis.....	39
3.1. <i>Mondiale kennisvragen.....</i>	<i>39</i>
3.2. <i>Lokale kennisvragen.....</i>	<i>40</i>
4. Kansen in Zuid-Holland.....	45
5. En als u nog meer wilt weten	49
Bibliografie.....	51





Samenvatting

Deze kennisnotitie gaat over circulariteit en zonnepanelen. Zonnepanelen spelen een cruciale rol in de transitie naar een duurzame energievoorziening. Maar zonnepanelen gebruiken ook (schaarse) materialen en zouden kunnen zorgen voor veel afval op termijn. Ze zijn daarmee ook belangrijk in de transitie naar een circulaire economie. Een economie waarin we zo weinig mogelijk grondstoffen gebruiken en afval hergebruiken. Daarom gaat deze kennisnotitie over het zoveel mogelijk circulair maken van zonnepanelen.

Circulariteit van zonnepanelen gaat over:

- 1.** *Nieuwe zonnepanelen zo duurzaam mogelijk produceren, zoveel mogelijk op basis van goed voorradige, weinig milieubelastende en liefst gerecyclede materialen.*
- 2.** *Nieuwe panelen zo ontwerpen dat ze zoveel mogelijke energie produceren, zo lang mogelijk meegaan en aan het eind van de levensduur gerecycled kunnen worden.*
- 3.** *Oude panelen zo lang mogelijk gebruiken (ook eventueel tweedehands)*
- 4.** *Afgedankte panelen aan het eind van de levensduur zo hoogwaardig mogelijk recyclen*

In Zuid-Holland wordt in 7 regio's in Regionale Energie Strategieën nu gepland hoeveel zonnepanelen erbij zouden moeten komen tot 2030. Totaal gaat het ongeveer om 5,6 miljoen geplaatste zonnepanelen in Zuid-Holland in 2030. Ongeveer 1/3 daarvan is al gerealiseerd en 2/3 zal nog geplaatst worden tussen 2020 en 2030. Vanaf ongeveer 2035 zullen de eerste zonnepanelen de leeftijd van 25 jaar gaan bereiken en zullen er regelmatig panelen kapot gaan en gerecycled moeten worden. Die 5,6 miljoen panelen bestaan uit ongeveer 100 miljoen kg materiaal.

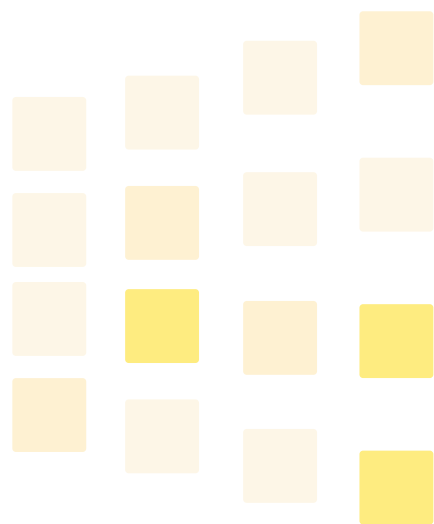
Afgedankte zonnepanelen vallen in de EU en dus ook in Nederland onder de wetgeving voor elektronisch afval. Daarin is bepaald dat producenten

en importeurs moeten zorgen voor een systeem dat kapotte producten aan het eind van hun levensduur recyclet, en dat 85% van het gewicht van die panelen gerecycled wordt. Producentenverantwoordelijkheid heet dat systeem. In 2016 werd in Nederland gemiddeld 45% van het elektronische afval ingezameld voor recycling. De bedoeling was om dit te verhogen naar 65% in 2019 en daarna naar 85%. Voor zonnepanelen geldt dat de hoeveelheid kapotte zonnepanelen die nu retour komt circa 0,2% is ten opzichte van de nieuwe plaatsing. Vanaf 2035 worden dit er veel meer. Dan is ook belangrijk om vooral de schaarse materialen als bijvoorbeeld zilver goed terug te winnen.

In deze kennisnotitie, die geschreven is als een eerste kennismaking met circulariteit en zonnepanelen, leest u verder over de materialen die in zonnepanelen gebruikt worden, de productie, de recycling en kennis die nog ontbreekt op dit onderwerp. Tot slot suggereren we een aantal kansen voor onder andere Zuid-Holland en geven we diverse links en bronnen aan waar u nog meer over dit onderwerp kunt vinden.

Het is belangrijk om te vermelden dat deze kennisnotitie een momentopname is. Zo is de provincie Zuid-Holland namelijk intensief in gesprek met bedrijven, kennisinstellingen en andere organisaties om dit jaar vanuit het netwerk een bredere set aan kansen te identificeren en aan te pakken.

Wilt u in contact treden met de provincie hierover dan dat via deze [website](#).





1.

Twee transitie uitdagingen

1. Twee transitie uitdagingen

Deze kennisnotitie gaat over zonnepanelen. Deze spelen een cruciale rol in de transitie naar een duurzame energievoorziening. Zowel voor bedrijven als voor burgers. Die duurzame energievoorziening hebben we echt nodig om gevaarlijke klimaatverandering te voorkomen. Maar zonnepanelen gebruiken ook (schaarse) materialen en zouden kunnen zorgen voor veel afval op termijn. Ze zijn daarmee ook belangrijk in de transitie naar een circulaire economie. Een economie waarin we zo weinig mogelijk grondstoffen gebruiken en afval hergebruiken. Daarom gaat deze kennisnotitie over het zoveel mogelijk circulair maken van zonnepanelen. Daarbij beseffen we dat zonnepanelen onderdeel zijn van zonnestroomsystemen met ook kabels, omvormers en constructies. Nu concentreren we ons op het hart van alle systemen, de panelen.

1.1. Zonnepanelen belangrijk voor energietransitie, circulair nog beter

Voor de verduurzaming van de energiesector is de vervanging van fossiele energieproductie op basis van kolen en gas door onder andere zonnepanelen hard nodig. Zonnepanelen dragen bij aan minder CO₂-emissies en klimaatverandering en het verminderen van het gebruik van fossiele energie. Ook in Zuid-Holland geldt dat hoe meer zonnepanelen er geplaatst worden hoe beter.

Maar die zonnepanelen moeten ook gemaakt worden. Op dit moment is het gelukkig zo dat de energievraag en CO₂-emissie die speelt bij de productie van een paneel veel lager is dan de besparing die met een paneel te halen is (factor 10 in 2017 (Raugei, 2017)). Toch wil je natuurlijk panelen hebben die zo duurzaam mogelijk zijn. Dat betekent dat er zo min mogelijke milieubelasting speelt tijdens de productie en dat er zo min mogelijk schaarse grondstoffen nodig zijn. Ook speelt mee dat in sommige panelen giftige of schaarse materialen als lood, cadmium of antimoon gebruikt worden. Dit willen we het liefst beperken of helemaal voorkomen. Hierdoor kunnen deze zonnepanelen als ze na 25 jaar of meer afgedankt worden zo

hoogwaardig mogelijk gerecycled worden. Daarvoor is het nodig om ons voor te bereiden op een goede inzameling en technieken voor die recycling. En verder moeten de panelen die we nu kopen later ook goed uit elkaar te halen zijn voor een goede recycling. Of dat onderdelen geschikt zijn voor hergebruik. En als er meer zonnepanelen in Europa gemaakt zouden kunnen worden op basis van Europees afval en niet in China is er ook minder transport nodig.

Tot slot zijn er nu steeds meer projecten waarbij panelen van 5 à 10 jaar oud die het op zich nog goed doen vervangen worden door nieuwe en vaak ook meer panelen met een hoger energierendement. Dit levert tweedehands panelen op die in veel andere projecten nog prima te gebruiken zijn. Deze kennisnotitie besteedt daarom ook aandacht aan de tweedehands markt voor zonnepanelen.

Circulariteit van zonnepanelen gaat dus over:

1. *Nieuwe zonnepanelen zo duurzaam mogelijk produceren, zoveel mogelijk op basis van goed voorradige, weinig milieubelastende en liefst gerecyclede materialen.*
2. *Nieuwe panelen zo ontwerpen dat ze zoveel mogelijke energie produceren, zo lang mogelijk meegaan en aan het eind van de levensduur makkelijk gerecycled kunnen worden.*
3. *Oude panelen zo lang mogelijk gebruiken (ook eventueel tweedehands)*
4. *Afgedankte panelen aan het eind van de levensduur zo hoogwaardig mogelijk recyclen.*

Al deze onderwerpen worden verder toegelicht in deze kennisnotitie. We geven u de feiten en suggesties voor verder lezen als u meer informatie wenst.

Zonnepanelen functioneren in een groter systeem

Om een zonnepaneel te laten werken is er meer nodig dan alleen het paneel. Zo is een constructie nodig om hem neer te zetten, is er een omvormer nodig om van gelijk- naar wisselstroom te gaan en zijn er kabels en soms ook energieopslag nodig. Deze onderdelen moeten uiteindelijk ook

allemaal circulair worden. In deze notitie beperken we ons om te beginnen tot ze zonnepanelen zelf. Dit wil niet zeggen dat die andere onderdelen niet belangrijk zijn. Wel is het zo dat die andere onderdelen meer lijken op producten die nu al in de bouw of in de elektronica-industrie gerecycled worden. Wellicht kijken we hier in een volgende kennisnotitie verder naar.

1.2. De zonnepaneelketen

Zonnepanelen leggen een lange weg af voordat ze in Nederland op een dak geplaatst worden. De winning van de materialen en de productie van zonnecellen vindt vooral in China plaats. Assemblage van cellen in panelen gebeurt daar ook maar wordt ook weer steeds meer in Europa gedaan. En plaatsing, montage en onderhoud is natuurlijk een lokale kwestie.

Waar wordt een zonnepaneel van gemaakt?

De basis voor de meest gebruikte (~95%) silicium-zonnepanelen (c-Si) is het materiaal silicium. Het silicium wordt in een hoog-temperatuurproces gewonnen uit zand. Van de blokken zuiver silicium worden dunne plakjes gemaakt. Naast silicium bevatten deze zonnepanelen ook zilver. De silicium-zonnepanelen zijn op te delen in panelen op basis van polykristallijn silicium of op basis van monokristallijn silicium. Monokristallijn vergt meer bewerkingen om te maken en is dus ook duurder maar produceert meer energie uit dezelfde hoeveelheid zon.

De rest van de markt bestaat vooral uit dunnefilmtechnologieën. Daarvoor gebruikt men vooral CdTe (CadmiumTelluride) (~4% marktaandeel) of CIGS (koper, indium, gallium en selenide) (met ruim 1% marktaandeel).

