

Auteur B.G. (Ben) Breekveldt MSc, adviseur Merosch

Circulaire strategieën voor de verwerking van zonnepanelenafval

We staan in Nederland momenteel midden in de energietransitie. Deze transitie is nodig om ons CO₂-reductiedoel in 2050 te behalen, want de meeste CO₂-uitstoot komt voort uit energiegebruik. De energietransitie houdt in dat we moeten overstappen van het gebruik van fossiele brandstoffen zoals steenkool, aardgas en aardolie naar hernieuwbare energiebronnen zoals wind- en zonne-energie. Om dit te kunnen realiseren zijn grondstoffen nodig voor de productie van materialen in windmolens en zonnepanelen. Zo is het aantal geïnstalleerde zonnepanelen in Nederland de afgelopen jaren enorm gestegen. Een goede ontwikkeling op het eerste oog. Maar, hoe gaan we straks om met de zonnepanelen als ze aan het einde van de levensduur zijn en van het dak af moeten? Zomaar afdanken mag en kan niet meer, want in 2050 willen we ook dat de Nederlandse economie volledig circulair is waarin afval eigenlijk niet meer bestaat.

De noodzaak voor een circulaire economie komt voort uit het feit dat de bronnen waaruit we grondstoffen delven niet onuitputtelijk zijn. Dit betekent dat we de materialen waar een zonnepaneel uit bestaat moeten gaan hergebruiken om te voorkomen dat er in 2050 een gigantische zonnepanelenafvalberg ontstaat. Wanneer we naar de definities van de circulaire economie van Geissdoerfer et al. (2017) en Ellen MacArthur Foundation (2021) kijken, kunnen we stellen dat een circulaire economie het volgende inhoudt:

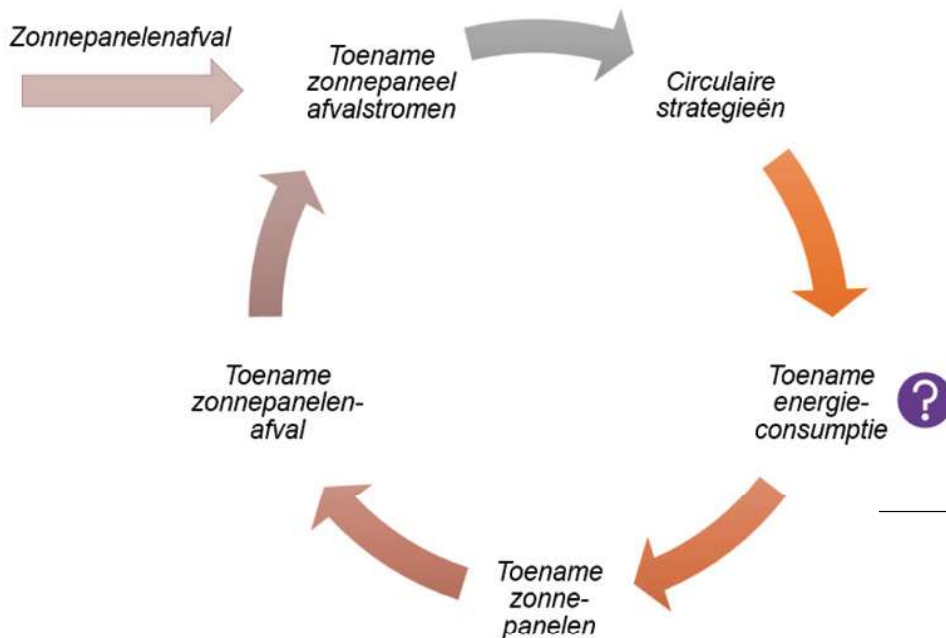
- Een circulaire economie is regeneratief en herstellend van aard voor mens en milieu.
- Materialen en grondstoffen blijven in gebruik binnen de economie en worden geen afval.

- De kwaliteit van materialen degradeert niet of zo min mogelijk tijdens het gebruik.
- Afvalstromen, emissies en energieverliezen worden geminimaliseerd en bestaan idealiter helemaal niet.
- Economische activiteit draagt bij aan het bestrijden van klimaatverandering, een schoner milieu en het herstellen van de biodiversiteit.

