



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu

Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport

Veilige en duurzame zonnepanelen: tijdens ontwerp aandacht nodig voor milieu-impact



Publiekssamenvatting

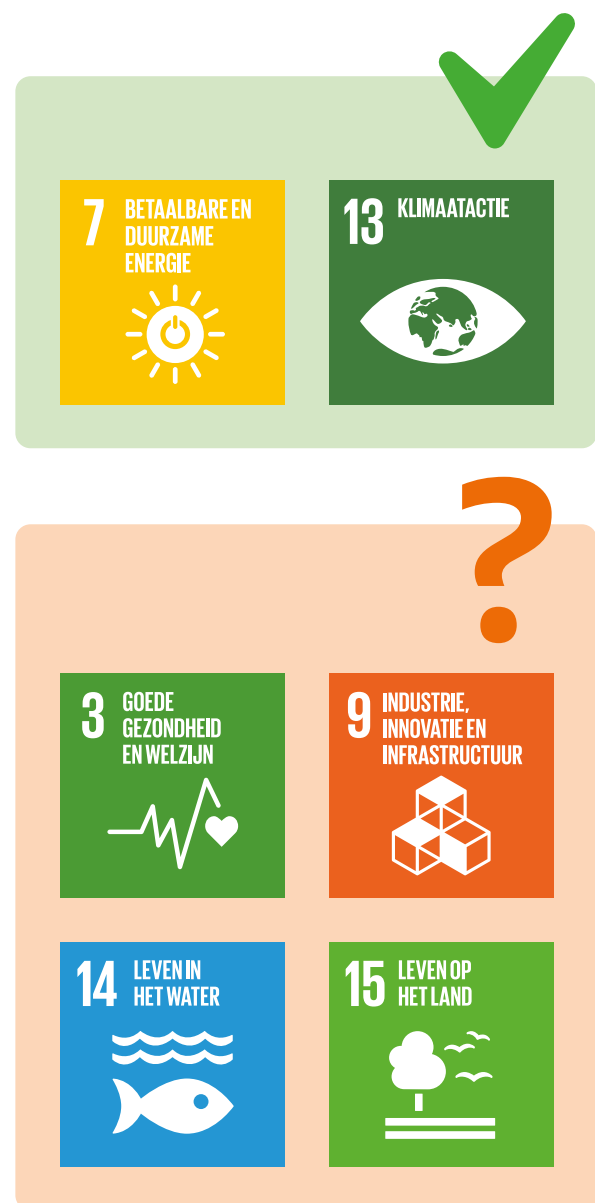
Zonnepanelen zijn een belangrijke oplossing om de opwarming van de aarde tegen te gaan. Dat komt omdat er minder CO₂ bij vrijkomt om ze te maken dan bij het gebruik van fossiele brandstoffen als aardolie en gas. Zonnepanelen moeten alleen geen nieuwe problemen veroorzaken, zoals schadelijke effecten van chemische stoffen die erin zitten en brandgevaar. Aangezien er steeds meer zonnepanelen gebruikt gaan worden, is in de hele 'keten' aandacht nodig voor mogelijke ongewenste bijeffecten. Dus van het ontwerp, de productie tot en met de afvalverwerking.

Deze mogelijke bijeffecten moeten worden meegewogen bij keuzes voor het ontwerp van zonnepanelen. Dat is ook nodig bij de keuze tussen verschillende duurzame energiebronnen, zoals windmolens. Het is dus belangrijk dat ontwerpers, inkopers en beleidsmakers zicht hebben op mogelijke bijeffecten om goede keuzes te kunnen maken bij het gebruik van duurzame energiebronnen. Zij hebben hier nu geen zicht op.

Het RIVM heeft daarom een tool ontwikkeld om de milieueffecten te volgen van het gebruik van chemische stoffen voor zonnepanelen in de hele keten, zoals lood. Hieruit blijkt dat hergebruik en recycling essentieel zijn voor een circulaire economie. Er komen veel minder metalen uit zonnepanelen in het milieu terecht als ze worden gerecycled dan wanneer de panelen als afval worden gestort. Uit dit afval kan bijvoorbeeld lood weglekken in het milieu.

Ook is het belangrijk zonnepanelen zo lang mogelijk te gebruiken en niet eerder te vervangen. Dat lijkt nu vaak wel te gebeuren bijvoorbeeld als de zogeheten omvormer kapot is. De reden is dan omdat nieuwe zonnepanelen meestal meer elektriciteit opleveren. Maar als de oude panelen niet worden hergebruikt, is de CO₂-uitstoot groter en milieuwinst kleiner.

Het RIVM heeft voor deze verkenning een paar stoffen, twee paneeltypen en enkele scenario's voor de circulaire economie geanalyseerd. Toch bieden deze methoden nu al inzicht in mogelijkheden om de milieueffecten te verkleinen en de milieuwinst te vergroten.



Figuur 1 Zonnepanelen dragen bij aan opwekken van betaalbare en schone energie en het verkleinen van klimaatverandering. Maar hoe dragen zonnepanelen bij aan andere duurzame ontwikkelingsdoelen?

Zorgen en kansen: zonnepanelen zijn duurzaam, toch?

Zonnepanelen leveren energie en stoten daarbij veel minder CO₂ uit dan fossiele energiebronnen zoals gas of kolen.¹ Door CO₂ warmt de aarde op. Zonnepanelen zijn daarom een belangrijk onderdeel van de oplossing voor het klimaatprobleem. Met andere energietechnologieën dragen ze bij aan de overgang naar een klimaatneutraal energiesysteem. Maar we moeten het klimaatprobleem zo oplossen dat er niet andere problemen ontstaan. Zo kan de opwekking van duurzame energie niet echt duurzaam zijn als deze ook ongewenste effecten heeft op mens en milieu (figuur 1). Zoals de uitstoot van zorgwekkende stoffen, geluidsoverlast, brandgevaar en uitputting van schaarse grondstoffen. Verder kan de productie van de panelen negatieve sociale effecten hebben, zoals dwangarbeid in landen waar ze worden gemaakt. Het is daarom belangrijk om bij het gebruik van nieuwe energiesystemen ongewenste bijeffecten in de hele keten van zonnepanelen (de PV-keten) te onderzoeken. Deze effecten moeten meegewogen worden bij de keuzes voor het ontwerp van veilige en duurzame zonnepanelen. Maar ook bij de keuze welke energietechnologie het beste kan worden ingezet naast zonnepanelen, zoals windmolens of biomassa. Een duurzaam energiesysteem vergt dus meer dan alleen een klimaatneutraal energiesysteem.

Naar verwachting groeit het gebruik van zonnepanelen de komende jaren enorm: in 2050 zal tot wel 100 keer meer zonne-energie worden opgewekt dan nu.² Ook worden er veel nieuwe technologieën en type zonnepanelen ontwikkeld. Deze nieuwe panelen wekken meer energie op dan degene die nu beschikbaar zijn. Maar de nieuwe panelen kunnen ook nieuwe of andere chemische stoffen gebruiken, waardoor misschien nieuwe risico's voor mens en milieu

ontstaan als deze stoffen in de omgeving terecht komen. Verder kan het aantrekkelijk zijn om zonnepanelen vroegtijdig te vervangen omdat de nieuwere efficiënter energie opwekken. Dit kan ongunstig zijn voor de CO₂-uitstoot en duurzaamheid van het geheel.

Aangezien het veel tijd, geld en energie kost om nieuwe technologieën te ontwikkelen, is het belangrijk om in een zo vroeg mogelijk stadium daarvan in te schatten hoe veilig en duurzaam ze zijn. Daarom hebben het RIVM en het Centrum voor Milieuwetenschappen van de Universiteit Leiden (CML) twee methoden ontwikkeld om in de ontwerpfase van zonnepaneel(systemen) een eerste inschatting te maken van (i) mogelijke nieuwe risico's voor mens of milieu door het gebruik van stoffen in zonnepanelen en (ii) de milieu-impact van een vroegtijdige vervanging van oude zonnepanelen.

Van alle mogelijke bijeffecten beperken we ons in dit onderzoek dus tot de veiligheid van chemische stoffen en de effecten van de levensduur op de CO₂-voetafdruk.

De twee methoden zijn:

- Een gedetailleerd rekenmodel om de uitstoot van stoffen vanuit nieuwe zonnepanelen en effecten daarvan op het milieu in te schatten. Dit model hebben we getest op zes stoffen en twee typen panelen die nog niet op de markt zijn.
- Een rekentool om een grove inschatting te maken of de vervanging van oude panelen door efficiëntere nieuwe systemen ook minder CO₂-uitstoot oplevert.