Waar worden zonnepanelen gemaakt: vooral in China maar ook weer in Nederland

Zonnepanelen worden voor een groot deel grootschalig gemaakt in China. Maar ook in de Verenigde Staten, Europa en Nederland worden zonnepanelen gemaakt. Een voorbeeld van een Zuid-Hollandse zonnepaneelproducent is [Exasun](#) in Den Haag, dat zich vooral richt op zonnepanelen zonder toxische stoffen en een mooie inpassing in daken. Ander voorbeeld is [Energyra](#), dat gevestigd is in Zaanstad en zich richt op panelen met minder lood. En in Rozendaal zit [Kameleon Solar](#) dat net als Exasun panelen maakt

in allerlei kleuren. Een deel van deze productie is echt eigen productie en een deel is meer assemblage van onderdelen. De meeste cellen ook voor Nederlandse productie komen toch uit China.

Distributie, planning, verkoop en plaatsing van zonnepanelen vindt wel plaats in Nederland. Vele bedrijven verzorgen dit in Nederland.

In Nederland beschikten eind 2020 [1 miljoen woningen over zonnepanelen](#). Dat zijn bijna 1 op de 8 woningen, bleek uit onderzoek van Dutch New Energy Research. Daarnaast zijn er panelen op daken van bedrijven en gemonteerd op zonneweides. In 2020 werd iets meer dan 5 procent van de stroom in Nederland opgewekt door zonne-energie, waarmee 5,3 miljoen ton CO₂ per jaar wordt bespaard.

1.3. Ontwikkeling aantal zonnepanelen in Zuid-Holland

In Zuid-Holland wordt in 7 regio's in Regionale Energie Strategieën nu gepland hoeveel zonnepanelen erbij zouden moeten komen tot 2030. Daarbij is er onderscheid gemaakt tussen kleinschalige projecten vooral door particulieren en grootschalige projecten. In 2019 is in deze [verkenning](#) een schatting gemaakt wat de verwachting is. Totaal gaat het ongeveer 5,6 miljoen geplaatste zonnepanelen in Zuid-Holland in 2030. Ongeveer 1/3 daarvan is al gerealiseerd en 2/3 zal nog geplaatst worden tussen 2020 en 2030.

Vanaf ongeveer 2035 zullen de eerste zonnepanelen de leeftijd van 25 jaar gaan bereiken en zullen er regelmatig panelen kapot gaan en gerecycled moeten worden. Die 5,6 miljoen panelen bestaan uit ongeveer 100 miljoen kg materiaal. Als die over een periode van 20 jaar afgedankt wordt is dat 5 miljoen kg per jaar. Op dit moment zamelt Wecycle ongeveer 20 miljoen kg elektronisch afval per jaar in Zuid-Holland. (Landelijk [100](#) en dus in Zuid-Holland ongeveer 20.) Zonnepanelen gaan dus een substantieel deel worden van het inzamelsysteem voor elektronisch afval op termijn.

Tabel 1 - Inschattingen extra zonnepanelen in RES regio's Zuid-Holland tot 2030. Bron: Factsheet Zon-pv en wind op land, Analyse naar opwek van hernieuwbare energie per RES-regio 2019.

RES Regio	Totaal 2030 (TWh) Grootschalig PV	Totaal 2030 (TWh) Kleinschalig PV	Totaal (TWh)	Aantal panelen*
Alblasserwaard	0,05	0,02	0,07	0,3 mln.
Drechtsteden	0,09	0,07	0,16	0,6 mln.
Goeree Overflakkee	0,05	0,03	0,08	0,3 mln.
Hoeksche Waard	0,05	0,03	0,08	0,3 mln.
Holland Rijnland	0,08	0,19	0,27	1,0 mln.
Midden Holland	0,07	0,08	0,15	0,6 mln.
Rotterdam-Den Haag	0,20	0,46	0,66	2,5 mln.
Totaal			1,47	5,6 mln.

Tussen 2010 en 2018 is de hoeveelheid zonne-energie in Zuid-Holland met een factor 7 toegenomen. De voortgang richting 2030 is te volgen op de website [“de staat van Zuid-Holland”](#)

* Een gemiddeld zonnepaneel van 1,65 m x 1 meter levert op dit moment 300 Wattpiek en bij een opstelling ook ongeveer 300x0,875 kWh=262kWh per jaar. Voor 1 TWh (10^{12} Wh is dus 1 miljard kWh) zijn dan dus ongeveer 3,8 miljoen panelen totaal nodig. Een zonnepaneel weegt totaal ongeveer 19 kg per stuk.

Aanpak Circulair Zuid-Holland – Provincie Zuid-Holland

Transitieaanpak Circulair Zuid-Holland – Provincie Zuid-Holland

In Zuid-Holland wordt gewerkt met het uitgangspunt: “De transitie naar een circulaire economie doorlopen we samen”. Onze strategisch beleidsnotitie ‘Circulair Zuid-Holland: Samen Versnellen’ is het actuele beleidsdocument (Provinciale Staten, 5 februari 2020). Het doel is om per 2050 een volledig circulaire economie te hebben, met als tussenstap 50% minder gebruik van primaire grondstoffen (mineraal, fossiel en metaal) in 2030. Er is gekozen voor vier circulaire transitithema’s: Bouw, Kunststoffen, Groene Grondstoffen & Voedsel en Maakindustrie.

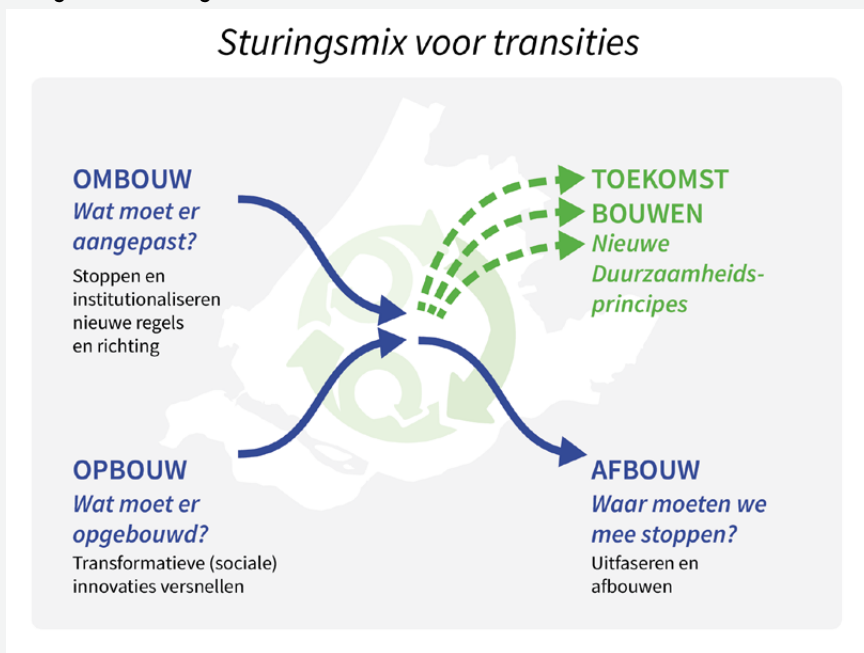
De provincie Zuid-Holland werkt met een veranderaanpak gebaseerd op transitie management (Rotmans, Loorbach e.a.). Het gaat hier om grote maatschappelijke veranderingsprocessen, die op de lange termijn leiden naar nieuwe maatschappelijke structuren, instituties, opvattingen en praktijken voor die duurzame circulaire samenleving. Hiervoor is een sturingsmix nodig van opbouw, ombouw en afbouw.

Figuur 1 – Stappenplan provincie Zuid-Holland



Deze Kennissenotitie hoort bij stap 1; een stand van zaken notitie die overzicht en inzicht geeft en belangrijk is bij voor de strategie en visievorming. Hier wordt het fundament gelegd voor voor de Transitieagenda's per thema.

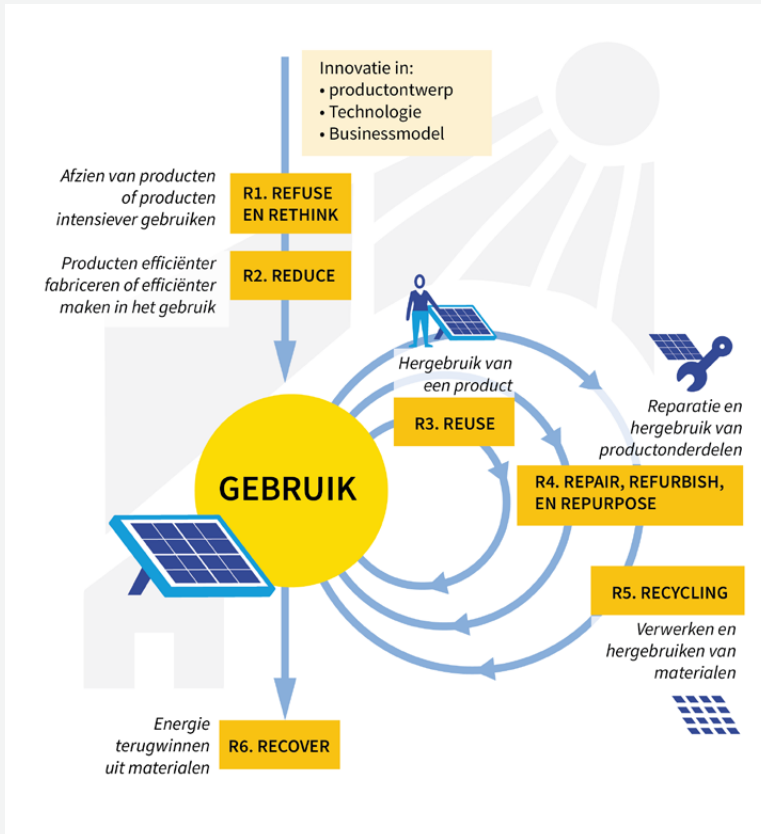
Figuur 2 – Sturingsmix voor transities



Box 2 – De R-ladder in de circulaire economie**R-ladder in de circulaire economie**

De verschillende mogelijkheden om onze economie meer circulair te maken worden vaak gepresenteerd als de R-Ladder. Hier leggen we kort uit wat daar mee bedoeld wordt. Allereerst staat een lineaire economie voor het produceren van producten die we vaak kort gebruiken en dan weggooien. Op zijn hoogst worden die verbrand voor energieproductie maar soms belanden ze op de stortplaats waar ze eeuwig zullen blijven liggen. In de circulaire economie voorkomen we dit en gebruiken we producten zo lang mogelijk en worden oude producten geen afval maar bron voor nieuwe producten.

