

# Stralen zonder schaduw

Analyse en advies voor een methodiek voor de toetsing van de CO<sub>2</sub> voetafdruk bij zonnepanelen





Rijksdienst voor Ondernemend  
Nederland

Dit rapport is opgesteld in opdracht van de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland, in samenwerking met de TKI-Urban Energy en het Ministerie van Klimaat en Groene Groei

**Auteurs**

Gwen Aartsma  
Stefan Favrin  
Mathijs van Kouwen  
Cécile van Oppen

**Datum**

Februari 2025

# Inhoudsopgave

Inhoudsopgave .....	1
Begrippenlijst .....	2
Samenvatting .....	3
Hoofdstuk 1. Aanleiding en doel van het onderzoek .....	4
Hoofdstuk 2. Methodiek CO <sub>2</sub> voetafdruk zonnepanelen .....	6
Hoofdstuk 3. Effectiviteit van de methodologie .....	14
Hoofdstuk 4. Andere duurzaamheidsthema's .....	19
Hoofdstuk 5. Conclusie en Aanbevelingen .....	23
Totstandkoming .....	24
Bijlage 1. Meer informatie over methodieken .....	25
Bijlage 2. Europese ontwikkelingen .....	27
Bijlage 3. Uitkomsten EPD analyse .....	28
Bijlage 4. CO <sub>2</sub> -Terugverdientijd .....	30
Bijlage 4. Bronnen .....	31

# Begrippenlijst

Term	Beschrijving
CO <sub>2</sub> -voetafdruk	De totale uitstoot van broeikasgassen (in CO <sub>2</sub> -eq) die wordt veroorzaakt door een organisatie, individu, evenement, dienst of product.
CO <sub>2</sub> -terugverdientijd (CO <sub>2</sub> -TVT)	De tijd die nodig is om de CO <sub>2</sub> -uitstoot die vrijkomt bij de productie van zonnepanelen te compenseren door de CO <sub>2</sub> -besparing tijdens de gebruiksfase.
Environmental Product Declaration (EPD)	Een gestandaardiseerde manier om de milieu-impact van een product te rapporteren, gebaseerd op een levenscyclusanalyse (LCA)
Fase A, B, C en D in een LCA	In een Life Cycle Assessment (LCA) worden de milieu-impact van een product of dienst beoordeeld gedurende de gehele levenscyclus. Deze levenscyclus wordt vaak opgedeeld in vier fasen, namelijk fase A, B, C en D. Fase A is de productiefase – verder onderverdeeld in A1 t/m A3 (productie, ofwel Cradle to Gate) A4 t/m A5 (transport en installatie), fase B is de gebruiksfase. Fase C is de einde levensduurfase, fase D bevat de voordelen en lasten buiten het systeem, zoals de recycling van materialen die in andere producten kunnen worden gebruikt.
Geverifieerde LCA	Een gestandaardiseerde en onafhankelijke methode om de CO <sub>2</sub> -voetafdruk te berekenen, gebaseerd op een volledige levenscyclusanalyse.
Kilowattuur (kWh)	De eenheid van energie die wordt gebruikt om de hoeveelheid elektriciteit te meten die wordt verbruikt of geproduceerd
Life Cycle Assessment (LCA)	Een methode om de milieu-impact van een product of dienst te beoordelen gedurende de gehele levenscyclus.
Polysilicium	Een basismateriaal voor zonnepanelen dat veel elektriciteit kost om te produceren.
Product Category Rules (PCR)	Specifieke regels voor een productcategorie die bepalen hoe een EPD moet worden opgesteld.
Systeemgrens	De afbakening van welke onderdelen, processen en levenscyclusfasen worden meegenomen in de berekening van de CO <sub>2</sub> -voetafdruk.
Versimpelde methodiek	Een methode om de CO <sub>2</sub> -voetafdruk te berekenen met vaste, versimpelde regels voor bepaalde berekeningen.
Wattpiek (Wp)	De eenheid van vermogen die aangeeft hoeveel elektriciteit een zonnepaneel onder ideale omstandigheden kan produceren.

# Samenvatting

Met diverse subsidieregelingen, waaronder de (opvolger van) de SDE++, wordt de aanleg van zonnepanelen gestimuleerd. Hoewel zonnepanelen groene stroom opwekken is het ook van belang dat de productie van zonnepanelen ook duurzaam is. Om de verduurzaming van het productieproces van zonnepanelen verder aan te jagen wordt aan het ministerie van Klimaat en Groene Groei geadviseerd om een CO<sub>2</sub>-eis op te nemen voor zonnepanelen.

## CO<sub>2</sub>-eis zinvol

Op basis van dit onderzoek lijkt het zinvol om te sturen op verdere verduurzaming, ondanks dat de CO<sub>2</sub>-voetafdruk van de productie van zonnepanelen de afgelopen jaren aanzienlijk is gedaald. Dit blijkt enerzijds uit het feit dat niet alle (grote) producenten van zonnepanelen al publiekelijk rapporteren over hun duurzaamheidsprestaties (bijvoorbeeld middels een Environmental Product Declaration, ofwel EPD). Zelfs producenten die wel een EPD hebben laten maken voldoen niet altijd aan de CO<sub>2</sub>-grenswaarden van instanties zoals EPEAT of de Franse overheid.

## Keuze voor EPD

De verduurzaming van de productie van zonnepanelen is geen nieuw onderwerp. Diverse overheden – zoals Frankrijk en Zuid-Korea – sturen al langer op de CO<sub>2</sub>-voetafdruk van zonnepanelen. Ook wordt in Europa al langere tijd gewerkt aan een methodiek om de CO<sub>2</sub>-

voetafdruk van zonnepanelen in kaart te brengen in het kader van de Europese ESPR verordening.

In dit onderzoek is gekeken welke (bestaande) methodiek het beste aansluit op de wensen van het ministerie van Klimaat en Groene Groei en RVO. Omdat het werken met EPDs relatief gangbaar is in de markt én omdat het werken met geverifieerde LCA's leidt tot een hoge mate van uitvoerbaarheid voor RVO adviezen wij om te werken met een geverifieerde LCA. Er zijn op dit moment twee bestaande 'Product Category Rules' (PCR) voor zonnepanelen: EPD Norge en EPDItaly. EPD Norge hanteert een, voor RVO, meer bruikbare systeemgrens,

namelijk het zonnepaneel en het frame. Door voor deze systeemgrens te kiezen zijn de EPDs beter vergelijkbaar en daardoor bruikbaar in een regeling zoals de (opvolger) van de SDE++.

EPD Norge maakt gebruik van Wattpiek (Wp) als functionele eenheid. Het gebruik van Wp als functionele eenheid heeft als voordeel dat het zich richt op de fase waar de meeste negatieve CO<sub>2</sub>-impact zit, namelijk de productiefase. Door deze focus krijgen andere belangrijke eigenschappen zoals levensduur en efficiëntie minder aandacht. Dit kan ondervangen worden door additionele eisen op te nemen.

	Versimpelde methodiek	Geverifieerde LCA			
<b>Methodiek</b>	LCA CO <sub>2</sub> -methodiek met vaste, versimpelde regels voor bepaalde berekeningen	Geverifieerde en gestandaardiseerde methodiek op basis van een LCA			
<b>Huidige toepassing</b>	Wordt nu toegepast in Frankrijk bij aanbestedingen, en Path A van EPEAT	Wordt nu toegepast in EPDs en door Path B van EPEAT. De verwachting is dat dit ook wordt opgenomen in EcoDesign.			
<b>Beheerder rekenregels</b>	Franse overheid   EPEAT Path A (leunt op Franse methodiek)	PCR van EPD Norge	EPEAT Path B (leunt op EPD Norge)	PCR van EPD Italy	PEFCR
<b>Systeemgrens</b>	Zonnepaneel   Zonnepaneel + frame	Zonnepaneel, frame, kabels, aansluitdoos	Zonnepaneel + frame	Zonnepaneel-systeem / plant	Zonnepaneel-systeem
<b>Functionele eenheid</b>	Wp	Wp	Wp	kWh	kWh
<b>Grenswaarden</b>	550 kg CO <sub>2</sub> /kWp	-	LC: 630 kg CO <sub>2</sub> /kWp ULC: 400 CO <sub>2</sub> /kWp	-	25 g CO <sub>2</sub> /kWh

Figuur 1 | Overzicht van keuzes tussen de methodieken

---

# Hoofdstuk 1. Aanleiding en doel van het onderzoek

**Zonnepanelen worden wereldwijd gezien als duurzaam product omdat er groene elektriciteit mee opgewekt wordt. Verdere verduurzaming van de productie van zonnepanelen kan een bijdrage leveren aan het verlagen van de mondiale CO<sub>2</sub>-uitstoot.**

## Achtergrond

TKI Urban Energy en RVO werken middels meerjarige innovatieprogramma's aan de energetische verduurzaming van de gebouwde omgeving. Een groot onderdeel van de verduurzaming in de gebouwde omgeving moet komen vanuit de groene elektriciteit van zonnepanelen. Nu is het natuurlijk wel van belang dat de zonnepanelen zélf dan ook op duurzame (en circulaire) wijze worden geproduceerd. Daarom worden er vanuit de overheid verschillende routes verkend om de juiste ontwikkelingen te stimuleren, waaronder het verlagen van de mondiale CO<sub>2</sub>-uitstoot<sup>1</sup>.

## Doel

Om met de (toekomstige) SDE++ regeling, en eventueel andere regelingen, de juiste financiële prikkels af te geven, is de vraag of het zinvol is om onderscheid te maken tussen zonnepanelen met een hoge en lage CO<sub>2</sub> voetafdruk. Hoewel er verschillende controlemechanismen zijn om het onderscheid op CO<sub>2</sub> voetafdruk te maken, is de vraag of deze voldoende

doelmatig, transparant, betrouwbaar, betaalbaar en uitvoerbaar zijn. Het doel van deze studie is dan ook om te komen met een advies over óf de CO<sub>2</sub> voetafdruk meegenomen moet worden in de toekenning van (de opvolger van) de SDE++ regeling, én welke methodiek hiervoor het beste gebruikt kan worden.

Het sturen op enkel CO<sub>2</sub> in de productiefase kent ook potentiële nadelen: hierdoor kan afwenteling plaatsvinden op andere thema's, zoals toxiciteit. Daarom brengen wij in deze studie ook andere impactgebieden in kaart die relevant zijn voor de productie van zonnepanelen, zoals biodiversiteit, toxiciteit (vervuiling), leveringszekerheid, circulariteit en sociale aspecten zoals dwangarbeid.

## Leeswijzer

Allereerst wordt ingegaan op de mogelijke methodologieën die toegepast kunnen worden om bij een subsidie de CO<sub>2</sub> voetafdruk mee te nemen. Aan de hand van vooraf opgestelde criteria wordt hierin een keuze gemaakt. Vervolgens wordt ingegaan op de marktanalyse die kijkt naar de eventuele gevolgen van de toepassing van een dergelijke methodiek, om hiermee antwoord te geven op de vraag of het daadwerkelijk zinvol is om een methodiek toe te passen. Daarna wordt ingegaan op de overige methodieken die toegepast

kunnen worden als verder wordt gekeken dan alleen CO<sub>2</sub>. Op het laatst gaan wij ook nog kort in op het advies dat hieruit volgt.

---

<sup>1</sup> Hiermee bedoelen wij altijd CO<sub>2eq</sub>

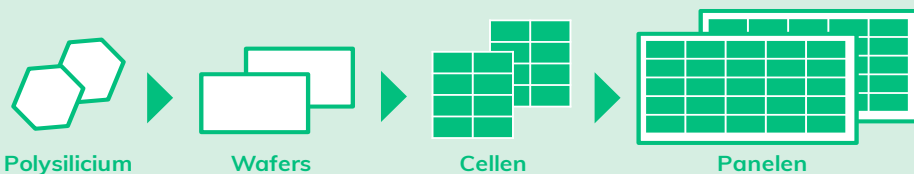
# Context. Het productieproces van zonnepanelen

## De productieketen van zonnepanelen

Het productieproces van zonnepanelen is energie-intensief. De elektriciteitsmix van het productieland is daarom bepalend voor de uitstoot tijdens de productie van zonnepanelen. Met name de productie van polysilicium, het basismateriaal voor zonnepanelen, kost veel elektriciteit.

De emissie-intensiteit van de productie van zonnepanelen is gelukkig sterk gedaald in het afgelopen decennium. Dankzij verbeteringen in materiaal- en energie-efficiëntie en de afname van het gebruik van elektriciteit uit fossiele brandstoffen bij productie is de emissie-intensiteit gedaald met bijna 45%.

China produceert verreweg de meeste zonnepanelen ter wereld, met een marktaandeel van ruim 80% - 90% van de gehele keten tot en met zonnecellen<sup>1</sup>. Hierbij bepaalt de energiemix van China dus in zware mate de mondiale CO<sub>2</sub>-voetafdruk van zonnepanelen.



Figuur 3 | Versimpelde productieketen van zonnepanelen (IEA, 2022)

## Polysilicium

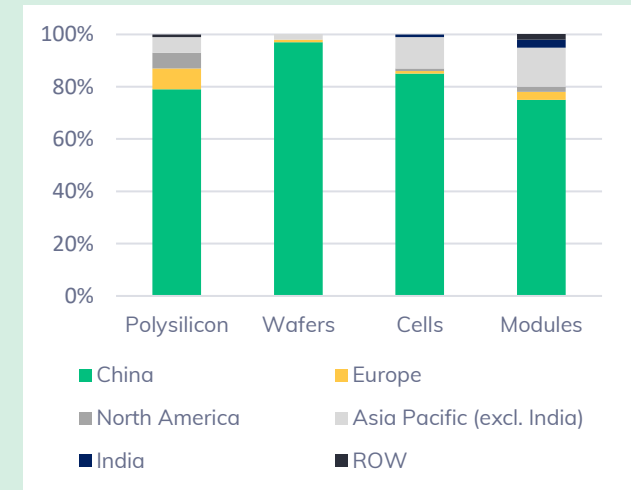
Zonnepanelen worden grotendeels gemaakt van polysilicium; China produceerde in 2021 ongeveer 80% van het polysilicium dat wereldwijd werd gebruikt voor zonnepanelen. Prijzen van met name polysilicium zijn sterk gedaald, met bijna 70% in de periode van 2010-2015. Eerder onderzoek stelt dat dit onder andere komt door het gebruik van goedkope kolen als energiebron, en de inzet van goedkope (dwang)arbeid<sup>2</sup>. Deze lage prijzen hebben ertoe geleid dat producenten in Japan, Korea en de Verenigde Staten hun polysiliciumfabrieken hebben verkleind of gesloten.