Een circulaire economie moet in de kern goed zijn voor het klimaat. Dit betekent dus ook het behalen van het CO₂-reductiedoel waar de energietransitie aan bijdraagt. Zo kan je stellen dat er een circulaire energietransitie moet plaatsvinden. Enerzijds omdat voor de benodigde zonnepanelen in de energietransitie grondstoffen nodig zijn, anderzijds omdat een circulaire economie hernieuwbare (zonne-)energie nodig heeft. Het goede nieuws is dat er diverse circulaire strategieën bestaan om zonnepanelen die aan het einde van hun levensduur raken te kunnen verwerken, waardoor afval wordt voorkomen. Daartegenover staat dat deze strategieën zelf energie gebruiken. Zo ontstaat een versterkende feedbackloop (figuur 1). Maar hoeveel energie dan precies?

De zonnepanelenafvalberg

De grootte van de zonnepanelenafvalberg hangt af van meerdere factoren. Denk bijvoorbeeld aan hoelang een zonnepaneel op het dak blijft liggen, welke type zonnepaneel wordt toegepast of de materiaalintensiteit van een zonnepaneel. Met dat laatste wordt bedoeld hoeveel gewicht en/of volume aan materiaal er nodig is om een bepaalde



Figuur 1: Probleemdefinitie energieconsumptie circulaire zonnepaneelverwerkingsstrategieën.

hoeveelheid zonnestroom op te wekken. Door technologische ontwikkelingen wordt de materiaalintensiteit steeds lager (dus meer opwek met minder materiaal). Ook zorgt technologische ontwikkeling voor een hoger opwekkingsrendement. Doordat er steeds meer zonnepanelen aan het einde van de levensduur raken wordt de zonnepanelenafvalberg steeds groter. Door de afnemende materiaalintensiteit en de vergroting van het opwekkingsrendement wordt die groei enigszins afgeremd.

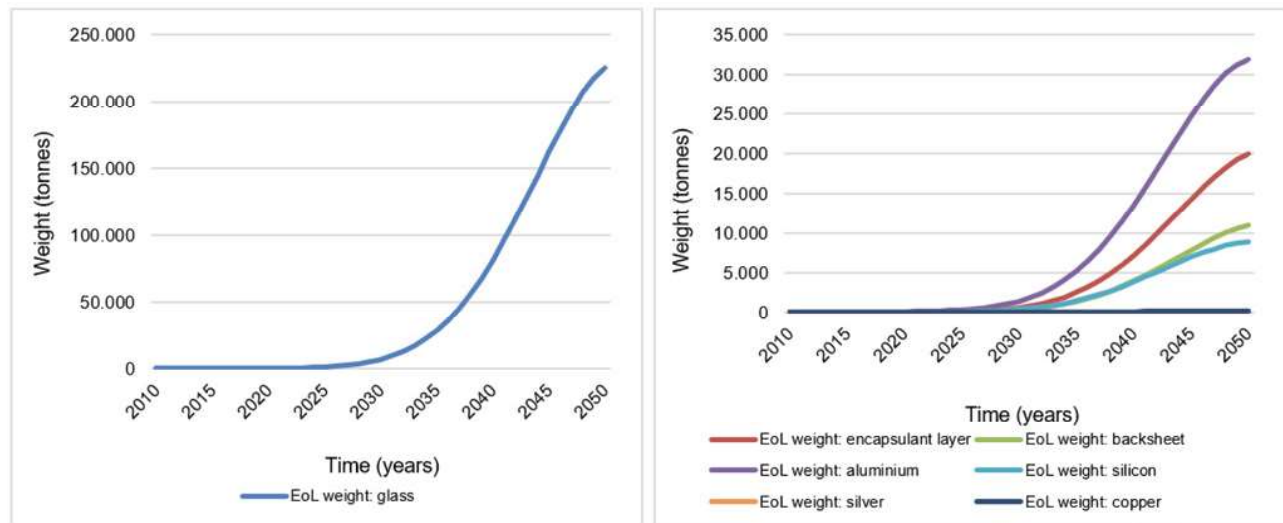
Hoe groot is en wordt die zonnepanelenafvalberg dan precies? Om dit te bepalen is in eerste instantie gekeken naar Nederlandse zonnepaneelmarktdata. Daarna is met behulp van de door Netbeheer Nederland (2023) opgestelde scenario's de ontwikkeling van de zonnepanelenmarkt in de toekomst voorspeld. Als onderdeel van mijn verrichte masterscriptie heb ik een uitgebreid wiskundig model ontwikkeld om het toekomstige aantal zonnepanelen in Nederland in te schatten. Zo is er gekeken hoeveel

