

Analyse: De Carbon Footprint en Carbon Payback Time van PV-systemen die in 2024/2025 in Nederland worden geïnstalleerd



Analyse van de *Public Buyers Group* voor *Duurzame Zonnepanelen*

Update December 2024

INHOUDSOPGAVE

ACHTERGROND.....	3
SAMENVATTING.....	5
1. DE CARBON FOOTPRINT VAN EEN PV-SYSTEEM.....	7
1.1 De Carbon Footprint van Zonnepanelen	8
1.2 Montagematerialen.....	12
1.3 Omvormers.....	14
1.4 DC-bekabeling	14
1.5 AC-kabels naar de netaansluiting	15
1.6 Albedo-klimaat-effect.....	15
1.7 Oceaantransport, installatie, gebruiksfase en afvalverwerking	17
2. CARBON PAYBACK TIME	19
Samenvatting.....	19
2.1 De bruto opwek van een typische nieuwe PV-installatie in NL	21
2.2 Hoeveel volasturen wordt nieuwe PV-opwek afgeschakeld?.....	23
2.3 Hoeveel emissies worden vermeden met extra zonnestroom?.....	33
2.4 Carbon Payback Time volgens Prognoses KORT, LANG en KEV	35
2.5 Carbon payback time volgens de KEV'22.....	37
APPENDIX A: GEMIDDELDE LEVENSDUUR VAN PV	39
A1 - Introductie	39
A2 - Waarom is een lange levensduur belangrijk	42
A3 – Wanneer grote kans op levensduur van meer dan 25 jaar?	43
A4 - Overzicht vanuit marktonderzoek.....	46
APPENDIX B: MEERPRIJS VAN (ULTRA) LOW CARBON.....	47
Eisen in de inkooptemplate.....	48

ACHTERGROND

Achtergrond

De *Buyer Group voor Duurzame Zonnepanelen* is één van de 30 buyer groups die voortkwamen uit het Uitvoeringsprogramma Circulaire Maakindustrie (UPCM) vanuit het Ministerie van I en W.

Centraal doel van onze buyer group is het stimuleren van de inkoop van duurzamere zonnepanelen. Onder leiding van RVO (Pianoo) is een projectteam gevormd met publieke organisaties zoals ProRail, Rijksvastgoedbedrijf, Groningen, Amsterdam, Rotterdam, Waterschap Noorderzijlvest, HVC, ENECO.

Deze Buyer Group is namens de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO) geleid door Bart-Jeroen Bierens en Michiel Mensink.

Werkwijze

Vanaf begin 2022 heeft het team de belangrijkste duurzaamheidsaspecten van zonnepanelen onderzocht via literatuuronderzoek en expert-interviews. Via marktonderzoeken in 2023 en 2024 zijn ook de beschikbaarheid en meerprijs van duurzamere zonnepanelen in kaart gebracht.

De belangrijkste duurzaamheidsproblemen die werden onderzocht:

- Levensduur van zonnepanelen
- Carbon Footprint
- Vermijdbare toxische stoffen (PFAS, Lood, Antimoon)
- Dwangarbeid (met name door Oeigoeren in Xinjiang)

Als belangrijkste hulpmiddel voor inkopers hebben wij een *template* geschreven met inkoop-eisen. Daarin staan kwaliteits- en veiligheidseisen uit tien andere aanbestedingen, *plus* enkele eisen en gunningscriteria met betrekking tot duurzaamheid.

Dit document: Uitgebreide analyse naar de Carbon Footprint en de Carbon Payback Time

In 2023 kwamen wij erachter dat er de kans bestaat dat de carbon footprint van een PV installatie met standaard zonnepanelen niet wordt terugverdiend. In dat geval wordt de klimaatopwarming *versneld*.

Zogeheten low-carbon zonnepanelen, een fractie duurder, gaven nog wel een gunstig klimaateffect. Daarom namen wij in het inkoop-template als eis op een carbon footprint lager dan 550 kg CO₂/kWp.

In September 2024 werd wij de analyse uit 2023 verder uitgewerkt en geupdate aan de hand van actuele afschakelgegevens (curtailment) over de periode juli 2023 tot en met juli 2024. Deze update is verwerkt in het document dat u nu leest. Het afschakelen bleek veel sneller gegroeid dan verwacht.

Disclaimer

De aannames en analyses in dit document zijn met grote zorgvuldigheid gemaakt maar zijn niet controleerd door het Ministerie van I en W, het Ministerie van Klimaat en Groene Groei, RVO of andere overheidsorganisatie. Geen van de aannames en conclusies in dit document kunnen daarom worden gezien als een standpunt van een van de Ministeries of andere overheidsorganisatie.

Feedback

De analyses en inschattingen zijn zorgvuldig gemaakt maar er kunnen fouten zijn gemaakt of nieuwe informatie kan ontbreken. Mocht je fouten zien, zaken missen of betere inschattingen hebben? Stuur ons dan svp een e-mail via: BGDPV@pianoo.nl.

Tot slot

Het staat vast dat het klimaat meer is geholpen met (ultra)low-carbon zonnepanelen dan met mainstream zonnepanelen. Deze (ultra)low-carbon panelen zijn nauwelijks duurder dan mainstream panelen, gaan even lang mee en ze zijn ruim beschikbaar; geen enkele reden om deze niet te kopen!

SAMENVATTING

Het installeren van zonnepanelen wordt gestimuleerd om klimaatopwarming te vertragen. Maar hoe goed zijn zonnepanelen eigenlijk in deze taak? En zijn sommige zonnepanelen hierin beter dan andere?

Twee standaard zonnepanelen van 500 W_p wegen samen ongeveer 50 kilogram. Ook hebben ze samen een Carbon Footprint van ongeveer 1.000 kilogram CO₂-equivalent¹. Daarmee wegen de CO₂-emissies van het productieproces ongeveer 20 keer zoveel als het paneel zelf.

Maar is dat nu veel of weinig? En is dat een probleem of niet?

Deze vragen kunnen worden beantwoord via de 'Carbon Payback Time'.

Carbon Payback Time

De CO₂-emissies van het productieproces van zonnepanelen worden geleidelijk terugverdiend. Immers, de zonnestroom voorkomt dat er in een elektriciteitscentrale gas wordt verbrand en het voorkomt de bijbehorende CO₂-emissies. De carbon payback time (CPT) is de tijd die nodig is om de carbon footprint van het productieproces weer terug te verdienen via de jaarlijks vermeden emissies.

Als de CPT korter is dan de levensduur dan vertraagt een zonnepaneel de klimaatopwarming; maar als de terugverdientijd langer is dan versnelt het zonnepaneel de klimaatopwarming.

Aanpak

Dit rapport bestaat uit twee hoofdstukken en een appendix.

Hoofdstuk 1 brengt de Carbon Footprint van de zonnepanelen en de andere componenten van een PV-systeem in kaart voor drie soorten PV systemen:

- Ultra-Low Carbon PV systeem
- Low Carbon PV systeem
- Mainstream PV systeem

Hoofdstuk 2 berekent de carbon payback time voor deze drie systemen. Hiervoor zijn prognoses nodig voor factoren zoals het afschakelen van zonnepanelen (curtailment) en de energiemix. Voor elke factor is het mogelijk om een optimistische en een pessimistische inschatting te maken. Daarom worden er drie prognoses gemaakt: *Prognose KORT*, *Prognose LANG* en *Prognose KEV'22*.

Appendix A gaat in op de verwachte levensduur van zonnepanelen.

¹ In de vakliteratuur variëren inschattingen van de carbon footprint van *mainstream* zonnepanelen van 800 tot 1300 kg CO₂-eq per kWp. De CFP komt uitgebreid aan de orde in Hoofdstuk 1.

Resultaten

De gemiddelde levensduur van recent geïnstalleerde zonnepanelen is waarschijnlijk **12 tot 15** jaar. Slechts een fractie van alle zonnepanelen zal het 25^e jaar halen.

De Carbon Payback Time van een in 2024 geïnstalleerd PV systeem heeft volgens de drie prognoses (Kort, Lang, KEV'22) de volgende bandbreedte, afhankelijk van het type systeem:

- **Ultra-Low Carbon systeem** – ULC zonnepanelen en best case aannames: **4 tot 6 jaar**
- **Low Carbon systeem** – LC zonnepanelen en optimistische aannames: **7 tot 25 jaar**
- **Mainstream systeem** – mainstream panelen en gemiddelde aannames: **meer dan 25 jaar**

Conclusies

In Nederland worden er vooral *mainstream* zonnepanelen geïnstalleerd. In 2024 was het marktaandeel ca. 95%. De Carbon Payback Time van deze panelen is waarschijnlijk langer dan de verwachte levensduur. Daarmee zullen deze zonnepanelen de klimaatopwarming versnellen.

Bij Low-Carbon panelen is het onzeker – ze kunnen klimaatopwarming versnellen of vertragen. Ultra-Low Carbon panelen helpen duidelijk met vertragen de klimaatopwarming.

De Carbon Payback Time neemt de komende jaren echter verder toe door de stijgende curtailment. Voor een Ultra-Low Carbon paneel dat in 2025 wordt geïnstalleerd stijgt de CPT al naar 5-7 jaar.

Daarom is het belangrijk om in Nederland alleen nog Ultra-Low Carbon zonnepanelen te installeren. Zo wordt voorkomen dat we met extra zonnepanelen de klimaatopwarming onbedoeld versnellen. Ultra-Low Carbon zonnepanelen verhogen de totale kosten van een PV systeem met 5-15%, geen grote belemmering. In het rapport worden een aantal voorbeelden genoemd van ULC panelen.

Een andere optie is nog om Low-Carbon zonnepanelen in verticale oriëntatie te installeren. Dan wekken ze vooral stroom op in de vroege ochtend en aan het eind van de middag. Op die momenten is nog geen overaanbod van elektriciteit - in tegenstelling tot zonnige uren rond het middaguur. Vertikaal-geplaatste zonnepanelen worden daarom zelden afgeschakeld en helpen daarmee met het vertragen van klimaatopwarming.

1. DE CARBON FOOTPRINT VAN EEN PV-SYSTEEM

De Carbon Footprint (CFP) betekent de hoeveelheid broeikasgassen die vrijkomen tijdens de levensloop van een product of systeem. In het geval van zonnepanelen wordt de CFP uitgedrukt in kilogram CO₂ per kilowattpiek (kWp). Twee zonnepanelen van 500 Wattpiek maken samen 1 kWp.

Naast de panelen bevat een PV-systeem kabels, omvormers en bevestigingsmateriaal.

De CFP kan via een *life cycle analysis* (LCA) worden bepaald. De hele levensloop wordt daarbij onder de loep genomen - alle broeikasgasemissies van mijnbouw tot productie tot transport.

Waar vinden de broeikasgasemissies plaats?

Tijdens de productie van de materialen van zonnepanelen komen relatief veel broeikasgasemissies (BKG-emissies) vrij, met name bij de volgende processen:

- i. **Productie van metallurgisch silicium.** In een elektrische boogoven wordt ruw vloeibaar silicium gemaakt uit een mengsel van kwartszand en steenkoolpoeder. Dit vergt veel elektriciteit. De verbranding van steenkoolpoeder zorgt voor directe CO₂ emissies.
- ii. **Raffinage.** De zuivering van metallurgisch silicium (98%) tot de vereiste 99,9999999% (9N) gaat via het Siemens-proces. Siliciumpoeder wordt met zoutzuur (HCl) gemengd tot een gas (SiCl₃). Dit gas, tri-chloorsilaan, wordt verhit en geraffineerd in destillatiekolommen. Volgens slaat het silicium uit dit gas neer op een staaf zuiver silicium van hoge temperatuur, terwijl de reactorwand juist wordt gekoeld. Dit proces vergt veel elektriciteit.
- iii. **Kristallisatie.** Het gezuiverde silicium wordt in een smeltkroes verhit tot het vloeibaar wordt (~1600 °C). Vervolgens wordt een steeds aangroeiend monokristal langzaam uit de smelt getrokken. Zo ontstaat een groot monokristal (ingot). Ook dit proces vergt veel elektriciteit.
- iv. **Wafering.** De ingot wordt verzaagd tot rechte blokken. Deze worden via een soort broodmachine in zeer dunne *wafers* gesneden van slechts 0,2 mm door kilometerslange, zeer dunne, diamant-gecoate staaldraden. Ook dit proces vergt veel elektriciteit.
- v. **Celproductie.** De wafers worden verwerkt tot zonnecellen via 10-12 verschillende processen, waaronder etsprocessen, processen onder vacuüm en hoge temperatuur. Ook deze processen vergen veel elektriciteit.