## Wafers, cellen en assemblage tot panelen

China heeft een dominante positie in de productie van wafers en cellen, met een marktaandeel van 80%. Deze dominantie is ook zichtbaar bij de assemblage van panelen. Bijna 70% van de wereldwijde assemblage van zonnepanelen vindt namelijk plaats in China.

## Transport

Het transport in de productieketen van zonnepanelen is verantwoordelijk voor slechts 3% van de totale CO<sub>2</sub>-uitstoot in de productieketen van zonnepanelen.



Figuur 2 | Productiecapaciteit van zonnepanelen per land of regio (IEA, 2022)

## Innovaties

Op basis van literatuur en gesprekken met een aantal zonnepaneelproducenten zien we dat er innovatiepotentieel is voor het verlagen van de CO<sub>2</sub>-voetafdruk van zonnepanelen. Mogelijkheden zijn:

- Het gebruik van gerecycled staal i.p.v. aluminium voor het frame;
- Het toepassen van gerecycled solar glas;
- Het dunner maken van de wafer;
- Het verlagen van de hoeveelheid zilver;
- Het opwekken van (eigen) groene stroom.

# Hoofdstuk 2. Methodiek CO<sub>2</sub> voetafdruk zonnepanelen

Om de CO<sub>2</sub>-voetafdruk van zonnepanelen in kaart te brengen worden wereldwijd verschillende methodieken gebruikt. Dit onderzoek laat zien dat een geverifieerde LCA het beste aansluit op de wensen van RVO met betrekking tot onder andere uitvoerbaarheid. Deze methodiek is daarnaast ook toekomstbestendig met oog op aankomende Europese richtlijnen.

Dit onderzoek richt zich primair op welke rekenmethodiek gehanteerd kan worden om de CO<sub>2</sub>-voetafdruk van zonnepanelen te beoordelen binnen diverse subsidieregelingen (waaronder de SDE++).

Verschiede overwegingen, zoals de te hanteren rekenregels, de systeemgrens en de functionele eenheid, zijn verbonden aan de uiteindelijke methodieke keuze.

Deze overwegingen worden in dit hoofdstuk in meer detail besproken. Eerst beschrijven we de methodieken zelf, als fundament voor de overige overwegingen, zoals ook te zien is in Figuur 4.

Voor het kiezen van een geschikte beoordelingsmethodiek kijken wij naar wat de mogelijkheden nu zijn, en in hoeverre deze mogelijkheden voldoen aan de vooraf vastgestelde criteria (zie de toelichting op de volgende pagina). Tegelijkertijd zien wij ook dat er veel ontwikkelingen zijn op Europees niveau (zie Bijlage 2), waaronder de Ecodesign for Sustainable Products Regulation (ESPR). Het is ook belangrijk om aansluiting te vinden bij Europese ontwikkelingen om de methodiek die in Nederland wordt gebruikt zo toekomstbestendig mogelijk in te richten.

## De methodieken

Er bestaan verschillende methodieken voor het bepalen van de CO<sub>2</sub>-voetafdruk van zonnepanelen, waaronder:

- 1. Versimpelde methodiek:** LCA-methodiek met vaste, versimpelde regels voor bepaalde berekeningen;
- 2. Geverifieerde LCA** (bijv. EPD): Geverifieerde en gestandaardiseerde methodiek op basis van de LCA.

	Versimpelde methodiek	Geverifieerde LCA						
Methodiek	LCA CO <sub>2</sub> -methodiek met vaste, versimpelde regels voor bepaalde berekeningen	Geverifieerde en gestandaardiseerde methodiek op basis van een LCA						
Huidige toepassing	Wordt nu toegepast in Frankrijk bij aanbestedingen, en Path A van EPEAT	Wordt nu toegepast in EPDs en door Path B van EPEAT. De verwachting is dat dit ook wordt opgenomen in EcoDesign.						
Beheerder rekenregels	<table border="0"> <tr> <td>Franse overheid</td> <td>EPEAT Path A (leunt op Franse methodiek)</td> </tr> </table>	Franse overheid	EPEAT Path A (leunt op Franse methodiek)	<table border="0"> <tr> <td>PCR van EPD Norge</td> <td>EPEAT Path B (leunt op EPD Norge)</td> <td>PCR van EPD Italy</td> <td>PEFCR</td> </tr> </table>	PCR van EPD Norge	EPEAT Path B (leunt op EPD Norge)	PCR van EPD Italy	PEFCR
Franse overheid	EPEAT Path A (leunt op Franse methodiek)							
PCR van EPD Norge	EPEAT Path B (leunt op EPD Norge)	PCR van EPD Italy	PEFCR					
Systeemgrens	<table border="0"> <tr> <td>Zonnepaneel</td> <td>Zonnepaneel + frame</td> </tr> </table>	Zonnepaneel	Zonnepaneel + frame	<table border="0"> <tr> <td>Zonnepaneel, frame, kabels, aansluitdoos</td> <td>Zonnepaneel + frame</td> <td>Zonnepaneel-systeem / plant</td> <td>Zonnepaneel-systeem</td> </tr> </table>	Zonnepaneel, frame, kabels, aansluitdoos	Zonnepaneel + frame	Zonnepaneel-systeem / plant	Zonnepaneel-systeem
Zonnepaneel	Zonnepaneel + frame							
Zonnepaneel, frame, kabels, aansluitdoos	Zonnepaneel + frame	Zonnepaneel-systeem / plant	Zonnepaneel-systeem					
Functionele eenheid	Wp	<table border="0"> <tr> <td>Wp</td> <td>Wp</td> <td>kWh</td> <td>kWh</td> </tr> </table>	Wp	Wp	kWh	kWh		
Wp	Wp	kWh	kWh					
Grenswaarden	<table border="0"> <tr> <td>550 kg CO<sub>2</sub> /kWp</td> <td>LC: 630 kg CO<sub>2</sub>/kWp ULC: 400 CO<sub>2</sub>/kWp</td> </tr> </table>	550 kg CO <sub>2</sub> /kWp	LC: 630 kg CO <sub>2</sub> /kWp ULC: 400 CO <sub>2</sub> /kWp	<table border="0"> <tr> <td>-</td> <td>LC: 630 kg CO<sub>2</sub>/kWp ULC: 400 CO<sub>2</sub>/kWp</td> <td>-</td> <td>25 g CO<sub>2</sub> /kWh</td> </tr> </table>	-	LC: 630 kg CO <sub>2</sub> /kWp ULC: 400 CO <sub>2</sub> /kWp	-	25 g CO <sub>2</sub> /kWh
550 kg CO <sub>2</sub> /kWp	LC: 630 kg CO <sub>2</sub> /kWp ULC: 400 CO <sub>2</sub> /kWp							
-	LC: 630 kg CO <sub>2</sub> /kWp ULC: 400 CO <sub>2</sub> /kWp	-	25 g CO <sub>2</sub> /kWh					

Figuur 4 | Kiezen voor een methodologie: de verschillende opties

## Toelichting | Definities van de criteria

De volgende criteria worden in dit onderzoek gebruikt om de verschillende methodieken met elkaar te vergelijken om tot een (eind)oordeel te komen:

**Doelmatigheid:** Sluit de methodiek voldoende aan bij het doel van de regeling (het verlagen van CO<sub>2</sub> uitstoot)?

**Uitvoerbaarheid:** Is het toevoegen van de methodiek in het subsidieproces uitvoerbaar voor de uitvoeringsorganisatie (RVO in het geval van SDE++) die de subsidieaanvragen beoordeelt? – dit is een expliciete randvoorwaarde.

**Betrouwbaarheid:** Hoe betrouwbaar is de methodiek en de achterliggende data (en hiermee de bijbehorende uitkomsten) voor de beoordeling van de panelen?

**Transparantie:** Hoe transparant is de methodiek en de input die hierin nodig is?

**Betaalbaarheid:** Is de methodiek voldoende betaalbaar voor producenten?<sup>ii</sup>

De verschillende methodieken worden hierna toegelicht, inclusief de bijbehorende overwegingen.

In Nederland is er op dit moment geen sprake van dat RVO eventuele verificatie kan uitbesteden aan een derde partij. In Frankrijk, waar gebruik wordt gemaakt van de 'Versimpelde methodiek' is de verificatie bijvoorbeeld

extern belegd bij Certisolis. Ook zijn de middelen (tijd, expertise, geld) binnen RVO beperkt om een verificatie zelf te doen. Om de verificatie behapbaar te maken voor RVO moet deze redelijk eenvoudig zijn – en dus weinig tijd kosten en geen speciale expertise vergen.

Op basis van de randvoorwaarde uitvoerbaarheid valt de versimpelde methodiek daarom af.

## Versimpelde methodiek

<b>Doelmatig</b>	+/-
<b>Uitvoerbaar</b>	-
<b>Betrouwbaar</b>	++
<b>Transparant</b>	+
<b>Betaalbaar</b>	+/-

**Conclusie:** Door de verhoogde mate van uitvoeringsinspanning bij deze methodiek, kan niet worden voldaan aan de randvoorwaarde uitvoerbaarheid

### Huidige toepassing en beheerder rekenregels

In Frankrijk wordt voor aanbestedingen de Versimpelde Carbon Voetafdruk Methodiek (Évaluation Carbone Simplifiée, ECS) toegepast. De ECS heeft als doel de milieu-impact van de gebruikte zonnepanelen te beoordelen door de broeikasgasemissies te berekenen die gepaard gaan met de productie van de zonnepanelen. De ECS richt zich specifiek op de

productiefase van de zonnepanelen, van de grondstoffen tot de fabricage van het eindproduct. Andere fasen, zoals transport, installatie, gebruik en einde levensduur, worden niet meegenomen in de ECS. In Zuid-Korea wordt – in navolging van Frankrijk – een soortgelijke methodiek gehanteerd, met als enige uitzondering een andere systeemgrens.

Ook EPEAT (zie Bijlage 1 voor meer informatie), een vrijwillig, wereldwijd ecolabel dat wordt beheerd door de Global Electronics Council (GEC) gevestigd in de Verenigde Staten, hanteert een variant op deze methode in haar 'Path A'.

### Systeemgrens, functionele eenheid en rekenmethode

De ECS is een "cradle-to-gate" beoordeling die zich richt op de productie van het zonnepaneel zelf<sup>3</sup>. De functionele eenheid van deze methodiek (i.e. in welke eenheid de resultaten worden weergegeven) is Wattpiek (Wp). Hierbij worden 2 soorten gegevens verzameld:

- Het gewicht (kg) van de gebruikte materialen per Wp (inclusief standaard waardes voor verliezen die voorkomen bij het productieproces);
- De locatie van productie van deze materialen, waarbij voor verschillende productiestappen verschillende locaties kunnen worden opgegeven.

De carbon footprint wordt vervolgens bepaald door een standaardwaarde voor emissies die zijn toegekend aan

<sup>ii</sup> Dit is een inschatting op basis van de gehouden interviews



productie van een (sub)component op de opgegeven locatie, te vermenigvuldigen met de materialisatie (de hoeveelheid en het type materialen die worden gebruikt in de productie van zonnepanelen).

De systeemgrens die in Frankrijk wordt gehanteerd, is die van het zonnepaneel zelf. Zowel de Zuid-Koreaanse methodiek als EPEAT hanteren een andere systeemgrens, namelijk die van het zonnepaneel inclusief het frame.

#### Een versimpeld\* rekenvoorbeeld van de ECS

In Duitsland is de vaste waarde 44,59 kg CO<sub>2</sub> per kilogram polysilicium. In China is dit 75,21 en in Noorwegen 13,54. Stel dat een producent uit alle drie de landen polysilicium haalt, met een verdeling van [33%, 33%, 33%]. Om de carbon footprint te berekenen wordt dan het gewicht (bijvoorbeeld 3kg, 1 kg uit elk land) van het ingekochte polysilicium vermenigvuldigd met de verdeling waar het vandaan komt, keer de respectievelijke carbon voetafdruk van dat land. In dit geval dus:

$$33\% * 1 * 44,59 + 33\% * 1 * 75,21 + 33\% * 1 * 13,54 = 44 \text{ kg CO}_2$$

Dit wordt voor ieder element van een zonnepaneel uitgerekend en bij elkaar opgeteld om te komen tot de carbon footprint van het paneel.

\* In dit voorbeeld zijn andere standaardwaardes zoals verliezen niet meegenomen

#### Voor- en nadelen van de methodiek

De twee gegevensvariabelen waar producenten zich mee kunnen differentiëren zijn de materialisatie en de productielocatie. Hierdoor zullen ze zich richten op efficiëntere processen in materiaalgebruik, zodat er minder materiaal in hoeft per Wp (bijvoorbeeld minder silicium) en op de keuze voor leveranciers die in landen met een lage CO<sub>2</sub>-intensiteit produceren.

Deze methodiek stimuleert producenten daarom minder om op de eigen (specifieke) locatie te verduurzamen, aangezien dit geen voordeel oplevert. Dit geldt voor zaken zoals energie-efficiëntie, inzet van hernieuwbare energie, en het verminderen van verliezen in materiaalgebruik. Daarnaast wordt alles buiten de productiefase (transport en meer) niet meegenomen.

Deze systematiek vraagt meer van de uitvoeringsinstantie, omdat de systematiek alleen richting geeft over hoe de berekeningen moeten worden gedaan. Er is geen (externe) verificatie van de berekeningen en er is ook geen certificeringsschema dat gekoppeld is aan deze methodiek. Dat betekent dat de uitvoeringsinstantie zelf deze verificatie zou moeten uitvoeren en daar voldoende kennis en capaciteit voor in huis moet hebben. Deze methodiek valt af vanwege de uitvoerbaarheid.