Daarvoor zijn er 6 (in sommige andere ladders wel 10) aanpakken die met een Engels woord dat begint met een R worden aangeduid. Eerste actie is het nadenken over de vraag of je een product wel nodig hebt. (Refuse=R1). Bij zonnepanelen kan je dat vertalen naar de vraag of we wel zoveel elektriciteit nodig hebben. Een derde monitor aan je computerscherm is misschien niet echt nodig. Volgende stap is de vraag verminderen of producten efficiënter maken. Bij zonnepanelen kan je dat vertalen naar een zo hoog mogelijk energierendement en een zo lang mogelijke levensduur (in combinatie Energie return on investment – ERol genoemd), dan heb je voor dezelfde stroom minder panelen nodig. En rond een zonnepaneel kan je denken aan hergebruik (Re-use = R3) van tweedehands panelen, die iemand anders wegdoet omdat hij efficiëntere nieuwe panelen wil, op een groot gebouw waar er toch veel ruimte is en het rendement niet zo belangrijk is. En als een paneel maar gedeeltelijk stuk is dan kan reparatie (Repair of refurbish = R4) een mogelijkheid zijn om panelen nog langer te gebruiken.

Figuur 3 – R-ladder met strategieën van circulariteit

Maar als panelen echt stuk zijn dan is het zaak de materialen te recyclen om er weer nieuwe producten van te maken (Recycling = R5)

Voor sommige producten is het ook nog een laatste optie om producten voor energieproductie te verbranden. Zonnepanelen branden alleen niet. Als zonnepanelen toch in een verbrandingsoven terecht komen dan wordt alleen het koper en aluminium bij de verbranding eruit gehaald voor recycling maar andere materialen raken dan verloren.



2.

**Levensfasen
zonnepanelen**

2. Levensfasen zonnepanelen

Zonnepanelen zijn de afgelopen 40 jaar zeer sterk verbeterd in efficiëntie en prijs. Toch vindt er nog steeds veel innovatie plaats. Zo geeft de Nederlandse zonne-industrie bijvoorbeeld aan dat tot 2030 de productiekosten van zonnepanelen gehalveerd kunnen worden, de energieopbrengst kan stijgen met op zijn minst 25% en dat de levensduur verlengd kan worden met 10 jaar (RVO, 2020). Er zijn ook diverse typen en merken zonnepanelen op de markt die elk richten op verschillende toepassingen.

Om tot circulaire zonnepanelen te komen is het handig om naar de hele levenscyclus van een zonnepaneel te kijken, zoals weergegeven in Figuur 4. De levenscyclus kan opgedeeld worden in drie fases: de productiefase (Hoofdstuk 2.1), de gebruiksfase (Hoofdstuk 2.2) en de einde levensduur (Hoofdstuk 2.3). Per fase behandelen we een aantal onderwerpen. Voor elk van deze onderwerpen behandelt dit hoofdstuk kort de stand van zaken en trends binnen de sector.

In deze kennisnotitie noemen we slechts een selectie van de bedrijven en onderzoeksinstituten die bezig zijn met zonnepanelen. Wilt u een compleet overzicht dan kunt u dat vinden in het overzicht van RVO (2020) op pagina 18, waarbij de bedrijven en onderzoeksinstituten opgedeeld zijn in verschillende categorieën.

2.1. Productiefase: over (modulair) ontwerpen, materialen en productie

2.1.1 Langere levensduur

De huidige zonnepanelen gaan op dit moment gemiddeld 25 tot 30 jaar mee. Op dit moment verwacht de markt de levensduur in 2030 met misschien wel 10 jaar te kunnen verlengen (Sinke, 2021; RVO, 2020).

Deze ontwikkeling is volgens Wim Sinke, hoofdonderzoeker zonne-energie TNO, erg belangrijk omdat het verlengen van de levensduur van zonnepa-

Box 3 - Integrale aanpak circulaire zonnepanelen is een must

Integrale aanpak circulaire zonnepanelen is een must

In dit hoofdstuk worden de onderwerpen, zoals bijvoorbeeld de levensduur en het energierendement, apart behandeld. Veel van de behandelde onderwerpen zijn echter op één of meerdere manieren met elkaar verweven. Veel producenten en onderzoekers kijken namelijk integraal naar deze onderwerpen tijdens hun onderzoeks- en ontwerpfase. Wat tijdens ons onderzoek vaak naar voren kwam is dat een verbetering op het ene onderwerp als gevolg kan hebben dat er op een ander onderwerp ingeleverd moet worden. Zo zijn bijvoorbeeld in sommige gevallen meer schaarse materialen nodig voor zonnepanelen met een hoger energierendement. Een goede balans tussen deze verschillende aspecten is het circulair maken van zonnepanelen is daarom belangrijk.



Figuur 4 – Circulaire levenscyclus van een zonnepaneel.

nelen over het algemeen directe positieve gevolgen heeft voor het verlagen van de klimaatimpact over de hele levensduur van het paneel.

Toch zorgt een langere levensduur niet in alle gevallen voor de gewenste verlaging van de klimaatimpact. Door het hoge tempo waarin zonnepanelen verder ontwikkeld worden neemt het energierendement door de jaren heen snel toe (zie paragraaf 2.2.1). Hierom worden regelmatig goed functionerende zonnepanelen voor het einde van hun levensduur al [vervangen](#). [Omvormers, kabels en constructie blijven vaak wel behouden](#). Een voorbeeld is het [Solarpark Azewijn](#) in de Achterhoek dat voortijdig van nieuwe panelen is voorzien. Omdat goed functionerende panelen die 10-15 'oud' zijn een significant lager energierendement hebben dan de nieuwste panelen, schrijven projectontwikkelaars zonnepanelen vaak al af na 15 jaar omdat daar een betere businesscase voor is. De zonnepanelen worden veelal doorverkocht aan het buitenland. Er is weinig bekend over wat er gebeurt met de zonnepanelen die doorverkocht worden naar het buitenland en hoelang deze daar gebruikt zullen worden (zie ook 2.3.2). Daarbij is er ook zorg dat zonnepanelen in het buitenland vaak na afdanking niet netjes gedemonteerd en gerecycled worden maar vaak gestort op een stortplaats. Een internationaal statiegeldsysteem waardoor de panelen na gebruik hier weer terugkomen voor recycling zou daar een oplossing voor kunnen zijn.

Om deze reden is het volgens Sinke belangrijk om tijdens het ontwikkelen van zonnepanelen die langer mee gaan ook goed te onderzoeken of er een businesscase is waarbij deze langere levensduur ook volledig benut wordt. Het ontwikkelen van zonnepanelen die langer meegaan heeft namelijk alleen zin als ze ook daadwerkelijk langer gebruikt worden. De businesscase voor maximaal gebruik zou bevorderd kunnen worden door een goed systeem op te zetten waarbij doorverkoop en hergebruik aantrekkelijke mogelijkheden zijn voor projectontwikkelaars. De tweedehands markt voor particulieren en projectontwikkelaars staat nu echter nog in de kinderschoenen.

Voorbeeld ontwikkeling zonnepanelen TNO

Er is veel ontwikkeling in zonnepanelen op dit moment. TNO (2020) houdt zich bijvoorbeeld veel bezig met het verbeteren van de recyclingbaarheid, levensduur en energierendement van zonnepanelen. Zo zorgen de door TNO ontwikkelde technologieën ervoor dat het bedrijf Exasun in staat is glas glas zonnepanelen te ontwikkelen die volgens TNO 5 jaar langer mee zouden gaan, geen giftig loodhoudend materiaal en fluorhoudende Tedlar nodig heeft. Daarnaast is het paneel aan het einde van de levensduur heel makkelijk te ontmantelen en daardoor goed te recyclen. Zie ook <https://www.topsectorenergie.nl/spotlight/circulaire-zonnepanelen-gemaakt-nederland>

2.1.2 Giftige stoffen

Zonnepanelen kunnen giftige stoffen bevatten die zeer schadelijk kunnen zijn voor het milieu. Dit zou een gevaar kunnen vormen tijdens productie en verbranding van zonnecellen. Daarnaast kan het gebruik van giftige stoffen impact hebben op de recyclebaarheid van de zonnecellen. Gelukkig zijn de hoeveelheden die gebruikt worden klein en is de kans op vrijkomen zolang de panelen intact zijn ook heel klein. Toch is het zaak de hoeveelheid nog verder te verlagen.

De voornaamste giftige stoffen die worden gebruikt in zonnepanelen op basis van silicium zijn lood en PFAS. Het giftige lood wordt gebruikt in soldeermateriaal om de soldeer flexibel en sterker te houden (Topsector Energie, 2020). Het moeilijk te recyclen fluorhoudende materiaal Tedlar wordt gebruikt om de achterkant van de module te beschermen.

Er zijn verschillende bedrijven en universiteiten bezig met onderzoek naar het verminderen of elimineren van het gebruik van giftige stoffen in zonne-

cellen. Zo heeft het Nederlandse bedrijf Mat-Tech door een nieuwe techniek toe te passen en traditionele soldeer componenten in de modules te vervangen loodvrij soldeermateriaal ontwikkeld (TNO, 2020; Topsector Energie, 2020). Daarnaast heeft het Haagse bedrijf Exasun zonnepanelen ontwikkeld met aan beide kanten glasplaten, wat als alternatief kan dienen voor de kunststof dat normaliter wordt gebruikt voor de achterkant van de module maar waar fluor aan wordt toegevoegd om de waterdichtheid te verhogen. Hieraan zijn zogeheten achterzijdecontact cellen toegevoegd, een technologie ontwikkeld door DSM en TNO waarbij gebruik wordt gemaakt van nieuw hechtmateriaal om de componenten in de zonnemodule te hechten die onder bepaalde omstandigheden terugschieten in de oorspronkelijke vorm. Dit maakt het ontmantelen van het paneel aan het einde van de levensduur en de recycling van het glas veel gemakkelijker (TNO, 2020; Topsector Energie, 2020). In een gezamenlijk project tussen deze bedrijven is gewerkt aan de ontwikkeling van een nieuw zonnepaneel die bovenstaande elementen combineert. Er wordt verwacht dat deze zonnepanelen eind 2021 op de markt zullen komen (solarmagazine.nl, 2020).

Perovskiet: Veelbelovend voor meer energieopbrengst maar wel met lood

Een andere ontwikkeling van zonnepanelen is het toepassen van dunnefilm-perovskiet in zonnepanelen. Door perovskiet te combineren met silicium kan het rendement van panelen verder worden verhoogd tot misschien wel 30%. Een nadeel van het toepassen van perovskiet is echter dat er meestal een zeer kleine hoeveelheid lood in zit en dat is een toxisch materiaal. Het is ook mogelijk om perovskiet met tin te maken maar deze werken nog niet zo goed als die met lood. [TNO](https://www.tno.nl) doet onderzoek naar deze techniek.

In de EU wordt er gestudeerd op [Ecodesign](https://ecodesign.nl) regels voor zonnepanelen. Voorlopig zijn er nog weinig voorstellen voor echt strenge en vergaande regels. Wel komen er voorwaarden voor rapportage van wat er in een paneel zit en hoe deze gedemonteerd zou moeten worden.