China's marktaandeel in deze processen is meer dan 90%. De meeste elektriciteit (ca 65%) wordt in China nog steeds met kolencentrales geproduceerd. Zeker in de industriële provincies waar deze zware industrie is gevestigd. Ondanks de vele nieuwe zonneparken komen er in China ook nog wekelijks kolencentrales bij.

Ook bij de productie van andere materialen komen forse hoeveelheden broeikasgassen vrij:

- glas en aluminium (frame)
- koper (DC-kabels en AC-kabels)
- staal (constructie)

Bij de assemblage van de zonnepanelen en het zeetransport naar Europa komen relatief weinig emissies vrij; evenmin bij het installatieproces en de afvalverwerking. De emissies komen vooral door de materiaalproductie.

De carbon footprint van drie soorten PV installaties

De CFP van een zonnepaneel is afhankelijk van de gebruikte technologie, de producent, het productieland en ontwerpkeuzes. Daarom zijn er grote verschillen tussen het zonnepanelen.

De onderstaande tabel toont de bandbreedte van de carbon footprint voor een Zon-op-Daksysteem en een Zon-op-Landsysteem. In de onderstaande paragrafen wordt ingegaan op elke component.

De carbon footprint wordt hieronder ingeschat voor drie scenario's:

- **Ultra-low carbon PV systeem** - ULC zonnepanelen en *best case* aannames
- **Low-carbon PV systeem** - LC zonnepanelen en optimistische aannames
- **Mainstream PV systeem** – mainstream panelen en gemiddelde aannames

Carbon Footprint PV-systeem 1 kWp [kg CO ₂ -eq/kWp]	Zon-op-Dak			Zon-op-Land		
	Ultra-Low Carbon	Low Carbon	Mainstream	Ultra-Low Carbon	Low Carbon	Mainstream
Zonnepanelen	270	550	1.000	270	550	1.000
Montagematerialen	70	115	160	160	320	480
Omvormers	25	33	40	25	33	40
DC-kabels	15	22	30	15	22	30
AC-kabels	10	15	20	50	200	400
Albedo-effect	0	50	100	100	250	500
Oceaantransport	10	20	30	10	20	30
Installatieproces	10	15	20	10	15	20
Gebruiksfase	10	15	20	10	15	20
End-of-life	10	15	20	10	15	20
TOTAAL	430	850	1.440	660	1.440	2.540

Tabel 1: Carbon Footprint van drie PV-systemen van 1 kWp, op dak en op land.

1.1 De Carbon Footprint van Zonnepanelen

1.1.1 Ultra-Low Carbon zonnepanelen

Dunnefilm zonnepanelen hebben de laagste Carbon Footprint. Deze zonnepanelen gebruiken geen kristallijn silicium zonnecellen maar andere halfgeleiders. Een dunnefilm zonnecel is 2 à 3 micron dik: een factor 50 dunner dan kristallijn-silicium zonnecellen (150 micron). Er is daarom 50 keer minder materiaal nodig en mede hierdoor hebben dunne-film zonnepanelen een fors lagere CFP.

Er zijn veel diverse soorten dunne-film zonnecellen: CIGS, CdTe, perovskiet, amorf-silicium en organische zonnecellen. Zonnepanelen op basis van perovskiet cellen komen waarschijnlijk in 2025 op de markt met de belofte van een hoge efficiëntie, lage productiekosten en een lage carbon footprint.

Met een wereldwijd aandeel van 4-5% van alle jaarlijks verkochte zonnepanelen is CdTe het meest relevante dunne-film zonnepaneel. Binnen de categorie 'dunne-film' heeft het een marktaandeel van 80%. De productiekosten en efficiëntie zijn vergelijkbaar met mainstream silicium zonnepanelen.

Het Amerikaanse bedrijf FirstSolar is de grootste producent van CdTe-zonnepanelen. Deze hebben een oppervlak van 2,5 m² en bestaan uit 2 glasplaten (30 kg), een aluminium frame (4,1 kg) en encapsulant (1 kg). De CdTe-zonnecellen zelf zijn 3 micron dik en wegen slechts 8 gram per zonnepaneel.

De carbon footprint van deze panelen is **267 kg CO₂-eq/kWp²**. Volgens onderzoekers van NREL wordt deze vooral veroorzaakt door het glas (52%), het aluminium (22%) en de elektriciteit die nodig is voor de moduleproductie (21%). Het halfgeleidermateriaal (CdTe) heeft een aandeel van slechts 0,3% in de CFP.

Terzijde - zonnepanelen met een nog lagere CFP?

Met 0,3% geven de CdTe-zonnecellen een verwaarloosbare bijdrage aan de CFP. Hoe kan de CFP van zonnepanelen verder naar beneden?

Opties PV-industrie:

- Verhoog de efficiëntie (bijv. met perovskiet of tandemcellen)
- Verlaag het verbruik van de moduleproductie
- Vervang het aluminium frame door gerecycled aluminium of staal

Opties overheden:

- Glas schoner produceren met groen gas of H₂
- Elektriciteitsopwek vergroenen

1.1.2 Carbon footprint van *Mainstream* zonnepanelen

Meer dan 95% van de in Nederland geïnstalleerde zonnepanelen wordt geproduceerd in China of bevat c-Si-zonnecellen uit China. En de carbon footprint van een c-Si zonnepaneel wordt grotendeels bepaald door de CFP van de cellen. Helaas zijn er weinig peer-reviewed carbon footprint analyses gemaakt van deze Chinese c-Si cellen.

Het opstellen van een LCA is complex. Vrijwel elke Chinese celproducent heeft meerdere fabrieken met verschillende technologieën, verschillende machines, verschillende operationele prestaties enzovoorts. Dat leidt tot al tot flinke variaties van de carbon footprint. Daarnaast heeft elke celproducent een mix van toeleveranciers (van wafers) die op hun beurt weer diverse toeleveranciers hebben van polysilicon. En ook deze wafer- en polysiliconproducenten hebben meerdere fabrieken, processen en bezettingsgraden. Kortom een betrouwbare analyse vergt vele analyses van vele fabrieken. Het resultaat zou een gemiddelde moeten zijn plus de tolerantie daarin (onzekerheidsmarge).

Door het gebrek aan betrouwbare LCA's van Chinese producenten zijn er geen objectieve data waarmee een *industry average* kan worden bepaald.

Inschattingen van de IEA PVPS Task 12 werkgroep

Bij gebrek aan betrouwbare LCA gegevens van c-Si cellen worden er inschattingen gemaakt. *Vrijwel alle* wetenschappelijke artikelen en commerciële LCA analyses gebruiken de inschattingen van de *Life Cycle Inventory (LCI)*³ van de IEA PVPS Task 12 werkgroep als basis.

² Wikoff et al., *Embodied energy and carbon from the manufacture of cadmium telluride and silicon photovoltaics*, Joule (2022), <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.06.006>.

³ R. Frischknecht, P. Stolz, L. Krebs, M. de Wild-Scholten, P. Sinha, V. Fthenakis, H. C. Kim, M. Raugei, M. Stucki, 2020, Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessment of Photovoltaic Systems, International Energy Agency (IEA) PVPS Task 12, Report T12-19:2020.

Deze inschatting wordt elke 5 jaar opnieuw gemaakt door de IEA PVPS Task 12-werkgroep. Voor c-Si door 2 wetenschappers van Westerse onderzoeksinstituten die geen toegang hebben tot Chinese data.

Bij gebrek aan objectieve data uit China maken zij inschattingen van de verbeteringen die zijn gemaakt ten opzichte van 10 tot 15 jaar oude gegevens en analyses van toenmalige Europese producenten. Daarnaast gebruiken zij inschattingen van machinebouwers. Zoals hierboven beschreven is de onzekerheidsmarge groot maar helaas wordt deze onzekerheidsmarge niet genoemd in deze LCI.

Op basis van deze LCI berekende het Duitse Fraunhofer Instituut⁴ 800 kg CO₂ / kWp voor mainstream c-Si-zonnepanelen. Er is wel een risico dat dit getal rooskleurig is. Ten eerste is er bij zowel de machinebouwers als onderzoekers uit de PV industrie een risico op rooskleurige inschattingen. Ten tweede lijkt het erop dat de getallen geen *industry average* zijn maar een *best case*: de IEA PVPS gaat uit van een bijna ideale situatie met een hoge yield, volle bezetting en machinevervanging pas na 10 jaar, terwijl er in werkelijkheid een grote overcapaciteit is en dus een lage bezettingsgraad. Door snelle technologie-veranderingen worden machines ook al na een paar jaar vervangen, etcetera.

Andere inschattingen van de Carbon Footprint van c-Si panelen

Er zijn weinig wetenschappelijke publicaties te vinden met eigen, onafhankelijke brondata voor het berekenen van de CFP. Hierbij twee voorbeelden:

- Het Amerikaanse NREL, een onderzoeksinstituut vergelijkbaar met TNO in Nederland en Fraunhofer in Duitsland, kwam in 2022 uit op een Carbon Footprint van 1075 kg CO₂ / kWp voor mainstream c-Si zonnepanelen op basis van haar eigen data en analyses.⁵
- In China kwam de Universiteit van Kunming⁶ in 2021 uit op 1300 kg CO₂/kWp, waarbij inputs van een nabije Chinese producent werden gebruikt.

Conclusie

De inschatting van de CFP van mainstream c-Si varieert van 800, 1075 of 1300. Bovendien is er een onbekende maar aanzienlijke foutmarge. In dit document wordt de afgeronde waarde **1.000 kg CO₂/kWp** gebruikt als gemiddelde carbon footprint van mainstream c-Si-zonnepanelen.

1.1.3 Carbon footprint van Low-Carbon zonnepanelen

Er zijn steeds meer c-Si zonnepanelen te koop met een fors lagere Carbon Footprint ten opzichte van mainstream zonnepanelen - zowel van Europese als Chinese producenten. Deze ontwikkeling is gestimuleerd door wetgeving in Frankrijk. Vanaf 2015 werd een maximale limiet aan de carbon footprint ingesteld voor grote publieke PV projecten. Vele producenten hebben daarop een low-

⁴ Reichel et al., *A comparative life cycle assessment of silicon PV modules: Impact of module design, manufacturing location and inventory*, Solar Energy Materials & Solar Cells 230 (2021) 111277, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111277>

⁵ Wikoff et al., *Embodied energy and carbon from the manufacture of cadmium telluride and silicon photovoltaics*, Joule (2022), <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.06.006>

⁶ Fan et al., *LCA of Crystalline Silicon Wafers for PV Power Generation*, Silicon (2021); <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00670-4>.

carbon module ontwikkeld. Volgens ons onderzoek in Q1'2024 kunnen vrijwel alle grote Chinese en Europese producenten een zonnepaneel leveren dat aan de limiet van 550 kg CO₂/kWp voldoet. De meerprijs daarvan is meestal beperkt tot een halve of hele cent per Wp.

Er zijn verschillende manieren waarop de carbon footprint van c-Si panelen kan worden verlaagd.

A) Low-carbon energiemix

De raffinage van metallurgisch silicium naar 'solar grade polysilicon' vergt de meeste elektriciteit en veroorzaakt meer dan de helft van de carbon footprint. Voor de low-carbon panelen kopen Chinese producenten het benodigde polysilicon bij het Europese bedrijf Wacker. Immers, Europa heeft een gunstigere elektriciteitsmix dan China. Daarnaast is het proces van Wacker efficiënter. Daardoor is de carbon footprint van polysilicon van Wacker een stuk lager. Ook Europese producenten als MeyerBurger en 3Sun kopen hun polysilicon in Europa en hebben daardoor ook een lagere CFP.