#### Geverifieerde LCA

Doelmatig	+
Uitvoerbaar	+
Betrouwbaar	+
Transparant	+/-
Betaalbaar	+/-

**Conclusie:** ondanks een gematigde score op de betaalbaarheid en transparantie, is dit de methode die op de meeste aspecten positief scoort.

#### Huidige toepassing

Life Cycle Assessments (LCAs) worden toegepast om de milieu-impact van producten of diensten in kaart te brengen over de gehele levenscyclus. Verschillende methodieken (EPD, EPEAT (Path B) en PEFCR) gebruiken (een versimpelde vorm van) de LCA-methodiek als basis.

In de basis worden LCA's minder snel openbaar gedeeld omdat deze ook bedrijfssensitieve informatie kunnen bevatten. In een LCA wordt namelijk op materiaalniveau gerapporteerd. In een geverifieerde LCA – zoals een EPD, bij en ecolabel zoals EPEAT of voor de PEFCR – wordt op elementniveau gerapporteerd waardoor deze bedrijfssensitieve informatie niet meer aanwezig is. Bovengenoemde methodieken worden hieronder nader toegelicht.

### Environmental Product Declaration (EPD)

Een EPD is een wereldwijde standaard om de milieupact van producten met elkaar te kunnen vergelijken<sup>4</sup>. Voor bouw-gerelateerde producten, waar zonnepanelen vaak onder worden geschaard, worden de EPDs vaak opgesteld op basis van het EN:15804+A2 standaard. De analyse wordt gedaan voor de gehele levenscyclus door middel van een LCA en vervolgens wordt dit onafhankelijk getoetst door een derde partij. De toetsing richt zich vooral op het proces (i.e. zijn alle formele stappen van de EPD voldoende uitgevoerd). Hoewel ingevoerde gegevens wel worden gecheckt op validiteit, wordt dat niet altijd grondig gedaan. Dit is vaak ook lastig, gezien de lange ketens die gemoeid zijn met de productie van zonnepanelen Uiteindelijk is, na verificatie, de specifieke EPD-registratie publiekelijk inzichtelijk.

Ook bij EPEAT 'Path B' kan een producent eigen data opvoeren. De producent in kwestie doet dat middels het aanleveren van een LCA die vervolgens door een derde partij wordt geverifieerd. Hier worden nog een aantal extra vereisten aan toegevoegd voor de optionele Ultra Low Carbon Solar criterium, zoals dat ingekochte hernieuwbare energie maar voor 25% verandering mag aanbrengen bij elektriciteit emissiefactoren en dat bepaalde certificaten moeten worden aangeleverd voor claims omtrent ingekochte hernieuwbare energie (zie ook pagina 13).

Als laatst maakt de Product Environmental Footprint (PEF<sup>5</sup>) – een methodiek die door de Europese Commissie is ontwikkeld – ook gebruik van LCA als basis om de

ecologische impact van producten te berekenen<sup>6</sup>. De opgestelde regels heten ook wel PEFCR, Product Environmental Footprint Category Rules. Voor zonnepanelen wordt deze methodiek nu verder uitgewerkt onder de ESPR met de naam 'ecodesign requirements'<sup>10</sup>. Uit de eerste concepten blijkt dat wordt voorgesteld dat verschillende variabelen vast worden gelegd (zoals % degradatie per jaar of aantal zonnepanelen) of dat er met specifieke bewijzen gewerkt moet worden. Daarnaast wordt het elektriciteitsverbruik tijdens de productie meegenomen op basis van de leverancier-specifieke gegevens. Als dit niet mogelijk is, wordt het landelijk gemiddelde gebruikt. Let op; Deze informatie komt allemaal uit een concept uit 2022. In 2024 zou een nieuw concept worden gedeeld. Dit is tot op heden niet (openbaar) gebeurd.

### Beheerder rekenregels

De regels voor een EPD kunnen per productcategorie verder gespecificeerd zijn in de *Product Category Rules* (PCR). Een PCR voor zonnepanelen is een set aan regels die voor het ontwikkelen van een EPD voor deze productgroep. Naast dat er een functionele eenheid en systeemgrens worden voorgeschreven, stelt deze PCR meer eisen ten aanzien van wat er berekend moet worden, zoals:

- Welke onderdelen van een zonnepaneel systeem worden meegenomen in de berekening (zonnepaneel, frame, omvormer, etc.);
- Wat er in iedere levenscyclusfase van een zonnepaneel beschreven of berekend moet worden

- Of er in de gebruiksfase specifiek voor zonnepanelen rekening moet worden gehouden met watergebruik voor het schoonmaken van panelen.

Bij zonnepanelen leidt dit tot twee varianten op basis van PCRs: EPDI<sup>7</sup> en EPD Norge<sup>8</sup>. Iedere PCR heeft een andere set aan regels gekozen, wat effect heeft op hoe resultaten worden gerepresenteerd en wat daar wel en niet in zit. Op de twee pagina's hierna worden de mogelijke PCRs nader besproken.

### Conclusie keuze voor methodiek

De versimpelde methodiek en de eisenlijst zijn op basis van de randvoorwaarde uitvoerbaarheid geen optie. Van de 'Geverifieerde LCA' methodiek is de EPD praktisch het beste toepasbaar (ten opzichte van EPEAT). Dit heeft een aantal redenen:

1. EPEAT is een certificeringschema waarin – naast de carbon footprint – ook andere (duurzaamheids)eisen worden gesteld waar een producent aan moet voldoen. Dit zien wij wel als van toegevoegde waarde, alhoewel dit de scope breder trekt dan de originele vraag – het sturen op CO<sub>2</sub>-reductie. Wanneer er niet wordt aangesloten bij EPEAT zou de verificatie van deze aanvullende eisen bij RVO komen te liggen, wat niet ten goede komt aan de uitvoerbaarheid.
2. Het certificeren voor EPEAT brengt boven op het uitvoeren van een LCA aanvullende kosten met zich mee voor marktpartijen; daarnaast wordt een product maar voor een periode van één jaar opgenomen in het EPEAT-register alvorens het

product opnieuw gecertificeerd moet worden. De meerkosten zijn voor een EPD beperkt, ook is een EPD voor een periode van vijf jaar geldig.

3. De ESPR-uitwerking voor zonnepanelen (PEFCR) is nog in ontwikkeling, zonder zekerheid over de tijdlijn. Volgens de huidige tijdlijn zou dit in 2024 goedgekeurd worden door de commissie<sup>9</sup>. Daarom adviseren we om tot de tijd dat de ESPR wordt geïmplementeerd de EPD te hanteren als methodiek, ook omdat deze methodiek in Europa meer gangbaar is dan EPEAT.

Omdat uitvoerbaarheid als belangrijke factor wordt gezien, en de EPD methodiek voldoende doelmatig wordt geacht, is ervoor gekozen om deze methode verder uit te werken.

Bij de keuze voor de methodiek van een EPD, moet vervolgens gekozen worden voor een toepasselijke PCR, in afwachting van de Europese PEFCR. Op het moment is dat voor zonnepanelen de PCR van EPD Norge en EPDIItaly. De uitwerking hiervan is te vinden op pagina 11 en 12.

### **Keuze voor een specifieke PCR: EPD Norge met aanvullende eisen**

Er wordt geadviseerd om tot het uitkomen van de ESPR de PCR van EPD Norge aan te houden, met aanvullende eisen. Hoewel een methodiek die leunt op kWh als functionele eenheid onze voorkeur heeft (EPDIItaly) vanwege (i) het sturen op minder CO<sub>2</sub> per opgewekte elektriciteit en (ii) de toekomstbestendigheid in het kader

van aankomende ESPR (PEFCR); adviseren we toch om momenteel te kiezen voor EPD Norge. De vrije invulling van een deel van EPDIItaly maakt de toegankelijkheid van de methode lager (zowel in uitvoerbaarheid als vergelijkbaarheid). Daarnaast heeft de PCR van EPDIItaly een lage vergelijkbaarheid, omdat deze zich richt op zonneparken en hierdoor vrijheid geeft in de systeemgrenzen die gehanteerd kunnen worden. Daarom wordt geadviseerd om nu te kiezen voor Wp, op basis van de PCR van EPD Norge.

Bij voorkeur worden er bij de subsidieaanvraag aanvullende eisen opgenomen om de onvolkomenheden van EPD Norge – en daarmee de keuze voor Wp – te overbruggen:

1. Eisen rondom de gebruiksfase zoals degradatie, efficiëntie en verliezen van het systeem. Deze variabelen worden al aangeleverd voor EPD Norge en kunnen daarom vanuit dezelfde verklaring worden aangeleverd als de CO<sub>2</sub>-eis;
2. Additioneel kan er een eis worden neergelegd rondom de productgarantie. Dit zit niet standaard in de EPD, maar wordt wel altijd meegegeven bij het op de markt brengen van een product of is inzichtelijk via certificeringen.

Het toevoegen van deze variabelen kan meer vragen van de uitvoeringsinstantie bij verificatie. Maar met de voorgestelde additionele eisen blijft dit beperkt, omdat het grotendeels binnen de PCR past en er voor productgaranties bestaande certificeringen zijn.

### **Slotopmerking keuze methodiek**

Ondanks het advies om voor EPD Norge te kiezen, moeten de Europese ontwikkelingen goed in de gaten gehouden worden. Zodra er een Europese methodologie bestaat, die voldoet aan de criteria van de overheid, wordt geadviseerd deze methodologie te volgen.

# Geverifieerde LCA. EPD Norge

EPD Norge is een instantie die een PCR heeft samengesteld voor zonnepanelen. De PCR heet 'EPD-Norge: NPCR 029 v.1.1 Part B for photovoltaic modules used in the building and construction industry, including production of cell, wafer, ingot block, solar grade silicon, solar substrates, solar superstrates and other solar grade semiconductor materials'<sup>8</sup>.

## Systeemgrens

De PCR van EPD Norge kijkt naar het zonnepaneel, het frame, de kabels en de aansluitdoos.

## Functionele eenheid

EPD Norge heeft de PCR ingericht op basis van Wattpiek (Wp) als functionele eenheid. Het vermogen in 'Wp' is de maximale output van een systeem onder ideale omstandigheden. Door de massa CO<sub>2</sub>-uitstoot in kilogram per (k)Wp te bepalen, wordt het mogelijk om panelen met verschillende maximale vermogens te vergelijken. Door deze functionele eenheid te gebruiken, wordt het volgende (met name) gestimuleerd:

- Het materiaalgebruik en de uitstoot hiervan minimaliseren (materialen met een lage materiaalgebonden CO<sub>2</sub>),
- Het verbeteren van de technologie van de het productieproces m.b.t. energieverbruik (productieprocessen met laag energieverbruik zoals FBR of gebruik van groene stroom)

- De technologie van het paneel zelf (bijvoorbeeld panelen met lagere footprint per Wp zoals dunne film)

## Voor- en nadelen

Een PCR op basis van Wp focust op de fase waar de meeste negatieve impact zit, namelijk de productiefase van een zonnepaneel (en end-of-life). Ook voorkomt het onzekerheden van het meenemen van de opbrengsten in de gebruiksfase (zie voor een toelichting de volgende pagina 'EPDItaly'). Echter, doordat de focus alleen op de productiefase ligt, worden producenten aangestuurd op het gebruiken van schone energie in productie en niet op de kwaliteit (bijvoorbeeld levensduur en efficiëntie) van de panelen zelf. Dit stimuleert daarmee een focus op de korte termijn reductie van CO<sub>2</sub>-uitstoot, zonder de positieve effecten op lange termijn te optimaliseren, zoals verbeterde levensduur, minimale degradatie en betere efficiëntie van de zonnepanelen. Daartegenover staat dat de methode betrouwbaarder is dan wanneer de gebruiksfase wel wordt meegenomen, doordat de opbrengst in de gebruiksfase nog in de toekomst ligt en dus onzekere schattingen vereisen.

Om de nadelen te ondervangen, kunnen extra eisen gesteld worden die al bekend zijn. Zie hiervoor pagina 10.

## Het verschil tussen methodologieën die Wp hanteren | EPEAT, Noorse PCR en ECS<sup>i</sup>

### EPEAT en Franse ECS

De gehanteerde berekenmethode van EPEAT en de Franse ECS kennen sterke overeenkomsten (met name 'Path A' van EPEAT), maar verschillen in bepaalde eisen omtrent scope en methodologische keuzes. De belangrijkste verschillen zijn de grenswaardes (zie hoofdstuk 3) en scope van de methodiek, waarbij EPEAT wel het frame meeneemt en het Franse ECS dat niet doet.

### EPEAT en Noorse PCR (EPD Norge)

'Path B' van EPEAT volgt de route van de Noorse PCR, en bouwt daar ook op voort. Het grootste verschil tussen EPEAT en de Noorse PCR, is dat er additionele vereisten worden gesteld door EPEAT omtrent input data en dat – wellicht belangrijker – enkel de productiefase (fase A) wordt meegenomen, t.o.v. fase A t/m D (productie t/m end-of-life) voor de Noorse PCR.

Naast de carbon footprint worden er door EPEAT ook andere eisen gesteld, al dan niet optioneel. Deze additionele vereisten zijn met name gericht op het:

- Stimuleren van duurzamer energieverbruik;
- Reduceren van materiaal & levenscyclus emissies;
- Betere end-of-life en beschikbaarheid van secundaire grondstoffen;
- Beperken van toxische stoffen.

# Geverifieerde LCA. EPDItaly

EPDItaly is een instantie die een PCR heeft samengesteld voor zonnepanelen. De PCR heet 'EPDItaly 014 – Photovoltaic modules'<sup>7</sup>.

## Systeemgrens

De PCR van EPDItaly hanteert als systeemgrens het gehele zonnestelsel. Dit betekent concreet: paneel, frame en omvormer. Daarnaast kunnen andere elementen optioneel meegenomen worden in de berekening, zoals kabels en transformatoren voor de opgewekte elektriciteit. Dit geeft vrijheid in de invulling van de systeemgrens, waardoor ieder uniek zonnepark zich goed kan representeren. Dit leidt er echter wel toe dat de onderlinge vergelijkbaarheid lager is dan gewenst omdat de EPDs vaak locatie specifiek worden gemaakt.