zonnepanelen er per jaar geïnstalleerd gaan worden en hoeveel ieder jaar van de daken afkomen. Uit het rekenmodel blijkt dat tussen 1992 en 2050 naar schatting meer dan 130 miljoen zonnepanelen van de daken worden gehaald. Het gaat hierbij om circa 2.750.000 ton aan materialen. Wanneer je al deze zonnepanelen in lengte achter elkaar legt kan je bijna 6,5 keer de aarde rond.

En uit welke materialen bestaat deze afvalberg? Qua gewicht is glas met ongeveer driekwart van de totale berg de zwaarste afvalstroom, gevolgd door aluminium, de omhullende plastic (EVA) laag, het plastic achterblad en silicium (figuur 2).

Circulaire zonnepanelenafval verwerkingsstrategieën

Voordat we in de diverse circulaire zonnepaneelstrategieën duiken, kijken we eerst breder naar welke strategieën in een circulaire economie mogelijk zijn. Hierbij geldt de "R-hierarchy" van Potting et al. (2017) als uitgangspunt, zie figuur 3. Volgens deze hiërarchie zijn circulaire strategieën onderverdeeld in 10 categorieën, beginnend bij R0 en eindigend bij R9. Hierin is categorie



Figuur 2: Zonnepaneelafval materiaalstromen.

R0 het meest circulair en R9 het minst. De meest circulaire strategieën, R0 – R2, gaan over de ontwerpfase van een product. Vanaf categorie R3 tot en met R7 gaat het over hoe de levensduur van een product of de daarin verwerkte materialen verlengd kan worden. Aan het einde van de levensduur van een product belanden we bij strategieën R8 en R9. In het kader van de zonnepanelenafvalberg is er gekeken naar strategieën vanaf R3 tot en met R9.

In Nederland bestaan er bedrijven die kijken hoe zonnepanelen hergebruikt (R3 & R7) kunnen worden. Daarnaast worden ook mogelijkheden tot het repareren (R4), opknappen (R5) en herfabriceren (R6) van zonnepaneel (onderdelen) onderzocht. Ook zijn er gespecialiseerde zonnepaneel-

recyclebedrijven (R8). Als minst circulaire optie is er de mogelijkheid om zonnepaneelafval te verbranden en daarmee energie op te wekken (R9). Bij het verbranden van zonnepanelenafval komen veel schadelijke en vervuilende stoffen vrij en gaan waardevolle grondstoffen verloren die op zullen raken. Het is vanuit milieu- en economisch oogpunt dus absoluut niet wenselijk om zomaar zonnepanelenafval te gaan verbranden.

Momenteel wordt wetenschappelijk onderzoek gedaan naar hoe barsten in de glazen afdeklaag van zonnepanelen gerepareerd (R4) kunnen worden met UV-lampen. Ook bestaat er een Japans bedrijf dat middels "hot knife technology" de vastgelijmde lagen van zonnepanelen door kan snijden waardoor

Tabel 1: Overzicht energieverbruik voor het verwerken van een ton zonnepanelenafval.

Circulaire strategie	Energieverbruik [kWh/ton PV-panelen]
R3 – Reuse	9
R4 – Repair	40
R5 – Refurbish	179
R6 – Remanufacture	724
R7 – Repurpose	49
R8 – Recycle	622
R9 – Recover	-193
Transport	78

je de afzonderlijke lagen kunt monteren (R6) in nieuwe zonnepanelen mits er niks kapot gaat. Dit kan bijvoorbeeld in één van de twee Nederlandse zonnepaneelproductielijnen waarin zonnepanelen refurbished (R5) kunnen worden.