B) Andere technologie

Via innovatieve technologie wordt ook de carbon footprint verlaagd:

- *Fluidised Bed Reactor*. De grote Chinese polysilicium producent CGL gebruikt voor een deel van hun polysilicium productie een ander proces. Niet het Siemens-proces maar een proces op basis van een Fluidised Bed Reactor, waarvoor minder elektriciteit nodig is.
- *Dunnere cellen*. Ook proberen sommige producenten dunnere wafers te gebruiken met een dikte van 110-120 micron in plaats van de standaard 150 micron. Daardoor kan een kwart van het silicium worden bespaard. Bijvoorbeeld de Chinese producent Risen zet hier op in. Ook andere bedrijven die heterojunctie celtechnologie gebruiken (oa MeyerBurger, 3SUN) gebruiken dunnere wafers.
- *Radicale innovaties*. Radicaal andere productieprocessen beloven ook een sterke reductie. De stap van kristallisatie en wafering kan worden geëlimineerd onder namen als *kerfless*, *direct wafering* of *epitaxial growth*. Daardoor wordt ongeveer de helft van de BKG-emissies bespaard. Verschillende scale-ups, waaronder het Duitse NexWafe, werken aan deze technologie. Volgens NexWafe komen deze dunne, low-carbon wafers in 2026 op de markt.

Representatieve waarde voor low-carbon panelen: 550 kg/kW_p

Uit marktonderzoek van de *buyer group* bleek dat veel producenten low-carbon panelen kunnen leveren. De carbon footprint bedraagt gemiddeld 500 kg/kWp volgens het Franse systeem *Evaluation Carbon Simplifiée* (ECs). Echter volgens het ECs systeem wordt het aluminium frame niet meegerekend bij de carbon footprint. Het aluminium frame dat op vrijwel alle standaard panelen zit heeft een CFP van ~50 kg/kWp. Om de CFP van low-carbon panelen vergelijkbaar te maken tussen mainstream en ultra-low carbon panelen, tellen we deze 50 kg op bij de 500 en komen zo tot 550 kg als representatieve waarde voor low-carbon panelen.

1.2 Montagematerialen

De hoeveelheid en soort montagematerialen hangt sterk af van het type project: op land, op dak of op water. Er zijn vele montagesystemen op de markt, op basis van staal, aluminium of kunststoffen.

Daarnaast zijn belangrijke parameters projectspecifiek: de hoeveelheid ballast voor een dakinstallatie of tot welke diepte de stalen funderingspalen van zon-op-landinstallaties in de grond worden geschroefd. Er is geen recente publicatie gevonden waarin de carbon footprint van verschillende montagesystemen is geanalyseerd. Daarom wordt deze hieronder ingeschat (zie ook Tabel 2).

Zon-op-daksystemen

De meeste montagesystemen voor platte daken gebruiken stalen profielen (bijvoorbeeld van Van der Valk, Sunbeam, Esdec). Een minderheid van de systemen gebruikt aluminium profielen. Volgens onderstaande analyse is de CFP van de meeste montagesystemen **70-160 kg CO₂/kWp**.

Per onderdeel een korte toelichting:

- *Aluminium*: dit materiaal heeft een laag gewicht per m² PV-systeem, maar de carbon footprint kent een grote variatie. De productie van *virgin* aluminium met schone elektriciteit in Noorwegen heeft een carbon footprint van 4 kg CO₂/kg alu⁷ terwijl aluminium uit China een veel hogere CFP heeft van 18 kg CO₂/kg-alu. Andere Europese aluminiumproducenten zitten ergens tussen deze 2 uitersten. De CFP van 100% gerecycled aluminium uit Noorwegen⁸ (op basis van schone elektriciteit) heeft een lagere carbon footprint met circa 2,3 kg CO₂/kg-alu. Kortom, de CFP van aluminium kan een factor 10 verschillen. Extrusie en anodisatie zijn ingeschat op 1 kg CO₂/kg-alu.
- *Staal*: dit materiaal kent ook veel verschil tussen virgin of gerecycled. In Nederland wordt het Magnelis-staal van ArcelorMittal veel gebruikt. De Magnelis-varianten op basis van *gerecycled* staal, inclusief de magnesium-alu-zinkcoating, hebben een carbon footprint van 0,8 kg CO₂/kg-staal.⁹ De variant op basis van ijzererts (*virgin*) komt uit op 2,6 kg CO₂/kg-staal.¹⁰ Profielvorming en bewerkingen zijn ingeschat op 0,5 kg CO₂/kg-staal.
- *Ballast*: de hoeveelheid ballast voor een zon-op-daksysteem kan een factor 4 schelen en hangt af van de hoogte van het dak, de grootte van het systeem en het windgebied. Meestal worden betonnen tegels gebruikt. De carbon footprint van de ballast is meestal kleiner dan die van het staal. Het is overigens ook mogelijk *zonder* ballast te werken door het PV-systeem mechanisch aan het dak te bevestigen. Dit is echter duurder en vereist dakdoorboring, met kans op lekkage. Daardoor wordt dit nog relatief weinig toegepast.
- *Diverse*: denk aan RVS-bouten, klemmen, kunststof onderdelen, verpakking en transport.

⁷ <https://www.epd-norge.no/epder/bygg/stal-armering-aluminiumskonstruksjoner/hydro-75r-aluminium-extrusion-ingot>

⁸ <https://www.epd-norge.no/epder/bygg/stal-armering-aluminiumskonstruksjoner/hydro-4-0-aluminium-extrusion-ingot>

⁹ https://europe.arcelormittal.com/repo/fce/transfer/XCarb Recycled and Renewably Produced Magnelis_EPD.pdf

¹⁰ <https://epd-online.com/PublishedEpd/Download?id=19562>

Carbon footprint van montagesystemen voor platte daken	Gewicht per m² PV-systeem kg	CFP per kg materiaal kg CO₂	CFP per m² kg CO₂	CFP Aluminiumsysteem per kWp kg CO₂/kWp	CFP Staalsysteem per kWp kg CO₂/kWp
A) Aluminiumsysteem	3-4	3-20	9-80	45-400	
B) Staalsysteem	5-7	1,4-3	7-21		35-105
Ballast (stoeptegels/beton)	10-40	0,2	2-8	10-40	10-40
Diverse				10	15-20
TOTAAL				65-450	60-165

Tabel 2: Inschatting van minimale en maximale carbon footprint van het montagesysteem voor een plat dak.

Aanname: zonnepanelen met 20% efficiency ofwel 5 m² per kWp.

Zon-op-landsystemen

Vanwege de funderingen (vaak stalen schroefpalen) en de draagconstructie is voor een zon-op-landsysteem per vierkante meter 3 à 4 keer meer staal nodig. Ballast is niet nodig. De post 'diverse' schaaft wel mee. De bandbreedte voor een montagesysteem van zon-op-land wordt zo ingeschat op **160-480 kg CO₂/kWp**.

Zon-op-watersystemen

Er is nog te weinig informatie beschikbaar voor een inschatting.

1.3 Omvormers

Het befaamde onderzoeksbureau Treeze, eigendom van LCA-expert en Ecoinvent-oprichter R. Frischknecht, heeft in 2016 onderzoek verricht naar de carbon footprint van omvormers.¹¹ Bij kleine omvormers van 5 kW voor residentieel gebruik komen de onderzoekers op **120 kg CO₂/kWp-AC** en voor middelgrote omvormers van 20 kW op **75 kg CO₂/kWp-AC**. Voor grotere PV-projecten op grote platte daken, met een vermogen van 0,3-3 MWp aan zonnepanelen, worden meestal omvormers van 50-100 kWp gebruikt. De CFP van de grotere omvormers worden in dit document ingeschat op **50 kg CO₂/kWp-AC**.

Bij de meeste PV-installaties hebben de omvormers een capaciteit van 50-80% van het vermogen van de zonnepanelen. Voorheen was 70-80% standaard (omdat je flink bespaart op de omvormerkosten terwijl je maar 1 à 2% opbrengst mist). Tegenwoordig zijn omvormers beperkt tot 50% van het zonnepaneelvermogen. Dit is verplicht geworden in de SDE++-regeling (vanwege netcongestie).

Conclusie

Voor omvormers wordt gerekend met een bandbreedte van: **25-40 kg CO₂/kWp**. (50-80% x 50 kg CO₂). Mogelijk zijn er grotere verschillen tussen omvormers maar dit vereist vervolgonderzoek.

1.4 DC-bekabeling

De CFP van de DC kabels (tussen de zonnepanelen tot de omvormer), de kabelgoten, combinerboxen en bevestigingsmaterialen wordt vooral door het koper veroorzaakt.

De CFP van het koper van de DC-kabels is **10-20 kg CO₂/kWp** op basis van de volgende aannames:

- *Gemiddelde lengte van de DC-kabels*: bij PV-systeem van 500 kWp een gemiddelde kabellengte van **100 meter**, bij kleinere systemen van 50-200 kWp **50 meter**
- *Vermogen per kabel*: vaak wordt 1 kabel toegepast per string panelen met vermogen **5 kWp**
- *Kabeldoorsnede*: **6 mm** per string met 5 kWp vermogen
- *Kopergewicht per meter kabel* (6 mm): circa **250 gram** per meter
- *Carbon footprint van koper*: **4 kg CO₂ per kg koper**¹²

Berekening: (50 tot 100 meter)/5 x 0,25 x 4 = 10-20 kg CO₂/kWp.

Conclusie

Aanname met betrekking tot de klemmen, goten, de kabelmantel en andere componenten: 50% van het koper.

De CFP van de DC kabels en bijbehorende componenten wordt zo geschat op **15-30 kg CO₂/kWp**.

¹¹ https://treeze.ch/fileadmin/user_upload/downloads/Publications/Case_Studies/Energy/174-Update_Inverter_IEA_PVPS_v1.1.pdf

¹² Ecoinvent LCI database v3.3.

1.5 AC-kabels naar de netaansluiting

Zon-op-dak

Bij zon-op-dakprojecten is de afstand tussen de omvormers en meterkast vaak niet meer dan 10 tot 50 meter. Veel PV-installaties worden zo ontworpen dat een zwaardere netaansluiting niet nodig is. In deze analyse wordt voor zon-op-dakprojecten aangenomen dat netverzwaring *niet* nodig is en dat carbon footprint van de AC-kabels $2/3^e$ bedraagt van de DC-kabels, ofwel **10-20 kg CO₂/kWp**.

Zon-op-land en zon-op-water

Grote zonneparken werden vaak aangelegd op locaties waar grond goedkoop is maar op flinke afstand van stroomgebruikers, hoogspanningslijnen en onderstations. Voor dergelijke zonneparken legt de netbeheerder een kabel aan. De lengte van deze nieuwe kabel kan variëren van een paar kilometer tot meer dan 20 kilometer.

Conclusie

Volgens bureau Treeze¹³ bedraagt de carbon footprint per 20 kilometer AC-kabel **1.000 kg CO₂/kWp**. Als een zonnepark vlak naast een bestaande netaansluiting ligt, wordt de carbon footprint geschat op **50 kg CO₂/kWp**. De bandbreedte wordt op deze manier: **50 tot 1.000 kg CO₂/kWp**.

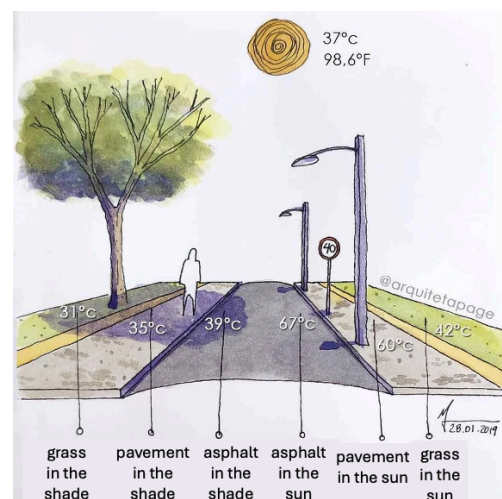
1.6 Albedo-klimaat effect

Witte oppervlakken blijven koeler

Een wit geschilderd huis (denk aan huizen in Griekenland) of een witte auto blijft in de zomer veel koeler dan een huis of auto met een donker kleur.¹⁴ De term 'Albedo' staat voor het deel van de zonnestraling dat wordt gereflecteerd – zowel zichtbaar licht als infrarood en UV.

Het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) vermeldt dat albedo-verlaging direct bijdraagt aan klimaatopwarming. Als gletsjers en sneeuwvlakten wegsmelten of als gras en bomen worden vervangen door wegen en bebouwing, dan wordt het aardoppervlak iets warmer en dit levert ook een directe bijdrage aan klimaatopwarming.