Deze factsheet beschrijft de voorbeelden die het RIVM met deze methoden heeft uitgewerkt. Het is de bedoeling dat de methoden verder worden ontwikkeld en zo veiligheid en duurzaamheid in nieuwe fotovoltaïsche (PV)-technologieën en toepassingen worden meegewogen. We hebben de methoden voorgelegd aan een groep stakeholders uit de hele keten met behulp van een focusgroep, vragenlijsten en interviews.

¹ Zie bijv. rapport TNO (2021). [Tijd voor Duurzame zonne-energie. Zonnestroom: van hernieuwbaar naar duurzaam](#)

² Ram et al. (2019) [Global Energy System based on 100% Renewable Energy](#)

Ontwerp

Cell type



Paneel type



Systeem type



Figuur 2 Verschillen in scope van ontwerp voor PV-energiesystemen, variërend van het ontwerp van een PV-celtype, paneeltype en systeemtype.

Ontwerp kan verschillende betekenissen hebben in de PV-keten, denk aan verschillende perspectieven hierop van de panelenfabrikant, de projectontwikkelaar of afvalverwerker. Zo kan een fabrikant keuzes maken welk materiaal ze gebruiken, en een projectontwikkelaar juist keuzes maken welk paneel ze inkopen of wanneer ze een paneel vervangen. De ontwikkelde tools hebben daarom ook een andere betekenis of doeleinde, afhankelijk van het scenario

dat ermee wordt berekend. In het rekenmodel over chemische veiligheid zijn twee paneeltypen met elkaar vergeleken om de keuze tussen verschillende celtypen inzichtelijk te maken (figuur 2). De rekentool om panelen te vervangen is juist geschikter voor keuzes om het energiesysteem met zonnepanelen beter in te richten.

Chemische veiligheid: risico's van nieuwe materialen

Waarom willen we risico's van nieuwe materialen in zonnepanelen berekenen?

Er worden veel nieuwe type panelen ontwikkeld die steeds efficiënter energie opwekken en nieuwe materialen gebruiken. Denk aan zonnecellen waarin **III-V metalen** (arseen, gallium en indium) of **lood** zijn verwerkt. Deze nieuwe typen panelen zijn nog niet op de markt. Ze kunnen de prijs van de panelen verlagen en zorgen voor efficiënter ruimtegebruik doordat minder panelen dezelfde hoeveelheid energie opwekken. Maar nieuwe materialen kunnen ook nieuwe risico's voor mens en milieu veroorzaken. Zonnecellen van III-V metalen of lood-perovskiet zijn interessant omdat ze in het lab veel efficiënter bleken dan de veelgebruikte kristallijne-silicone (C-si) cellen. Wetenschappers zijn bezorgd dat de gebruikte III-V metalen (arseen, gallium en indium) en lood bij deze panelen naar het milieu kunnen lekken tijdens het gebruik en de afvalfase.

Arsen en lood zijn beide Zeer Zorgwekkende Stoffen (ZZS) en zijn dus gevaarlijker dan andere stoffen. Dit betekent niet dat er altijd een risico is. Een schadelijk effect ontstaat pas als de blootstelling aan een stof groot genoeg is en de concentraties in het milieu daardoor grenswaarden overschrijden. Het is dus niet alleen van belang of een (gevaarlijke) stof in een paneel zit, maar vooral in welke mate hij in het milieu terecht komt en zich daarna verspreidt. Bij nieuwe technologieën is het niet altijd mogelijk om te meten hoeveel er van stoffen vrijkomt, vooral in vroege onderzoeksfases. Het ontwikkelde rekenmodel is daarom als voorbeeld gebruikt voor hypothetische C-Si/III-V tandem PV-cell- en C-Si/Lood-perovskiet tandem PV-cell-panels.

We benadrukken hierbij dat het model en de gekozen scenario's ontwikkeld zijn om inzicht te geven in keuzes voor het ontwerp van zonnepaneel(systemen) en zo afwegingen hierin mogelijk te maken. Bijvoorbeeld de

keuze tussen verschillende materialen of inzicht in het belang van recycling. De huidige resultaten zeggen dus bewust weinig over de veiligheid van zonnepanelen die nu op de markt zijn. Ze moeten gezien worden als een voorbeeld van mogelijke berekeningen met dit model. Andere mogelijke toepassingen worden verderop in de factsheet besproken. Ook beperkt dit model zich tot inschattingen van de chemische veiligheid; dat wil zeggen de risico's voor het milieu door het gebruik van specifieke stoffen in zonnepanelen. Brand- of arbo-veiligheid zijn bijvoorbeeld niet meegenomen.

Wat kan het rekenmodel?

Het rekenmodel voor chemische veiligheid is ontworpen om te berekenen hoeveel van een bepaalde stof uit een zonnepaneel kan vrijkomen en in het milieu kan terechtkomen. Het rekenmodel rekt hiervoor verschillende scenario's tegelijk uit en bevat onder andere:

- Groeicurves van het aantal panelen in gebruik over de toekomstige 100 jaar;
- Emissie van stoffen op drie geografische schalen:
 - Continentaal (Europa);
 - Regionaal (Amsterdam en omgeving);
 - Lokaal (drijvend PV systeem vlakbij een vuilstort);
- Onderscheid tussen panelen op land, daken en water;
- Ook onderscheid tussen emissies bij gebruiksfase en emissies bij einde levensfase:
 - Emissies bij productie en transport van panelen is niet meegenomen;
 - Voor einde levensfase zijn twee scenario's berekend: met en zonder recycling.

Er kunnen nog meer waarden worden ingevoerd. Voorbeelden zijn de efficiëntie van de panelen, hoeveel panelen ergens staan en hoeveel er kapot gaan in het veld, en hoeveel er worden gerecycled. Om rekening te houden met onzekerheid in deze waarden hebben we kansberekeningen gedaan met onzekerheidsverdelingen. Een overzicht

van alle invoermogelijkheden en de gebruikte waarden staan in het proefschrift van Blanco et al. (2022)³ en bijlage 1.

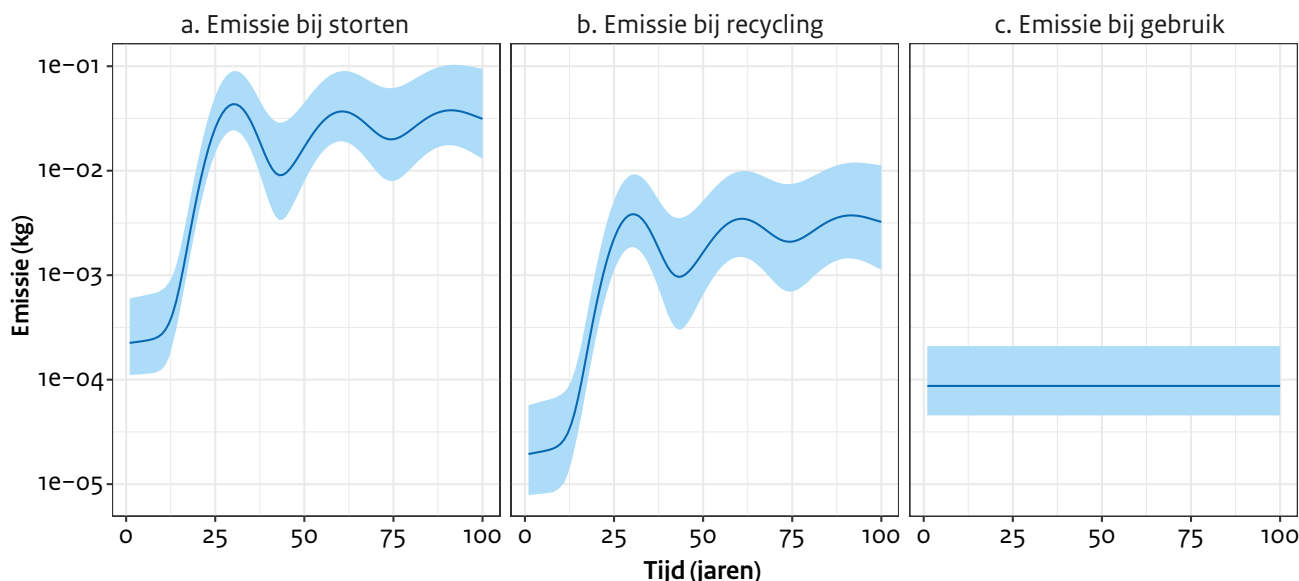
Wat is er in dit scenario berekend?