## Functionele eenheid

EPDItaly gebruikt kWh als functionele eenheid. Met een methodiek op basis van kWh wordt de verwachte hoeveelheid door het zonnestelsel opgewekte energie bepaald. Door de massa vrijgekomen CO<sub>2</sub>-equivalenten af te zetten tegen deze (in de toekomst) op te wekken energie, krijg je een methodologie die de CO<sub>2</sub>-efficiëntie aangeeft ten opzichte van het beoogde product, namelijk schone elektriciteit. Door deze functionele eenheid te gebruiken wordt de functie van het paneel – het opwekken van energie – meer centraal gesteld.

Daardoor heeft, naast de productiefase ook de verwachte energieproductie in de gebruiksfase een bepalend effect voor de uitkomsten. Echter worden er ook aannames gedaan (die niet zijn voorgeschreven), zoals de zonuren en -straling, waardoor de vergelijkbaarheid omlaaggaat.

## Voor- en nadelen

Doordat er minder wordt voorgeschreven, is er meer vrijheid in de keuzes tijdens het invullen van de EPD. Hierdoor gaat de vergelijkbaarheid omlaag. EPDItaly omschrijft dit zelf ook "EPD's op basis van deze PCR kunnen alleen met elkaar worden vergeleken als meerdere fotovoltaïsche modules of zonneparken duidelijke overeenkomsten vertonen."<sup>iii</sup>

Ook de betrouwbaarheid is lager als er niet voldoende capaciteit is om de resultaten te checken. Er kunnen immers gunstige factoren gekozen worden om de uitkomst te verbeteren. Als oplossing kunnen meer eisen worden voorgeschreven, maar dit betekent dat producenten hun EPD niet meer elders kunnen gebruiken (want daar gelden deze nieuwe eisen niet), wat betaalbaarheid en standaardisatie niet goed doen.

Het kiezen voor kWh heeft zowel voor- als nadelen. Zoals toegelicht, richt deze methode zich op de gehele

levenscyclus, waardoor ook de opbrengst, (theoretische) levensduur en end-of-life van de panelen wordt meegewogen. Door hierop te sturen kan de uitstoot per functionele eenheid (kWh) het best omlaag gebracht worden, en het biedt ruimte voor eerlijke vergelijking met andere energiesystemen (zoals wind). Tegelijkertijd is de eigenlijke energieopwekking sterk afhankelijk van een aantal factoren, zoals: schaduw, levensduur, aantal zonne-uren en degradatie.

Om deze factoren juist mee te kunnen nemen is er vaak wel een (theoretische) methode of standaardwaarde. Zo is er een standaardfactor voor zonne-uren in Nederland (1000 kWh/m<sup>2</sup>)<sup>1</sup> en degradatie (0.7%)<sup>2</sup>, maar dit gaat ten koste van onderlinge differentieerbaarheid. Als de eerdergenoemde onzekerheden zijn ondervangen geeft de kWh-methode een vollediger beeld van de (zowel positieve als negatieve) impact van een zonnepaneel. Een bijkomend nadeel is dat de PCR van EPDItaly geen energieberekening voorschrijft, wat nogmaals de vergelijkbaarheid verlaagt.

## Overeenkomst tussen EPDItaly en ESPR (PEFCR)

Zowel EPDItaly als de ESPR (PEFCR) voor zonnepanelen gebruik kWh als functionele eenheid.

<sup>iii</sup> PCR EPDItaly014 – Photovoltaic modules p.10

## Belangrijke overwegingen bij de herkomst van de data

Naast de gehanteerde methodiek is het ook belangrijk naar de herkomst van de data te kijken. Zowel bij de betrouwbaarheid van de data, als bij de voor te schrijven elektriciteitsmix zijn verschillende mogelijkheden. Hieronder worden deze mogelijkheden uiteengezet.

### Betrouwbaarheid van data

De gegevens die worden aangeleverd in de EPDs kunnen op twee manieren ingevuld worden:

- **Primaire data:** Primaire gegevens zijn gegevens die specifiek voor het product zijn en rechtstreeks van de fabrikant of leverancier komen. Dit type data is daarmee het meest accuraat. Nadeel is dat het lastig is om deze gegevens te verifiëren.
- **Secundaire data:** Als er geen primaire data beschikbaar is, wordt er vaak gerekend met data uit internationale databases, zoals Ecolinvent of Gabi. Het onderscheidend vermogen van de producenten wordt hierdoor kleiner. De actualiteit van de gegevens – die soms jaren oud kunnen zijn - is daarnaast ook van invloed op de betrouwbaarheid van de uitkomsten.

Door een maximum CO<sub>2</sub>-voetafdruk in te stellen stimuleer je dat producenten die beter presteren dan het marktgemiddelde o.b.v. de databases meer met primaire data gaan werken. Voor producenten die minder presteren dan het marktgemiddelde geldt dat zij een prikkel hebben om gunstige aannames te maken.

Hiervoor is het van belang dat er duidelijke afspraken worden gemaakt over systeemgrenzen, en welke gegevens wel en niet mogen worden gebruikt. Dat staat in de PCR. Een voorbeeld hiervan is het gebruik van hernieuwbare energie in de productiefase, wat hieronder wordt toegelicht.

Hiernaast is ook de verificatiestap van belang. Er zijn verschillende instanties die 'erkend' zijn om verificaties voor EPDs te doen (zie [deze lijst](#)). Ook zijn er instanties specifiek aan EPD Norge gekoppeld (zie [deze lijst](#)).

### Voorschrijven van de elektriciteitsmix

De elektriciteitsmix is bepalend is voor de CO<sub>2</sub>-voetafdruk van zonnepanelen. Door de methodieken worden er verschillende aanpakken voorgeschreven om de uitstoot van de elektriciteitsmix mee te nemen. Deze gaan met name in op het gebruik van (ingekochte) hernieuwbare energie. Een belangrijke discussie is hoe Garanties van Oorsprong (GVO's) meegenomen kunnen worden in de CO<sub>2</sub>-methodiek.

De verschillende manieren waarop de methodieken (EPD, EPEAT en PEFCR) omgaan met de gerapporteerde elektriciteitsmix bij producenten zijn hieronder beschreven:

- Bij EPD Norge moet de nationale elektriciteitsmix worden gebruikt van het land waarin de (sub)componenten worden geproduceerd. GVO's bij inkoop van hernieuwbare energie mogen niet direct worden meegenomen in de resultaten. Wel mogen

deze apart worden gerapporteerd onder het hoofdstuk 'additionele ecologische informatie'.

- Bij EPDItaly wordt producent-specifieke energiemixen wel toegestaan, inclusief het gebruik van GVO's zolang bewijs is overhandigd van deze certificaten. Daarnaast schrijft het een 'residual mix' aanpak voor, wat als doel heeft om dubbelstellingen door GVO's te voorkomen.
- Bij EPEAT wordt er meer gestuurd op verificatie via 'Energy Attribute Certificates (EACs)'. Alleen voor de optionele Ultra Low Carbon Solar worden additionele eisen gesteld, zoals dat de gebruikte emissiefactor voor elektriciteit maar voor 25% gereduceerd kan worden door de inkoop van hernieuwbare energie.
- Bij de conceptversie van de PEFCR voor zonnepanelen (via de ESPR) wordt gesproken over het meenemen van het elektriciteitsverbruik tijdens de productie van zonnepanelen op basis van de leverancier-specifieke gegevens.

# Hoofdstuk 3. Effectiviteit van de methodologie

**Het sturen op de CO<sub>2</sub>-voetafdruk van zonnepanelen is nog steeds zinvol om de verdere verduurzaming van het productieproces van zonnepanelen aan te jagen. Dit onderzoek laat zien dat niet alle grote producenten van zonnepanelen al werken met EPDs, noch dat zij de bestaande grenswaarden van EPEAT en de Franse overheid halen.**

Naast de vraag welke methodiek gehanteerd kan worden, is het ook belangrijk te blijven kijken naar wat het effect van een dergelijke methodiek is, en of het zinvol is om een CO<sub>2</sub>-voetafdruk mee te nemen in de beoordeling van een subsidie om de totale mondiale CO<sub>2</sub> uitstoot omlaag te brengen.

Om deze vraag te is een marktanalyse gedaan van beschikbare EPDs. Deze marktanalyse laat zien dat niet alle (grote) producenten in het bezit zijn van een EPD. Er vanuit gaande dat marktpartijen die een EPD hebben al bezig zijn om de productie van hun zonnepanelen te verduurzamen kunnen we stellen dat er nog veel verbeterpotentieel ligt in de markt. Dit beeld wordt bevestigd doordat de gevonden EPDs van zonnepanelen ook niet allemaal voldoen aan de bestaande grenswaardes (Frankrijk, EPEAT). Tot slot is ook een berekening gemaakt voor de CO<sub>2</sub>-terugverdientijd (CO<sub>2</sub>-TVT) van de zonnepanelen waarvoor EPDs zijn gevonden. Op basis van deze berekeningen zien we dat de CO<sub>2</sub>-TVT van de panelen

tussen de 2 en 7 jaar ligt. Het is aannemelijk dat de gebruikte EPD's de top van de markt vertegenwoordigen, en dat de gemiddelde CO<sub>2</sub>-TVT dus langer zal zijn. Het sturen op CO<sub>2</sub>-voetafdruk lijkt dus zinvol om een aanvullende prikkel in te bouwen voor marktpartijen om de 'investering' in CO<sub>2</sub>-voetafdruk te verlagen.

## Grenswaarden

Welke grenswaarde gehanteerd gaat worden is een belangrijke keuze. Dit onderzoek schetst alleen de effecten van bestaande gehanteerde grenswaarden, maar doet geen aanbeveling welke gehanteerd moet gaan worden.

Binnen een subsidieaanvraag bepaalt een grenswaarde voor de CO<sub>2</sub>-voetafdruk van het paneel of de aanvraag wel of niet wordt goedgekeurd. De grenswaardes verschillen per functionele eenheid die gekozen kan worden (Wp of kWh), en zijn ook afhankelijk van de systeemgrens.

Hoewel dit onderzoek geen uitspraken doet over een gewenste grenswaarde, wordt hierna wel aangegeven welke grenswaardes worden gehanteerd door andere initiatieven; ook laten we zien welke panelen die verschillende grenswaardes kunnen halen.

## De grenswaarde voor kg CO<sub>2</sub> per kWp

Voor kWp worden anno 2024 verschillende grenswaardes gehanteerd door verschillende methodieken. Deze worden echter bij beide methodieken mogelijk binnenkort aangepast. Momenteel is de situatie:

Bij het EPEAT certificaat zijn er twee categorieën:

- Ultra Low: 400 kg CO<sub>2</sub> per kWp (Fases A1-A3)
- Low: 630 kg CO<sub>2</sub> per kWp (Fases A1-A3)

Systeemgrens: paneel + frame

In Frankrijk geldt één grenswaarde (Fases A1-A3)

- 550 kg CO<sub>2</sub> per kWp

Systeemgrens: paneel

## De grenswaarde voor kg CO<sub>2</sub> per kWh

Volgens een conceptversie van de specificaties voor de Ecodesign for Sustainable Products Regulation (ESPR) op gebied van PV uit 2022 (v2)<sup>10</sup> wordt de grenswaarde gesteld van 25 g CO<sub>2</sub> per kWh die op den duur zal worden aangescherpt tot 18 g CO<sub>2</sub> per kWh

## Marktanalyse beschikbaarheid EPDs

Om te kunnen bepalen welke zonnepanelen kunnen voldoen aan een eventuele grenswaarde in CO<sub>2</sub>-voetafdruk, kan de huidige prestatie opgezocht worden in bestaande EPDs van producenten middels een marktanalyse. Het is echter niet zo dat alle

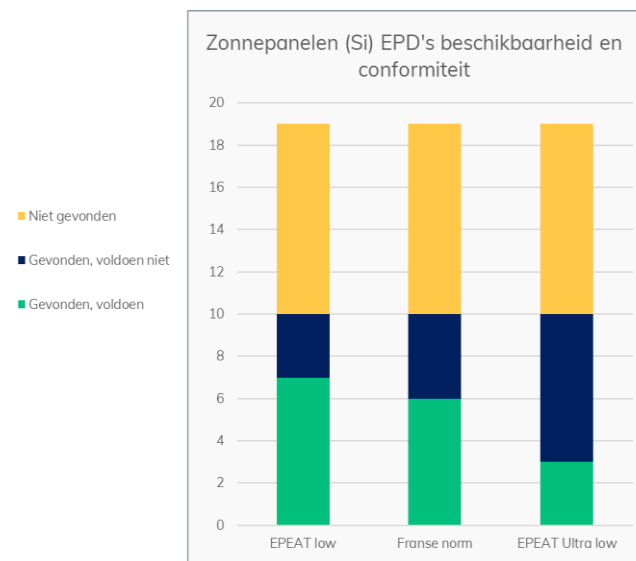
zonnepaneelproducenten al een EPD hebben laten uitvoeren. Bij een dergelijke analyse zal dus altijd enigszins *confirmation bias* ontstaan<sup>iv</sup>.

Om de *confirmation bias* te beperken is eerst een lijst opgesteld van grote producenten en pas daarna gekeken of deze partijen een EPD hebben of niet. Deze analyse is gedaan voor verschillende producentgroepen: de grootste mondiale zonnepaneelproducenten, de grootste Europese producenten, enkele Nederlandse producenten en tot slot enkele producenten van alternatieve PV-technologieën.

In Figuur 5 is de uitkomst van deze marktanalyse samengevat. Hieruit is te zien dat niet alle producenten een EPD hebben, en dat zelfs de producenten die een EPD hebben niet altijd voldoen aan de bestaande grenswaarden. De volledige lijsten zijn in Bijlage 3 te vinden.

Een belangrijk inzicht uit de marktanalyse is dat nagenoeg geen Europese producenten in het bezit zijn van een EPD conform de PCR van EPD Norge. Wel weten wij dat enkele van deze producenten werken met LCA's, waardoor de stap naar een EPD eenvoudig(er) gezet is.