Zonnepanelen zijn gemaakt om zoveel mogelijk zonlicht op te vangen. In de zomer bereiken zonnepanelen in volle zon een temperatuur van 80 tot 90 graden terwijl gras en bomen dan slechts enkele graden warmer zijn dan de lucht. Gras en bomen blijven vooral koel dankzij verdamping (Figuur 1).



Figuur 1. Voorbeeld van temperaturen van verschillende oppervlakken in zon en schaduw

¹³ treeze.ch/fileadmin/user_upload/downloads/Publications/Case_Studies/Energy/itten-2014-electricity-mix-v1.3.pdf

¹⁴ Het *urban heat island effect* wordt ook veroorzaakt door verschillen in Albedo en verdamping. Steden stimuleren daarom groene daken en lichtere bestrating.

Het klimaateffect van donkere, warme oppervlakken

De Albedo kan in theorie variëren tussen 0% (zwart) en 100% (een spiegel). In de wetenschappelijke publicatie¹⁵ die het IPCC ook gebruikt wordt ingeschat dat bij 'droge oppervlakken' elke (permanente) 1% Albedo-verlaging per vierkante meter een *klimaateffect* heeft dat gelijk staat aan de uitstoot van 7 kg CO₂.

Het bovenstaande geldt voor droge oppervlakken. Maar veel levende natuur (grasland, bossen, planten) en oppervlaktewateren (meren, rivieren, bassins) blijven koel dankzij verdamping. Deze blijven vrijwel even koud als een wit oppervlak en hebben daardoor een *effectieve* Albedo die vergelijkbaar is met een wit oppervlak.

Aan de andere kant wordt bij zonnepanelen 15-20% van het zonlicht¹⁶ niet omgezet in warmte maar in elektriciteit. Daarom rekenen we voor zonnepanelen met een *effectieve* Albedo van 15-20% terwijl de reflectie slechts 2-6% is.

Tabel 3 geeft een overzicht van de Albedo en de effectieve Albedo van diverse oppervlakken.

Natuur ¹⁷			Kunstmatige oppervlakken ¹⁸		
	Albedo (reflectie)	Effectieve Albedo		Reflectie (reflectie)	Effectieve Albedo
Verse sneeuw	85-95%	idem	Wit geverfd dak	75-85%	idem
Wolken	40-90%	Idem	Witte dakfolie (EPDM/PVC/TPO)	70-80%	idem
Zand/rotsen (droog)	30-50%	idem	Wit grint	50-60%	idem
Grasland	25-30%	70-90%	Beton	25-40%	idem
Bos	10-20%	70-90%	Licht grint /steenslag op bitumen	20-25%	idem
Water (meren, zee)	6-10%	70-90%	Donkergrijs grint	10-20%	idem
			Bitumen, EPDM-folie (na 1 jaar)	10-20%	idem
			Vers asfalt	5-10%	Idem
			Zonnepanelen	2-5%	15-20%

Tabel 3: Albedo van natuurlijke en kunstmatige oppervlakken.

Het klimaat-Albedo effect van een PV installatie in Nederland

Er is nog weinig onderzoek verricht naar het klimaateffect van het verlagen van de Albedo als gevolg van het installeren van zonnepanelen. Het wordt in LCA-analyses van PV-systemen meestal niet meegenomen. Hieronder wordt onze inschatting gemaakt.

Het getal 7 uit de literatuur is een gemiddelde maar gezien de beperkte zoninstraling in Nederland zal het Albedo-klimaateffect hier ook kleiner zijn. Ook willen we niet te ver afwijken van andere LCA analyses van PV systemen, omdat het Albedo effect daarin ook niet is meegenomen. Daarom gaan wij niet uit van 7 kg maar van 2 kg CO₂ per procent Albedo per m².

¹⁵ Hashem Akbari et al, *The long-term effect of increasing the albedo of urban areas*, 2012, Environmental Research Letters, doi:10.1088/1748-9326/7/2/024004.

¹⁶ Aannames: 20% module efficiency en performance ratio 90%.

¹⁷ <https://nl.wikipedia.org/wiki/Albedo>

¹⁸ https://www.epa.gov/sites/default/files/2017-05/documents/reducing_urban_heat_islands_ch_4.pdf

Een PV installatie van 1 kWp heeft een oppervlakte van ca 5 m². We rekenen daarom met **10 kg CO₂** per procent Albedo-verlaging.

Het Albedo-klimaatteffect van een PV-installatie is wel sterk projectafhankelijk want het hangt erg af van de Albedo van het oppervlak voor het PV system werd geplaatst. In Nederland worden daken vrijwel nooit wit geschilderd, ook witte folie of wit grint op een dak is zeer zeldzaam. De Albedo van gebruikelijke dakbedekking is 20-40%.

Tabel 4 toont de indicatieve bandbreedte van het effect.

	Albedo zonder PV-installatie	Effectieve Albedo-verlaging	Klimaatteffect** per kWp
Zon-op-dak	20-40% (afhankelijk van de dakbedekking)	0-20%	0-200 kg CO ₂
Zon-op-land*	25-30% (weiland)	10-50%	100-500 kg CO ₂
Zon-op-water*	7-10% (binnenwater)	10-50%	100-500 kg CO ₂

Tabel 4: Albedo-klimaatteffect van diverse typen PV-installaties.

*) Bij zon-op-land en zon-op-waterprojecten is het nog erg onzeker, vandaar de grijze letters.

**) Op basis van 5 m² oppervlak aan zonnepanelen per kWp, immers de meeste nieuwe zonnepanelen in 2023 hebben een module-efficiëntie van ca 20% bij standaardtestcondities (een vermogen van 200 Wp/m²).

1.7 Oceaantransport, installatie, gebruiksfase en afvalverwerking

Er is geen recente analyse gevonden van de emissies tijdens het zeetransport, de installatie, gebruiksfase en afvalverwerking. Daarom worden deze hieronder ingeschat.

Zeetransport

Aangezien 95% van de Nederlandse zonnepanelen uit China of andere landen in Azië komt rekenen we zeetransport mee. Ook ultra-low carbon zonnepanelen vergen meestal zeetransport – ze worden vooral buiten Europa geproduceerd (Maleisië, India, de VS).

Best case – bij een zuinig, volgeladen containerschip met glas-foliepanelen dat niet te snel vaart, met LPG als brandstof, bedragen de emissies van het zeetransport circa **10 kg CO₂-eq per kWp**.

Worst case – bij een ouder containership dat vaart op stookolie, waarbij de kapitein haast heeft of als er tegenwind is, met glas-glaspanelen, zijn de emissies van het zeetransport circa **30 kg CO₂-eq per kWp**.

Deze getallen zijn berekend op basis van de volgende aannames:

- afstand oceaanroute Shanghai-Rotterdam: **22.000 km**
- containerschip GHG-emissies: **5 tot 20 gram CO₂-eq per ton per km**¹⁹
- gewicht 40-voets container (leeg): **3.800 kg**

¹⁹ Istrate, I.R., et al., *Quantifying Emissions in the European Maritime Sector*, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2022, ISBN 978-92-76-51975-1, doi:10.2760/496363, JRC128870.

- **380 kWp** aan zonnepanelen per container²⁰
- containergewicht per kWp zonnepanelen: circa **10 kg**
- gewicht zonnepanelen per kWp: circa **50 kg** glas-foliepanelen, circa **60 kg** voor glas-glas²⁰
- transportgewicht (aandeel container en zonnepanelen) per kWp: **60-70 kg**

Installatie

De emissies tijdens het installatieproces komen vooral door transport. Tijdens het installatieproces worden de zonnepanelen eerst met vrachtauto's naar de projectlocatie vervoerd. Vervolgens komen de mensen die bij de bouw betrokken zijn naar de projectlocatie. Het energieverbruik tijdens het installatieproces is bijna verwaarloosbaar.

De totale broeikasgasemissies tijdens de installatiefase worden ingeschat op **10-20 kg CO₂/ kWp**.

Gebruiksfase

Tijdens de gebruiksfase zijn de emissies vooral afkomstig van het transport dat nodig is om 1 of 2 keer per jaar de installatie te inspecteren en klein onderhoud te verrichten. Dit gebeurt gedurende 15-30 jaar. De broeikasgasemissies tijdens de gebruiksfase worden ingeschat op **10-20 kg CO₂/ kWp**.

Afvalverwerking

De emissies gedurende de *afvalverwerking* zijn gering. Deze emissies komen vooral van het transport naar sorteercentra en het transport van sorteercentra naar de verwerkingsinstallatie. Bij de verwerking wordt per kWp circa 5-7 kilo aan plastics (encapsulant, backsheet) verbrand.²¹

De broeikasgasemissies van de afvalverwerking worden ingeschat op **10-20 kg CO₂/ kWp**.

²⁰ Op basis van datasheets van onder andere: JASolar, Longi, Jinko, Risen, Canadian Solar, GCL.

²¹ De aluminium frames en koperen kabels worden door metaalverwerkers als nieuwe grondstof gebruikt. De afvalverwerking van het laminaat van glas en cellen gaat via verbranding of pyrolyse. Bij deze processen zijn de broeikasgasemissies vergelijkbaar. De afvalfracties (met name glasresten) worden laagwaardig hergebruikt.

2. CARBON PAYBACK TIME

Samenvatting

Carbon payback time betekent de hoeveelheid tijd die nodig is om de *carbon footprint* van een PV-installatie terug te verdienen via het voorkomen van CO₂ emissies door fossiele elektriciteitsopwek.

De analyses in dit hoofdstuk zijn gemaakt voor een Zon-op-Dak systeem dat op 1-1-2024 werd opgeleverd. Er gekozen voor Zon-op-Dak omdat dit het meest voorkomende type PV-installatie²² is en omdat overheden steeds terughoudender worden met zonnevelden.

De berekening

De berekening van de Carbon Payback Time gaat als volgt:

- *Start* met de Carbon Footprint van het PV systeem
- *Bereken* de netto opwek in kWh per jaar (de bruto opwek minus curtailment)
- *Vermenigvuldig* de opwek met de hoeveelheid bespaarde CO₂ emissies per kWh zonnestroom
- *Verminder* de Carbon Footprint met de jaarlijks bespaarde CO₂ tot het saldo gelijk is aan nul.

Het aantal jaren dat hiervoor nodig is noemen we de Carbon Payback Time.

Drie bepalende factoren

De bespaarde broeikasgasemissies hangen daarom af van drie bepalende factoren:

1. de **bruto-opwek** van de nieuwe zon-op-dak-PV-installatie
2. de **curtailment** - welk deel van de bruto opwek wordt afgeschakeld
3. de **fossiele emissies** die worden voorkomen in de uren dat de zonnestroom wordt geleverd.

Belangrijk op te merken: de curtailment en de bespaarde fossiele emissies variëren van jaar tot jaar. Daarom moet worden gewerkt met prognoses, waarbij wordt gewerkt met realistische maxima en minima voor de diverse factoren.

In §2.1 tot en met §2.3 worden deze drie factoren in detail toegelicht en wordt er een prognose gemaakt voor de komende 10 jaar op basis van *minimale* en *maximale* inschattingen.

Drie prognoses voor de carbon payback time

In §2.4 worden de minimale en maximale inschattingen gebruikt om de carbon payback time te berekenen volgens twee prognoses:

- *Prognose KORT* – op basis van de inschattingen die een korte carbon payback time geven
- *Prognose LANG* - op basis van de inschattingen die een lange carbon payback time geven

Deze voorspelde CPT volgens deze twee scenario's geven de extremen weer – in werkelijkheid zullen nooit alle factoren één kant op vallen. De CPT ligt daarom vrijwel zeker binnen de bandbreedte van deze twee scenario's.

²² Via de SDE++ regeling en *zonneladders* wordt Zon-op-Land ontmoedigd.

Naast de prognoses KORT en LANG wordt ook nog een *derde* rekenmethode gebruikt: volgens de cijfers en rekenmethode van de Klimaat- en Energieverkenning (KEV) van het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL). Deze prognose wordt getoond in § 2.5.