Voor III-V- en lood-perovskiet-technologieën hebben we de concentraties van III-V-metalen (arsen, gallium, indium), lood, zilver en koper berekend. De III-V-metalen en lood zijn karakteristiek voor deze nieuwe technologieën. Zilver en koper zitten in de veelgebruikte kristallijne (C-Si) panelen. In de analyse zijn we ervan uitgegaan dat deze nieuwe zonnecellen in combinatie (tandem) met C-si-zonnecellen in één paneel worden gebruikt, zodat zilver en koper ook zijn meegenomen. De verwachte hoeveelheid panelen over 100 jaar is gebaseerd op het Shell Sky Scenario⁴ voor de Europese schaal en de Regionale Energie Strategie van Noord Holland Zuid⁵ voor de regionale schaal. Voor de lokale schaal is gekeken naar een fictief drijvend PV-systeem van 50 MW met daarbovenop 14 MW aan zonnepanelen op omliggende daken. Verder zijn er twee

recycle scenario's doorgerekend: een waarbij de metalen niet worden gerecycled en dus worden verbrand of gestort, en een scenario waarbij vrijwel alle metalen in een paneel worden gerecycled.

Wat zijn de uitkomsten van de eerste berekeningen?

Uit deze eerste analyse blijkt dat er relatief weinig III-V-metalen en lood vrijkomen in het milieu in vergelijking met het zilver en koper dat standaard in C-Si-panelen zit. Van de berekende uitstoot komt het meeste vrij wanneer (onderdelen van) zonnepanelen op de vuilstort terecht komen (Figuur 3). Onder normale omstandigheden komt de meeste uitstoot in de eind- of afvalfase vrij en veel minder tijdens het gebruik. Ook is te zien dat de hoogte van de concentraties in het milieu veel verschillen als de zonnepanelen wel of niet worden gerecycled. Wanneer de metalen in zonnepanelen worden gerecycled is de uitstoot grofweg honderd keer lager dan wanneer alles wordt gestort of verbrand (Figuur 3).



Figuur 3 Emissie in de tijd naar het milieu van lood (Pb) uit C-Si/Lood-perovskiet tandemzonnepanelen op lokale schaal bij storten (EOL_R) of recycling (EOL_NR) als einde levensfase, en emissie door uitloging tijdens gebruik. Het lichtblauwe vlak toont onzekerheid in de uitkomst tussen de 25ste en 75ste percentiel.

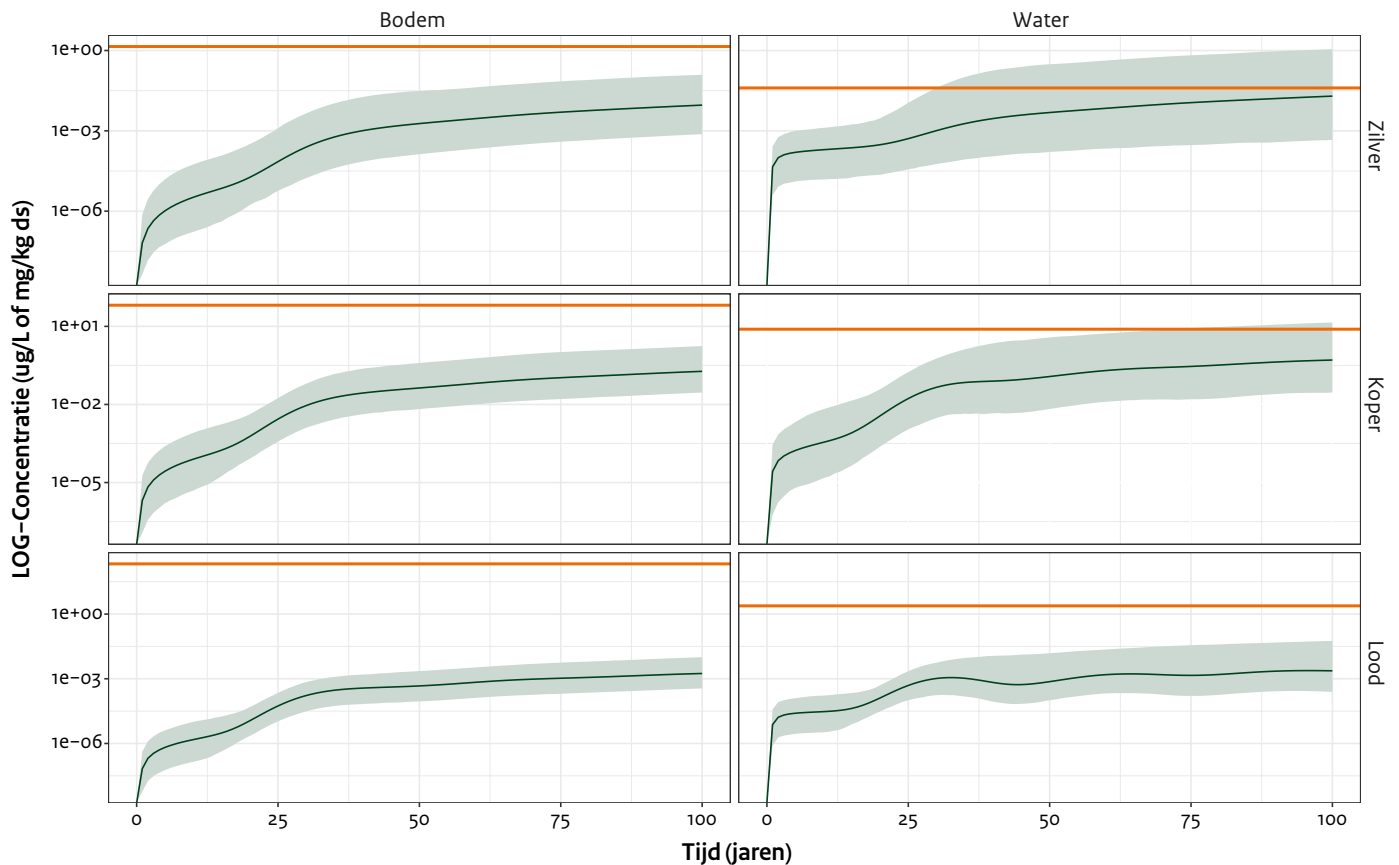
³ Blanco, C. F., Quik, J.T.K., Hof, M., Behrens, P., Cucurachi, S., Peijnenburg, W.J.G. M., Dimroth, F., Vijver, M.G. (2022). Probabilistic and prospective ecological risk assessment of III-V/silicon tandem photovoltaics. In: Guiding safe and sustainable technological innovation under uncertainty: A case study of III-V/silicon photovoltaics. PhD thesis. Leiden University, Leiden, The Netherlands.

⁴ [Shell Scenarios SKY Meeting the Goals of the Paris Agreement](#)

⁵ [RES 1.0 Noord-Holland Zuid](#)

De uitstoot van III-V-metalen en lood veroorzaakt zelfs bij de ongunstigste aannames geen blootstellingsconcentraties in water en bodem die hoger zijn dan de hiervoor geldende grenswaarden (figuur 4). Onder normale omstandigheden zullen deze metalen naar verwachting geen grote risico's veroorzaken bij het gebruik van deze nieuwe technologieën. Hierbij is uitgegaan van normale omstandigheden waarbij weinig panelen kapot gaan in het veld. Bij extreme weersomstandigheden waardoor panelen beschadigd raken, zou dit anders kunnen zijn.

Wat opvalt is dat juist voor koper en zilver de grenswaarden mogelijk wél worden overschreden. Dit zijn geen nieuwe toegevoegde stoffen, maar zijn onderdeel van de bestaande techniek in C-Si-zonnepanelen. Dit betekent dat er volgens dit rekenmodel mogelijk een risico kan zijn voor het milieu bij het gebruik van deze materialen in de huidige zonnepanelen, vooral als deze niet goed worden gerecycled. Een kanttekening hierbij is dat het rekenmodel bewust is ontworpen om risico's voor een bepaald scenario eerder te groot in te schatten dan te klein. Verder onderzoek is dus nodig om de schattingen van de uitstoot van zilver en koper uit zonnepanelen te verfijnen en met metingen te valideren.



Figuur 4 Verwachte blootstellingsconcentraties van zilver (Ag), koper (Cu), en lood (Pb) uit lood perovskiet zonnepanelen in water (wL) en bodem (sL) op lokale schaal in een scenario zonder recycling van deze metalen. Gevulde groene vlak geeft 5^{de} tot 95^{ste} percentiel weer, de groene lijn het geometrisch gemiddelde. De oranje horizontale lijn geeft de zogenoemde Predicted No Effect Concentration (PNEC) weer, de concentratie waaronder er geen schadelijke effecten op het milieu verwacht worden.

Beperkingen en aannames

- Om de twee typen panelen te kunnen vergelijken is het hetzelfde scenario gebruikt om in te schatten hoeveel ervan worden geplaatst. Dit is niet perse realistisch aangezien marktverkenningen op dit moment mogelijk zelfs meer dan 90 procent marktaandeel verwachten van

op lood-perovskiet gebaseerde tandempanelen in vergelijking met veel lagere aandelen III/V C-Si-tandempanelen (30 procent in dit geval).