<sup>iv</sup> Met *confirmation bias* bedoelen we dat partijen die al bezig zijn met het verlagen van de CO<sub>2</sub>-voetafdruk van hun



Figuur 5 | Analyse Marktanalyse EPDs

### CO<sub>2</sub>-terugverdientijd

Om bij te dragen aan de reductie van CO<sub>2</sub>-uitstoot is de vraag of het sturen op de CO<sub>2</sub>-voetafdruk van zonnepanelen hieraan een bijdrage levert. Hiervoor bepalen we de CO<sub>2</sub>-terugverdientijd (CO<sub>2</sub>-TVT) van de modules. Door dit te berekenen, brengen we in kaart binnen hoeveel jaar de 'investering' in CO<sub>2</sub>-voetafdruk is terugverdiend door de reductie in CO<sub>2</sub>-uitstoot door opwek van groene energie in de gebruiksfase.

Is de CO<sub>2</sub>-TVT heel kort, dan is de veronderstelling dat het minder zinvol is om te sturen op de CO<sub>2</sub>-voetafdruk

zonnepanelen waarschijnlijk ook de prestaties hiervan in kaart brengen, al dan niet middels een EPD. Door enkel naar EPD-

omdat de opbrengst van zonnepanelen uiteindelijk de bepalende factor is voor de duurzaamheid van de panelen. Tegelijkertijd is het wel van belang dat elk zonnepaneel diens eigen voetafdruk volledig compenseert binnen de eigen levensduur, en liever nog ruim daarvoor.

Om de CO<sub>2</sub>-TVT te berekenen is enkel gekeken naar de productie- en gebruiksfase. Curtailment van 25% is eveneens meegenomen. De overige aannames met betrekking tot degradatie, instraling en emissiefactoren worden in Bijlage 4 nader toegelicht; evenals de gehanteerde formule.

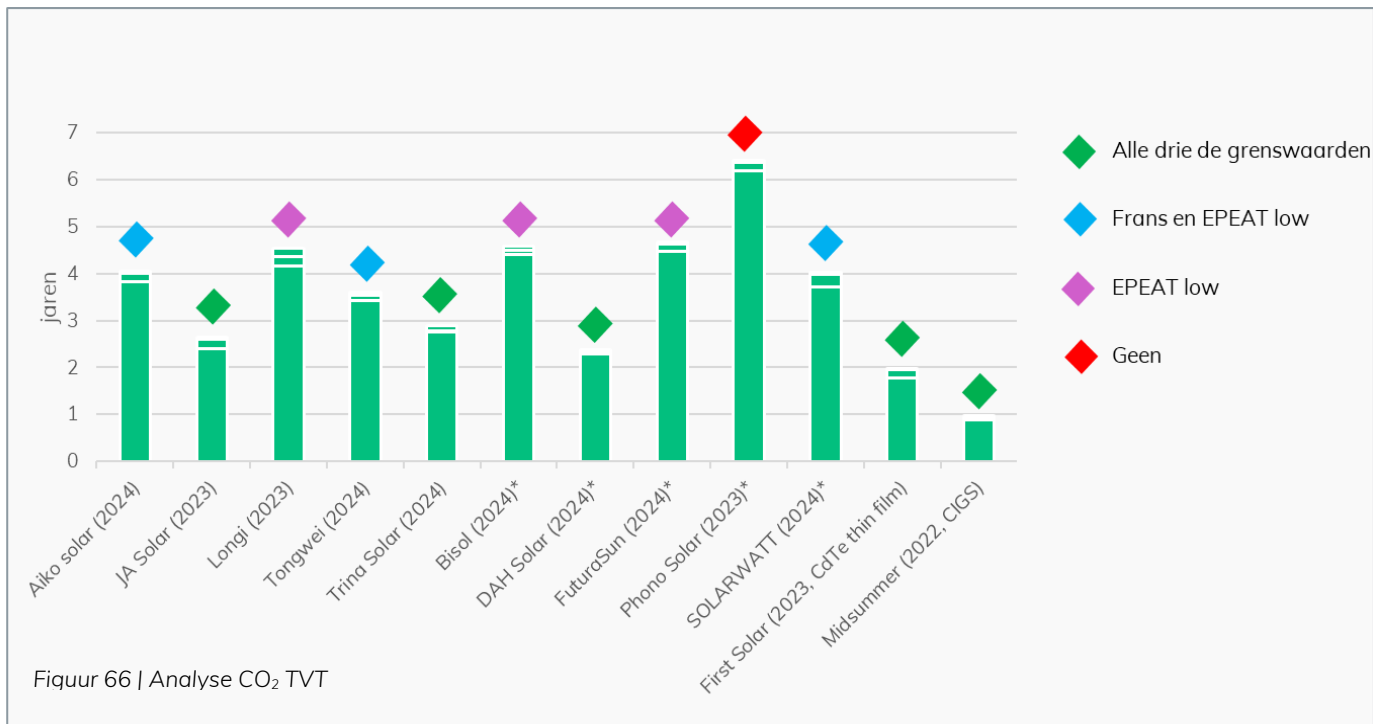
Door de gesimplificeerde methode en gemaakte aannames zijn de resultaten slechts een indicatie. De resulterende CO<sub>2</sub>-TVT -waarden zijn te zien in de figuur hieronder (figuur 6).

Uit de resultaten blijkt dat de berekende CO<sub>2</sub>-TVT voor de meeste Si-zonnepanelen uit de gevonden EPD's tussen de 2 en 5 jaar is. Er van uitgaande dat de gebruikte EPD's de top van de markt vertegenwoordigen, en dat de gemiddelde CO<sub>2</sub>-TVT dus langer zal zijn, is het aannemelijk dat het sturen op CO<sub>2</sub>-voetafdruk zinvol is om een aanvullende prikkel in te bouwen voor marktpartijen om de 'investering' in CO<sub>2</sub>-voetafdruk te verlagen.

databases te kijken vinden we dus waarschijnlijk met name producenten die al voldoen aan grenswaarden.



Opvallend is ook dat de CO<sub>2</sub>-TVT voor de alternatieve technologieën (CIGS, CdTe) extreem kort is. De CO<sub>2</sub>-investering voor deze panelen is laag. Zonder ook levensduur mee te nemen is de vraag is of het (enkel) sturen op CO<sub>2</sub>-voetafdruk voor deze type panelen functioneel is.



# Analyse Environmental Product Declarations

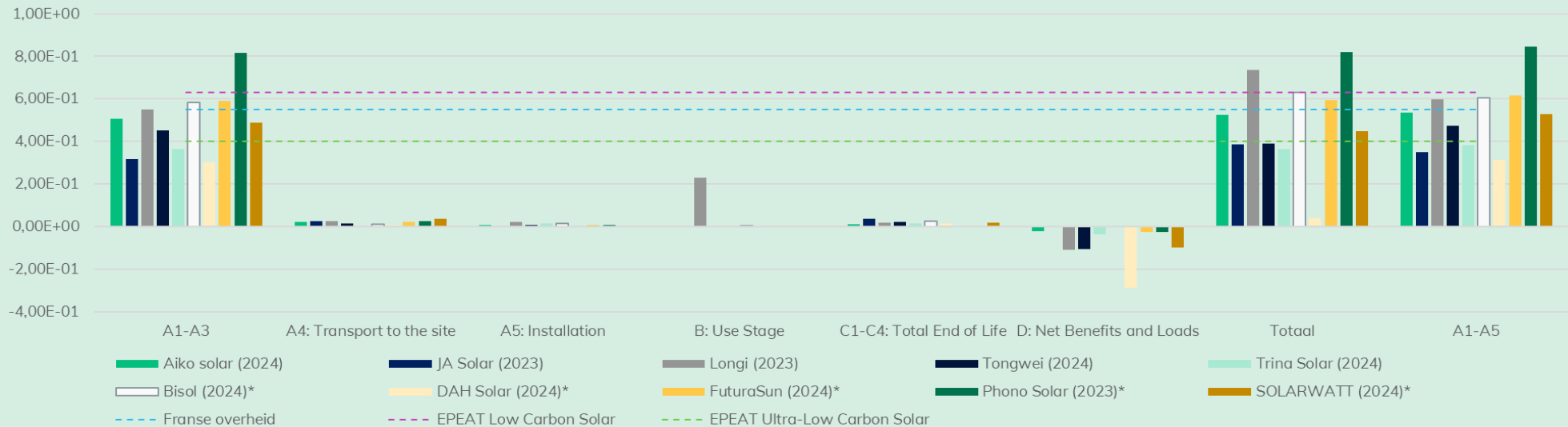
Onderstaand figuur laat zien hoe de panelen presteren op CO<sub>2</sub>-uitstoot per levenscyclusfase op basis van 10 gevonden EPDs (EPD Norge, Wp). De productiefase (A1-A3) is, zoals bekend, de grootste bron van CO<sub>2</sub>-uitstoot. In de 'use stage' wordt in een levenscyclusanalyse alleen meegenomen hoeveel uitstoot er plaatsvindt, zonder de energie opwek van het zonnepaneel mee te nemen. Als wordt gekeken naar de totale uitstoot van de panelen in alle levensfasen, dan is een verdeling te tussen de verschillende panelen die aan verschillende grenswaarden voldoen.

De Franse grenswaarde (550 kg CO<sub>2</sub> per kWp) is opgesteld voor fases A1-A3, (de uitstoot in de productiefase, zonder transport naar de ingebruikname- en bedrijfslocatie en installatie). Deze Franse grenswaarde wordt door 7 van de 10 panelen gehaald. Het transport naar de installatielocatie en de installatie (A4 en A5) hebben een minimale bijdrage aan de CO<sub>2</sub>-uitstoot in de productiefase. Dus met inachtneming van A1-A5, halen nog steeds 6 van de 10 panelen de grenswaarde. 9 van de 10 panelen halen de Low Carbon grenswaarde van EPEAT (fases A1-A3). Slechts 3 van

de panelen halen de Ultra-Low Carbon grenswaarde (A1-A3).

Let op: de systeemgrenzen die worden gehanteerd voor het zonnestelsel verschillen. EPEAT (leunt op de rekenregels van EPD Norge) hanteert het zonnepaneel met frame; en in Frankrijk hanteren ze enkel de module zonder frame<sup>11</sup>. De EPDs die in onderstaande grafiek zijn geanalyseerd zijn conform EPD Norge opgesteld. De panelen kunnen dus voldoen terwijl er meer van het product wordt meegeteld aan uitstoot.

Koolstofuitstoot per levensfase van zonnepanelen uit gevonden EPD's (kg CO<sub>2</sub> eq per Wp)



# Het aanvragen en beoordelen binnen de SDE++ subsidie

Verschillende methodieken hebben een andere impact op het beoordelingsproces; Sommige methodieken drukken zwaarder op de uitvoerbaarheid van de regeling dan andere methodieken. Tegelijkertijd kan de druk, wanneer deze minder bij de beoordelaars van de regeling ligt, juist weer bij andere partijen in de keten komen te liggen. Hierin moet een keuze gemaakt worden.

## Aanvragen en beoordelen SDE++

Een SDE++ aanvraag wordt gedaan door de aanvrager. Dit is (vrijwel) nooit de producent van zonnepanelen. De aanvrager zal dus bij de producent (of tussenpersoon / importeur) informatie moeten opvragen over de zonnepanelen wanneer een CO<sub>2</sub>-voetafdrukeis wordt opgenomen in de SDE++ aanvraag. Tijdens de initiële aanvraag voor SDE++-subsidie zijn de zonnepanelen (vaak) nog niet aangeschaft. Dit betekent dat er in dit stadium enkel de eis kan worden neergelegd, zonder hier al op te kunnen controleren als beoordelaar. De aanvraag komt daarom binnen bij de beoordelaar en wordt beoordeeld zonder deze informatie. Dit betreft een voorlopige goedkeuring.

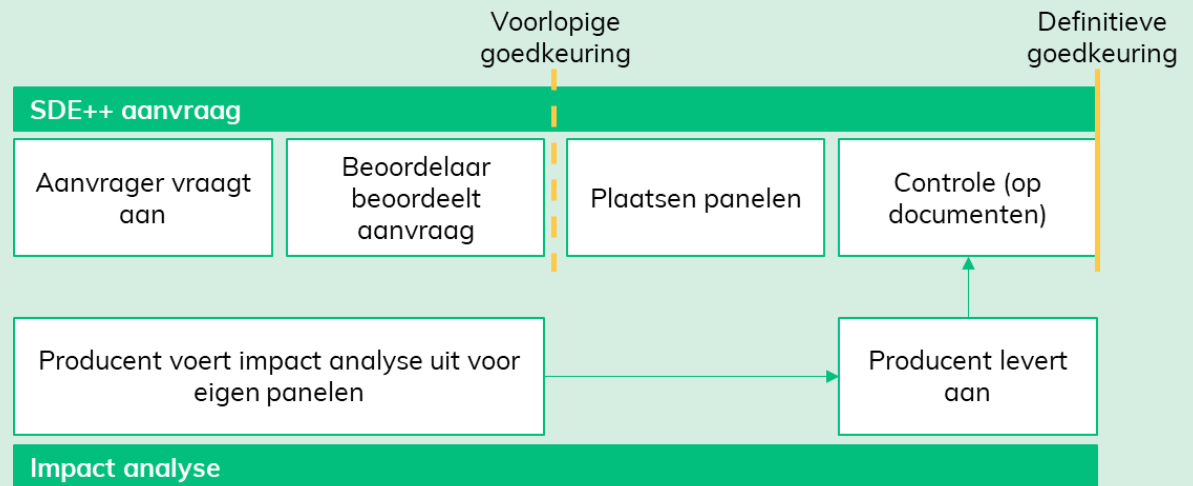
## Subsidie verkrijgen (definitieve goedkeuring)

Projecten worden pas gestart na de voorlopige goedkeuring van de subsidie. De panelen worden in dit stadium dus pas aangeschaft. Tijdens de aanschaf zal de aanvrager dus voor panelen moeten kiezen die voldoen aan de CO<sub>2</sub>-eis. Wanneer het project daadwerkelijk is aangesloten, wordt een controle uitgevoerd of inderdaad aan alle voorwaarden is voldaan. Dit is het moment waarop de beoordelaar de controle uitvoert op de aangeschafte panelen. Vanwege de uitvoerbaarheid moet deze controle zo simpel mogelijk zijn. Het subsidiebedrag wordt hierna uitgekeerd, mits is voldaan aan de voorwaarden.