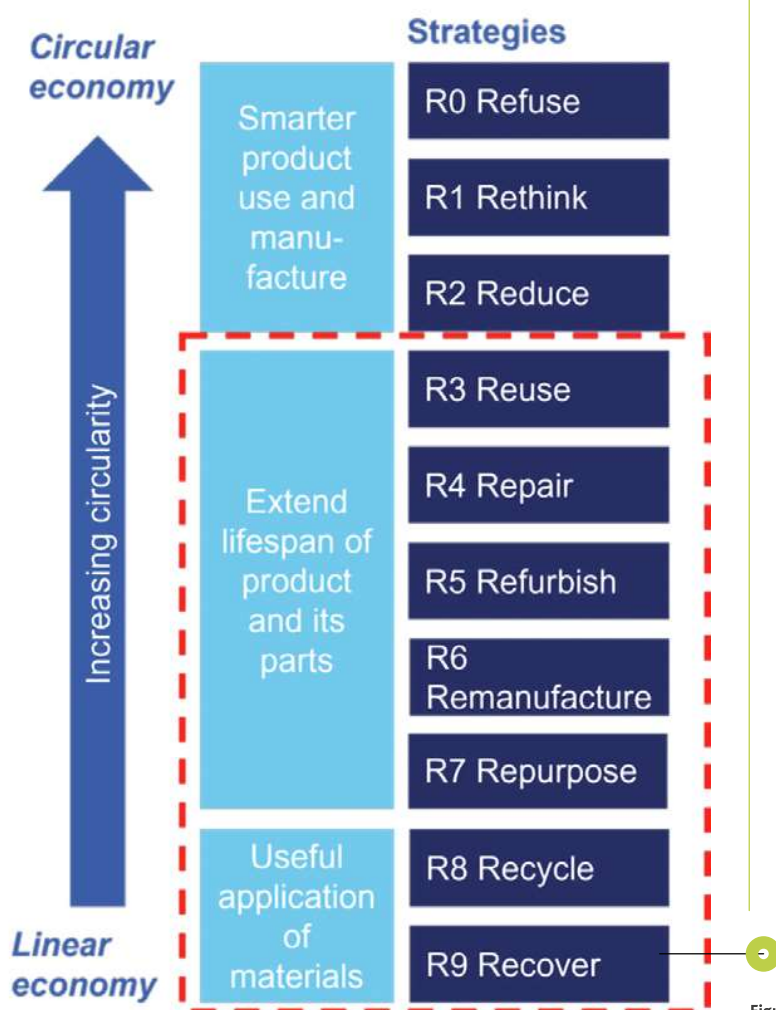
Al deze processen gebruiken zelf energie. Zo is er, door middel van een procesenergie-analyse, geraamd hoeveel energie er nodig is om een ton zonnepanelenafval per strategie te verwerken. Deze analyse raamt de energieconsumptie van een proces aan de hand van de doorvoertijd, het gebruik van apparatuur, en de vermogens en efficiëntie van de opgestelde apparatuur. Zie de tabel voor het overzicht van hoeveel energie er ongeveer nodig is voor het verwerken van een ton zonnepanelenafval.

Zo is er voor een ton zonnepanelenafval bij R3 bijvoorbeeld slechts 9 kWh nodig, maar voor een recyclemethode loopt de energieconsumptie op tot boven de 600 kWh

per ton zonnepaneelafval. Wanneer zonnepanelenafval verbrand wordt, wordt er 193 kWh aan energie teruggewonnen per ton zonnepanelenafval. Daarnaast verbruikt het transporteren van zonnepanelen relatief veel energie. Voor strategieën R3, R4 en R7 verbruikt het transport zelfs meer energie dan het proces om het zonnepanelen circulair te verwerken.

Hoeveel energie kosten de circulaire zonnepaneelstrategieën samen?