Focus op de komende 10 jaar

In de prognoses wordt maximaal 10 jaar vooruitgekeken. Dit komt omdat de gemiddelde levensduur van zonnepanelen 12 tot 15 jaar is - zie Appendix A²³. Voor een redelijke kans op een positieve klimaatbijdrage moet de Carbon Payback time daarom korter zijn dan 10 jaar. Daarom heeft het niet veel nut om langer dan 10 jaar vooruit te kijken.

Resultaten

De carbon payback time volgens deze drie prognoses, en afhankelijk van de drie verschillende scenario's voor de carbon footprint van het PV systeem wordt weergegeven in tabel 5:

Carbon Payback Time van 3 soorten PV installaties Geïnstalleerd 1-1-2024 rond Utrecht op een plat dak					
	Aannames	CFP [kg CO ₂ /kWp]	Prognose KORT [jaar]	Prognose LANG [jaar]	PROGNOSE PBL KEV [jaar]
Ultra-Low Carbon	Ultra Low-Carbon panelen, best case aannames	430	4	7	3
Low-Carbon	Low-Carbon PV panelen, optimistische aannames	850	11	>25	7
Mainstream	Mainstream PV panelen, gemiddelde aannames	1440	>25	>25	>25

Tabel 5: Carbon Payback Time volgens verschillende scenario's.

Ofwel:

- *Mainstream systeem: klimaatopwarming wordt versneld*
- *Ultra-Low Carbon systeem: klimaatopwarming wordt vertraagd.*
- *Low Carbon systeem: effect op klimaatopwarming onzeker*
(alleen bij optimistische aannames is de CPT korter dan de levensduur)

Conclusie

Het is verstandig om alleen nog ultra-low carbon zonnepanelen in Nederland te installeren, en om ook bij de andere componenten rekening te houden met de carbon footprint.

Hoe zit het met Zon-op-Land en Zon-op-Water? Bij die systemen is de elektriciteitsopwek typisch 10-20% hoger. Maar de Carbon Footprint is ook 50-80% hoger (zie tabel 1). Daarom is de Carbon Payback Time langer dan voor een Zon-op-Dak systeem en wordt het nog moeilijker om klimaatopwarming te vertragen.

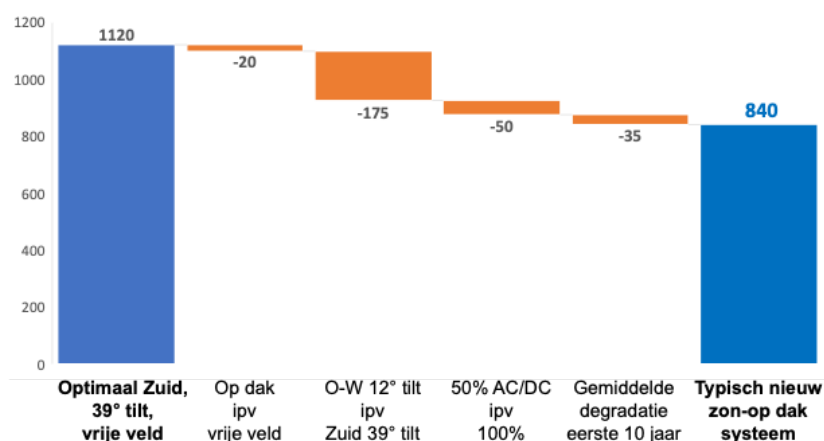
Zonnepanelen die in 2025 of daarna worden geïnstalleerd? De CPT wordt de komende jaren steeds langer. Een Ultra-Low Carbon paneel geïnstalleerd in 2025 heeft al een CPT van 6-8 jaar. Dit komt met name door de stijgende curtailment.

²³ Uiteraard zou zijn er uitzonderingen en zal een klein percentage van de zonnepanelen wel 25 jaar blijven functioneren. Maar de gemiddelde levensduur is de komende jaren waarschijnlijk 12-15 jaar. Zie Appendix A voor uitgebreide toelichting.

2.1 De bruto opwek van een typische nieuwe PV-installatie in NL

Onder ideale omstandigheden wekt een PV systeem in de Bilt ca. 1100 kWh/kWp per jaar op. Maar in werkelijkheid is de bruto opwek van een typisch nieuw PV systeem een stuk lager: 840 kWh/kWp per jaar. Dit cijfer (840) is gebaseerd op onderzoek van het PBL²⁴.

De onderstaande grafiek toont hoe je uitkomt bij een bruto opwek van 840 vollasturen terwijl dit onder ideale omstandigheden zelfs 1120 vollasturen zou zijn.



Figuur 2. De bruto opwek van een typisch zon-op-dak PV systeem in de Bilt is 840 vollasturen. Bron: eigen analyse op basis van PBL cijfers, simulaties van PVGIS²⁵ en simulatiesoftware van SMA²⁶.

De verliesfactoren worden hieronder nader toegelicht.

Orientatie en hellingshoek niet optimaal Zuid maar 'Oost-West' bij 10 graden

Op platte daken worden panelen meestal in een 'Oost-West' opstelling en een tilthoek van 10 graden geïnstalleerd. Op deze manier kan je het hoogste aantal panelen plaatsen op een dak; de windbelasting is zo relatief laag en de onderlinge beschaduwing minimaal. De jaarlijkse opwek zakt hierdoor wel met 15% ten opzichte van de optimale orientatie: op het zuiden met een hellingshoek van 39 graden.

Omvormervermogen: 50% van het paneelvermogen

Zonnepanelen leveren maar een paar uren per jaar het Wattpiek vermogen: alleen als de zon loodrecht invalt en als het nog erg koud is. Die combinatie komt zeer zelden voor. Daarom dimensioneren installateurs de omvormer meestal op 60-70% van het paneelvermogen. Dat scheelt slechts 2-3% van de jaarlijkse opwek maar de omvormer is een stuk goedkoper.

Voor de SDE++ subsidie geldt sinds 2023 dat het AC vermogen maximaal 50% mag zijn van het DC vermogen van de PV installatie, vanwege de problemen met netcongestie. Dit scheelt ongeveer 5% van de jaarlijkse opwek.

²⁴ Lensink, S. (red.) (2024), Eindadvies basisbedragen SDE++ 2024, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving

²⁵ Berekend met PVGIS https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/

²⁶ Berekend met Sunnydesignweb, de software van SMA voor het dimensioneren van omvormers. <https://www.sunnydesignweb.com/sdweb/#/Home>

Degradatie

Na installatie gaan de zonnepanelen langzaam een klein beetje achteruit. Vrijwel alle producenten hanteren een degradatie van 1,5-2% in het eerste jaar en 0,3-0,5% in de jaren daarna.

Conclusie

De gemiddelde opwek van een representatief nieuw plat-dak PV systeem is **840 vollasturen** per jaar. Dit is het startpunt voor alle 3 prognoses.

2.2 Hoeveel vollasturen wordt nieuwe PV-opwek afgeschakeld?

2.2.1 Hoe werkt afschakelen

Steeds vaker is er in Nederland een **stroomoverschot** tijdens zonnige uren. Gascentrales schakelen terug naar een lage opwek en kolencentrales staan uit. Dan moet ook een deel van de PV-installaties worden afgeschakeld omdat de totale stroomopwek niet groter mag zijn dan de stroomvraag.

Dit afschakelen gaat in de praktijk geheel automatisch, op drie manieren:

- i. **Commercieel afschakelen via de day-ahead EPEX markt**
- ii. **Commercieel afschakelen via de intraday en onbalansmarkt**
- iii. **Technisch afschakelen vanwege lokale overbelasting**

i. Commercieel afschakelen via de day-ahead EPEX markt

Dit werkt met software die is verbonden met de energiemarkten. De omvormers van (niet-residentiële) PV-installaties worden op afstand met een signaaltje uitgezet. Diverse bedrijven hebben hiervoor een *energiemanagementsysteem* ontwikkeld. Dat bestaat uit een kastje dat wordt aangesloten op de omvormer en op het internet. Bij bepaalde prijsniveaus krijgt het kastje een signaal om de omvormer uit te schakelen. Zodra de *day-ahead* stroomprijs op de EPEX markt onder de nul zakt worden al vele PV systemen afgeschakeld, vooral grotere systemen zonder SDE++ vergoeding. PV systemen met SDE++ vergoeding schakelen pas af als de prijs lager dan de SDE++ vergoeding.

Dit voorkomt dat men moet betalen voor het leveren van zonnestroom. Veel financiers van PV-installaties eisen tegenwoordig zo'n afschakelsysteem.

ii. Commercieel afschakelen via de onbalansmarkt

Steeds meer aanbieders van energiemanagement systemen handelen op de onbalansmarkt. Dan kan je op bepaalde momenten geld verdienen door af te schakelen - ook tijdens uren dat de day-ahead stroomprijzen nog positief zijn.

iii. Technisch afschakelen vanwege lokale overbelasting

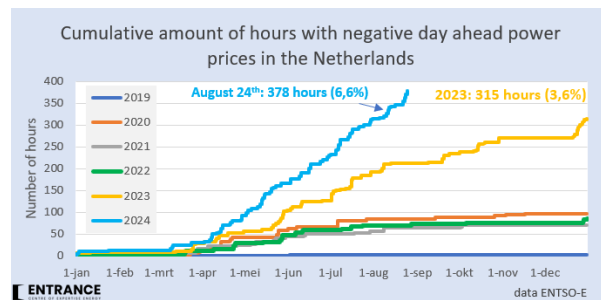
Particulieren merken soms dat hun omvormer afschakelt op zonnige dagen. In dat geval is er op het lokale netwerk een overaanbod van zonnestroom. Door het overaanbod stijgt de spanning lokaal waardoor omvormers automatisch afschakelen. In bepaalde gemeenten is Stedin gestart met het op afstand uitzetten van particuliere PV installaties om lokale overbelasting tegen te gaan.

2.2.2 Recente ontwikkelingen in het afschakelen

Sterke stijging in curtailment: in H1'24 werd de helft van de opwek van sommige PV systemen afgeschakeld.

Day-ahead stroommarkt: tot 24 augustus al 378 uren met een negatieve stroomprijs

Figuur 3 toont dat het aantal uren met een negatieve day-ahead stroomprijs snel stijgt. In het hele jaar 2024 waarschijnlijk meer dan 500 uren.



Figuur 3. Ontwikkeling uren met day ahead prijs < 0 €.
Bron: Entrance/Martien Visser, via 'X', 25-8-24.

Onbalansmarkt: eveneens snelle groei in afschakeluren de afgelopen jaren

Het bedrijf Spectral Energy is een *energy management service provider*. Alleen al Spectral verzorgt het afschakelen van meer dan 380 MW_p aan PV-installaties²⁷. Naast Spectral zijn er nog een tiental andere bedrijven die deze diensten in Nederland aanbieden. De PV installaties en windturbines worden via zowel de *day-ahead* als de passieve onbalansmarkt afgeschakeld.

Het aantal afschakeluren via de onbalansmarkt groeit snel. Volgens Spectral was dit afschakelen via de onbalansmarkt voor PV installaties in 2021 lucratief gedurende 280 uren, in 2022 ca 375 uren en in 2023 ca 450 uren. Dankzij het afschakelen kon je met een PV-installatie van 1 MW_p in 2023 via de intraday-markt circa € 20.000 verdienen²⁸.

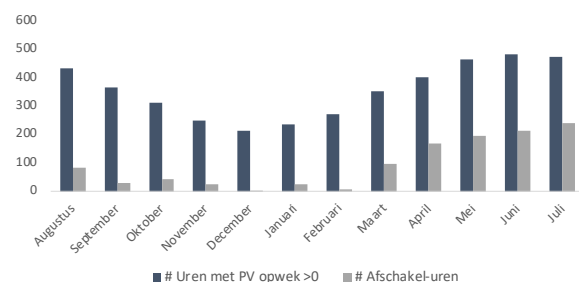
Je mist dan weliswaar ook inkomsten uit de SDE++ subsidie, omgerekend ca € 6.000. Maar dankzij het afschakelen via de onbalansmarkt stijgen de netto jaarinkomsten van het PV project met ca. € 14.000, ofwel met 15-30%. De onbalansmarkt was ook lucratiever dan alleen afschakelen bij negatieve day-ahead prijzen; dan kon je in 2023 ca. €8.000 aan verliezen voorkomen.

Nota bene: het aantal afschakeluren via de onbalansmarkt is hoger dan het aantal uren met negatieve prijs op de day-ahead markt.