- We hebben niet gekeken naar de typen panelen die al op de markt zijn en ook niet naar andere onderdelen van het PV-paneel, zoals de fluoropolymer backsheet of antimoen in glas.

- De uitkomsten geven een eerste beeld van de mate waarin significante hoeveelheden van de zorgstoffen in bodem en water vrijkomen. Het is geen risicobeoordeling van bestaande zonnepanelen. Ook zijn de uitkomsten op een aantal punten extra voorzichtig, omdat de onzekerheden ook erg groot zijn, al helemaal van keuzes tijdens de ontwerpfase.
- Er is geen rekening gehouden met lokale extreme situaties, zoals grootschalige schade na bijvoorbeeld extreem weer of een aanvaring (als ze op water liggen).

Waarvoor kan de methode worden gebruikt?

- Om opties in het ontwerp van nieuwe zonnepanelen te vergelijken, bijvoorbeeld de materiaalkeuze.
- Om opties van zonnepanelen te vergelijken als onderdeel van marktverkenning, bijvoorbeeld de inkoop van een ander type paneel voor een nieuw zonnepark.

Hoe kan de methode worden doorontwikkeld en welk vervolgonderzoek wordt voorzien?

- Door de aanpak iets aan te passen kan hij ook voor bestaande zonnepanelen worden gebruikt.
- Door de methode voor? andere type PV-technologie binnen de PV-sector te kunnen gebruiken, zoals *building integrated PV* of andere systeemonderdelen zoals omvormers. Hiervoor kan de technologie roadmap voor fotovoltaïcs (ITRPV) worden gebruikt.
- Door te onderzoeken hoe fysieke veiligheid (bijvoorbeeld brand) kan worden meegenomen in dergelijke analyses. Meer informatie over brandveiligheid en zonnepanelen is beschikbaar in een RIVM rapport 2022-0103.



Vervangen of levensduur verlengen: duurzaam, duurzamer, duurzaamst

Waarom de duurzaamheid van zonnepanelen bepalen?

Zonnestroom is een duurzame energiebron, maar de type panelen verschillen in de mate waarin ze duurzaam zijn.⁶ Dit wordt vaak uitgedrukt in de 'duurzaamheidsprestatie' van een product. Deze wordt meestal berekend door de totale CO₂-voetafdruk van de productie en afdanking van het PV-systeem af te zetten tegen de opbrengst in kilowatt-tijdens één uur (kWh). We laten hier zien dat het gebruiksscenario ook bepalend kan zijn voor de duurzaamheidsprestatie.

Vervroegd vervangen van zonnepanelen

In Nederland moeten we efficiënt omgaan met de ruimte die we hebben en daarom is het behaalde rendement van zonnepanelen heel belangrijk. Zonnepanelen worden als ze ouder worden steeds minder efficiënt, en ondertussen worden er ook nieuwe, efficiëntere, panelen ontwikkeld. Daarom kan het interessant zijn om zonnepanelen eerder te vervangen dan de huidige gemiddeld verwachte levensduur van 30 jaar. Uit een eerdere studie is gebleken dat dat financieel aantrekkelijk kan zijn, maar dat vroegtijdig vervangen ten koste gaat van de CO₂-voetafdruk per kWh opgewekte energie.⁷ Aan de hand van een aantal scenario's illustreren we dat levensduur een van de belangrijkste duurzaamheidsaspecten is als we kijken naar de CO₂-voetafdruk per kWh. Een aantal variabelen heeft invloed op de uiteindelijke duurzaamheidsprestatie, namelijk:

- de operationele levensduur,

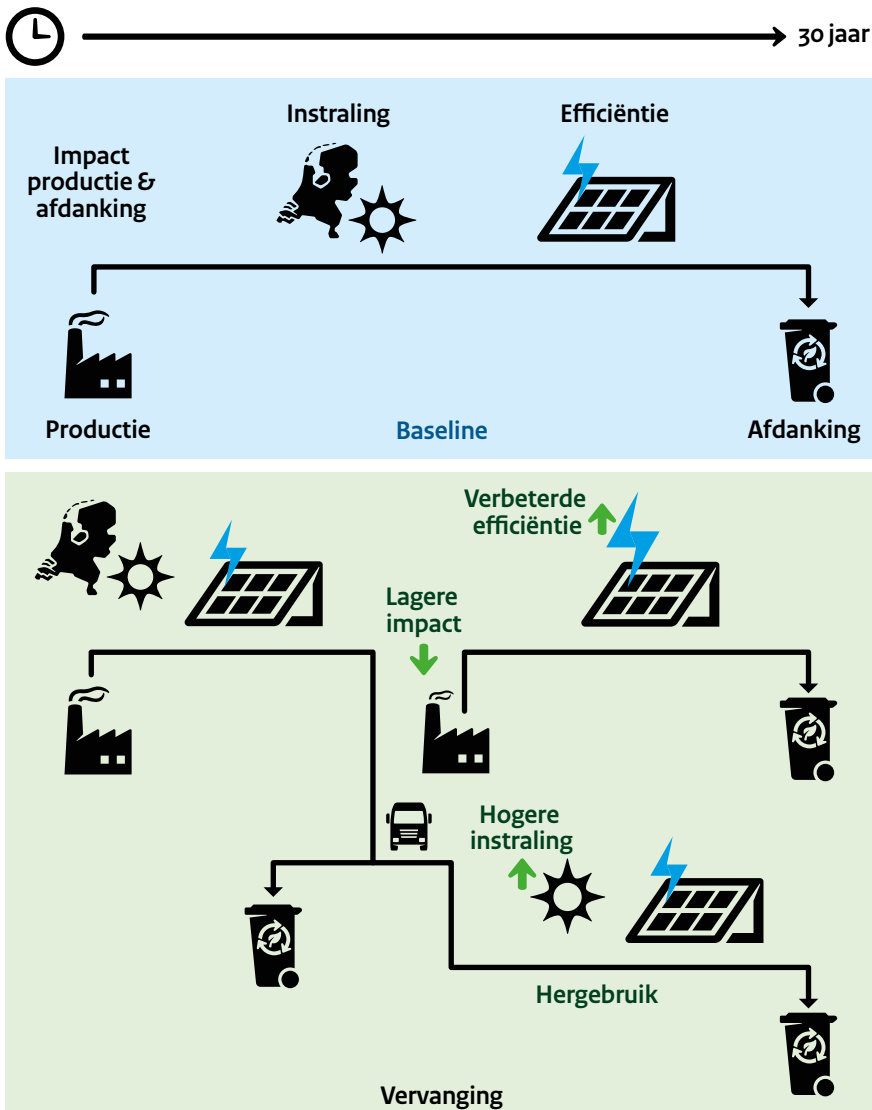
- instraling (de hoeveelheid zonlicht per oppervlak voor een bepaalde tijdsduur),
 - efficiëntie, en
 - milieubelasting bij productie en afdanking.
- Wanneer we willen berekenen of vroegtijdige vervanging loont, moeten we ook de toekomstige verbeterde efficiëntie meenemen. Daarnaast zal productie en afdanking minder milieubelastend worden: zowel door efficiëntere productietechnieken als door efficiënter materiaalgebruik. We hebben enkele illustratieve scenario's berekend met een methode die de IEA¹⁰ heeft ontwikkeld. In bijlage 2 wordt dit uitgebreider uitgelegd.

Welke scenario's zijn doorgerekend?

In figuur 5 zie je de onderdelen van de berekende scenario's. Ten eerste bovenaan het uitgangspunt oftewel de baseline: een PV-systeem dat 30 jaar blijft liggen en vervolgens wordt vervangen. De vervangingsscenario's eronder laten de elementen zien die meewegen: de operationele periode vóór de vervanging (hier illustratief elke 15 jaar), de snelheid waarmee de milieudruk van productie- en afdankingsprocessen is verbeterd, en de verbeteringen van de energie-efficiëntie. Daarnaast wordt bij vervanging gekeken naar de invloed van transport en instraling. Er wordt in dit model alleen gekeken naar de prestaties binnen de 30 jaar.

⁶ R. Frischknecht & L. Krebs. 2021. *Environmental life cycle assessment of electricity from PV systems*.

⁷ N. Rajagopalan, A. Smeets, K. Peeters, S. De Regel, T. Rommens, K. Wang, P. Stolz, R. Frischknecht, G. Heath, and D. Ravikuma. 2021. *Preliminary Environmental and Financial Viability Analysis of Circular Economy Scenarios for Satisfying PV System Service Lifetime*.



Figuur 5 Relevante aspecten die bij vervanging grote invloed hebben op de CO₂-voetafdruk per opgeleverde energie.