Het [RIVM](https://www.rivm.nl) doet op dit moment een onderzoek onder de titel DIRECT naar de recycling en zorgelijke stoffen in zonnepanelen.

2.1.3. *Schaarse materialen*

De hoeveelheid kritische metalen die nodig zijn voor de productie van alle zonnepanelen zal flink toenemen richting 2050 als we de Parijs klimaatdoelstellingen willen halen. Of er een daadwerkelijke tekort van bepaalde kritische materialen zal ontstaan is afhankelijk van vele factoren zoals: de vraag vanuit andere sectoren, de wereldwijde productie, afhankelijk van andere landen, innovatie en de gebruikte technologiemix (aandeel type zonnepanelen).

Technologiemix variëren (type zonnepanelen)

De hoeveelheid schaarse materialen die in een zonnepaneel zit is afhankelijk van het type zonnepanelen. Voor de meest gebruikte zonnepanelen op basis van silicium (c-Si) (~95% marktaandeel) is vooral zilver een aandachtspunt. Dunne film (CdTe) zonnepanelen (~4% marktaandeel) hebben volgens LCA-studies de beste prestaties op gebied van CO₂-uitstoot en energie-terugverdientijd, maar bevatten wel de schaarse materialen tellurium en cadmium (Metabolic, Copper8 & Universiteit Leiden, 2018). Een ander type dunne film (CIGS) zonnepanelen (~1% marktaandeel) bevat weer indium en selenium. Omdat de benodigde materialen verschillen per type zonnepaneel is het mogelijk om de druk op bepaalde schaarse materialen te verminderen door de technologiemix te variëren (ander type zonnepanelen te gebruiken). Dit zal grotendeels via het marktmechanisme automatisch gaan. Paneeltypen die dure schaarse metalen nodig hebben zullen duurder worden dan panelen die dat minder schaarse metalen gebruiken en daardoor minder verkocht worden.

In onderzoek naar schaarse materialen wordt er, afhankelijk van de aannames over bijvoorbeeld de technologiemix, vooral gesproken over de materialen indium en tellurium. Uit onderzoek van Metabolic, Copper 8 en Universiteit Leiden (2018) kwam bijvoorbeeld naar voren dat er een tekort zou kunnen ontstaan van het materiaal indium als je ervan uitgaat dat het marktaandeel van de dunne film zonnepanelen (CIGS) fors stijgt van ongeveer 1% naar 5%. Over tellurium concludeert (ECN, 2018) dat er op middellange termijn (tot 2030) feitelijk geen tellurium schaarste zal zijn en met CdTe PV een fors deel van de mondiale PV markt kan worden bedient. Voor lange termijn is dit echter zeer onzeker. Deze conclusie trekt TNO/ECN ondanks dat ze ook aangeven dat de JRC en DOE rapporten tellurium geclas-

sificeerd wordt als high risk respectievelijk near critical (U.S. Department of Energy, 2011; Moss, 2011).

Circulair materiaalgebruik

Circulair materiaalgebruik is een belangrijke factor die de vraag naar schaarse materialen kan verminderen. Echter biedt enkel circulair materiaalgebruik geen voldoende oplossing in de sterk groeiende markt van de zonnepanelen omdat het materiaal dat over 25 jaar terugkomt niet genoeg zou zijn om aan de materiaalvraag van dan te voorzien. De beschikbaarheid en duurzame winning van schaarse materialen zijn daarom op dit moment extra belangrijk. Voorlopig komen er vooral veel nieuwe zonnepanelen bij in de wereld en kunnen we nieuwe nog niet maken van oude.

Beschikbaarheid en winning

In tegenstelling tot wat veel mensen denken, is er in principe voldoende beschikbaarheid van de meeste metalen die nodig zijn voor de energietransitie. De belangrijkste vraag is vooral of er genoeg van deze metalen gewonnen kunnen worden in de nog ongeveer 30 jaar die we hebben voor de energietransitie. Dit is een relatieve korte periode om de productie op te schalen omdat het openen van een nieuwe mijn zo'n 10-20 jaar kan duren. Volgens Metabolic, Copper 8 en Universiteit Leiden (2018) ligt het daarom niet voor de hand dat de metaalproductie de komende jaren gaat kunnen meegroeien met de metaalvraag.

Om een duurzaam elektriciteitssysteem te realiseren, is het daarom dus zowel nodig om minder kritische metalen toe te passen, als om de wereldwijde jaarproductie van deze metalen te vergroten.

Andere oplossingen

Het minder toepassen van kritische metalen kan bijvoorbeeld gerealiseerd worden door het vervangen van kritische metalen. In de afgelopen 20 jaar worden er steeds meer alternatieve materialen toegepast in zonnepanelen ([pv-magazine.com](https://www.pv-magazine.com), 2020), al vervangen deze niet altijd de schaarse materialen. Daarnaast biedt het toepassen van circulair ontwerpen en het verbeteren van de verwerking aan het einde van de levensduur ook een mogelijke oplossing. Innovatie in zonnepanelen die zorgen voor een langere levensduur (paragraaf 2.1.1.), het verhogen van het energierendement

(Hoofdstuk) en het verbeteren van de verwerking aan het einde van de levensduur (Hoofdstuk) kunnen allemaal de vraag naar kritische materialen verminderen. Deze innovaties zorgen echter niet altijd voor een vermindering van de vraag naar kritische grondstoffen. Volgens Metabolic, Copper 8 en Universiteit Leiden (2018) hebben nieuwe technologieën namelijk vaak een hogere efficiëntie en zijn goedkoper, maar creëren ze vaak een hogere vraag naar kritische metalen.

Metabolic, Copper 8 en Universiteit Leiden (2018) zien het overwegen van een Europese mijnbouwindustrie ook als een mogelijke oplossing om een potentieel tekort aan schaarse materialen te voorkomen. Dit verhoogt namelijk de wereldwijde productie van deze materialen en verlaagd de afhankelijkheid van andere landen.

Vraag kritische materialen uit andere sectoren

De druk op kritische metalen neemt waarschijnlijk ook ieder jaar verder toe door de (groeierende) behoefte van kritische metalen in andere toepassingen, zoals elektrische auto's en consumentenelektronica. Als gevolg van deze groeiende behoefte aan schaarse materialen kunnen tekorten of leveringsonderbrekingen in de keten ontstaan waardoor de energietransitie mogelijk vertraagd wordt.

2.2. Gebruiksfase

2.2.1. Energierendement

Het energierendement van een zonnecel geeft aan hoeveel van de energie van het zonlicht kan worden omgezet in elektriciteit. Door de jaren heen is er veel gewerkt en bereikt op het gebied van efficiëntie waardoor de efficiëntie van zonnepanelen elk jaar gestaagd stijgt. Deze stijging is weergegeven in Figuur 5 – Stijgende efficiëntie van verschillende type zonnecellen sinds 2000. Bron: Wim Sinke, TNO en UvA waarbij onderscheid is gemaakt tussen verschillende type siliciumzonnepanelen (~95% marktaandeel) en verschillende dunnefilmtechnologieën, waarvan CdTe met ~4% marktaandeel de grootste is, gevolgd door CIGS met ruim 1% en een heel klein aandeel voor a-Si.

Momenteel ligt het gemiddelde energierendement dat met een industriële silicium zonnecel (c-Si) wordt behaald rond de 20% tot 22%, waarbij het theoretische maximum rendement voor (laboratorium) zonnecellen wordt geschat op 29,4%. Echter wordt de praktische rendementsgrens van dit type zonnecel geschat op ongeveer 26% (TNO, 2019).

Door maatregelen zoals het actief toepassen van koelen van panelen en optimale oriëntatie van de zonnecel ten opzichte van de zon, kan voor huidige toepassingen de opbrengst worden geoptimaliseerd (Universiteit Utrecht, 2017).

Er wordt door Nederlandse onderzoekers en bedrijven veel onderzoek gedaan naar nieuwe concepten en technologieën om de efficiëntie van zonnecellen te verhogen. Zo onderzoekt TNO of het mogelijk is om de opbrengst van silicium fotovoltaïsche (PV) cellen te verhogen door het aanbrengen van functionele coatings die zorgen voor een betere licht-opname en verliezen aan het oppervlak minimaliseren (TNO, 2020a).

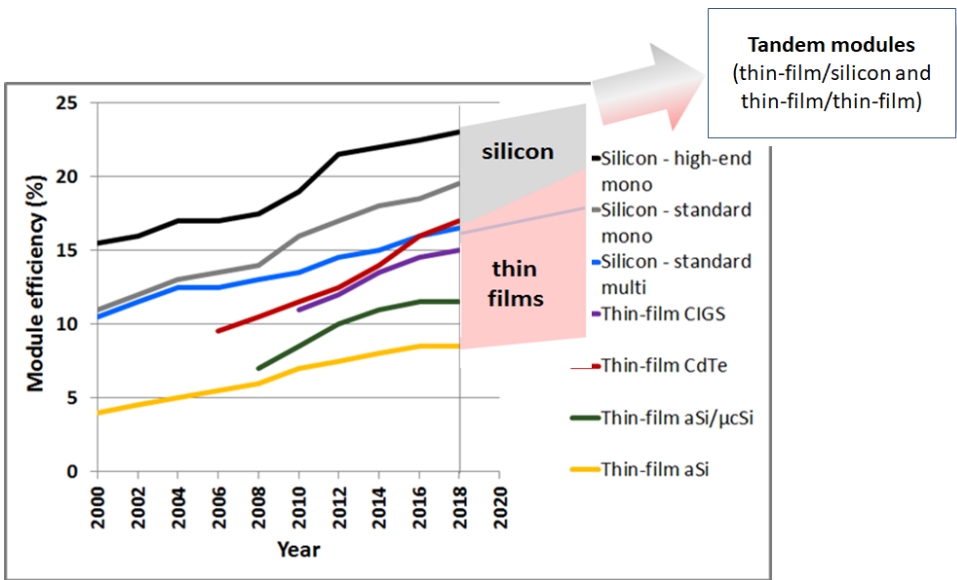
Om direct de energieopbrengst van PV-cellen te verhogen, wordt er ook onderzoek gedaan door TNO naar de mogelijkheden om licht aan twee zijden van de cel en module op te vangen. Hiermee zou de directe energieopbrengst met 10 tot 20% verhoogd kunnen worden. Een ander voorbeeld is hun onderzoek naar de ontwikkeling van “tandem constructies”, waarbij verschillende typen zonnecellen worden gecombineerd. Door het samenbrengen van een cel geoptimaliseerd voor hoge energie fotonen en de ander geoptimaliseerd voor lage energie fotonen, kan er meer elektrische energie uit zonlicht worden gehaald, waarmee de efficiëntie significant kan worden verhoogd (RVO, 2020; TNO, 2019). Deze onderzoeken worden gedaan door TNO met partners uit Solliance, een belangrijke onderzoeksamenwerking waarbij expertise van universiteiten, onderzoeksinstituten en bedrijven worden samengebracht. Door het combineren van een beide technologieën is een tweezijdig werkende tandemzonnecel ontwikkeld met een equivalent rendement van 30,2% (TNO, 2019).