Uitvoeren impact analyse zonnepanelen

Zodra panelen worden uitgezocht en aangeschaft door de aanvrager, moeten producenten kunnen aantonen dat zij voldoen aan de gestelde CO<sub>2</sub>-eis. Dit is dus al geruime tijd voordat de documenten moeten worden aangeleverd voor de controle. Producenten moeten dus tijdig beginnen met het laten doorrekenen van de impact van de panelen.

Voor een visualisatie van dit proces, zie figuur 7.



Figuur 77 | Versimpelde weergave SDE++ aanvraag met impact analyse van de zonnepanelen

# Hoofdstuk 4. Andere duurzaamheidsthema's

**Het sturen op de CO<sub>2</sub>-voetafdruk van zonnepanelen is erop geënt om verdere verduurzaming aan te jagen van (de productie van) zonnepanelen. Door enkel te kijken naar de CO<sub>2</sub>-voetafdruk van de productie kan echter ook afwenteling plaatsvinden op andere duurzaamheidsthema's zoals toxiciteit en leveringszekerheid.**

In het Nationaal Programma Circulaire Economie (NPCE) wordt circulariteit als middel gepositioneerd voor het bereiken van vier maatschappelijke doelen: het tegengaan van klimaatverandering (CO<sub>2</sub>), het tegengaan van biodiversiteitsverlies, het tegengaan van vervuiling, en het vergroten van leveringszekerheid. Hoewel het sturen op materiaal-gebonden CO<sub>2</sub> vaak als methode wordt gehanteerd om te sturen op circulariteit, zien we ook dat enkel sturen op CO<sub>2</sub> juist kan leiden tot afwenteling op andere thema's.

In de voorgaande hoofdstukken hebben wij ons met name gericht op de CO<sub>2</sub>-voetafdruk van zonnepanelen. We zien echter ook dat andere impactgebieden – zoals hierboven benoemd – ook relevant zijn in de productie, het gebruik en het einde van de levensduur van zonnepanelen. In dit hoofdstuk bieden wij een korte analyse van deze andere duurzaamheidsthema's, waaronder biodiversiteit, toxiciteit, gebruik van kritische materialen, circulariteit en dwangarbeid. Voor deze thema's geven wij aan waarom ze relevant zijn voor

zonnepanelen specifiek, en ook laten wij zien waar (aankomende) regelgeving de relevantie van deze thema's kan helpen versnellen.

## Toxiciteit

In het Nederlandse Circulaire Economiebeleid wordt circulariteit o.a. als middel gepositioneerd voor het beperken van vervuiling. Hierbij haakt het in op lucht-, water- en bodembeleid. Het gebruik van toxische stoffen kan nadelige gevolgen hebben voor (milieu)vervuiling, tegelijkertijd zijn deze toxische stoffen ook vaak gevaarlijk voor de mens.

Voor de productie van zonnepanelen worden diverse toxische stoffen gebruikt, waaronder:

- **Per- en polyflouralkylstoffen (PFAS).** PFAS zijn door de mens gemaakte chemische stoffen die niet van nature in het milieu voorkomen. PFAS staan ook bekend als 'forever chemicals', ze zijn niet afbreekbaar. Deze chemische stoffen kunnen schadelijk zijn voor mens (humane toxiciteit) en milieu (ecotoxiciteit). PFAS wordt vaak gebruikt in de backsheets van zonnepanelen om de bestendigheid tegen vocht en Uv-straling te vergroten. Hiermee wordt de levensduur van de producten verlengd. Tegelijkertijd heeft de toepassing van PFAS ook negatieve gevolgen voor de recyclebaarheid van zonnepanelen<sup>12</sup>. Er zijn inmiddels ook PFAS-vrije backsheets ontwikkeld, alleen zijn deze innovaties nog niet overgenomen door de (grote) producenten.

Het Europees chemicaliënagentschap ECHA heeft in 2023 een voorstel gepubliceerd voor een verbod op zo'n 10.000 stoffen die onder de PFAS familie vallen<sup>13</sup>.

- **Lood.** Lood is een zwaar metaal. Lood kan schadelijk zijn voor mens (humane toxiciteit) en voor het milieu (ecotoxiciteit). Lood wordt vaak gebruikt in het soldeermateriaal van PV-panelen. Evenals de andere toxische stoffen heeft de toepassing van lood negatieve gevolgen voor de recyclebaarheid van panelen. Er zijn ook loodvrije zonnepanelen beschikbaar<sup>14</sup>.
- **Antimoon.** Antimoon is, net als lood, een zwaar metaal. Antimoon is giftig voor mensen (humane toxiciteit). Antimoon wordt vaak aan het glas van zonnepanelen toegevoegd om de helderheid te vergroten, met een positief effect op de opbrengst van een zonnepaneel. Ook de toepassing van antimoon heeft negatieve gevolgen voor de recyclebaarheid van zonnepanelen. Aangezien glas zo'n 65-95% (op massa) van het zonnepaneel is, betekent het dus óók dat het grootste gedeelte van een zonnepaneel niet recyclebaar is. Er is ook antimoon-vrij PV-glas beschikbaar op de markt, dat ook al door enkele producten wordt gebruikt<sup>15</sup>.
- **Cadmium.** Voor Cadmium Tellerium (CdTe) zonnepanelen, een alternatieve technologie, wordt Cadmium gebruikt. Cadmium is eveneens een zwaar metaal. Cadmium is giftig voor mensen

(humane toxiciteit) en voor het milieu (ecotoxiciteit). Cadmium wordt in CdTe panelen gebruikt als halfgeleider. Hoewel CdTe-panelen een lage CO<sub>2</sub>-voetafdruk hebben in de productie<sup>16</sup>, heeft de toepassing van Cadmium gevolgen voor de recyclebaarheid.

Het gebruik van toxische stoffen is op dit moment niet zichtbaar in een EPD. Dit komt omdat er op elementniveau wordt gerapporteerd – zo is bijvoorbeeld de backsheet opgenomen, maar is het niet duidelijk dat in de backsheet ook PFAS zit. In een LCA wordt doorgaans wel op materiaalniveau gerapporteerd, dus hier is duidelijker zichtbaar of bepaalde toxische stoffen worden gebruikt.

Er zijn diverse manieren waarop aanvullende eisen opgenomen kunnen worden waardoor gestuurd kan worden op toxiciteit:

- In het **EPEAT-programma** kunnen aanvullende punten verdiend worden wanneer lage concentraties van 'Substances of Very High Concern' (SVHC) worden gebruikt;
- Het uitvragen van een **PFAS-vrij label**, waardoor zekerheid wordt geboden dat er geen PFAS wordt gebruikt in de zonnepanelen;
- Het opvragen van de **LCA** in aanvulling op de EPD. Hierin wordt zichtbaar óf bepaalde toxische stoffen worden gebruikt, maar niet in welke hoeveelheid. Ook is in een LCA zichtbaar hoe panelen scoren op de impactcategorieën die gekoppeld zijn aan

toxiciteit. Specifiek zijn dit ETP-fw (ecotoxiciteit, water); HTP-c en HTP-nc (humane toxiciteit).

PV-panelen zijn op dit moment nog vrijgesteld van RoHS wetgeving, die bij andere IT-apparatuur zorgt voor regulering van toxische stoffen. Wel is het aannemelijk dat in de aankomende jaren aanvullende wetgeving zal komen die het gebruik van toxische stoffen voor zonnepanelen zal beperken, zoals:

- Europa is op dit moment bezig met de ontwikkeling van een **Recyclability Index**. De tweede openbare consultatie voor deze index is eind 2024 afgerond. Binnen deze Recyclability Index wordt op dit moment ook gekeken naar 'Substances of Concern' (SoC)<sup>17</sup>.
- Het Europese Chemicaliën Agentschap (ECHA) heeft een voorstel voor **verbod op PFAS** aangeboden aan de Europese Commissie. De verwachting is dat de Europese Commissie in 2025 tot een oordeel komt over het voorstel. Een dergelijk verbod kan onderdeel uitmaken van de REACH regelgeving, wat ook gevolgen kan hebben voor de solar-industrie<sup>18</sup>.

### Kritische materialen

In het Nederlandse Circulaire Economiebeleid wordt circulariteit o.a. als middel gepositioneerd voor leveringszekerheid. Leveringszekerheid speelt in grote mate bij kritische en strategische materialen, zoals gedefinieerd door de Europese Commissie. Kritische materialen zijn volgens de Europese Commissie materialen die economisch belangrijk zijn (bijvoorbeeld

voor de energietransitie), en tegelijkertijd een hoge mate van leveringsrisico hebben. Strategische materialen zijn voor de Europese Commissie materialen die belangrijk zijn voor de onafhankelijkheid, veiligheid en geopolitieke positionering van Europa.

In zonnepanelen worden diverse kritische en strategische materialen gebruikt, waaronder:

- **Gallium** (strategisch): als halfgeleider in CIGS technologie; als doteermiddel in de wafers.
- **Borium** (strategisch): een additief dat wordt gebruikt om zonlicht om te zetten in energie.
- **Fosfor** (kritisch): bij negatief geladen panelen wordt fosfor gebruikt. Hierdoor is het paneel minder gevoelig voor verontreiniging, wat leidt tot een hogere efficiëntie.
- **Antimoon** (kritisch): wordt in het glas gebruikt om de helderheid te verhogen, wat een positief effect heeft op de efficiëntie.
- **Germanium** (strategisch): als halfgeleider.
- **Silicium metaal** (strategisch): als halfgeleider materiaal.
- **Aluminium** (kritisch): wordt vaak gebruikt in het frame van zonnepanelen, maar ook in de omvormer en eventuele constructies.
- **Fluor** (kritisch): als element in PFAS wat in de backsheet wordt gebruikt om bestendigheid tegen vocht en Uv-straling te voorkomen.
- **Nickel** (strategisch): als toevoeging om te galvaniseren, of als additief in (stalen) frames.
- **Koper** (kritisch): voor bekabeling en omvormers. Ook als basismateriaal in CIGS technologie<sup>19</sup>.

Het gebruik van kritische en strategische materialen is op dit moment niet zichtbaar in een EPD. Dit komt omdat er op elementniveau wordt gerapporteerd, zo wordt er 'glas' opgevoerd, maar is het niet duidelijk dat er Antimoon wordt toegevoegd aan het glas. In een LCA wordt doorgaans wel op materiaalniveau gerapporteerd, dus hier is duidelijker zichtbaar of bepaalde kritische en/of strategische materialen worden gebruikt.

Anders dan het uitvragen van een LCA, zijn er momenteel geen andere manieren waarop aanvullende eisen kunnen worden opgenomen om te sturen op het gebruik van kritische en/of strategische materialen.

Het is te verwachten dat het gebruik van kritische en strategische materialen in zonnepanelen in de aankomende jaren meer aandacht zal krijgen. Onder andere via de ontwikkeling van de **Recyclability Index** wordt het belang van dit onderwerp benadrukt. De tweede openbare consultatie voor deze index is eind 2024 afgerond. Kritikaliteit van materialen wordt als belangrijke aanjager gezien voor de ontwikkeling van deze recyclability index.

## Circulariteit

Hoewel circulariteit eigenlijk een middel is en geen doel op zich, is het wel van belang om voor zonnepanelen te weten of ze geschikt zijn om te repareren (levensduurverlenging), of dat ze op een goede manier te recyclen zijn. Recent is er met name aandacht gekomen voor de recyclebaarheid van zonnepanelen. Dit komt onder meer omdat, bij doorsnee ontwerp- en

assemblageprocessen, recyclebaarheid van de volgende onderdelen lastig is:

- **Glas:** dit komt deels doordat antimoon wordt vermengd met het glas om de helderheid te vergroten. Deze toevoeging maakt het lastig om het glas te recyclen voor andere toepassingen. Mits het glas losgemaakt kan worden de zonnecellen is het theoretisch mogelijk om PV-glas te recyclen naar nieuw PV-glas.
- **Zonnecellen:** de zonnecellen zelf worden met elkaar verlijmd, wat het lastig maakt om te recyclen. Diverse innovaties bieden in de toekomst mogelijk potentie, zoals thermische, chemische of mechanische delaminatie; alleen bevinden deze technologieën zich nog in een vroeg stadium.
- **Backsheet:** de backsheet bevat diverse additieven (waaronder PFAS) wat het lastig maakt om te recyclen. Ook is de backsheet verlijmd.

Daar staat tegenover dat er ook onderdelen zijn die wel goed te recyclen zijn:

- **(Aluminium) Frame:** het aluminium frame is eenvoudig losmaakbaar en recyclebaar.
- **Elektronica:** elektronica zoals de omvormer en bekabeling kunnen vaak goed gescheiden worden en gerecycled.

In een EPD wordt gerapporteerd over recyclingpercentages. In sommige gevallen wordt dit ook gekoppeld aan de verschillende materiaaltypes. De ontwikkeling van de **Recyclability Index** vanuit Europa biedt kansen om dit aspect in de toekomst meer te

omarmen. De verwachting is dat het onderzoek rondom de Recyclability Index medio 2025 wordt gepubliceerd<sup>20</sup>.

## Dwangarbeid

Een belangrijk sociaal aspect bij de productie van zonnepanelen is dwangarbeid. Recent onderzoek laat zien dat de meerderheid van de wereldwijd geproduceerde zonnepanelen nog steeds verbonden is aan de Oeigoerse (XUAR) regio Deze regio staat bekend om (het gebruik van) dwangarbeid.

Tussen 33-50% van de wereldwijde productie van PV-silicium is afkomstig van de XUAR regio. Ook is deze regio een van de wereldwijde productiehubs van 'metallurgische graad silicium' (MGS) wat nodig is voor de productie van zonnepanelen. Volgens bronnen is deze concentratie aan zonnepaneelproductie een bewuste keuze van de Chinese overheid om de prijs – mede door goedkope kolen – van zonnepanelen te verlagen.

Er zijn diverse stappen ondernomen (bijv. **Uyghur Forced Labor Prevention Act** in de VS) waardoor bedrijven minder afhankelijk willen zijn van inkoop uit de XUAR regio. Dit heeft echter ook ertoe geleid dat er minder transparantie is over de herkomst van materialen.

De ketens voor zonnepanelen zijn lang en complex. Dus hoewel een aantal Chinese fabrikanten aan aparte productielijn gemaakt heeft die vrij zegt te zijn van XUAR-producten, zijn de productielijnen alsnog afhankelijk van toeleveranciers uit deze regio.