In H1'24 al 640 uren waarop een deel van de PV systemen werden afgeschakeld

Energie-experts hebben voor elk uur in de periode augustus '23 tot en met juli '24 berekend: de hoeveelheid zonPV opwek; of er moest worden afgeschakeld en hoeveel opwek werd afgeschakeld.

Uit deze analyse bleek dat zonnepanelen gedurende 4200 uren stroom opwekten. Dat lijkt te kloppen, er zijn 4380 uren zijn met daglicht. Uit de analyse bleek ook een sterke stijging van het aantal afschakeluren vanaf maart.



Figuur 4. Aantal uren per maand met PV opwek >100 MW en het aantal afschakeluren in Nederland. Periode augustus'23 - juli'24.

In het eerst halfjaar van 2024 werden PV systemen gedurende 640 uren afgeschakeld. Dat meer dan het dubbele van het aantal uren met een negatieve day-aheadprijs (240 uur in H1'24).

²⁷ <https://spectral.energy/product/stellar>.

²⁸ Bron: Spectral Energy, webinar, november 2023.

Uit een verdere analyse bleek dat sommige PV systemen op *elk* van de zonnigste²⁹ uren in H1'24 werden afgeschakeld. Dat kan komen omdat de zonPV opwek gedurende de zonnigste uren al groter is dan het gehele stroomverbruik van Nederland.

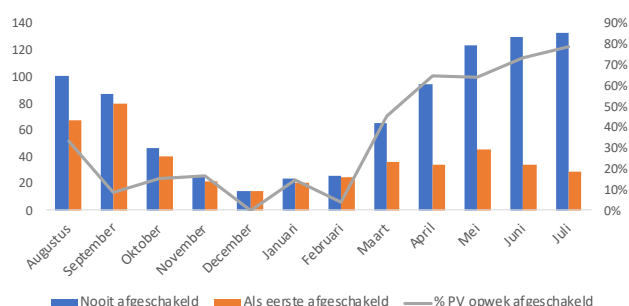
In H1'24 verloor een deel van de PV systemen de helft van de opwek vanwege overcapaciteit

Figuur 5 toont de opwek van twee soorten PV systemen:

- **Systeem A – de blauwe kolommen - wordt nooit afgeschakeld.** Bijvoorbeeld een residentieel PV systeem. Dankzij de salderingsregeling is er geen reden om af teschakelen.
- **Systeem B – de oranje kolommen - wordt juist vaak afgeschakeld.** Bijvoorbeeld een wat groter PV-systeem dat niet mag salderen en dat ook geen SDE++ beschikking heeft. Deze systemen schakelen af zodra de day-ahead prijs negatief is of indien dat loont via de onbalansmarkt.

De grijze lijn toont het percentage van de bruto maandelijkse opwek dat werd afgeschakeld bij Systeem B.

Dit percentage groeide explosief: na de winterdip werd het in maart al 45% en in juli zelfs 78%. Systeem B wekte in H1'24 slechts 210 vollasturen op en miste daarmee 54% van de opwek van Systeem A (460 vollasturen).



Figuur 5. Maandelijkse opwek van PV-systemen met en zonder afschakelen in de periode Aug'23 – Juli'24.

Systematiek achter de curtailment analyse en verificatie

De geraadpleegde energie-experts hebben als basis gebruikt de werkelijke gegevens op uurbasis waaronder de opwek van gascentrales, kolencentrales, wind-op-zee en kernenergie; de hoeveelheid export en import; en het totale stroomverbruik. De opwek door ZonPV en onshore wind is gemodelleerd op basis van het opgestelde vermogen aan PV en wind per provincie (CBS), en de gegevens van 30 KNMI weerstations. Daarnaast zijn andere gegevens gebruikt waaronder de day-ahead uurprijs. Uit het (vertrouwelijke) rekenmodel volgt de hoeveelheid opwek uit wind en zonPV die moet worden afgeschakeld.

De hier gepresenteerde uitkomsten - dat meer dan 50% van de opwek van bepaalde PV systemen werd gemist door afgeschakelen – is bevestigd door twee energiemanagement providers.

²⁹ Definitie 'zonnigste uren': uren met een bruto PV opwek groter dan 0,5 kWh per kWp.

2.2.3 Uitgangspunten voor onze analyse en prognoses

De oorsprong van dit rapport is de vraag: hoe nuttig is het plaatsen van extra PV systemen in Nederland voor het vertragen van klimaatopwarming?

We gaan in deze analyse uit van het plaatsen van één extra PV systeem van 1 kWp, dat wordt geplaatst op 1-1-2024 (of op 1-1-2025).

De afschakelgegevens van de periode augustus 2023 tot en met juli 2024. Daarom zijn er prognoses nodig voor het aantal afschakelingen in 2025 en de jaren daarna. Voor het maken van een zuivere analyse en realistische prognoses gebruiken we drie uitgangspunten:

1) Nieuwe PV wordt als eerste afgeschakeld.

Tijdens afschakelingen is er een stroomoverschot. Extra zonnestroom is op die momenten zinloos.

2) Er wordt géén extra PV geïnstalleerd in Nederland na dit nieuwe systeem van 1 kWp

Voor een zuivere analyse moeten we een cirkelredenering voorkomen.

Daarom nemen we in de prognoses aan dat er nul extra zonnepanelen meer bijkomen in Nederland, na het plaatsen van het extra PV systeem.

We kijken *wel* naar de impact op het aantal afschakelingen door andere ontwikkelingen:

- de extra windopwek die de komende jaren wordt bijgeplaatst in Nederland
- ontwikkelingen in het buitenland,
- ontwikkelingen van het stroomverbruik.

Overigens zal het werkelijke aantal afschakelingen in 2025 en daarna *hoger* zijn dan in onze prognose, omdat er in werkelijkheid *wel* PV-systemen in Nederland worden bijgeplaatst, zowel door huishoudens als vanuit de nog bestaande pijplijn aan SDE++ beschikkingen.

3) Realistische, praktische haalbare maxima en minima

Voor de prognoses worden realistische, in de praktijk haalbare maxima en minima gebruikt.

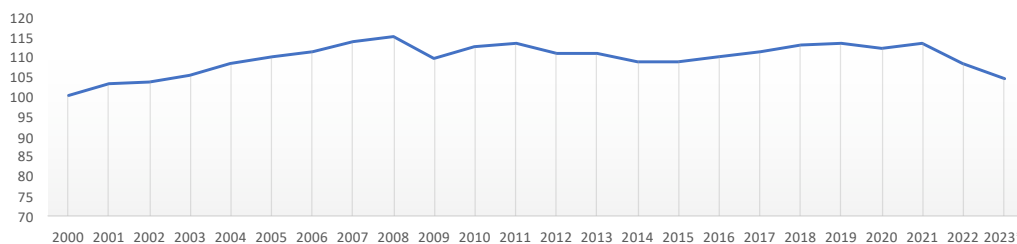
Bijvoorbeeld de extra wind-opwek kan niet veel afwijken van de bouwplannen van vergunde projecten en de realisatie van de afgelopen jaren.

2.2.4 Achtergrond: de elektriciteitsvraag en de groeiende opwek door zon en wind

In paragraaf 2.2.5 worden prognoses gemaakt van het aantal afgeschakelde vollasturen. Eerst geven we hier toelichting over de vijf relevant factoren voor die prognoses.

1) De totale stroomvraag is niet gegroeid

Het is verrassend maar zoals Figuur 6 toont is ons elektriciteitsverbruik sinds 2005 ruwweg 112 TWh (Terawattuur) met schommelingen van ± 3 TWh. In 2023 is de vraag iets gekrompen tot 105 TWh. Dat is gelijk aan het verbruik in 2003 (bron: CBS).



Figuur 6: Netto elektriciteitsverbruik in Nederland per jaar, in TWh (miljard kWh).

Netto elektriciteitsverbruik = opwek + import - export - distributieverliezen. Bron: CBS, 2024.

Deze krimp is verrassend omdat de bevolking sinds 2003 met 10% groeide; er kwamen vele elektrische apparaten bij; een half miljoen elektrische auto's; een half miljoen warmtepompen; en een aantal grote datacenters. Deze groeifactoren zijn gecompenseerd door hogere efficiëntie (LED lampen, zuiniger witgoed, televisies en elektromotoren) en automatisch afschakelen. Bovendien is energieintensieve productie (Aldel, Nyrstar, etc) voor een deel verplaatst naar het buitenland.

2) PV-opwek al vaak hoger dan de totale stroomvraag

Gemiddeld is het stroomverbruik in Nederland 13 GW. Dat gaat via een vast patroon met een piek van 15-18 GW van 17.00 uur tot 20.00 uur en een dal van 7-9 GW van 1.00 uur tot 4.00 uur 's nachts. Op werkdagen is het iets hoger dan in het weekend, in de winter wat hoger dan in de zomer. In tegenstelling tot landen als Spanje en de VS is er op zonnige dagen geen significante verhoging van het stroomverbruik (door airco's).

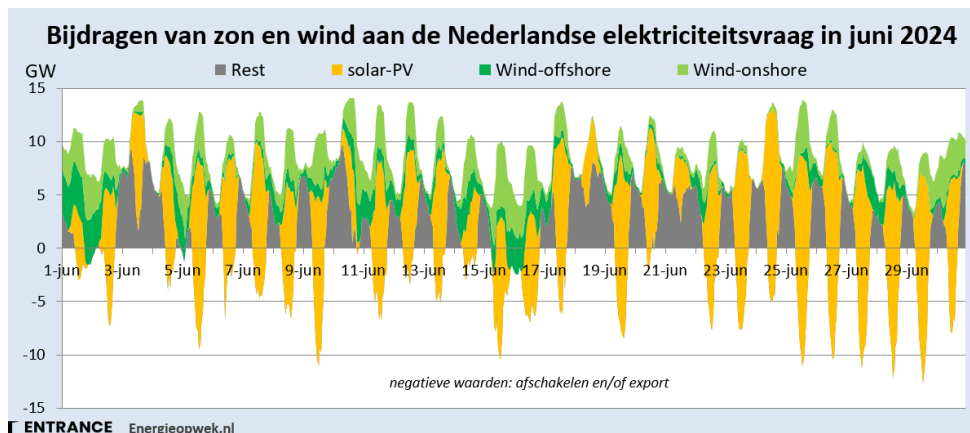
Eind 2023 stond in Nederland een PV-vermogen opgesteld van 24 GW. Onze PV-installaties wekken in de zomermaanden 12-16 GW op rond het middaguur terwijl de vraag varieert van 10 tot 14 GW. De opwek van *alleen* onze zonnepanelen is dan hoger dan onze totale vraag! Dan ontstaat er direct een stroomoverschot.

3) Correlatie tussen de opwek uit zonnepanelen en windturbines op land

Nederland staat ook in de internationale top met de hoeveelheid windopwek per inwoner. Eind 2023 stond er 6,5 GW Wind-op-Land opgesteld en 4,5 GW aan Wind-op-Zee.³⁰ Dus als de zon een beetje schijnt en als het een beetje waait ontstaat er al vaak een stroomoverschot.

³⁰ Bron: CBS.nl.

Figuur 7 toont dit effect voor de maand juni 2024: de opwek van zon en wind samen is vrijwel elke dag hoger dan de vraag. Ook valt de correlatie op tussen opwek uit zonPV en Wind-op-Land. De opwarming door de zon veroorzaakt 's middags vaak wind (onshore). 's nachts is er vaak weinig wind.



Figuur 7: In Juni'24 was de opwek uit wind en zon vaak hoger dan de totale vraag.
Bron: Entrance/Energieopwek.nl, via MartienVisser op X, juli 2024.