Het beantwoorden van deze vraag vergt twee stappen. Ten eerste is er gekeken naar de factoren die bepalen hoe groot de zonnepanelenafvalstromen in 2050 zullen zijn. Ten tweede moeten de verwachte



Figuur 3: R-hierarchy.

zonnepaneelafvalstromen in 2050 verdeeld worden over strategieën R3 t/m R9.

Hierboven is de grootte van de zonnepanelenafvalberg en impact van de technologische ontwikkelingen op de groei van de afvalberg behandeld. De snelheid waarmee de technologie zich ontwikkelt bepaalt voor een deel de uiteindelijke grootte van de zonnepanelenafvalstromen.

Daarnaast maakt het ook uit hoelang een zonnepaneel wordt gebruikt. Vanwege economische overwegingen worden zonnepanelen veelal korter gebruikt dan technisch mogelijk is. Hoe eerder een zonnepaneel van het dak wordt afgehaald, hoe eerder deze op de afvalberg terecht komt. Ook is het soort zonnepaneel van invloed op de zonnepaneelafvalstromen. Zo bestaan zonnepanelen van hetzelfde type, geproduceerd door verschillende fabrikanten, uit een net andere verhouding aan grondstoffen en materialen.

Scenario analyse

Omdat we geen glazen bol hebben en precies weten hoe de technologische ontwikkelingen, economische levensduur en het soort zonnepaneel zullen zijn in de toekomst is gekeken naar verschillende mogelijke ontwikkelingen van de zonnepanelenafvalberg. Hiervoor zijn variabelen van invloed op de grootte van de afvalberg in verschillende varianten gekoppeld in vijf verschillende 'adoption pathways'. Deze 'pathways' zijn in feite diverse ontwikkelmogelijkheden van de toekomstige zonnepanelenmarkt en daarmee de zonnepanelenafvalberg.

Vervolgens is er bepaald hoeveel zonnepanelenafval er belandt bij de circulaire strategieën (R3 – R9). Deze verdeling van afval hangt af van de mate van circulair gedrag/beleid in de Nederlandse economie. De mate van circulair gedrag en beleid wordt ingedeeld

in lijn met de gradaties van meest tot minst circulair volgens de R-hierarchy. Zo zijn er drie 'circular storylines' opgesteld:

1. Hoge mate van circulariteit: in deze verhaallijn worden de meeste afvalstromen verwerkt door de meest circulaire strategieën. Geen afvalstroom wordt verbrand (R9).
2. Focus op energie-efficiëntie: bij het alloceren van de afvalstromen naar specifieke circulaire strategieën wordt gekeken naar welke strategieën en activiteiten binnen de strategie het meest energie-efficiënt zijn. Daarnaast wordt een deel van het afval verbrand zodat hiermee energie gegenereerd wordt.
3. Lage mate van circulariteit: behalve een beperkte hoeveelheid hergebruik en reparaties wordt 90% van het zonnepanelenafval (exclusief metalen) verbrand voor de opwek van energie.

Aan de hand van het combineren van de vijf 'adoption pathways' met de drie 'circular storylines' zijn tien verschillende scenario's voor de totale energieconsumptie van circulaire zonnepaneelstrategieën doorgerekend. Voor elk van deze scenario's is de totale energieconsumptie ingeschat op basis van de geraamde energieconsumptie per ton te verwerken zonnepanelenafval per circulaire strategie.

Resultaten scenario analyse

Het scenario dat de meeste energie consumeert in 2050 komt voort uit het 'adoption pathway', met een levensduur van 27,5 jaar (langer dan bij minder circulaire storylines) en standaard technologische ontwikkeling onderdeel van de hoge mate van circulariteit 'circular storyline'. De daaropvolgende scenario's met de meeste energieconsumptie zijn tevens onderdeel van de verhaallijn met een hoge mate van circulariteit. Binnen deze drie scenario's varieert de energieconsumptie voor het verwerken van al het zonnepanelenafval door