---

De Gemeente Amsterdam neemt dwangarbeid ook mee als een van de eisen in haar methodiek. Hierbij wordt middels aanvullende informatie over de productie- en toeleveringsketen geanalyseerd of (1) de relevante toeleveringsketen zich geheel bevindt in landen met een laag risico op dwangarbeid, of (2) in geval dat een leverancier zich wél bevindt in een land met een hoger risico op dwangarbeid, dat de leverancier middels een audit onafhankelijk is onderzocht en het betreffende onderzoek deelbaar en betrouwbaar is.

## Conclusie

Er zijn diverse andere duurzaamheidsthema's die relevant zijn in de productie van zonnepanelen. In dit hoofdstuk zijn vier van deze thema's iets verder uitgewerkt.

Het is belangrijk om deze vier thema's ook in de context te plaatsen van het sturen op CO<sub>2</sub>-voetafdruk (Fase A1-A3). Door ons te richten op die eerste productiefasen én specifiek op het thema' CO<sub>2</sub> kan er sprake zijn van afwenteling op andere thema's, zoals hierboven geschetst. De CO<sub>2</sub>-voetafdruk (Fasen A1-A3) zegt immers niks over toxiciteit, kritieke materialen noch circulariteit.

---

# Hoofdstuk 5. Conclusie en Aanbevelingen

**Op basis van dit onderzoek lijkt het zinvol om de CO<sub>2</sub>-voetafdruk van zonnepanelen op te nemen als eis in de beoordeling van subsidies voor zonnepanelen (zoals de SDE++ regeling en de opvolger hiervan). De CO<sub>2</sub>-uitstoot tijdens de productie van zonnepanelen vertegenwoordigt nog altijd een aanzienlijk aandeel in de gehele levenscyclus. Door in Nederland op de CO<sub>2</sub>-voetafdruk te sturen ontstaat er een aanvullende prikkel voor producenten om deze CO<sub>2</sub>-voetafdruk te verlagen.**

Vanwege doelmatigheid, betrouwbaarheid en uitvoerbaarheid adviseren wij om te sturen op de CO<sub>2</sub>-voetafdruk van zonnepanelen middels een Environmental Product Declaration (EPD). Op dit moment lijkt het logisch om aan te sluiten bij de rekenregels van EPD Norge omdat de systeemgrens en rekenregels het meest toepasbaar zijn op de Nederlandse situatie en de wensen voor de subsidieregeling. Deze keuze leidt dan ook tot Wp als gekozen functionele eenheid.

Ten aanzien van de rekenregels en functionele eenheid is het aan te raden om de Europese ontwikkelingen hieromtrent te volgen, en eventueel aan te sluiten op een door Europa in ontwikkeling zijnde PEFCR wanneer deze beschikbaar is.

Door de keuze van Wp als functionele eenheid moet wel rekening gehouden worden met de nadelen, waaronder efficiëntie en levensduur. Zo zullen CdTe en CIGS panelen beter scoren, zoals ook inzichtelijk is gemaakt in Hoofdstuk 3, echter zullen deze wel vaker vervangen worden door de korte(re) levensduur.

Het advies is samen te vatten in onderstaande punten:

- Positief advies op het sturen op CO<sub>2</sub>-voetafdruk van zonnepanelen;
- Middels een EPD;
- Aansluiting bij EPD Norge voor de korte termijn;
- Leidt tot Wp als functionele eenheid.
- Advies om extra eisen rondom productgarantie en het inzichtelijk maken van de energie opwek mee te nemen.



---

# Totstandkoming

## **Geraadpleegde experts**

Voor dit rapport zijn verschillende experts geraadpleegd:

- Ines Benachir, Longi
- Patty Dillon, EPEAT
- Felipe Blanco Rocha, CML Universiteit Leiden
- Jan Jaap van Os, voormalig ExaSun
- Michiel Mensink, Buyer Group Zonnepanelen
- Ieke Bak, Ecochain
- Wilma Eerenstein, Renegize
- Stefan Rigter, Gemeente Amsterdam
- Rick Veenemans, KIWA,
- Mantijn van Leeuwen, NIBE
- Gerard de Leede, Solarge
- Pia Alina Lange, Trina Solar
- Ellen Hoog Antink, RWS

## **Projectteam**

Copper8

- Gwen Aartsma
- Mathijs van Kouwen
- Stefan Favrin
- Cécile van Oppen

## **Opdrachtgever**

Dit onderzoek is in opdracht van de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO) en de TKI Urban Energy uitgevoerd. In dit onderzoek is nauw samengewerkt met diverse klankbordgroep leden:

- Eline Fleur Spekle, Ministerie van KGG
- Robin Timmermans, Ministerie van KGG
- Patrick Todd, Ministerie van KGG
- Gaudi van den Boom, RVO
- Robin Quax, TKI Urban Energy
- Maaïke Beenes, Holland Solar

# Bijlage 1. Meer informatie over methodieken

In dit onderzoek zijn verschillende methodieken geanalyseerd, namelijk:

- De Franse methodiek
- EPEAT
- Het gebruik van EPD's
- De Amsterdamse methodiek

Hieronder gaan wij dieper in op deze methodieken.

## Franse methodiek

De Franse overheid maakt gebruik van een 'versimpelde carbon voetafdruk methodiek'. De *simplified carbon footprint evaluation* beperkt de scope tot de impact van productie. Hierbij worden 2 soorten gegevens verzameld:

1. Totale gewicht (kg) van de gebruikte materialen per Wp (dit is inclusief standaard verliezen);
2. De locatie van productie van deze materialen, waarbij voor verschillende productiestappen verschillende locaties kunnen worden opgegeven;

De carbon footprint wordt vervolgens bepaald door een standaardwaarde die is toegekend aan de opgegeven locatie te vermenigvuldigen met de materialisatie. Een voorbeeld: in Duitsland is de vaste waarde 44,59 kg CO<sub>2</sub> per kilogram polysilicium. Dit wordt

vermenigvuldigd met het totale gewicht aan polysilicium van het paneel per Wp van het paneel.

## EPEAT

EPEAT is een vrijwillig, wereldwijd ecolabel dat wordt beheerd door de Global Electronics Council (GEC) gebaseerd in de Verenigde Staten. EPEAT certificeert niet alleen zonnepanelen, maar ook andere (elektronische) producten.

Om het EPEAT-label te krijgen, moet een fabrikant voldoen aan de verplichte criteria. EPEAT is niet alleen van toepassing op zonnepanelen, maar geldt voor allerlei andere elektronische producten waaronder mobiele telefoons, televisies, servers e.d. Het is een breed ecolabel dat meerdere duurzaamheidskwesties behandelt, zoals klimaatverandering, duurzaam gebruik van hulpbronnen, zorgwekkende chemicaliën en due diligence van de toeleveringsketen.

Bij EPEAT is voor zonnepanelen het Low Carbon Solar (LCS) criterium toegevoegd aan de vereisten om het EPEAT-ecolabel te behalen; het behalen van Ultra Low Carbon Solar (ULCS) is daarbij een aanvullende optie. Fabrikanten van zonnepanelen moeten voldoen aan de (U)LCS-criteria én de EPEAT-criteria in NSF 457 –

Sustainability Leadership Standard for Photovoltaic Modules and Photovoltaic Inverters. Om de last voor zonnepaneel-fabrikanten te minimaliseren en voort te bouwen op bestaande methodologieën, is de methode gebaseerd op de Franse nationale overheidsspecificatie voor aanbestedingen van zonne- en windenergie-installaties (via de ECS-methode)<sup>v</sup>. Wijzigingen die zijn aangebracht in het Franse aanbestedingsproces zijn bedoeld om de wereldwijde toepasbaarheid van de (U)LCS-criteria te waarborgen.

Binnen de EPEAT methodologie is het (tot einde 2024) in elk geval mogelijk om tussen twee paden te kiezen: 'Path A' of 'Path B'. In 'Path A' wordt gebruik gemaakt van generieke data, op basis waarvan de Carbon footprint wordt berekend. Dit is ook de route van de Franse overheid, met hun Simplified Carbon Evaluation. In 'Path B' wordt gebruik gemaakt van eigen (producent-specifieke) opgevoerde data van een producent, door middel van een aangeleverde LCA. Voor beide paden geldt dat een onafhankelijke verificateur betrokken wordt om vast te stellen of de grenswaarden worden gehaald.

EPEAT geregistreerde producten zijn te vinden in het openbaar toegankelijke EPEAT-register. Voordat een

<sup>v</sup> "Cahier des charges de l'appel d'offres portant sur la réalisation et l'exploitation d'installations de production

d'électricité à partir de l'énergie solaire - AO PPE2PV Sol," in dit document aangeduid als "Franse Aanbesteding"

---

product EPEAT-geregistreerd kan worden, moet een onafhankelijke, door GEC goedgekeurde Conformity Assurance Body (CAB) de conformiteit van het product met de EPEAT-criteria bevestigen.

## EPD

Een EPD – Environmental Product Declaration - is een wereldwijde standaard om de milieu-impact van producten met elkaar te kunnen vergelijken, en die voor bouwgerelateerde producten vaak op basis van het EN:15804+A2 standaard worden opgesteld. Dit wordt gedaan vanuit het perspectief van de gehele levenscyclus door middel van een Life Cycle Assessment (LCA), welke vervolgens onafhankelijk wordt getoetst. Deze toetsing is vaak op het proces en niet op de gegevens.

De regels voor een EPD kunnen per productcategorie verder gespecificeerd zijn in de Product Category Rules (PCR). De PCRs stellen extra vereisten op die specifiek zijn voor het betreffende product. Uiteindelijk is, na verificatie, de EPD registratie openlijk verkrijgbaar. Wat er daadwerkelijk gestimuleerd wordt met de keuze voor een EPD is geheel afhankelijk van de keuze voor functionele eenheid, en de gehanteerde PCR.

In grove lijnen zijn er twee opties:

3. De functie – namelijk energie opwek – centraal stellen en daarmee de impact uitdrukken in een functie daarvan (gram CO<sub>2</sub> per kWh)
4. De impact van het product centraal te stellen door de energieproductie niet mee te nemen in de impact

berekeningen en daarmee de focus te leggen op het paneel (en eventueel extra componenten). Hiervoor wordt de impact uitgedrukt in gram CO<sub>2</sub> per Wp.

## Amsterdamse methodiek

De Gemeente Amsterdam werkt met een eisenlijst waar producenten aan moeten voldoen om de subsidie te ontvangen<sup>21</sup>. Dit subsidieprogramma heeft specifieke voorwaarden en definities met betrekking tot de te gebruiken zonnepanelen en bijbehorende installaties.

Voor de gemeente Amsterdam geldt dat de subsidie van toepassing is op twee typen zonnepanelen: duurzaam geproduceerde zonnepanelen en, indien noodzakelijk, lichtgewicht zonnepanelen. De hoogte van de subsidie is afhankelijk van het type zonnepaneel en wordt uitgedrukt in euro per kilowatt piekvermogen (kWp). De gemeente bekijkt verschillende factoren om de subsidie te verstrekken, namelijk:

- CO<sub>2</sub>-uitstoot in de productiefase van de panelen
- Gebruik van PFAS en lood in de panelen
- Risico op dwangarbeid bij de productie
- Energie omzettingsefficiëntie

Dit kan worden aangetoond met, onder andere, de volgende informatie:

- Een bestaande versimpelde methodiek certificaat (ECS)
- Informatie over de backsheet en de soldeertin
- Informatie productie- en toeleveringsketen
- Datasheets

## Bijlage 2. Europese ontwikkelingen

De Europese Unie (EU) heeft plannen om een methodiek voor de ecologische voetafdruk van zonnepanelen te ontwikkelen. Dit is onderdeel van een breder initiatief (Ecodesign for Sustainable Products Regulation, ofwel ESPR) om de milieu-impact van (energie gerelateerde) producten te beoordelen. De methodiek is samengebracht in een EcoReport tool<sup>vi</sup> en biedt een gestroomlijnde levenscyclusanalyse van het product, samen met een levenscycluskostenanalyse. Het doel van deze analyse is om een indicatie te geven van de representatieve milieueffecten van een typisch product in de verschillende levenscyclusfasen. Aan dit initiatief wordt nog gewerkt,<sup>22</sup> en is verder niet meegenomen in deze rapportage.

Er zijn nog geen EU-brede Product Category Rules (PCR) of Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCR) voor zonnepanelen. Naar verwachting komen die met de nieuwe Ecodesign for Sustainable Products Regulation (ESPR). Voor zonnepanelen is hiervoor al een concept uitgebracht (zie ook Hoofdstuk 2). Dit concept is ter review openbaar gedeeld en komt uit 2022. De verwachting was dat de laatste versie in 2024 gedeeld zou worden, maar dit is tot op heden niet gebeurd. Oorspronkelijk had de Europese Commissie de laatste versie al moeten goedkeuren in 2024. Wat de exacte

regels vanuit de ESPR gaan worden is daarom niet duidelijk. Ook is niet bekend wanneer de laatste versie wordt gepresenteerd en of dit de eindversie zal zijn.

Naast de ESPR worden in de komende jaren meer Europese regels van kracht, waaronder CBAM en de CPR. Ook deze richtlijnen hebben invloed op (de import of productie) van zonnepanelen. CBAM – afhankelijk van de recente ontwikkelingen – zal de kostprijs van niet duurzame panelen stapsgewijs doen verhogen. Ondanks dat CBAM momenteel op zes specifieke productcategorieën van toepassing is, namelijk ijzer en staal, cement, meststoffen, aluminium, elektriciteit en waterstof, kan het een indirect effect hebben als losse materialen (bijv. stalen of aluminium frames) worden geïmporteerd. Ook kan in de toekomst de wetgeving veranderen.

CPR stelt eisen aan bouwproducten. Zeker is dat Building Integrated Photovoltaics (BIPV) hieraan zullen moeten voldoen. Onduidelijk is of conventionele zonnepanelen hier ook onder zullen vallen. Daarnaast is ook een recyclability index in ontwikkeling voor zonnepanelen specifiek. Deze index zal naar verwachting ook eisen stellen aan toxische / kritische materialen en demontabiliteit.