Eerste uitkomsten

De eerste resultaten laten zien dat vervangen een hogere CO₂-voetafdruk per kWh geeft dan de baseline (Scenario's 2 en 3, tabel 1). Hierbij wordt rekening gehouden met een realistische verbetering in panelefficiëntie en algehele milieudruk bij de productie na 15 jaar⁸, zie Tabel 1. Dit betekent dat het niet duurzamer wordt om een paneel vroegtijdig te vervangen als je het oude paneel daarna weggooit of recyclet. Maar bij een vervanging met hergebruik op een locatie met een hogere instraling, bijvoorbeeld in een zonnig gebied als Zuid-Spanje, is in onze berekenin-

gen de prestatie per kWh wel lager dan de baseline (Scenario 4, Tabel 1). Transport naar een nieuwe locatie is in de meeste gevallen verwaarloosbaar⁵, maar kan een grote bijdrage hebben aan de CO₂-voetafdruk als het met een onzuinig busje gebeurt. In dat geval mag er maximaal 550 kilometer worden afgelegd vanuit Nederland om nog netto klimaatwinst te behalen ten opzichte van de baseline. Als de impact van transport nagenoeg verwaarloosbaar is, zou het oude paneel minimaal 1500 kWh/kWp moeten opleveren om de impact van de productie en afdanking van het nieuwe systeem te compenseren. Aan de andere kant kunnen technische innovaties in de efficiëntie van een zonnepaneel (aantal kWp per m²) of het productieproces voor een kleinere milieudruk zorgen. Op een van deze vlakken zijn wel zeer grote verbeteringen nodig om een lagere CO₂-voetafdruk te krijgen dan de baseline: gewoon 30 jaar laten liggen (Scenario 5 en 6, tabel 1). Daarbij kan bij

⁸ Op basis van de huidige verwachting van 1,4 procent jaarlijkse PV-paneel efficiëntieverbetering en een 5 procent lagere milieudruk bij paneelproductie elke 5 jaar uit Rajagopalan et al. (2021)

hergebruik op een plek met hogere instraling de vraag worden gesteld of het beter is de nieuwe efficiëntere panelen meteen daar te installeren.

Tabel 1. Resultaten voor een mono-Si 3 kWp systeem in Nederland. Er is gerekend met een lineaire degradatie van 0,7 procent per jaar voor alle panelen, en transport- en installatiekosten beschouwen we verwaarloosbaar.

| # | Scenario | CO ₂ -voetafdruk (g CO ₂ eq. per kWh) | Verbeterde paneel efficiëntie t.o.v baseline | Verlaagde milieudruk productie t.o.v baseline | Opbrengst bij gemiddelde instraling (kWh/kWp) |
|---|---|---|--|---|---|
| 1 | Baseline 30 jaar met recycling | 39,7 | - | - | 1044 ^a |
| 2 | Na 15 jaar vervangen met recycling oude panelen | 62,4 | 23% ^b | 16% ^b | 1044 ^a |
| 3 | Na 10 en 20 jaar vervangen met recycling oude panelen | 86,5 | 15% ^b 32% ^b | 10% ^b 22% ^b | 1044 ^a |
| 4 | Na 15 jaar vervangen met hergebruik in zonnig land | 38,4 | 23% ^b | 16% ^b | 1640^c |
| 5 | Na 15 jaar vervangen met recycling oude panelen | 39,7 | 250%^d | 16% ^b | 1044 ^a |
| 6 | Na 15 jaar vervangen met recycling oude panelen | 39,7 | 23% ^b | 292%^e | 1044 ^a |

- a. Gemiddelde instraling voor Nederland. Bron: [Global Solar Atlas](#)
- b. Gemiddelde verbetering paneel efficiëntie en milieudruk productie volgens Rajagopalan et al. (2021).
- c. Gemiddelde instraling voor Zuid-Spanje. Bron: [Global Solar Atlas](#)
- d. Theoretische verbetering paneel efficiëntie voor behalen baseline CO₂-voetafdruk
- e. Theoretische verbetering milieudruk bij productie voor behalen baseline CO₂-voetafdruk

Beperkingen en aannames

- Er is van uitgegaan dat de nieuwe panelen op dezelfde locatie worden geplaatst als de panelen die ze vervangen. En er is in het hergebruikscenario geen vergelijking gemaakt met een scenario waar juist de nieuwe in plaats van de oude panelen op een nieuwe locatie worden geplaatst.
- Het is een snelle en grove berekening, waarbij enkele details zoals afstand en type van transport of locatie (dak/weiland) niet zijn meegenomen. De berekening is ook niet productspecifiek.
- Er is met een beperkt aantal scenario's gerekend, die op allerlei manieren nog kunnen worden geoptimaliseerd.

Waarvoor kan de methode worden gebruikt?

- Voor advies aan beleidsmakers over de milieu-impact van de vervanging van PV-panelen (re-powering);
- Voor projectontwikkelaars en consumenten is de tool eenvoudig online te implementeren (zie bijvoorbeeld [hier](#));

- Om de herbruikbaarheid mee te wegen in de waarde van een PV-paneel.

Hoe kan de methode verder worden ontwikkeld?

- Door naast de milieu-impact ook de *levelized cost of energy* (LCOE) mee te nemen.
- Door in plaats van alleen opgewekte elektriciteit ten opzichte van de CO₂-voetafdruk, ook de vermeden energie vanuit huidige bronnen mee te nemen.

Wat willen we nog meer weten?

- De rol van gedrag bij de vervanging van zonnepanelen.
- Vereisten voor een business case van wel 50 jaar lang.
- Welke factoren ervoor zorgen dat PV-panelen niet vroegtijdig vervangen worden.

Conclusie

Het RIVM en CML hebben twee methoden uitgewerkt om de duurzaamheid van nieuwe ontwerpen van zonnepanelen in een vroege fase van het ontwikkelingsproces in te schatten. Deze twee methoden kunnen al tijdens de ontwerpfase van een zonnepaneel(systeem) inzicht geven in keuzes van het ontwerp en de fase van de keten waar de meeste winst in veiligheid en duurzaamheid te behalen is. In de uiterekende voorbeelden is de grootste winst nadrukkelijk te halen aan het einde van de levensfase. Dit zou vorm kunnen krijgen door panelen te ontwerpen die beter te recyclen zijn, of juist aan het einde van de keten door de recyclingtechnieken te verbeteren. Duidelijk is dat er veel minder metalen uit zonnepanelen weglekken en in het milieu terecht komen door ze te recyclen dan ze als afval te storten. Ook hebben we laten zien dat een vervroegde vervanging van zonnepanelen weliswaar meer elektriciteit oplevert, maar dat deze opbrengst een grotere CO₂-voetafdruk per opgeleverde energie heeft als de oude panelen niet hoogwaardig worden hergebruikt. Levensduurverlenging, hergebruik en recycling van zonnepanelen zijn dus essentieel voor een hoogwaardige bijdrage aan een circulaire economie.

Om de energietransitie te versnellen en goed geïnformeerde keuzes te maken voor een circulair, veilig en duurzaam gebruik van PV zijn analyses van veiligheid en duurzaamheid essentieel. Verschillende factoren hebben effect op de

snelheid, veiligheid en duurzaamheid van de energietransitie. Voorbeelden zijn levensduur, ontmantelbaarheid, materiaalherwinning, keuze voor gebruikte stoffen, kwetsbaarheid voor schade (mechanische oorzaak, brand), technische (efficiëntie, ligging) en economische aspecten (kostprijs). Dat geldt ook voor sociale aspecten (rechtvaardigheid, internationale sociale voorwaarden, gedrag). Alhoewel deze analyse inhoudelijk slechts een paar stoffen, paneeltypen en scenario's voor een circulaire economie bevat, bieden de methoden nu al inzicht in mogelijkheden om de milieurisico's te verkleinen en duurzaamheidsprestatie te vergroten.

Bij het ontwerp van zonnepanelen zullen altijd keuzes gemaakt moeten worden. Het is nu van belang dat ontwerpers, inkopers en beleidsmakers deze aspecten kunnen afwegen in de verschillende fasen van ontwerp. De vraag is hoe de ontwikkelde methoden het beste kunnen worden gebruikt en zo kunnen bijdragen aan een duurzame energietransitie. Het gebruik en/of de resultaten hiervan zouden ontwerpers en ook beleidsmakers kunnen ondersteunen bij de keuzes in het ontwerp of bij het stellen van doelen en eisen. Er ligt nog wel de uitdaging om de methoden technisch uit te breiden en te verbeteren, en ze tegelijkertijd gebruiksvriendelijk en toepasbaar te krijgen/houden.