de mix aan circulaire strategieën in 2050 tussen de 224 MWh en 270 MWh. Voor de scenario's onderdeel van de verhaallijn focus op energie-efficiëntie geldt een substantieel lagere energieconsumptie van tussen de 84 MWh en 90 MWh. In het scenario waar het gros van het afval wordt verbrand zien we dat er tussen de 15 en 21 MWh aan energie gegenereerd wordt. Met andere woorden: het circulair verwerken van zonnepaneelafval zonder verbranding kost minimaal 224 en maximaal 270 MWh waarbij de kans wordt misgelopen om ongeveer 20 MWh aan energie op te wekken, totaal dus minimaal 240 en maximaal 290 MWh. Dit komt neer op minimaal 0,04% en maximaal 0,05% van de totale Nederlandse energieconsumptie in 2050.

Kannibaliserend effect

Het lijkt niet zoveel energie te zijn, maximaal 0,05% van de totale Nederlandse energieconsumptie. Ook als we kijken naar het percentage van de totale opgewekte zonnestroom in 2050 lijkt het mee te vallen. Minimaal wordt 0,17% en maximaal 0,21% van de totaal opgewekte zonnestroom gebruikt voor circulaire zonnepaneelstrategieën. Wanneer dit wordt vertaald naar hoeveelheid zonnepanelen en materialen dat hiervoor nodig is wordt de impact duidelijker. Maximaal zijn er bijna 620.000 zonnepanelen nodig die bij elkaar 17.000 ton wegen om te voorzien in de energievraag van circulaire zonnepaneelstrategieën in 2050. Met andere woorden, deze hoeveelheid zonnepanelen zijn alleen al nodig voor het verwerken van zonnepaneelafval met volledig hernieuwbare energie. Hiermee kannibaliseren zonnepanelen dus een

deel van de zonne-energie en schaarse materialen om circulaire zonne-energie te kunnen opwekken. Kortom, ondanks dat er relatief gezien weinig energie nodig is voor circulaire zonnepanelenstrategieën worden er een flink aantal zonnepanelen opgeofferd om deze strategieën te voorzien van hernieuwbare zonne-energie.

Het is dan ook van groot belang om aandacht te besteden aan circulaire strategieën die voorkomen dat zonnepanelenafval ontstaat (R0 – R2). Dit is de manier om de feedbackloop uit figuur 1 te doorbreken. Zo wordt reparatie en hergebruik van zonnepanelen gemakkelijker, wat beter is dan om zonnepanelen te recyclen. Dit heeft als bijkomend voordeel dat het energieverbruik van de energie-intensievere circulaire strategieën (R6 – R9) omlaag gaat, omdat daar minder zonnepanelenafval belandt.

Over de auteur:

Ben Breekveldt heeft dit afstudeeronderzoek uitgevoerd voor de Master Environmental Sciences aan de Open Universiteit. Wil je hier meer over weten? Stuur dan een e-mail naar b.breekveldt@merosch.nl of een berichtje via [LinkedIn](#). In een onderzoek gestart in juli 2024 onderzoekt Breekveldt met collega's wat de milieulast en CO₂-uitstoot van zonnepanelen zijn over een gehele gebouwlevensduur. De resultaten worden binnenkort gepubliceerd.

Referenties

1. Breekveldt, B.G. (2024). The Dutch circular energy transition's energetic impact – exploring the future aggregated energy consumption of end-of-life PV module circularity strategies by 2030 and 2050. Thesis MSc Environmental Sciences, Open Universiteit, Heerlen, NL.
2. Ellen MacArthur Foundation. (2021). Completing the Picture: How the Circular Economy Tackles Climate Change. https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/Completing_The_Picture_How_The_Circular_Economy_Tackles_Climate_Change_V3_26_September.pdf
3. Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of cleaner production*, 143, 757-768. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
4. Netbeheer Nederland. (2023). Het energiesysteem van de toekomst: de I13050-scenario's. <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2023/04/06/het-energiesysteem-van-de-toekomst-de-ii3050-scenarios>
5. Potting, J., Hekkert, M., Worrell, E., & Hanemaaijer, A. (2017). Circular economy: Measuring innovation in the product chain. <https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2016-circular-economy-measuring-innovation-in-product-chains-2544.pdf>