De Nederlandse zonne-energie sector verwacht dat in 2030 de opbrengst verhoogd zou kunnen zijn tot ten minste 25% (RVO, 2020).

Naast dat het reduceren van kosten, kan het verhogen van het energierendement van zonnepanelen ook op het gebied van duurzaamheid meerdere voordelen leveren.

Naast dat de zonnepaneel meer duurzame energie zal opwekken tijdens zijn gehele levensduur en daarmee CO₂-uitstoot middels fossiele elektriciteitsopwekking kan voorkomen, kan een hoger energierendement er ook voor zorgen dat er minder zonnecellen nodig zijn voor dezelfde hoeveelheid energieopwekking en daarmee bijdragen aan vermindering van het gebruik van (schaarse) materialen. Echter moet er ook rekening mee worden gehouden dat, zoals eerder genoemd in Hoofdstuk 2.1.3, nieuwe technologieën die leiden tot hogere efficiëntie ook vaak een hogere vraag naar kritische metalen kunnen bewerkstelligen. Het zou bijvoorbeeld ook impact kunnen hebben op de totale levensduur van de zonnecel of de recyclingsmogelijkheden.

Figuur 5 – Stijgende efficiëntie van verschillende type zonnecellen sinds 2000.
Bron: Wim Sinke, TNO en UvA



2.3. Einde levensduur

2.3.1. Inzameling

Kapotte of verouderdere zonnepanelen vallen in de EU en dus ook in Nederland onder de wetgeving voor elektronisch afval. Daarin is bepaald dat producenten en importeurs moeten zorgen voor een systeem dat kapotte producten aan het eind van hun levensduur recyclet. En dat van die panelen 85% gerecycled wordt gemeten naar gewicht. Producentenverantwoordelijkheid heet dat systeem. In 2016 werd in Nederland gemiddeld 45% van al het elektronische afval ingezameld voor recycling. De bedoeling was om dit te verhogen naar 65% in 2019 en daarna naar 85%. Voor zonnepanelen geldt dat de hoeveelheid kapotte zonnepanelen die nu retour komt circa 0,2% is ten opzichte van de nieuwe plaatsing. Dit percentage is zo laag omdat er nu vooral heel veel zonnepanelen nieuwe geplaatste worden en omdat er (gelukkig) nog maar weinig kapot gaan. In de toekomst richting 2035 gaat dit veranderen.

Wie organiseert recycling

In Nederland organiseert Stichting Zonne-energie recycling Nederland ([ZRN](#)) de inzameling en recycling van zonnepanelen. Zij werkt daarbij samen met [Stichting OPEN](#) die de producentenverantwoordelijkheid voor al het elektronische afval in Nederland organiseert. De inzameling en recycling wordt dus collectief georganiseerd door de bedrijven gezamenlijk. De overheid gaat bedrijven verplichten om hieraan mee te doen. In principe geldt deze [plicht](#) vanaf 1 januari 2021. Enige uitzondering zijn bedrijven die dit zelf goed organiseren maar in de praktijk zal dit niet snel gebeuren.

De uitvoering van de inzameling gebeurt grotendeels door [WeCycle](#). Het aantal inzamelpunten en de bekendheid daarvan is de laatste jaren toegenomen (in 2018 71% [bekendheid](#) inleverbakken ten opzichte van 14% in 2017). Of het lukt om daarmee ook 85% van het elektronisch afval te gaan recycleren is echter sterk de vraag. Inleveren van kapotte panelen voor recycling is voor de inleverende burger of bedrijven wel gratis maar het blijkt in de praktijk vaak te veel gedoe. Het zou ook heel goed kunnen dat zonder financiële beloning het resultaat vergelijkbaar wordt met het resultaat bij batterijen inzamelen waar na 23 jaar inzamelen er 47% wordt ingezameld zo meldt [Stibat](#).

Retourpremie

Voor koel- en vrieskasten heeft de rijksoverheid het voornemen een [retourpremie](#) van 35 euro in 2021 in te voeren. De verwachting is dat er dan veel meer oude koel- en vrieskasten gerecycled gaan worden. Als deze maatregelen goed blijkt te werken is een retourpremie op termijn ook een optie om zonnepanelen goed in te zamelen voor recycling. Deze trend richting retourpremies sluit ook aan bij het statiegeld dat binnenkort voor kleine pet flesjes en ook blikjes ingevoerd gaat worden. Hier wordt een [inzamelpercentage](#) van 80 a 90% van verwacht.

Recycling gericht op kg of op waarde?

Omdat het resultaat van producentenverantwoordelijkheid wordt beoordeeld op kg materialen en niet op basis van de waarde van de materialen bestaat het risico dat vooral de goedkopere materialen die veel in zonnepanelen zitten als glas en aluminium gerecycled worden en dat kleine hoeveelheden schaarse en dure materialen niet gerecycled worden. In de EU wordt er over gesproken om de waarde van de materialen die gerecycled worden ook mee te nemen bij producentenverantwoordelijkheid. Voorlopig is dit nog niet geregeld. In verschillende EU onderzoeksprojecten is er [onderzoek](#) uitgevoerd naar het beter recyclen van schaarse metalen uit elektronisch afval.

Wie betaalt de recycling?

Recycling van zonnepanelen kost op dit moment meer dan het oplevert in euro's omdat de milieubelasting van het winnen en maken van grondstoffen niet in de prijs wordt meegenomen. Je zou verwachten dat voor panelen die nu verkocht worden een beetje geld opzij wordt gezet om ze over 25 jaar te recyclen. Zo is producentenverantwoordelijkheid echter niet georganiseerd. De panelen die in jaar X verkocht worden moeten betalen voor de panelen die in datzelfde jaar X ingezameld en gerecycled worden. De kosten voor het recyclen van de zonnepanelen worden zo dus naar voor geschoven. Volgens [Staatsecretaris](#) van Veldhoven zal dat echter niet leiden tot een financieel probleem in de toekomst. Wel zal de bijdrage van recycling per paneel omhoog gaan in de toekomst. Op dit moment kost recycling circa €2,50 per paneel. In [België](#) moet wel per nieuwe paneel nu al vast betaald worden en daar is de bijdrage €2,- per paneel. De Nederlandse fabrikant Exasun onderzoekt de optie van een [statiegeldregeling voor circulaire zonnepanelen](#).

Design for recycling stimuleren met recycling bijdrage?

Zoals u eerder hebt kunnen lezen zijn sommige panelen beter ontworpen voor recycling dan anderen. Die zijn dan ook goedkoper te recyclen of leveren in de toekomst waarschijnlijk zelf geld op. Het is daarom interessant om in de toekomst de recycling bijdrage afhankelijk te maken van hoe makkelijk zij te recyclen zijn. Voor kunststof verpakkingen geldt zo'n verschil al. Voor [kunststof verpakkingen](#) die goed te recyclen zijn betaal je 41 cent per kg. Voor slecht te recycling kunststof 67 cent per kg. Voor zonnepanelen zou de bijdrage zo voor slecht te recyclen panelen 5 euro kunnen worden en voor goed te recyclen panelen 0.

2035

Op dit moment is het aantal zonnepanelen dat nieuw geplaatst wordt veel groter (factor 500 volgens (REBEL, 2020)) dan het aantal panelen dat kapot is en gerecycled moet worden. Gezien de levensduur van 20 à 40 jaar is pas vanaf 2035 een veel grotere stroom kapotte zonnepanelen te verwachten.

2.3.2 Hergebruik en tweedehands

Zonnepanelen gaan zeer lang mee, maar nieuwe panelen worden ook steeds efficiënter. De flinke toename in efficiëntie (zie ook paragraaf 2.2.1) en de lagere prijs per paneel leidt er toe dat particulieren en bedrijven die tussen 2005 en 2015 een beperkt aantal panelen lieten monteren de zonnepanelen nu regelmatig vervangen door een groter aantal meer efficiënte panelen. De oudere minder efficiënte panelen kunnen vaak echter nog makkelijk 15 jaar door functioneren. Vooral op plekken waar de ruimte geen probleem is (grote daken) met beperkte netinpassing (zie paragraaf 2.4.) zijn oudere panelen ideaal in te zetten. Op [Marktplaats.nl](https://marktplaats.nl) worden zij voor een relatief lage prijs aangeboden en door particulieren zelf herplaatst en ook sommige installateurs richten zich op deze markt.

Op dit moment lijkt de tweedehands markt voor zonnepanelen in Nederland nog klein en vooral geschikt voor technisch vaardige doe-het-zelvers. Het zou interessant kunnen zijn om in Zuid-Holland met name voor huishoudens met een beperkt budget te onderzoeken of tweedehands refurbished (opgeknapte) zonnepanelen een interessant product kunnen gaan worden.

Een andere optie is het exporteren van tweedehands panelen naar landen met meer zon waar ook oudere Nederlandse panelen meer energie opleveren. Oude zonnepanelen worden veelal door projectontwikkelaars doorverkocht aan het buitenland. Er is weinig bekend over wat er gebeurt met de zonnepanelen die doorverkocht worden naar het buitenland en hoelang deze daar gebruikt zullen worden. De tweedehands markt voor particulieren en projectontwikkelaars staat nu echter nog in de kinderschoenen. In het EU project [CIRCUSOL](#) wordt deze optie op dit moment ook onderzocht.

2.3.3. Recycling

Je kan pas spreken van een circulair zonnepaneel wanneer 1) onderdelen hergebruikt worden, 2) materiaal hergebruikt wordt om nieuwe zonnepanelen te maken of 3) materiaal minimaal hergebruikt wordt in andere toepassingen (Copper 8, 2017). Europees wordt er uitgebreid onderzoek naar al deze aspecten onderzoek gedaan bijvoorbeeld in het programma [CIRCUSOL](#) ('circular business models for the solar power industry').

Als je deze definitie volgt kun je bij de huidige zonnepanelen nog lang niet spreken van circulaire zonnepanelen omdat deze nog niet goed te recyclen zijn. Ook de omvormers zijn nog niet goed te recyclen omdat deze elektronica bevatten. Andere (niet elektronische) onderdelen die nodig zijn voor de zonnepanelen, zoals frames en kabels en zijn over het algemeen al een stuk beter recyclebaar. Het recyclen van de afgedankte panelen is echter juist het interessants omdat zonnepanelen allerlei hoogwaardige materialen, zoals de schaarse materialen en zilver bevatten (zie paragraaf 2.1.3.). Het frame van het zonnepaneel kan er goed afgehaald worden om vervolgens gerecycled te worden. De rest wordt verbrand of laagwaardig hergebruikt. Zo wordt het glas bijvoorbeeld laagwaardig gerecycled als verpakkingsmateriaal (Copper 8, 2017; [oneworld.nl](#), 2020).