Bijlage 1: Methode bepaling stoffenveiligheid

Introductie

Volgens de methode van Blanco et al. (2022)³ is er een ecologische risicobeoordeling uitgevoerd op hypothetische tandem C-si en lood-perovskiet-panelen. De beoordeling van III-V-panelen staat beschreven in het artikel van Blanco et al. (2022)³ zelf. De modellen die hiervoor gebruikt zijn, zijn openbaar beschikbaar en te vinden met de volgende link: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7032992>. De modellen bestaan uit de volgende onderdelen:

1. Het modelleren van groeicurves van de vraag naar bepaalde panelen
2. Het modelleren van emissies van chemische stoffen tijdens de gebruiks- en einde-levensfase
3. Het modelleren van de verwachte stoffen concentraties in het milieu

De uitkomsten van deze stappen zijn de voorspelde concentraties van relevante chemische stoffen in het milieu (in engels: Predicted Environmental Concentrations, afkorting PEC) die vervolgens worden vergeleken met grenswaarden waarbij geen nadelige effecten op het milieu verwachten worden (Predicted No Effect Concentrations, afkorting PNEC). Het modelleren van vraag, emissies, en concentraties in het milieu is gedaan op een probabilistische manier, volgens de methode beschreven in de studie van Blanco et al. (2022)³. De beoordeling van de tandem C-si/lood-perovskiet panelen richt zich op drie metalen: zilver, koper, en lood. Omdat tot zover wij weten er geen publiekelijk beschikbare specificaties beschikbaar zijn voor dit type paneel, is de risicobeoordeling gebaseerd op de hoeveelheid materiaal in standaard C-si panelen, met uitzondering van lood. De hoeveelheid lood is gebaseerd op de gebruikelijke hoeveelheid lood per m² voor lood-perovskiet lagen. Een overzicht van de gebruikte hoeveelheden materiaal voor de berekeningen is te zien in tabel 2.

Tabel 2 Hoeveelheden materiaal in de gemodelleerde C-si/lood-perovskiet panelen.

| Materiaal | Gewicht (g/m ²) |
|-----------|-----------------------------|
| Ag(I) | 8,89E+00 |
| Al(III) | 2,54E+03 |
| Cu(II) | 1,13E+02 |
| EVA | 1,00E+03 |
| Glass | 1,01E+04 |
| Mg | 8,02E+01 |
| Ni(II) | 1,63E-01 |
| Pb(II) | 7,50E-01 |
| Si | 1,22E+02 |
| Sn(II) | 9,02E-03 |
| Steel | 1,47E+03 |
| Ti | 8,01E-04 |
| Zn(II) | 1,20E-03 |
| Total | 1,54E+04 |

Scenarios

Om een directe vergelijking te kunnen maken tussen de III-V panelen en de tandem C-si/lood-perovskiet panelen, is er voor gekozen om zoveel mogelijk dezelfde waarden voor parameters en hun verdeling te gebruiken als in de beoordeling van de III-V panelen in Blanco et al. (2022)³. Een uitzondering hierop zijn waarden voor de efficiëntie en formaat van de panelen en de fysisch-chemische eigenschappen van de metalen. Ook lag de focus op andere metalen voor de C-si/lood-perovskiet panelen dan in de beoordeling van de III-V panelen, namelijk zilver, koper en lood in plaats van arseen, indium, en gallium. Hoewel voor

de twee type panelen dus exact dezelfde scenario's voor vraag gebruikt zijn, vertegenwoordigd dit zeer waarschijnlijk geen realistisch vraag scenario voor de C-si/lood-perovskiet panelen.

De modellen bevatten drie geografische schalen: een Europese schaal, een regionale schaal gebaseerd op de gemeente Amsterdam, en een lokale schaal gebaseerd op een drijvend PV systeem met aangrenzend een vuilstortplaats en woonwijk. De vraag-scenario's zijn, zoals in Blanco et al. (2022)³, voor de Europese schaal gebaseerd op de projecties van het Shell Sky scenario, voor de regionale schaal op de Regionale Energiestrategie van Amsterdam, en voor de lokale schaal gebaseerd op een drijvend PV systeem van 50MW met een additionele 14 MW op omliggende daken. Er is aangenomen dat de gemodelleerde panelen, per jaar, 5% van het totale marktaandeel van zonnepanelen zouden beslaan op Europese en regionale schaal. Alle parameters gebruikt voor de berekeningen van vraag en emissies zijn beschreven in Blanco et al. (2022)³. De gebruikte waarden voor C-si/lood-perovskiet panelen die anders waren dan de waarden genoemd in Blanco et al. (2022)³ zijn gegeven in Tabel 3.

Het emissiemodel bevat voorspellingen van emissies voor twee fases van de levenscyclus van zonnepanelen: emissies tijdens de gebruiksfase, door middel van uitloging van metalen uit gebroken panelen blootgesteld aan regenwater, en emissies bij einde-levensfase, door middel van uitloging bij storten of verdamping bij verbranding van de panelen. Ook zijn er twee verschillende scenario's berekend voor de mate van recycling: een scenario waar aangenomen is dat geen zilver, koper, of lood uit zonnepanelen wordt gerecycled, en een scenario waar aangenomen is dat 85% tot 99.9% van de metalen gerecycled wordt met een materiaalherwinning van 90 tot 99%. De hiermee berekende emissies zijn vervolgens als invoer gebruikt voor het milieu verspreidings model SimpleBox (<https://doi.org/10.5281/zenodo.5743269>), waarmee de voorspelde concentraties in het milieu (PEC) voor de komende 100 jaar zijn berekend. Dit is gedaan met de optie voor dynamische analyse in R (v4.1.3)⁹. De PECs zijn geschat voor zoet oppervlaktewater en bodem, voor alle drie de geografische schalen.

Tabel 3 Invoerwaarden voor de C-si/lood-perovskiet panelen die verschiden van de waarden in Blanco et al. (2022)³. Voor alle niet genoemde parameters zijn dezelfde waarden gebruikt als in Blanco et al. (2022)³.

| Parameter | Naam variable | Eenheid | Basis waarde | Verdeling |
|-------------------------------------|---------------|---------|--------------|--|
| PV Installatie | | | | |
| Panel conversion efficiency | pv.eff | % | 28% | P, a=25%, b=28%, c=31% |
| Mass of element per m2 cell: silver | Mu.PVarea | g/m2 | 8.89 | U, min=8.89, max=9.10.60 |
| Mass of element per m2 cell: copper | Mu.PVarea | g/m2 | 1.13e2 | U, min=1.06e2, max=1.13e2 |
| Mass of element per m2 cell: lead | Mu.PVarea | g/m2 | 0.75 | U, min=0.64, max=0.86 |
| Use phase | | | | |
| Diffusion coefficient of silver | D | m2/s | 1.65e-9 | P, a=1.65e-9 * 0.85, b=1.65e-9, c=1.65e-9 * 1.15 |
| Diffusion coefficient of copper | D | m2/s | 7.33e-10 | P, a=7.33e-10 * 0.85, b=7.933e-10, c=7.33e-10 * 1.15 |
| Diffusion coefficient of lead | D | m2/s | 9.45e-10 | P, a=9.45e-10 * 0.85, b=9.45e-10, c=9.45e-10 * 1.15 |

⁹ R Core Team (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

| EOL phase: landfill | | | | |
|--|-----------|------|------------|--|
| Waste/leachate partit. coefficient: silver | KW | L/kg | $10^{2.1}$ | L, $\mu=2.1$, $\sigma=0.52$ |
| Waste/leachate partit. coefficient: copper | KW | L/kg | $10^{2.0}$ | L, $\mu=2.0$, $\sigma=0.39$ |
| Waste/leachate partit. coefficient: lead | KW | L/kg | $10^{2.9}$ | L, $\mu=2.9$, $\sigma=0.65$ |
| EOL phase: Incineration | | | | |
| Fraction of silver volatilized incinerator | f.inc.esp | - | 0% | None |
| Fraction of copper volatilized incinerator | f.inc.esp | - | 7.5% | U, min=0%, max=15% |
| Fraction of lead volatilized incinerator | f.inc.esp | - | 40% | U, min=10%, max=70% |
| ESP removal of volatilized metal | f.esp.lf | - | 99% | U, min=98%, max=99.99% |
| Substance parameter | | | | |
| Solid/water partitioning coefficient: silver | Kpsw_soil | L/kg | $10^{2.6}$ | L, $\mu=2.6$, $\sigma=0.8$, truncated min = 1, max = 4.5 |
| Solid/water partitioning coefficient: copper | Ksw | L/kg | $10^{2.5}$ | L, $\mu=2.5$, $\sigma=0.6$, truncated min = 0.1, max = 3.6 |
| Solid/water partitioning coefficient: lead | Ksw | L/kg | $10^{3.7}$ | L, $\mu=3.7$, $\sigma=1.2$, truncated min = 0.7, max = 5.0 |

Risicobeoordeling

Om een inschatting te maken van de risico's voor het milieu zijn de voorspelde concentraties in water en bodem vergeleken met relevante grenswaarden. Hiervoor zijn concentraties waarbij geen schadelijke effecten op het milieu verwacht worden gebruikt, de zo genaamde 'Predicted No Effect Concentrations (PNEC)' uit het registratie dossier van het Europees Agentschap voor chemische stoffen (ECHA). Deze waarden staan in tabel 4.