**ESPR:** De ESPR heeft als doel de duurzaamheid van producten op de EU-markt aanzienlijk te verbeteren door hun circulariteit, energieprestaties, recycleerbaarheid en duurzaamheid te verbeteren. Daarnaast dient het om een sterke, goed functionerende interne markt voor duurzame producten in de EU te realiseren

**CPR:** De Construction Products Regulation (CPR) stelt geharmoniseerde regels vast voor de verhandeling van bouwproducten in de EU. De verordening biedt een gemeenschappelijke technische taal om de prestaties van bouwproducten te beoordelen

**Recyclability index:** De EU werkt op dit moment aan een recyclability index voor zonnepanelen en omvormers. Naar verwachting is deze medio 2025 gereed. Huidige documentatie geeft inzicht in dat toxiciteit, kritische materialen en demontabiliteit hier waarschijnlijk onderdeel van zullen worden.

**CBAM:** CBAM staat voor Carbon Border Adjustment Mechanism. Dit is een maatregel van de Europese Unie die een koolstofprijs oplegt aan bepaalde geïmporteerde goederen die veel koolstof uitstoten, zoals staal, cement en elektriciteit. Het doel van CBAM is om "koolstoflekkage" te voorkomen, waarbij productie wordt verplaatst naar landen zonder koolstofprijs, wat de inspanningen van de EU om de uitstoot van broeikasgassen te verminderen, zou ondermijnen

<sup>vi</sup> Zie [MEErP revision](#) voor meer uitleg

## Bijlage 3. Uitkomsten EPD analyse

Zoals aangegeven in Hoofdstuk 3 van dit rapport is een EPD analyse uitgevoerd om te kunnen bepalen welke zonnepanelen kunnen voldoen aan een eventuele grenswaarde in CO<sub>2</sub>-voetafdruk. Het is echter niet zo dat alle zonnepaneelproducenten al een EPD hebben laten uitvoeren. Om *confirmation bias* te beperken is eerst een lijst opgesteld van grote producenten en pas daarna gekeken of deze partijen een EPD hebben of niet. Deze analyse is gedaan voor verschillende producentengroepen: de grootste mondiale zonnepaneelproducenten, de grootste Europese producenten, enkele Nederlandse producenten en tot slot enkele producenten van alternatieve PV-technologieën. De volledige lijsten zijn hieronder te vinden. In het groen staat de gevonden EPD. Rood betekent dat er geen EPD is gevonden.

Tabel 1 | Uitkomsten EPD analyse deel 1: Top 7 wereldwijd, top 10 EU en Nederland

Top 7 wereldwijd	Hoofdkantoor locatie	Productielocatie	Grenswaardes behaald (A1-A5)			CO <sub>2</sub> -terugverdiëntijd (A1-3)
			EPEAT low	Frans	EPEAT ultra	
Tongwei Solar <sup>23</sup>	China	China	✓	✓		3 jaar
JA Solar <sup>24</sup>	China	China	✓	✓	✓	2,5 jaar
Aiko Solar <sup>25</sup>	China	China	✓	✓		4 jaar
LONGi Solar <sup>26</sup>	China	China	-	-	✓	4,5 jaar
Jinko Solar	China	China				
Canadian Solar	Canada	China				
Trina Solar <sup>27</sup>	China	China	✓	✓	✓	2,5 jaar
<b>Top 10 EU</b>						
SMA Solar Technology	Duitsland					
Ecosuntek	Italië					
Centrotherm International	Duitsland					
Scatec ASA	Zweden					
Soltech Energy Sweden	Zweden					
Columbus Energy	Polen					
Solar Fabrik	Duitsland					
Sunex	Polen					
<b>Nederland</b>						
Energya	Nederland					
Elsun	Nederland					
Hyet	Nederland					
Solarge	Nederland					

Tabel 2 | Uitkomsten EPD analyse deel 2: Alternatieve technologieën

Alternatieve technologieën	Hoofdkantoor locatie	Productielocatie	Grenswaardes behaald (A1-A5)			CO <sub>2</sub> -terugverdiertijd
			EPEAT low	Frans	EPEAT ultra	
First Solar CdTe <sup>28</sup> (dunne film)	VS	India en VS	✓	✓	✓	2 jaar
Solar Frontier (CIGS)						
Ascent Solar (CIGS)	VS					
Kaneka Corporation	Japan					
Oxford Photovoltaics Perovskite	VK					
Solbian	Italië					
AVANCIS	Duitsland					
Hanwha Qcells	Zuid-Korea					
MiaSole (CIGS)	VS					
Midsummer SLIM <sup>29</sup> (CIGS)	Zweden	Zweden	✓	✓	✓	1 jaar
Campo Verde Solar						

Tabel 3 | Uitkomsten EPD analyse deel 3: Overige gevonden EPDs tijdens analyse

Extra gevonden	Hoofdkantoor locatie	Productie-locatie	Grenswaardes behaald (A1-A5)			CO <sub>2</sub> -terugverdiertijd
			EPEAT low	Frans	EPEAT ultra	
Bisol <sup>30</sup>	Slovenië	China	✓			4 jaar
DAH Solar <sup>31</sup>	China		✓	✓	✓	2 jaar
SolarWatt <sup>32</sup>	Duitsland		✓	✓		4 jaar
Phono Solar <sup>33</sup>	China	China	-	-	-	6 jaar
FuturaSun <sup>34</sup>	Italy	China	✓			4,5 jaar

# Bijlage 4. CO<sub>2</sub>-Terugverdientijd

## Formule CO<sub>2</sub>-terugverdientijd

De CO<sub>2</sub> TVT wordt berekend aan de hand van de waarden en aannames: het piekvermogen (P), het oppervlakte van de module (A) en CO<sub>2</sub>\_mod,wp - de koolstofvoetafdruk per Wp van productie tot installatie (A1-A5).

De gebruikte formule is:

$$\text{CO}_2 \text{ TVT} = \frac{\text{CO}_2\text{mod,wp} \cdot P}{n\text{stc} \cdot H_{\text{nl,y}} \cdot A \cdot \text{PR} \cdot C_{\text{af}} \cdot \text{deg} \cdot \text{CO}_2\text{E}}$$

## Aannames CO<sub>2</sub>-terugverdientijd

Voor de inschatting van de CO<sub>2</sub> TVT zijn een aantal aannames gedaan:

- [n\_stc] De efficiëntie van de modules bij standaard test condities (STC) is gebruikt.
- [deg] Degradering van zonnepanelen, die jaarlijks toeneemt, wordt versimpeld meegenomen als constante factor van 97%.
- [H\_NL] De Nederlandse instraling per jaar per m<sup>2</sup> van 1100 kWh/m<sup>2</sup>/yr is gebruikt O.b.v. gewogen gemiddelde van 1000 kWh/m<sup>2</sup>/yr ([Delft, horizontaal](#)) en 1150 kWh/m<sup>2</sup>/yr ([Delft, optimaal georiënteerd](#)).
- [PR] Een performance ratio (PR) van de modules is aangenomen op 80% (voor de elektrische verliezen, schaduw, etc.) o.b.v. [de PR van zonneparken](#).
- [C\_af] Het afschakelingseffect is meegenomen als factor 0,75 als verwachte gemiddelde vermindering

van de jaarlijkse opbrengst met 25% in de komende jaren. Dit is een schatting a.d.h.v. cijfers van afgelopen jaren i.c.m. een verwachte toename.

- [CO<sub>2</sub>E]: Het CO<sub>2</sub>-eq per kWh van de voorkomen emissies door de opwekking van zonnestroom is 0,20 kg CO<sub>2</sub>-eq per kWh. Dit is geschat o.b.v. de [elektriciteitsmix in NL in 2022](#) van 0,27 kg CO<sub>2</sub> per kWh (ongeveer gelijk aan de emissiefactor van gasverbranding). De emissiefactor vermindert (en verbetert) vanwege een toename van CO<sub>2</sub>-neutrale elektriciteit in de elektriciteitsmix.

## Interpretatie resultaten

Ten behoeve van de juiste interpretatie van de resultaten:

- De berekende terugverdientijden zijn tijdsgebonden. D.w.z. dat ze niet meer kloppen voor toekomstscenario's door veranderingen in bijvoorbeeld een vermeerdering van het afschakelingseffect en de verbetering van de energiemix.
- De berekende terugverdientijd kan niet worden gebruikt om te bepalen hoe vaak een module zichzelf terugverdiend om dezelfde reden als hierboven: de variabelen veranderen in de toekomst.

# Bijlage 5. Bronnen

<sup>1</sup> IEA (2022), Special Report on Solar PV Global Supply Chains

<sup>2</sup> Crawford A., Murphy, L. (2023) Over-exposed Uyghur Region Exposure Assessment for Solar Industry Sourcing

<sup>3</sup> Republique France (2024) Cahier des charges de l'appel d'offres portant sur la réalisation et l'exploitation d'Installations de production d'électricité à partir de l'énergie solaire

<sup>4</sup> Ecochain (2025). Environmental Product Declaration (EPD) – The complete guide. Geraadpleegd via: <https://ecochain.com/blog/environmental-product-declaration-epd-basics/>

<sup>5</sup> European Commission (2025). About the Environmental Footprint Methods. Geraadpleegd via: [https://green-business.ec.europa.eu/environmental-footprint-methods/about-environmental-footprint-methods\\_en](https://green-business.ec.europa.eu/environmental-footprint-methods/about-environmental-footprint-methods_en)

<sup>6</sup> European Commission (2025). Life Cycle Assessment: the scientific foundation of the Environmental Footprint methods. [https://green-business.ec.europa.eu/environmental-footprint-methods/about-environmental-footprint-methods\\_en](https://green-business.ec.europa.eu/environmental-footprint-methods/about-environmental-footprint-methods_en)

<sup>7</sup> EPDItaly (2020) Electricity produces by photovoltaic modules

<sup>8</sup> EPD Norge (2020) PCR – Part B for photovoltaic modules used in the building and construction industry, including production of cell, wafer, ingot block, solar grade silicon, solar substrates, solar superstrates and other solar grade semiconductor materials.

<sup>9</sup> European Commission (2025). Ecodesign – European Commission to examine need for new rules on environmental impact of photovoltaics. Geraadpleegd via: [https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12819-Ecodesign-European-Commission-to-examine-need-for-new-rules-on-environmental-impact-of-photovoltaics\\_en](https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12819-Ecodesign-European-Commission-to-examine-need-for-new-rules-on-environmental-impact-of-photovoltaics_en)

<sup>10</sup> European Commission (2022) Ecodesign requirements for photovoltaic modules and photovoltaic inverters. Working document, version 2.

<sup>11</sup> Commission de Régulation de l'énergie (2022) Cahier des charges de l'appel d'offres portant sur la réalisation et l'exploitation d'installations photovoltaïques

<sup>12</sup> Solar Magazine (2023) Het Dilemma | Zijn fabrikanten zonnepanelen klaar voor snel verbod PFAS of komt energietransitie in geding?

<sup>13</sup> European Chemicals Agency (2023) ECHA publishes PFAS restriction proposal, ECHA/NR/23/04

<sup>14</sup> RIVM (2024) Recycling van zonnepanelen kan duurzamer

<sup>15</sup> Mensink, Michiel (2024) Duurzaamheidsaspecten en Marktscan Duurzamere Zonnepanelen

<sup>16</sup> Wikoff et al. (2022), Embodied energy and carbon from the manufacture of cadmium telluride and silicon photovoltaics

<sup>17</sup> Viegand Maagoe et al. (2024) Development of a recyclability index for photovoltaic products, slides 2<sup>nd</sup> stakeholder meeting

<sup>18</sup> European Chemicals Agency (accessed 2025), Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS)

<sup>19</sup> EU Joint Research Center (2023), Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU – A foresight study

<sup>20</sup> CINEA (2024) PV Recyclability Index

<sup>21</sup> Gemeente Amsterdam (2024). Subsidieregeling duurzame Amsterdamse energie.

<sup>22</sup> ESIA (2024) Comprehensive Strategies for Carbon Footprint Assessment: Best Practices for European Sustainability Directives for PV modules

<sup>23</sup> Kiwa (2024). Environmental Product Declaration Tongwei

<sup>24</sup> Kapstan (2023). Environmental Product Declaration JA Solar

<sup>25</sup> Kapstan (2024). Environmental Product Declaration Aiko Solar Technologies

<sup>26</sup> SGS-CSTC Standards Technical Services (2023). Environmental Product Declaration LONGi Green Energy Technology

<sup>27</sup> Land, T. (2024). Environmental Product Declaration Trina Solar

<sup>28</sup> Meijer, J. (2023). Environmental Product Declaration First Solar



---

<sup>29</sup> ESU-services (2022) Environmental Product Declaration Midsummer

<sup>30</sup> Greenium Poslovno svetovanje (2024). Environmental Product Declaration Bisol

<sup>31</sup> Ji, H. (2024). Environmental Product Declaration DAH Solar

<sup>32</sup> Kapstan (2024). Environmental Product Declaration SolarWatt

<sup>33</sup> Kapstan (2023). Environmental Product Declaration Phono Solar

<sup>34</sup> Kapstan (2024). Environmental Product Declaration FuturaSun

#### Overige bronnen

- I. EIA (2020). Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems Task 12
- II. European Commission (2021). Inception Impact Assessment Environmental impact of photovoltaic modules, inverters and systems
- III. European Commission (2019). Preparatory study for solar photovoltaic modules, inverters and systems
- IV. Fraunhofer, (2023). THE EU ECODESIGN DIRECTIVE. Methodology Analysis and Implications for PV Module Manufacturers.
- V. Held, M. (2020). Review on Life Cycle Assessment of Solar Photovoltaic Panels
- VI. Muteri et al. (2020). Review on Life Cycle Assessment of Solar Photovoltaic Panels
- VII. Polverini et al. (2023). Assessing the carbon footprint of photovoltaic modules through the EU Ecodesign Directive
- VIII. Reichel et al. (2022). CO<sub>2</sub> emissions of silicon photovoltaic modules – impact of module design and production location
- I. Yuan et al. (2024). Material intensity and carbon footprint of crystalline silicon module assembly over time.
- IX. Yuan et al. (2024) How will manufacturing capacity additions in China and North America affect the carbon footprint of silicon photovoltaics?