4) Must-run-stroomopwek: 1-2 GW

Naast de opwek uit Zon en Wind heeft Nederland 1-2 GW aan zogeheten 'must-run' stroomopwek. Deze opwek blijft ook draaien bij negatieve stroomprijzen. Bij must-run stroomopwek is het onwenselijk of duur om af te schakelen. Voorbeelden:

- afvalverbranding
- verbranding van hoogovengas
- gascentrales die *stand-by* staan voor netbalancering

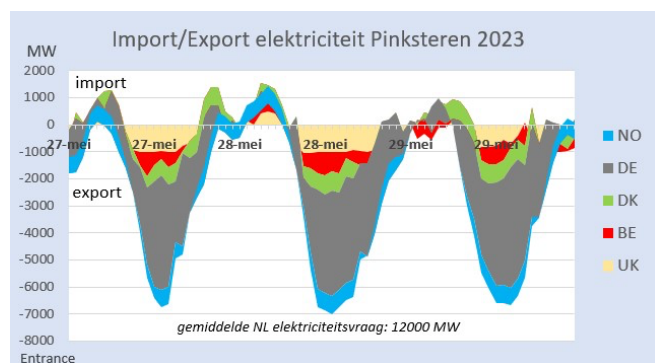
Deze laatste categorie vormt het leeuwendeel van must-run. Gascentrales zijn nodig als regelbaar vermogen. Ze kunnen zeer snel meer vermogen leveren als de wind wegvalt of als er bewolking komt. Samen produceren de standby gascentrales ongeveer 1 GW – ook bij negatieve stroomprijzen. Dit moet worden gezien als een basisopwek die niet wordt afgeschakeld.

Door de must-run opwek stijgt het aantal uren met een stroomoverschot. We nemen in de prognoses aan dat de hoeveelheid must-run opwek gelijk blijft.

5) Stroomexport

Gelukkig zorgt **stroomexport** voor een afname van het aantal uren met een stroomoverschot. In 2023 kon een stroomoverschot vaak worden geëxporteerd – met name naar Duitsland.

Figuur 8 toont een voorbeeld van de stroomexport en -import tijdens het zonnige pinksterweekend in 2023. Rond het middaguur werd met 6-7 GW veel stroom geëxporteerd – de *helft* van onze vraag en de maximale capaciteit van de internationale kabels. In de nacht was er een enige import, vooral uit Noorwegen (uit waterkrachtcentrales).



Figuur 8: export en import van elektriciteit door stroomoverschot, pinksterweekend 2023.

Bron: Martien Visser, data Entrace/ Energieopwek.nl.

De stroomexport wordt bepaald door de vraag, de internationale stroomprijzen en het vermogen van de internationale kabels.

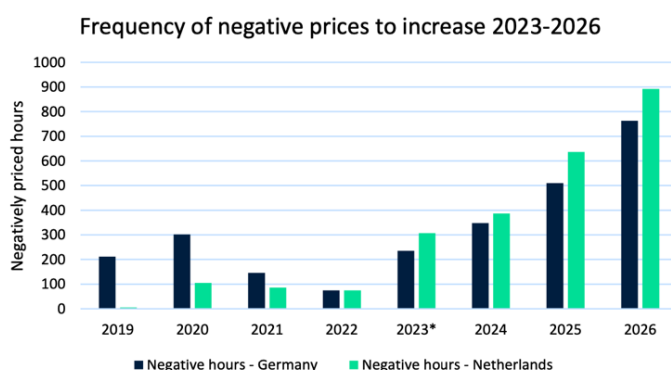
Het vermogen van de kabels naar onze buurlanden per begin 2025³¹:

- Noorwegen: 0,7 GW
- Denemarken: 0,7 GW
- Verenigd Koninkrijk: 1 GW
- België: 1,7 GW
- Duitsland: 4,2 GW

2.2.5 Prognoses van het aantal afschakelingen in de periode 2024-2027

Openbare prognoses van derde partijen

Energie-onderzoeksbureau ICIS Analytics is de enige ons bekende partij die deze prognose heeft gemaakt. In mei'23 publiceerde ICIS de analyse met Figuur 9, waarin het een snelle groei van het aantal uren met negatieve energieprijzen op de day-ahead-markt voorzag. Deze groei is echter al door de werkelijkheid ingehaald: in 2024 waren er al 458 uren met een negatieve day-ahead prijs.



Figuur 9: Prognose aantal uren met negatieve stroomprijzen op de day-ahead-markt.

Bron: ICIS Analytics, 2023.³²

³¹ Bron: <https://www.clo.nl/indicatoren/nl0595-interconnectiecapaciteit-elektriciteit>

³² https://www.linkedin.com/posts/ellie-chambers1_german-and-dutch-negative-price-hours-to-activity-7092055361754423296-0sMO/

De systematiek van onze prognoses

Als basis voor de prognoses voor 2025 en latere jaren gebruiken we de gevalideerde uurdata van energie-experts over de periode juli'23 tot en met juli'24 waarin onder andere de totale elektriciteitsvraag en de opwek van Zon, Wind, export, import, en must-run zijn opgenomen.

Vervolgens voegen we voor de jaren 2025, 2026 en 2027 een minimum (Prognose KORT) en een maximum (Prognose LANG) toe aan:

- de additionele opwek uit Wind op Land en Wind op Zee;
- verandering van totale stroomvraag
- verandering in export
- batterij-opslag en productie van groene waterstof.

Tenslotte wordt berekend of er op het betreffende uur zonPV moet worden afgeschakeld of niet.

Maximale en minimale wijzigingen in de periode 2025-2027

	Wind op Land		Wind op Zee		PV opwek		Stroomvraag		Export		Algemene onzekerheidscorrectie	
	"Kort"	"Lang"	"Kort"	"Lang"	"Kort"	"Lang"	"Kort"	"Lang"	"Kort"	"Lang"	"Kort"	"Lang"
2025	+10%	+10%	0%	+15%	0%	+5%	0%	0%	-10%	-20%	-10%	+5%
2026	+15%	+20%	+10%	+30%	0%	+5%	0%	0%	-20%	-35%	-10%	+5%
2027	+20%	+30%	+30%	+40%	0%	+5%	0%	0%	-30%	-50%	-10%	+5%

Tabel 6: Minimale en maximale wijziging per factor ten opzichte van de waarde in 2024.

Tabel 6 toont de minimale en maximale wijziging per factor ten opzichte van de waarden in 2024 die zijn gebruikt om te komen tot de prognose KORT en prognose LANG.

Deze inputs worden per factor kort toegelicht.

- **Wind-op-Land.** Volgens het CBS werd er de afgelopen jaren 600-700 MW per jaar bijgebouwd, terwijl de capaciteit op dit moment 6,5 GW bedraagt. Provincies, RES-regio's en ontwikkelaars zijn nog volop bezig om extra wind-opwek te realiseren. De bijbouw zal waarschijnlijk niet versnellen ten opzichte van de afgelopen jaren maar kan wel dalen als geluidsnormen of afstandnormen worden gewijzigd ten gunste van de omwonenden.
- **Wind-op-Zee.** Eind 2023 kende Nederland een W-o-Z capaciteit van 4,7 GW. Het eerste nieuwe windpark dat worden opgeleverd is windpark Hollandse Kust West. Deze is in 2021 getenderd in drie kavels van 700 MW. De bouw is gestart. De kavels worden opgeleverd in de periode 2025 – 2027. Als deze drie kavels operationeel zijn is de capaciteit vergroot met 44%. De opleversnelheid is nog wel onzeker, vandaar de maxima en minima.
- **PV-opwek.** Zoals in § 2.2.3 toegelicht nemen we aan dat er géén PV opwek bijkomt om een cirkelredenering te voorkomen. Wel was H1'24 relatief nat en donker. Volgens weerplaza.nl waren er 7% minder zonuren ten opzichte van het langjarig gemiddelde. Om te corrigeren voor dit effect nemen we in Prognose Lang aan dat de PV opwek de komende jaren 5% hoger ligt dan in 2024.
- **Stroomvraag.** De stroomvraag varieerde de afgelopen 20 jaar minder dan een paar procent per jaar (Zie Figuur 6). Er is geen aanleiding voor een trendbreuk met significante groei of krimp tot 2030:

- De efficiency van apparaten blijft toenemen. Dit zorgt voor een lichte voortgaande krimp van het verbruik.
 - Als er tot 2030 een een half miljoen elektrische auto's bijkomen stijgt het totale elektriciteitsverbruik met 1 TWh: 1% van het huidige elektrische verbruik.
 - Als er tot 2030 een half miljoen full-electric warmtepompen bijkomen in bestaande woningen stijgt het totale elektriciteitsverbruik met 1,5 TWh: 1,5% van het huidige elektrische verbruik
 - Een aantal grote groene waterstofprojecten zijn uitgesteld of afgeblazen
 - Vanwege de netcongestie en hoge stroomkosten is het de vraag wanneer de krimp in industriële vraag gaat omslaan in groei en hoeveel groei er is de komende 10 jaar
- Kortom: er is geen aanleiding voor significante groei of krimp tot 2030. De eventuele variatie van een paar procent wordt ook ondervangen via de post 'algemene onzekerheidscorrectie'.

- **Export.** De stroomopwek met zonnepanelen en windturbines groeit snel in onze buurlanden. Eind 2023 bedroeg de Duitse PV opwek ca 80GW. In 2024 -2025 komt er jaarlijks 15-18 GW bij waardoor ook Duitsland gaat kampen met steeds grotere stroomoverschotten als de zon schijnt. Gezien de grote (88%) correlatie tussen zonuren in Nederland en Duitsland wordt het steeds moeilijker om zonnestroom-overschotten naar Duitsland te exporteren. Daarbovenop komt de verdere bouw van windturbines in Duitsland, dat zorgt eveneens voor meer uren met een stroomoverschot. Ook andere buurlanden bouwen meer opwek uit zon en wind. Nederland kan daardoor steeds minder zon- of windstroom exporteren.
- **Algemene onzekerheidscorrectie.** Na het verwerken van alle inputs volgt een resultaat met de afgeschakelde vollasturen van een nieuw PV systeem. Hierop maken we een algemene onzekerheidscorrectie in verband met de onzekerheden in de data.

Resultaten

Tabel 7 toont de resultaten met het aantal afschakelingen voor een nieuw PV systeem dat werd geïnstalleerd op 1-1-2024.

Het percentage van de bruto opwek dat het systeem door afschakelen mist groeit volgens Prognose KORT van **49%** in 2024 tot **60%** in 2027, en volgens Prognose LANG van **57%** in 2024 tot **75%** in 2027. *Ofwel: tijdens de helft tot driekwart van de opwek staat het PV systeem uit.*

Prognoses afschakelen voor Nieuw PV systeem geïnstalleerd op 1-1-24						
		2023	2024	2025	2026	2027
Prognose KORT						
# Afschakelingen	[uur]	481	1.150	1.412	1.493	1.614
Afgeschakelde PV opwek	[vollastuur]	169	443	513	526	538
% bruto opwek gemist	[%]	19%	49%	57%	58%	60%
Prognose LANG						
# Afschakelingen	[uur]	481	1.342	1.734	1.950	2.152
Afgeschakelde PV opwek	[vollastuur]	169	517	618	646	671
% bruto opwek gemist	[%]	19%	57%	69%	72%	75%

Tabel 7: Minimale en maximale wijziging per factor ten opzichte van de waarde in 2024.

2.2.6 Prognoses van het aantal afschakelingen in de periode 2028-2034

Volgens Tabel 7 komt het afschakelpercentage in 2027 uit op een bandbreedte van 60% tot 75%. Voor de jaren 2028 tot 2034 zetten we deze percentages vast. Dat komt omdat de diverse ontwikkelingen tegengestelde effecten hebben en elkaar grotendeels neutraliseren.

Het afschakelpercentage in Prognose LANG zou verder kunnen **groeien** vanwege:

- een nieuw windpark op zee van 4 GW wordt waarschijnlijk opgeleverd (IJmuiden Ver, getenderd begin 2024)
- de bijbouw van Wind en Zon in onze buurlanden komt niet stil te liggen
- het stroomverbruik neemt mogelijk af door minder afname door energie-intensieve industrie (vanwege de hoge stroomkosten in Nederland, Duitsland en Engeland)

Maar een afschakelpercentage hoger dan 75% zou niet veel veranderen aan de uitkomst: de Carbon Payback Time is relatief lang. Daarom laten we dit op 75%.

Het afschakelpercentage in Prognose KORT kan alleen significant dalen indien:

- er in Nederland en buurlanden vrijwel geen nieuwe wind en PV wordt gerealiseerd na 2027;
- uiterlijk in 2029 zeer grootschalige batterij-opslag wordt gerealiseerd – honderd keer groter dan de aangekondigde GIGA Leopard batterij die in 2027 in Delfzijl zou worden opgeleverd;
- er meer dan 2 GW aan electrolyse-capaciteit voor groene waterstof wordt gerealiseerd.