Tabel 4 Grenswaarden voor zilver, koper, en lood gebruikt ter vergelijking met verwachte milieu concentraties.

| Metaal | PNEC voor bodemorganismen (mg/kg drooggewicht) | PNEC voor zoetwater organismen ($\mu\text{g/L}$) |
|--------|--|--|
| zilver | 1.41 | 0.04 |
| koper | 65 | 7.8 |
| lood | 212 | 2.4 |

Bijlage 2: Duurzaamheidsanalyse

De duurzaamheidsprestatie wordt berekend door de totale CO₂-voetafdruk van de productie en afschrijving van het PV-systeem af te zetten tegen de geproduceerde kWh binnen een bepaald tijdsbestek. Voor de berekeningen van totale CO₂-voetafdruk is de methode van Rajagopalan et al.¹⁰ gebruikt in combinatie met de gegevens uit de IEA-factsheet¹¹, zodoende gebruik makend van de bijgewerkte data van de IEA PVPS life cycle inventory¹². We baseren onze analyse van gebruiksscenario's voor vervroegd vervangen op een mono-Si PV-systeem, omdat wordt verwacht dat deze technologie de markt op korte termijn zal domineren¹³. Bovendien is de beschikbaarheid van milieugegevens groter in vergelijking met andere PV-technologieën.

Volgens de IEA-factsheet bedraagt de totale koolstofvoetafdruk per opgewekte kWh voor een mono-Si PV-systeem 42,5 g CO₂-eq (berekend voor een periode van 30 jaar), met de volgende systeemgrenzen en voorwaarden:

- Systeem: 3 kWp PV-systeem, installatie op een plat dak in Europa, inclusief paneel, bekabeling, bevestigingsconstructie, omvormer en systeeminstallatie;
- Verwachte levensduur: 30 jaar voor de panelen, 15 jaar voor omvormers;
- Instraling: 975 kWh/kWp;
- Efficiëntie: 19,5% efficiëntie voor mono-Si-technologie;
- Degradatie: 0,7% lineaire opbrengstdegradatie;

- Levenscyclusfasen: productie, vervoer, installatie, gebruik en einde-levensduurfase;
- Wereldwijde waardeketen: de Levens Cyclus Analyse (LCA) houdt rekening met de wereldwijde waardeketen achter de productie van een in Europa geïnstalleerd PV-systeem, en houdt rekening met de gemiddelde herkomstregio's voor de wafers, PV-cellen en panelen.

Rajagopalan et al. Geven een vergelijking om de opbrengst van een PV-systeem over een periode van 30 jaar te berekenen, inclusief het effect van het vervangen van panelen vóór de verwachte levensduur (vergelijking B1, overgenomen van Rajagopalan et al. (2021)¹⁰). Met deze vergelijking wordt de opbrengst berekend over 30 jaar van het eerder beschreven PV-systeem: 78536 kWh. Samen met de koolstofcoëfficiënt berekenen we dat dit systeem (42,5 g CO₂-eq/kwh * 78.536 kWh =) 3.337 kg CO₂-eq systeem vergt (om het systeem te produceren, te onderhouden, en af te danken door recycling).

$$\sum_{i=1}^n [\text{Opbrengst} \times P_1 \times (1 + a)^{N \times (i-1)} \times (1 - r \times \frac{N}{2}) \times N]$$

Vergelijking B1

Overgenomen van Rajagopalan et al (2021) waarin:

- N levensduur van de panelen in 1 cyclus
- n Aantal product cycli in 30 jaar voor PV-panelen en andere producten en materialen
- i cyclusnummer

- Opbrengst Initiële opbrengst van het systeem [kWh/kWp/jaar]
- P1 Piekopbrengst van paneel in jaar 1 van de periode van 30 jaar [kWp]
- a Jaarlijkse voorspelde opbrengst verbetering [%]
- r Degradatiesnelheid [%]

Voor hetzelfde systeem kunnen we de koolstofcoëfficiënt berekenen voor een installatie in Nederland. De instraling in

¹⁰ N. Rajagopalan, A. Smeets, K. Peeters, S. De Regel, T. Rommens, K. Wang, P. Stolz, R. Frischknecht, G. Heath, and D. Ravikuma. 2021.

[Preliminary Environmental and Financial Viability Analysis of Circular Economy Scenarios for Satisfying PV System Service Lifetime.](#)

¹¹ R. Frischknecht & L. Krebs. 2021. [Environmental life cycle assessment of electricity from PV systems.](#)

¹² R. Frischknecht, P. Stolz, L. Krebs, M. de Wild-Scholten, P. Sinha. 2020. [Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems.](#)

¹³ Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems. [Photovoltaics report.](#) 2022.

Nederland is ongeveer 1044 kWh/kWp¹⁴, dus dit resulteert in een waarde van 39,7 g CO₂-eq/kWh. Dit resultaat valt binnen het bereik van de door TNO berekende koolstofcoëfficiënten¹⁵, namelijk 29 g CO₂-eq/kWh en 55 g CO₂-eq/kWh voor een systeem dat is geproduceerd met respectievelijk een Europees en Chinees energiemixprofiel. Dit systeem en zijn prestaties vormen de uitgangswaarde voor deze studie.

Met de gegeven uitgangssituatie zullen we drie hoofdscenario's beoordelen op basis van vergelijking B1, in combinatie met vergelijking B2. Bij vervangingsscenario's, waarbij het systeem vóór de verwachte levensduur wordt vervangen door nieuwere panelen, moet rekening worden gehouden met de toekomstige technologische ontwikkeling (vooral voor de snel evoluerende PV-technologieën). Nieuwere panelen zijn doorgaans efficiënter en kunnen een lagere koolstofcoëfficiënt hebben over de levenscyclus door efficiëntieverbeteringen bij de productie of een hogere circulariteit (bijvoorbeeld Hogere materiaalrecyclage of hogere modulariteit). De vergelijking in figuur B2.1 omvat **a**, de jaarlijkse geraamde verbetering van het vermogen (in procenten), die naar verwachting ongeveer 1,4 procent¹⁰ zal bedragen. De vergelijking in figuur B2.2 omvat **b**, de verwachte milieuverbetering over 5 jaar (in procenten). In Rajagopalan wordt gewerkt met een 'revolutionair' scenario waarbij elke 5 jaar de voetafdruk van een panel (alle fases in de levenscyclus meegenomen) 10 procent vermindert. Als tussenvorm nemen we in de berekening aan dat deze milieuverbetering 5 procent per 5 jaar zal bedragen¹⁰. Met de vergelijking in figuur B2.2 berekenen we de totale koolstofvoetafdruk van het gebruikte PV-systeem over 30 jaar. Met de vergelijking in figuur B2.1 berekenen we de totale elektriciteitsproductie over 30 jaar. We vergelijken de prestaties met de functionele eenheid g CO₂-eq/kWh, dus; het resultaat van de totale koolstofvoet-

afdruk gedeeld door de totale elektriciteitsopbrengst.

$$\sum_{i=1}^n [(MI(P) + MI(BOS)) \times (1 - b)^{\frac{N}{5} \times (i-1)}] + \sum_{i=1}^z [MI(I) \times (1 - b)^{\frac{N}{5} \times (i-1)}]$$

Vergelijking B2

Overgenomen van Rajagopalan et al (2021) waarin:

- n Aantal productcycli in 30 jaar voor PV paneel en BOS
- z Aantal productcycli in 30 jaar voor inverters
- i Cyclus nummer
- MI(P) Milieudruk/CO₂-voetafdruk van het paneel voor levenscyclus
- MI(I) Milieudruk/CO₂-voetafdruk van de inverter voor levenscyclus
- MI(BOS) Milieudruk/CO₂-voetafdruk van BOS voor levenscyclus

Voor de volgende vervangingsscenario's is nagegaan of de gegeven strategie milieuvoordelen oplevert, en zo niet: op welk punt dan niet (meer). De resultaten zijn berekend voor een basisscenario met meest gangbare verwachtingen bij vervanging (ceteris paribus), en ook voor het vinden van het break-even punt van de afzonderlijke variabelen: efficiëntieverbetering en milieuverbetering. De totale opbrengst wordt berekend voor een periode van 30 jaar, waarbij geen rekening wordt gehouden met extra gebruik na die 30 jaar.