Om de recyclebaarheid van zonnepanelen te bevorderen lijkt vooral modulair ontwerp een zeer relevant onderwerp te zijn. De recycling van de huidige zonnepanelen is namelijk maar zeer beperkt mogelijk omdat de meeste materialen nauwelijks van elkaar gescheiden kunnen worden. Volgens Metabolic, Copper8 & Universiteit Leiden (2018) zijn het verhogen van de zuiverheid van herwonnen materialen en het verlagen van het benodigde energieverbruik belangrijke aandachtspunten voor de komende jaren. Hoogwaardig hergebruik van de materialen uit zonnepalen kan op lange

termijn onze afhankelijkheid van nieuwe (schaarse) grondstoffen sterk verminderen (Metabolic, Copper8 & Universiteit Leiden, 2018).

Volgens hoofdonderzoeker zonne-energie Wim Sinke van TNO is recyclebaarheid van de zonnepanelen voor de meeste fabrikanten nog geen ontwerpcriterium waardoor Nederland en de rest van de wereld in de toekomst met een grote afvalstroom van slecht recyclebare zonnepanelen te maken dreigen te krijgen. Volgens Sinke wordt er op dit moment wel rekening gehouden met het terugnemen (zie ook Hoofdstuk) en hergebruik van materialen, maar is dat nog niet hetzelfde als recycling (BNR, 2019).

De recycle-industrie staat op dit moment nog in de kinderschoenen. In theorie zijn zonnepanelen grotendeels te recyclen maar in praktijk zijn de zonnepanelen die nu op de markt komen nog maar beperkt recyclebaar. Hierdoor is de recycle-industrie op dit moment nog niet rendabel en verwacht Wim Sinke dat bedrijven pas zelf gaan investeren in betere methodes om te recyclen als duurzaamheid een duidelijke waarde in de markt krijgt of via regelgeving wordt afgedwongen. Hij pleit er in lijn met Europese ontwikkelingen voor om bedrijven op die manier te stimuleren te investeren in hergebruik en om het productieproces beter af te stemmen op de recycling (BNR, 2019). Omdat de huidige prijzen van zonnepanelen nu erg laag zijn kunnen bedrijven het ook weer permitteren om weer aan de tekentafel te gaan zitten om zo de recyclebaarheid van de zonnepanelen te verbeteren. Een goed voorbeeld hiervan is een nieuw 'design for recycling' zonnepaneel dat een Nederlands consortium met TNO, DSM, Exasun en Mat-Tech heeft ontwikkeld (Topsector Energie, 2020).

2.4. Tekort aan netcapaciteit

Door een flinke toename van het aantal zonneparken staat het elektriciteitsnet op sommige plekken onder druk. Om grote congesties in het elektriciteitsnet te voorkomen mogen projectontwikkelaars alleen gebruik maken van de SDE+-subsidie voor zonnepanelen als de netbeheerder een positieve transportindicatie heeft gegeven. Netbeheerders Liander en Enexis hebben al honderden negatieve transportindicaties aan projectontwikkelaars afgegeven waardoor deze geen subsidie krijgen. Volgens gedupeerde marktpartijen is dit een groot gevaar voor de energietransitie en de doelstellingen van het Energieakkoord en het Klimaatakkoord ([solarmagazine.nl](https://www.solarmagazine.nl), 2020a).

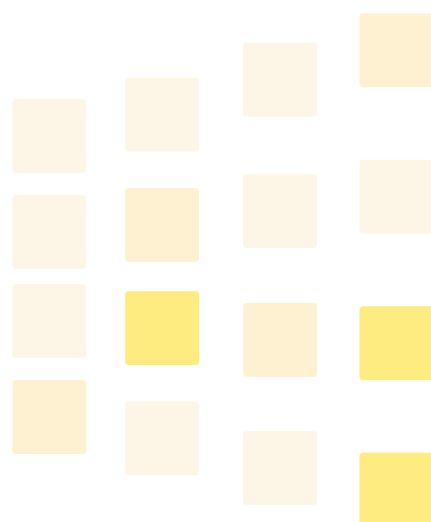
De netbeheerders Liander, Stedin en Enexis hebben kaarten ontwikkeld waarin duidelijk zichtbaar is in welke gebieden terugleverbeperkingen gelden. Op dit moment moeten projectontwikkelaars in bijna heel Nederland rekening houden met een mogelijke terugleverbeperking. Vooral in grote delen van de provincies Friesland, Flevoland, Groningen en Drenthe gelden er terugleverbeperkingen. Ook in het grootste deel van het noorden van Overijssel, het oosten van Gelderland en Utrecht en in de kop van Noord-Holland hebben netbeheerders laten weten dat er beperkt kan worden teruggeleverd (zonnestroomnederland.nl, 2020).

In de toekomst zouden deze terugleverbeperkingen nog groter kunnen worden. Om deze reden wordt er gekeken naar mogelijke, nu nog vrij innovatieve, flex-oplossingen (zoals batterijen). Daarnaast doen de projectontwikkelaars, die zonneparken aan willen leggen, soms ook concessies door een kleinere omvormer te plaatsen bij een zonnepark waardoor er op de dagen dat er veel zon is, een deel van de opbrengst afgekapd wordt en niet wordt terug geleverd aan het net.

Klimaatimpact netverzwaring versus zonnepanelen aanleggen

Bij netbeheerders en andere marktpartijen leefde eerder de vraag of het aanleggen van zonnepanelen wel leidt tot een reductie van de klimaatimpact als dit ertoe leidt dat het net verzwakt moet worden. Het verzwaken van het elektriciteitsnet zorgt namelijk ook voor een impact op het klimaat omdat er dikkere kabels aangelegd moeten worden en die meer materiaal bevatten dan de kleinere kabels. Uit onderzoek van CE Delft (2020) blijkt dat de CO₂-reductie van de opwek van duurzame energie m.b.v. de zonnepanelen veel groter is dan de CO₂-uitstoot van de netverzwaring, netverliezen en de productie van de panelen*.

* In deze studie is er gekeken naar meerdere scenario's waarbij 500 of meer zonnepanelen geplaatst werden op een boerderij. De netverzwaring betreft het vervangen van een laagspanningskabel met een middenspanningskabel van ongeveer vijf keer zo lang.





3.

Ontbrekende Kennis

3. Ontbrekende Kennis

Zoals u heeft kunnen lezen is het circulair maken van zonnepanelen een veld in ontwikkeling. Veel partijen zijn hier mee bezig. Steeds meer kennis wordt ontwikkeld maar op een aantal vlakken is aanvulling nog hard nodig. Omdat zonnepanelen toepassen in Nederland sinds ongeveer 10 jaar grootschalig gebeurt en panelen rond de 20 a 30 jaar meegaan is recycling van zonnepanelen nu nog een kleine business. Toch kunnen we aan zien komen dat dit in de toekomst belangrijk wordt. En ook is het zaak om zonnepanelen nu zo te maken dat ze goed her te gebruiken zijn. Wereldwijd wordt er onderzoek gedaan naar het meer circulair maken van zonnepanelen. Lokaal moet dat uiteindelijk ingevuld worden. De ontbrekende kennis hebben we daarom gesplitst naar lokaal en mondiaal. Mondiaal zijn kwesties die overal in de wereld aangepakt kunnen worden en die daarna wereldwijd gebruikt kunnen worden. Lokaal zijn kwesties die meer specifiek rekening moeten houden met de lokale gewoonten en regelgeving bijvoorbeeld in Zuid-Holland. Voor een provincie lijkt het logisch om ieder geval de lokale kennisvragen aan te pakken maar het is zeker ook te overwegen om samen met bedrijven een deel van de mondiale vragen aan te pakken. Voor die mondiale vragen is het goed ook af te stemmen met de rijksoverheid.

Omdat het hier gaat om een complex onderwerp sterk in ontwikkeling is dit een selectie uit de meest prangende kennisvragen die wij CE Delft zijn tegenkomen in onze verkenning.

3.1. Mondiale kennisvragen

- Hoe produceren we op dit moment zonnepanelen zodat ze zo goed mogelijk gerecycled kunnen worden?
- Hoe produceren we zonnepanelen met zo min mogelijk schaarse en giftige materialen erin?
- Hoe verlengen we de levensduur van panelen naar 35 a 40 jaar?
- Wat zijn goede 'desing for recycling' richtlijnen?
- Wat is de beste balans tussen levensduur, prijs en duurzaamheid?

- Hoe zorgen we ervoor dat projectontwikkelaars een businesscase waarbij de duurzaamheid van panelen gewaarborgd wordt (bijv. een businesscase die hergebruik of hoogwaardig recycling stimuleert)?
- Wat is de handigste manier om de mate van recyclebaarheid te meten en beoordelen? Beter is het om niet alleen op het gewicht van het gerecyclede materiaal letten maar ook op de waarde en of milieubelasting van de materialen daarin mee. Dit is alleen nog niet geregeld in de doelen voor recycling
- Hoe zorgen we ervoor dat onderdelen van zonnepanelen hergebruikt kunnen en zullen worden?
- Hoe zorgen we ervoor dat alle materialen uit panelen hoogwaardig gerecycled worden?

3.2. Lokale kennisvragen

- Via wat voor kanalen kunnen afgedankte zonnepanelen het beste ingezameld worden voor recycling? Hoe kan hier een goede business van gemaakt worden?
- Is een retourpremiesysteem, zoals dat binnenkort wordt ingevoerd voor oude koel- en vriesinstallaties, zinvol voor afgedankte zonnepanelen?
- Kan er een differentiatie komen in recyclingbijdrage voor goed te recyclen zonnepanelen (nultarief) en slecht te recyclen zonnepanelen (hoogtarief)?
- Hoe kan een lokale tweedehandsmarkt voor zonnepanelen die vrijkomen bij vervangingsprojecten het best worden gestimuleerd? Kan deze ook vooral gericht zijn op consumenten met een kleiner budget?
- Hoe kan met criteria voor Maatschappelijk verantwoord inkopen die overheden in Nederland en Zuid-Holland gebruiken circulariteit van zonnepanelen worden gestimuleerd? (Hierbij kan gebruik gemaakt worden van EU beleid dat in de maak is)

- Hoe kunnen wij het beste recyclebedrijven stimuleren om zelf te gaan investeren in betere methodes om te recyclen?
- Wat voor informatie hebben burgers en bedrijven nodig om te kiezen voor circulaire zonnepanelen? Is daarvoor een label nodig?
- Wat voor circulaire business modellen zijn er interessant voor zonnepanelen?. Denk daarbij aan leasen of huren, etc.
- Is het mogelijk om in Zuid-Holland bedrijven aan te trekken die circulair produceren en of zonnepanelen recyclen?