Scenario 1. Verhoging van de energie-efficiëntie (ceteris paribus):

- a. Scenario van vervanging om de 10 jaar, break-even bij een jaarlijkse efficiëntieverbetering van 7,8%;
- b. Vervangingsscenario om de 15 jaar, break-even bij een jaarlijkse efficiëntieverbetering van 6,3%;

| | | Scenario a: vervangen na 10 jaar | | | Scenario b: vervangen na 15 jaar | |
|--------------|---------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------------------|--|
| | Uitgangssituatie (baseline) | Verwachte uitkomst | Break-even voor <i>a</i> | Verwachte uitkomst | Break-even voor <i>a</i> | |
| N | Operationele levensduur (jaar) | 30 | 10 | 15 | 15 | |
| yield | Jaarlijkse instraling (kWh/kWp) | 1.044 | 1.044 | 1.044 | 1.044 | |
| P1 | Piekvermogen system (kWp) | 3 | 3 | 3 | 3 | |
| a | Jaarlijkse efficiëntieverbetering (%) | 1,4% | 1,4% | 7,8% | 6,3% | |
| r | Jaarlijkse degradatie (% lineair) | 0,7% | 0,7% | 0,7% | 0,7% | |
| b | 5-jaarlijkse milieuverbetering (%) | 5,0% | 5,0% | 5,0% | 5,0% | |
| | kg CO ₂ -eq. | 3.337 | 9.067 | 6168 | 6.168 | |
| | kWh | 84.094 | 104.686 | 99349 | 155.813 | |
| | kg CO ₂ -eq./kWh | 0,0397 | 0,0926 | 0,0668 | 0,0397 | |

¹⁴ Global Solar Atlas. [Global Photovoltaic Power Potential by Country](#).

¹⁵ TNO (2021). Tijd voor Duurzame zonne-energie. [Zonnestroom: van hernieuwbaar naar duurzaam](#)

Scenario 2. Verbetering van de milieuprestaties (bij de productie, het gebruik en de afdanking van het systeem) (ceteris paribus):

- Scenario voor vervanging om de 10 jaar, break-evenpoint bij een milieuverbeteringspercentage van 49% om de 5 jaar;
- Scenario van vervanging om de 15 jaar, waarbij het break-evenpoint wordt bereikt bij een milieuverbeteringspercentage van 43% over 5 jaar.

| | | Uitgangssituatie (baseline) | Scenario a: vervangen na 10 jaar | | Scenario b: vervangen na 15 jaar | |
|--------------|---------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|--------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| | | | Verwachte uitkomst | Break-even voor <i>b</i> | Verwachte uitkomst | Break-even voor <i>b</i> |
| N | Operationele levensduur (jaar) | 30 | 10 | 10 | 15 | 15 |
| yield | Jaarlijkse instraling (kWh/kWp) | 1.044 | 1.044 | 1.044 | 1.044 | 1.044 |
| P1 | Piekvermogen systeem (kWp) | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| a | Jaarlijkse efficiëntieverbetering (%) | 1,4% | 1,4% | 1,4% | 1,4% | 1,4% |
| r | Jaarlijkse degradatie (% lineair) | 0,7% | 0,7% | 0,7% | 0,7% | 0,7% |
| b | 5-jaarlijkse milieuverbetering (%) | 5,0% | 5,0% | 49% | 5,0% | 43% |
| | kg CO2-eq. | 3.337 | 9.067 | 4.150 | 6.168 | 3.955 |
| | kWh | 84.094 | 104.686 | 104.686 | 99.349 | 99.349 |
| | kg CO2-eq./kWh | 0,0397 | 0,0926 | 0,0397 | 0,0668 | 0,0397 |

Scenario 3. Hergebruik van voortijdig vervangen systemen

NB: het voordeel is alleen berekend voor de tijdsperiode van 30 jaar. Alle extra elektriciteit die na die periode met het systeem wordt geproduceerd, is voordelig maar wordt niet meegenomen in de berekening.

- Hergebruik van het 15 jaar oude paneel in een zonniger land als Spanje; wat is het koolstofvoordeel en onder welke vervoersomstandigheid komt het netto voordeel te vervallen?

- Hergebruik van het 15 jaar oude paneel: onder welke instralingsomstandigheden zou het vervangingsscenario voordelig zijn, wanneer transport te verwaarlozen is.

Scenario 3.a

Uit de eerdere exercitie kennen we het milieuprofiel van het scenario voor vervanging om de 15 jaar onder verwachte omstandigheden:

| Verwachte uitkomst | | |
|--------------------|---------------------------------------|--------|
| N | Operationele levensduur (jaar) | 15 |
| yield | Jaarlijkse instraling (kWh/kWp) | 1.044 |
| P1 | Piekvermogen systeem (kWp) | 3 |
| a | Jaarlijkse efficiëntieverbetering (%) | 1,4% |
| r | Jaarlijkse degradatie (% lineair) | 0,7% |
| b | 5-jaarlijkse milieuverbetering (%) | 5,0% |
| | kg CO2-eq. | 6.168 |
| | kWh | 99.349 |
| | kg CO2-eq./kWh | 0,0668 |

Vervolgens berekenen we de elektriciteit die het vervangen panel vervolgens in Zuid-Spanje zou kunnen opbrengen. We doen dat door het verschil te berekenen tussen één en de eerste van twee cycli in Spanje (met 1639 kWh/kWp instraling)¹⁴:

| | kWh 30 jaar in ES (1e van 1 cyclus) | kWh 15y in ES (1e van 2 cycli) |
|----------|-------------------------------------|--------------------------------|
| Cyclus 1 | 132.009 | 69.876 |

Het paneel produceert dus $(132.009 - 69.876 =)$ 62.133 kWh tijdens zijn tweede cyclus in Spanje.

De totale koolstofvoetafdruk blijft gelijk zonder rekening te houden met het vervoer (6.168 kg CO₂-eq.), maar we kunnen de extra opgewekte elektriciteit optellen voor de totale opgewekte elektriciteit (99.349 kWh + 62.133 kWh = 161.482 kWh). Dit resulteert in 0,0382 kg CO₂-eq./kWh. Het betekent dat er een maximum van 1,5 g CO₂-eq./kWh aan vervoer kan worden toegewezen, voordat het koolstofvoordeel teniet wordt gedaan. We namen de meest koolstof-intensieve transportmodus (*transport, freight, light commercial vehicle | market for | Europe without Switzerland | Cut-off*) van Ecoinvent¹⁶ en vermenigvuldigden de koolstofintensiteit (1,83 per ton. km) met het veronderstelde gewicht van het PV-systeem (208,4 kg), en vonden het break-evenpoint op ongeveer een afstand van 550 km.

Scenario 3.b

Met een berekening die vergelijkbaar is met scenario 3.a (zonder rekening te houden met transport), is gevonden dat het vervangen paneel minimaal 1500 kWh/kWp aan instraling moet krijgen om de impact van de productie van de nieuwe panelen te compenseren.

| | kWh 30 jaar in NL (1e van 1 cyclus) | kWh 15y in NL (1e van 2 cycli) |
|---------|-------------------------------------|--------------------------------|
| Cycle 1 | 84.094 | 44.514 |

Uit bovenstaande tabel blijkt dat het vervangen paneel $(84.094 - 44.514 =)$ 39.581 kWh zal opbrengen in de resterende 15 jaar in Nederland. Bij hergebruik van de vervangen panelen in Nederland is de koolstofcoëfficiënt voor de 30 jaar $(6.168 \text{ kg CO}_2\text{-eq.} / (39.581 \text{ kWh} + 99.349 \text{ kWh}) =)$ 0,0446 kg CO₂-eq./kWh. Onder omstandigheden met een instraling van 1.500 kWh/kWp zal het paneel in zijn tweede cyclus $(120.825 - 63.956 =)$ 56.969 kWh produceren:

| | kWh 30y bij 1500 kWh/kwp | kWh 15y bij 1500 kWh/kwp |
|---------|--------------------------|--------------------------|
| Cycle 1 | 120.825 | 63.956 |

Om de koolstofcoëfficiënt tot het baseline terug te brengen, hebben we ten minste 1500 kWh/kWp nodig: $6.168 \text{ kg CO}_2\text{-eq.} / (56.969 \text{ kWh} + 99.349 \text{ kWh}) = 0,0397 \text{ kg CO}_2\text{-eq./kWh}$.

¹⁶ Wernet G, Bauer C, Steubing B, Reinhard J, Moreno-Ruiz E, Weidema B. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. The International Journal of Life Cycle Assessment 2016; 21(9): 1218-30.

Auteurs:

Matthias Hof, Michelle Steenmeijer, Michiel van Kuppevelt,
Anne van Bruggen en Joris Quik

Wilt u meer weten? Kijk dan op:

- www.rivm.nl/direct
- www.sustainabilitymethod.com

Heeft u een specifieke vraag?

Mail dan naar info@rivm.nl

Dit is een uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven
www.rivm.nl

De zorg voor morgen begint vandaag