Zonnepanelen ook aandachtspunt in Rijksbrede programma circulaire economie

Landelijk is [de circulaire maakindustrie](#) ook een speerpunt. Vanaf 2021 wordt er in dit programma gewerkt aan circulaire zonnepanelen. Zo zullen er deelprojecten opgestart worden voor re-powering, refurbishment en hoogwaardige recycling.

Box 5 – Wim Sinke, hoogleraar zonne-energie, over circulaire zonnepanelen

Interview Wim Sinke, hoogleraar zonne-energie, over circulaire zonnepanelen

Hoogleraar zonne-energie Wim Sinke is dit jaar 40 jaar actief in het onderzoek naar zonnepanelen. Toen hij begon waren panelen nog heel duur en weinig efficiënt en vooral geschikt voor de ruimtevaart. Door heel veel innovatie zijn de panelen van nu veel efficiënter en goedkoper geworden. Toch blijven er nog belangrijke uitdagingen. Betere inpassing in bijvoorbeeld daken met onder andere gekleurde panelen en panelen in andere vormen is daar een voorbeeld van. Maar ook het maken van panelen met zo weinig mogelijk schaarse metalen, zonder giftige componenten en het hoogwaardig recyclen van panelen horen daar ook bij. Het mooiste zou zijn dat dat silicium uit de panelen na 30 jaar weer omgezet kan worden in nieuw silicium voor zonnecellen of elektronica. Op dit moment is dat nog niet mogelijk. Toch is al gelukt om veel minder zilver te gebruiken en ook zonder lood produceren gebeurt nu al veel.

In Europa is men onder vlag van Ecodesign aan het overleggen over criteria voor duurzaamheid. Wat Wim Sinke betreft gaat dat niet snel of ver genoeg. “Zoals het er nu uit ziet moeten fabrikanten vooral gaan aangeven wat ze aan materialen gebruiken en hoe je moet ontmantelen, maar dat is nog iets anders dan ontwerpen voor duurzaamheid. Dat kan veel steviger, al begrijp ik dat dat moeilijk is.” Maar Nederlandse overheden en projectontwikkelaars zouden best voorop kunnen lopen door in het kader van duurzaam inkopen en bij aanbesteding strengere eisen te stellen.

Bij de ontwikkeling van zonnepanelen wordt nu al gestreefd aan een langere levensduur van 35 a 40 jaar maar de vraag komt steeds meer op hoe je daarvoor een business case kunt vinden. Projecten worden vaak gepland voor 20 jaar. Ook zijn nieuwe panelen over 20 jaar weer energie-efficiënter, waardoor investeerders repowering kunnen overwegen (nieuwe panelen installeren en oude panelen verkopen voor gebruik elders). Hoe duurzaam dat is hangt natuurlijk mede van het tweede leven

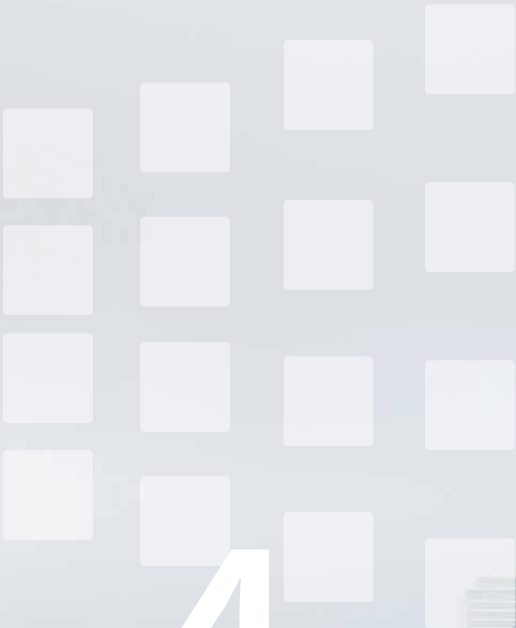
van die panelen af. De combinatie van economische en milieuaspecten onderzoeken we nu ook.

Een andere interessante innovatie is het gebruiken van perovskiet in combinatie met silicium in zogenaamde tandems. Dat maakt het mogelijk om panelen uiteindelijk een rendement van 30% of zelfs meer te geven terwijl dat nu vaak 20% is. Wel bevat de best werkende perovskiet een heel kleine hoeveelheid lood. Met andere elementen kun je ook perovskieten maken, maar die functioneren jammer genoeg nog lang niet zo goed. Meer onderzoek op dit gebied is heel nuttig.

Voor de schaarste of kostbare materialen geldt dat de gangbare siliciumpanelen alleen echt nog niet zonder zilver kunnen, terwijl sommige alternatieve paneeltypen ook andere materialen nodig hebben. Belangrijkste is dat er keus is. Mocht een bepaald materiaal schaars worden of te duur dan is er een alternatieve paneelsoort beschikbaar. Dit blijft een aandachtspunt maar oplossingen zijn voorhanden.

Onderzoek op het gebied van circulariteit van PV gebeurt nu veelal in Europese en Nederlandse projecten en onder de vlag van de IEA (taak 12). In sommige projecten is deelname van een Provincie als voorloperende stakeholder zinvol. Meer algemeen is het heel belangrijk om het juiste kader te zetten en het gevoel voor urgentie te verhogen. Een provincie kan ook goed faciliteren en stimuleren bij toepassingen in de praktijk. Op het gebied van zonne-energie-innovatie in bredere zin zijn mooie voorbeelden van een actieve rol van Provincies: het ondersteunen van de opzet van het PV-samenwerkingsverband Solliance met een investering van de Provincie Noord-Brabant, nu 10 jaar geleden en de bijdrage van de Provincie Noord-Holland aan de vernieuwing van PV-onderzoeksfaciliteiten in Petten.

Het zou het interessant zijn als Zuid-Holland een voorloper wordt in het stellen van duurzaamheidsregels aan zonneparken en andere zonnestroomsystemen, bijvoorbeeld op het gebied van inzameling en recycling en dat er experimenteerruimte komt om opties uit te proberen.



4.

Kansen

in Zuid-Holland



4. Kansen in Zuid-Holland

Een deel van de uitdagingen rond circulaire zonnepanelen wordt aangepakt in grote Europese onderzoeksprogramma's. De TU Delft, de Universiteit Leiden en TNO hebben hier een rol in naast veel meer onderzoeksgroepen wereldwijd. De provincie is hier natuurlijk blij mee maar heeft hier niet zo duidelijk een aanvullende rol in.

Landelijk stimuleert de rijksoverheid circulaire zonnepanelen via een belasting korting via de MIA/VAMIL regeling. Dit geldt, zoals te lezen is bij [RVO](#), voor circulaire PV-panelen met terugnamegarantie. (zie code C6410 in MIA/VAMIL)

We zien een aantal kansen en kwesties waar de provincie wel een rol zou kunnen vervullen.

1. *Een concreet plan om inzameling van afgedankte zonnepanelen voor recycling te verbeteren in samenwerking met de sector.*
2. *Een pilot met statiegeld voor zonnepanelen*
3. *Duurzaam en maatschappelijk verantwoord inkopen van zonnepanelen*
4. *Tweedehands zonnepanelen voor burgers met een kleinere beurs*

Dit kansenoverzicht is nu een momentopname. Binnen het Vernieuwersnetwerk Circulaire Zonnepanelen waarin overheden, kennisinstellingen en bedrijven dit onderwerp verder verkennen worden extra kansen verkend. Daarbij wordt er ook gekeken naar de haven, de maakindustrie en de rol van de provincie. En naar de kansen van het produceren van zonnepanelen in Zuid-Holland in samenwerking met de Zuid-Hollandse kennisinstellingen. Binnenkort komt hier dus een vervolg op.

Betere inzameling en recycling

De ervaring met inzameling van andere elektronische apparatuur voor recycling leert dat het lastig is om het gestelde doel van 85% inzameling en recycling te halen. Via gerichte pilots op verschillende locaties in Zuid-Holland zou op basis van de ervaring met elektronisch afval voorkomen kun-

nen worden dat als er grote stromen kapotte zonnepanelen gaan vrijkomen vanaf 2035 die dan maar de helft ingezameld wordt voor recycling. Zuid-Holland zou kunnen overwegen een voorbeeld provincie te worden voor heel Nederland op dit gebied. Statiegeld als optie zou 1 van deze pilots kunnen zijn.

Statiegeld op zonnepanelen?

Het blijkt bij andere elektronische apparaten heel lastig om een groot deel van de defecte apparatuur terug te krijgen voor hergebruik of recycling. Het instrument van statiegeld waarbij bij aankoop een beperkt bedrag wordt betaald en bij retour dit wordt teruggegeven blijkt bij verpakkingen, maar ook bij veel hulpmiddelen in de industrie zeer geschikt te zijn om een goed retourpercentage te bereiken. De provincie Zuid-Holland zou in haar regio een pilot met statiegeld op zonnepanelen kunnen houden, bijvoorbeeld samen met fabrikant Exasun, die ook al overweegt om [statiegeld](#) op circulaire zonnepanelen te gaan heffen. Na een proefperiode zou dit landelijk uitgerold kunnen worden.

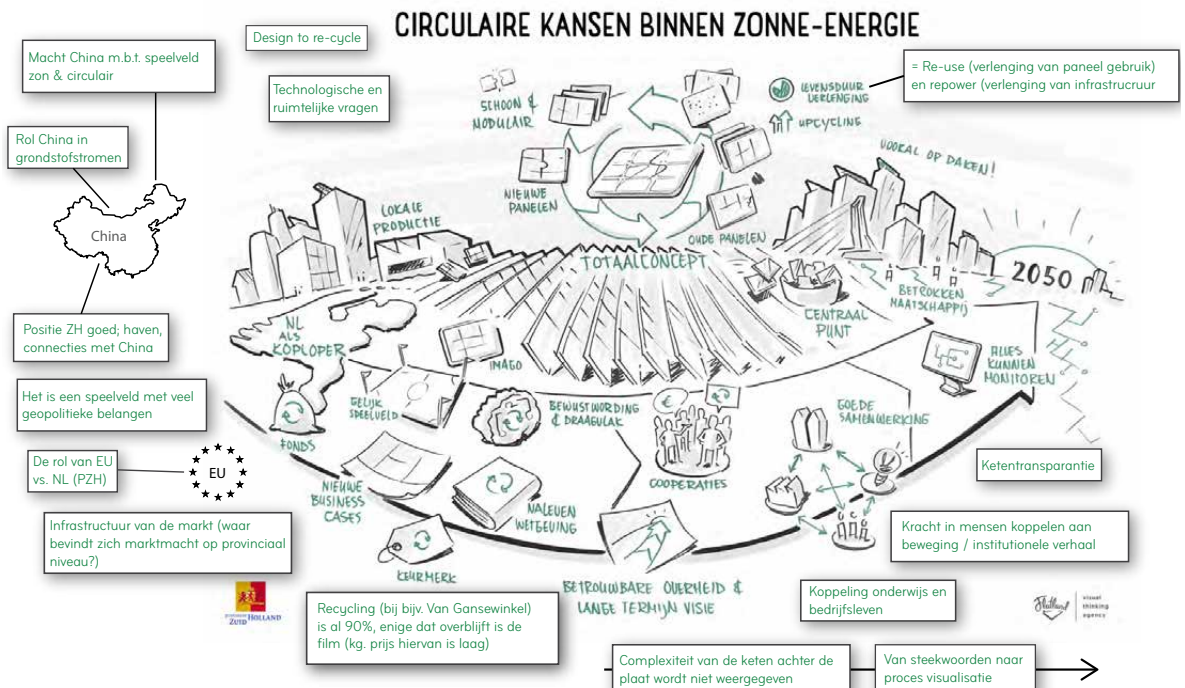
Maatschappelijk verantwoord inkopen

Nederlandse overheden hebben beloofd om bij al hun inkopen serieus te letten op de duurzaamheid van hun inkopen. [Maatschappelijk verantwoord inkopen](#) of duurzaam inkopen wordt dat genoemd. Om dit te faciliteren zijn er bij Pianoo veel criteria documenten en handreikingen beschikbaar. Voor de circulariteit van zonnepanelen is zo'n criteria document er niet. En als overheden als bijvoorbeeld de provincie Zuid-Holland energie aanbesteden dan vragen zij niet naar de circulariteit van zonnepanelen. Het is echter heel goed mogelijk dat de provincie Zuid-Holland voor haar inkoop van energie en dat van de gemeenten in Zuid-Holland zulke criteria opstelt of laat opstellen en deze toepast op de inkoop van energie. Dit voorbeeld kan vervolgens landelijk en Europees als voorbeeld worden verspreid. Hieraan gekoppeld zouden deze criteria ook meegenomen kunnen worden in het vergunningen en subsidiebeleid voor private partijen die zonnepanelen plaatsen.

Tweedehands zonnepanelen voor burgers met een kleine beurs?

Zonnepanelen worden vooral gekocht door bedrijven en burgers met voldoende investeringsmogelijkheden en een eigen dak (koophuis). Er zijn inmiddels ook allerlei initiatieven van verhuur en leasen en ook opties om in zonnepanelen te participeren op andermans daken. Daarbij gaat het echter vrijwel altijd om nieuwe panelen. Het zou interessant zijn om te verkennen of het mogelijk is om een goedkoper product aan te bieden als er gebruik gemaakt wordt van tweedehands panelen die vrijkomen op locaties die ontmanteld worden.

Figuur 6.





5.

**En als u nog meer
wilt weten?**

5. En als u nog meer wilt weten

De volgende bronnen hebben wij gebruikt voor deze kennisnotitie en zijn interessant als u zich verder in dit onderwerp wilt verdiepen. Daarbij moeten we benadrukken dat we zeker niet compleet zijn.

Meer informatie (Nederlands):

- Een analyse van de vraag naar [schaarse metalen voor de energietransitie](#). Daarbij gaat het zowel over windmolens als zonnepanelen. (Metabolic, Copper8 & Universiteit Leiden, 2018)
- Een analyse van bureau [Copper8](#) over circulaire zonnepanelen (Copper 8, 2017)
- Een [stappenplan](#) (roadmap) voor het meer een duurzamere zonnepanelen in Nederland. (Universiteit Utrecht, 2017)
- Informatie over circulaire zonnepanelen gemaakt in Nederland vindt u bij de [topsector energie](#), bij de [universiteit Leiden](#) en bij [TNO](#)
- Het Nederlandse vakblad over de zonnepanelen sector [Solarmagazine.nl](#)
- De [transitie agenda voor de circulaire maakindustrie](#) met plannen voor circulaire zonnepanelen.

Meer informatie (Engels):

- Een uitgebreid rapport van de Europese onderzoeksorganisatie [JRC](#) onderdeel van de Europese unie over circulaire zonnepanelen (JRC, 2020) met ook aandacht voor omvormers en hele systemen.
- [CIRCUSOL](#) ('circular business models for the solar power industry'); een innovatie-actieproject gesubsidieerd door het Horizon 2020-programma van de Europese Commissie."
- [IEA \(International Energy Agency\) task 12 PV sustainability activities](#) met veel rapporten over de duurzaamheids (LCA) en de afvalverwerking van zonnepanelen.
- [Een Artikel in Nature over de CO2 balans van zonnepanelen](#) maken en de besparingen die ze geven
- Een artikel in [Nature over onderzoekprioriteiten voor circulaire zonnepanelen](#).
- Het vakblad [PV magazine](#) voor de internationale zonnepanelen sector

Organisaties actief in Zonnepanelen in Zuid-Holland (niet compleet)

- TNO
- Exasun
- Solarge
- LCEnergy
- TU Delft
- CML (Universiteit Leiden)
- SEAC Solar Energy Applicatie Centre: TKI, RVO, TNO, Universiteiten, TU Delft
- [Circo Track Zonnepanelen](#) waarin diverse organisaties samenwerken.

Voor een compleet overzicht van organisaties actief in het zonnepanelen veld verwijzen wij u naar het [overzicht](#) dat agentschap van RVO bijhoudt

Meer informatie over de activiteiten van de provincie Zuid-Holland op het gebied van circulariteit vind u [hier](#).

Bibliografie

- BNR, 2019. *BNR Podcast (19-3-2019): Gerecycled materiaal van zonnepanelen opnieuw in panelen gebruiken is nog moeilijk.* [Online]
Available at: <https://www.bnr.nl/nieuws/duurzaamheid/10375747/zonnepanelen-zijn-slecht-recyclebaar>
[Geopend 14 12 2020].
- CE Delft, 2020. *Screening LCA klimaatimpact netverzwaring door plaatsing zonnepanelen op boerderij [confidentieel]*, Delft: CE Delft.
- Copper 8, 2017. *Circulaire zonnepanelen: de mogelijkheden en de uitdagingen.* [Online]
Available at: <https://www.copper8.com/circular-solar-panels-the-possibilities-and-challenges/>
[Geopend 6 1 2021].
- ECN, 2018. *Materiaal Schaarste en ECN. Eindrapport van het Ideation Challenge project Re-Supply*, Petten: ECN.
- JRC, 2020. *Preparatory study for solar photovoltaic modules, inverters and systems - Final report*, Luxembourg,: Publications Office of the European Union.
- Metabolic, Copper8 & Universiteit Leiden, 2018. *Metaalvraag van de Nederlandse energietransitie*, Amsterdam: Metabolic.
- Moss, R., 2011. *Critical metals in strategic energy technologies. Assessing rare metals as supply-chain bottlenecks in low-carbon energy technologies*, Luxemburg: JRC-Institute for Energy and Transport, Oakdene Hollins Ltd & The Hague Centre for Strategic Studies.
- NREL, 2021. *Best Research-Cell Efficiency Chart.* [Online]
Available at: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
[Geopend 14 1 2021].

- oneworld.nl, 2020. *Hoe duurzaam zijn zonnepanelen nu eigenlijk?*. [Online] Available at: <https://www.oneworld.nl/lezen/schone-energie/hoe-duurzaam-zijn-zonnepanelen-nu-eigenlijk/> [Geopend 6 1 2021].
- pv-magazine.com, 2020. *Materials in the circular economy*. [Online] Available at: <https://www.pv-magazine.com/2020/09/12/the-weekend-read-materials-in-the-circular-economy/> [Geopend 11 12 2020].
- Raugei, M., 2017. *Energy Return on Energy Invested (ERoEI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation: A comprehensive response*, sl: Energy Policy, Sciencedirect, Elsevier.
- REBEL, 2020. *Resultatenonderzoek Plan van Aanpak 65% AEEA*, Rotterdam: Rebel.
- RVO, 2020. *Next-generation solar power - Dutch technology for the solar energy revolution. Join publication of RVO, FME, TKI Urban Energy and Top Sector Energy.*, Utrecht: RVO.
- Sinke, W., 2021. *Interview met Wim Sinke, hoofdonderzoeker zonne-energie TNO*. [Interview] (7 1 2021).
- solarmagazine.nl, 2020a. *Netbeheerders Liander en Enexis geven honderden negatieve transportindicaties af*. [Online] Available at: <https://solarmagazine.nl/nieuws-zonne-energie/i19705/netbeheerders-liander-en-enexis-geven-honderden-negatieve-transportindicaties-af> [Geopend 14 1 2021].
- solarmagazine.nl, 2020. *Exasun onderzoekt nieuw businessmodel met statiegeld voor circulaire zonnepanelen*. [Online] Available at: <https://solarmagazine.nl/nieuws-zonne-energie/i23151/exasun-onderzoekt-nieuw-businessmodel-met-statiegeld-voor-circulaire-zonnepanelen> [Geopend 9 1 2021].

- TNO, 2019. *ECN part of TNO en partners doorbreken de opbrengstgrens van standaard zonnecellen*. [Online]
Available at: <https://www.tno.nl/nl/over-tno/nieuws/2019/2/ecn-part-of-tno-en-partners-doorbreken-de-opbrengstgrens-van-standaard-zonnecellen>
[Geopend 9 1 2021].
- TNO, 2020a. *Wereldwijd voorop lopen met innovatieve zonnepanelen*. [Online]
Available at: <https://www.tno.nl/nl/aandachtsgebieden/energietransitie/roadmaps/hernieuwbare-elektriciteit/overvloed-zonnestroom/innovatieve-zonnepanelen/>
[Geopend 9 1 2021].
- TNO, 2020. *Volledig recyclebare zonnemodules op komst*. [Online]
Available at: <https://www.tno.nl/nl/aandachtsgebieden/energietransitie/roadmaps/hernieuwbare-elektriciteit/overvloed-zonnestroom/innovatieve-zonnepanelen/recyclebare-zonnemodules/>
[Geopend 8 1 2021].
- Topsector Energie, 2020. *Circulaire zonnepanelen, gemaakt in Nederland*. [Online]
Available at: <https://www.topsectorenergie.nl/spotlight/circulaire-zonnepanelen-gemaakt-nederland>
[Geopend 9 1 2021].
- U.S. Department of Energy, 2011. *Critical Materials Strategy*, Washington DC : U.S. Department of Energy.
- Universiteit Utrecht, 2017. *ROADMAP - PV Systemen en Toepassingen*, Utrecht: Universiteit Utrecht.
- zonnestroomnederland.nl, 2020. *Terugleverbeperking: gebieden waar je je stroom niet kwijt kunt*. [Online]
Available at: <https://www.zonnestroomnederland.nl/kennisbank/terugleverbeperking-gebieden-waar-je-je-stroom-niet-kwijt-kunt/>
[Geopend 14 1 2021].