Dit is een onwaarschijnlijk scenario omdat de business case van net-batterijen onzeker is en omdat veel grootschalige groene waterstof projecten zijn uitgesteld of afgeblazen.

Als het kabinet besluit om ruime subsidies vrij te maken voor grootschalige groene waterstof of batterijen is er nog een 3-6 jaar nodig voor vergunningen, financiering, netaansluiting en bouwtime. En hoe later de realisatie des te kleiner de impact op de carbon payback time.

2.2.7 Opwek van een nieuw PV systeem in de periode 2024-2034 volgens twee prognoses

Prognose KORT		Netto vollasturen van een nieuw PV systeem geïnstalleerd op 1-1-24									
		2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
Bruto vollasturen	kWh	840	840	840	840	840	840	840	840	840	840
Prognose afgeschakelde opwek	%	-49%	-57%	-58%	-60%	-60%	-60%	-60%	-60%	-60%	-60%
Gemiste vollasturen	kWh	-414	-479	-491	-504	-504	-504	-504	-504	-504	-504
Netto geleverde vollasturen	kWh	426	361	349	336	336	336	336	336	336	336
Prognose LANG		Netto vollasturen van een nieuw PV systeem geïnstalleerd op 1-1-24									
		2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
Bruto vollasturen	kWh	840	840	840	840	840	840	840	840	840	840
Prognose afgeschakelde opwek	%	-57%	-69%	-72%	-75%	-75%	-75%	-75%	-75%	-75%	-75%
Gemiste vollasturen	kWh	-483	-576	-603	-630	-630	-630	-630	-630	-630	-630
Netto geleverde vollasturen	kWh	357	264	237	210	210	210	210	210	210	210

Tabel 8: Netto vollasturen van een PV systeem geïnstalleerd op 1-1-'24 volgens Prognose KORT en Prognose LANG.

Tabel 8 toont het netto aantal geleverde vollasturen van een PV systeem geïnstalleerd op 1-1-'24 volgens de twee Prognoses KORT en LANG; ergens tussen 210 en 360 uur. De werkelijkheid ligt waarschijnlijk ergens in dit bereik.

2.3 Hoeveel emissies worden vermeden met extra zonnestroom?

In 2023 wekten gascentrales nog 50% van de elektriciteitsvraag op.

In de ideale situatie bespaart elke kilowattuur zonnestroom de broeikasgasemissies van één kilowattuur uit een gascentrale.³³ De broeikasgasemissie van een Nederlandse gascentrale is circa 360 gCO₂/kWh.

Maar in werkelijkheid is de besparing in emissies lager. Dit komt omdat de verdrongen opwek niet alleen van gascentrales komt maar ook deels van schone opwek.³⁴ En de komende jaren worden de emissies van onze energiemix steeds lager. Het doel volgens het 'Nationaal Plan Energiesysteem' is nul emissies vanaf 2035.

Residual load en residual supply mix

De *residual load* is de hoeveelheid elektriciteit die nodig is ná aftrek van alle opwek van wind en zon en de must-run-opwek.

Deze residual load wordt door een mix van stroomopwekkers geleverd -de *residual supply* - met elk een specifieke broeikasgasemissie, zoals:

- Gascentrales
- Biomassacentrales
- Stroomimport (bijv waterkracht uit Noorwegen)

Emissies residual mix in H1'2024

Dankzij de gedetailleerde dataset met urengegevens van juli'23 tot en met juli'24 konden we de samenstelling van de residual load nauwkeurig analyseren. In stap twee konden we deze residual load-mix wegen met de hoeveelheid PV opwek.

Deze analyse gaf voor de residual load in H1'24 een *carbon intensity* van 334 gram CO₂ per kilowattuur.

Emissies residual mix in 2035

Volgens het Nationaal Plan Energiesysteem moet de Nederlandse elektriciteitsopwek per 2035 emissievrij zijn. Dit kan worden bereikt door een mix van maatregelen:

- Extra windturbines op land en op zee
- Grootschalige elektrische opslag
- Kerncentrales (grote centrales en SMR's)
- Extra kabels naar bijvoorbeeld Noorwegen, Engeland, België
- Meer biomassa

De emissies van gascentrales wordt hierdoor geleidelijk steeds kleiner.

³³ Kolencentrales zijn niet snel regelbaar en worden in 2030 gesloten.

³⁴ Een ander effect dat meespeelt is dat gascentrales minder efficiënt zijn in deellast (bijvoorbeeld 20-40% van het vermogen). Dit heeft een kleine (maar onbekende) impact op de bespaarde broeikasgasuitstoot.

De Carbon Footprint van deze maatregelen nemen we mee

Elk van de genoemde maatregelen voor *net-zero* elektriciteit brengt CO₂-emissies met zich mee tijdens de bouwfase – de carbon footprint. We houden rekening met deze emissies en verrekenen deze via de opgewekte stroom. De *carbon intensity* van de genoemde maatregelen varieert van ca 6 gram CO₂ per kWh (kernenergie) tot circa 50 gram CO₂ per kWh (Wind op Zee). Maar kernenergie is waarschijnlijk pas na 2035 operationeel.

Bij batterij-opslag en extra kabels naar buurlanden verwachten we dat de *carbon intensity* beperkt blijft tot dan 50 g CO₂ per kWh. Om prudent te zijn en ons niet rijk te rekenen, gebruiken we daarom 50 gram CO₂ per kWh voor de mix van maatregelen.

In Prognose LANG nemen we aan dat de elektriciteitsopwek in 2035 in Nederland volgens plan 'emissievrij' is. Vanwege het bovenstaande nemen we aan dat de *carbon intensity* van de *residual supply mix* vanaf 2035 niet gelijk is aan 0 maar aan 50 gram CO₂-eq /kWh.

In Prognose KORT nemen we aan dat de transitie naar emissievrije stroom ca. 5 jaar langer duurt. De *carbon intensity* van de *residual supply mix* heeft in dit scenario in 2035 nog een uitstoot van 100 gram CO₂-eq /kWh.

In de jaren tussen 2024 en 2035 gaan we uit van een lineaire afname.

Conclusie

Onderstaande tabel toont de prognose van de te verdringen broeikasgasemissies in gram CO₂-eq, per extra kilowattuur zonnestroom¹ volgens Prognose KORT en Prognose LANG.

Bespaarde BKG emissies													
[gCO ₂ / kWh]	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Prognose Kort	355	334	313	291	270	249	228	206	185	164	143	121	100
Prognose Lang	350	334	300	275	250	225	200	175	150	125	100	75	50

Tabel 9: Broeikasgasemissies van de residual supply mix, gewogen met de PV opwek, volgens de twee prognoses.

2.4 Carbon Payback Time volgens Prognoses KORT, LANG en KEV

2.4.1 Carbon Payback Time volgens Prognose KORT

Jaarlijks vermeden broeikasgasemissies

Tabel 10 toont de jaarlijks bespaarde BKG-emissies volgens de aannames van Prognose KORT:

Prognose KORT		Jaarlijkse bespaarde emissies van een nieuw PV systeem van 1 kWp, geïnstalleerd op 1-1-24											
		2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Bruto vollasturen	kWh	840	840	840	840	840	840	840	840	840	840	840	840
Prognose afgeschakelde opwek	%	-49%	-57%	-58%	-60%	-60%	-60%	-60%	-60%	-60%	-60%	-60%	-60%
Gemiste vollasturen	kWh	-414	-479	-491	-504	-504	-504	-504	-504	-504	-504	-504	-504
Netto geleverde vollasturen	kWh	426	361	349	336	336	336	336	336	336	336	336	336
Emissies residual supply mix	kg CO ₂ /kWh	0,334	0,313	0,291	0,270	0,249	0,228	0,206	0,185	0,164	0,143	0,121	0,100
Bespaarde BKG emissies	kg CO ₂	-142	-113	-102	-91	-84	-76	-69	-62	-55	-48	-41	-34

Tabel 10: Jaarlijks bespaarde broeikasgassen in kg CO₂ per kilowattpiek, van extra PV-systeem, volgens Prognose KORT.

CO₂-terugverdiëntijd volgens Prognose KORT

Tabel 11 toont het jaarlijkse emissiesaldo voor elk van de drie soorten PV systemen. Deze berekening vermindert de Carbon Footprint jaarlijks op basis van de vermeden emissies. De Carbon Footprint is terugverdiend zodra het emissiesaldo negatief is (aangeduid met negatieve, groene cijfers).

Emissiesaldo - Prognose KORT [kg CO ₂ /kWp]		CFP	31-12-2023	31-12-2024	31-12-2025	31-12-2026	31-12-2027	31-12-2028	31-12-2029	31-12-2030	31-12-2031	31-12-2032	31-12-2033
Bespaarde BKG emissies				-142	-113	-102	-91	-84	-76	-69	-62	-55	-48
Ultra-Low Carbon	430	430	288	175	73	-18	-101	-178	-247	-309	-364	-412	
Low-Carbon	850	850	708	595	493	402	319	242	173	111	56	8	
Mainstream	1440	1440	1298	1185	1083	992	909	832	763	701	646	598	

Tabel 11: Emissiesaldo van drie soorten PV systemen van 1 kWp volgens Prognose KORT

Tabel 12 toont de Carbon Payback Time volgens Prognose KORT voor de 3 soorten PV systemen:

Type PV-systeem	Carbon payback time
Ultra-Low Carbon	4 jaar
Low-Carbon	11 jaar
Mainstream	>25 jaar

Tabel 12: Carbon payback time per type systeem volgens Prognose KORT.

2.4.2 Carbon Payback Time volgens Prognose LANG

Jaarlijks vermeden broeikasgasemissies

Tabel 13 toont de jaarlijks bespaarde BKG-emissies volgens Prognose LANG.

Prognose LANG		Jaarlijkse bespaarde emissies van een nieuw PV systeem van 1 kWp, geïnstalleerd op 1-1-24											
		2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Bruto vastlasturen	kWh	840	840	840	840	840	840	840	840	840	840	840	840
Prognose afgeschakelde opwek	%	-57%	-69%	-72%	-75%	-75%	-75%	-75%	-75%	-75%	-75%	-75%	-75%
Gemiste vastlasturen	kWh	-483	-576	-603	-630	-630	-630	-630	-630	-630	-630	-630	-630
Netto geleverde vastlasturen	kWh	357	264	237	210	210	210	210	210	210	210	210	210
Emissies residual supply mix	kg CO ₂ /kWh	0,334	0,300	0,275	0,250	0,225	0,200	0,175	0,150	0,125	0,100	0,075	0,050
Bespaarde BKG emissies	kg CO₂	-119	-79	-65	-53	-47	-42	-37	-32	-26	-21	-16	-11

Tabel 13: Jaarlijkse besparing broeikasgassen in kg CO₂ per kilowattpiek van een extra PV-systeem volgens Prognose LANG.

CO₂-terugverdiëntijd volgens Prognose LANG

Tabel A14 toont het jaarlijkse emissiesaldo voor elk van de drie soorten PV systemen. De Carbon Footprint wordt jaarlijks vermindert met de vermeden emissies. De Carbon Footprint is terugverdiend zodra het emissiesaldo negatief is (aangeduid met negatieve, groene cijfers).

Emissiesaldo - Prognose KORT [kg CO ₂ /kWp]		CFP	31-12-2023	31-12-2024	31-12-2025	31-12-2026	31-12-2027	31-12-2028	31-12-2029	31-12-2030	31-12-2031	31-12-2032	31-12-2033
Bespaarde BKG emissies				-119	-79	-65	-53	-47	-42	-37	-32	-26	-21
Ultra-Low Carbon	430	430	311	232	166	114	67	25	-12	-44	-70	-91	
Low-Carbon	850	850	731	652	586	534	487	445	408	376	350	329	
Mainstream	1440	1440	1321	1242	1176	1124	1077	1035	998	966	940	919	

Tabel 14: Emissiesaldo van drie soorten PV systemen van 1 kWp volgens Prognose LANG.

Tabel 15 toont de Carbon Payback Time volgens Prognose LANG voor de drie systemen:

Type PV-systeem	Carbon Payback Time
Ultra-Low Carbon	7 jaar
Low-Carbon	> 25 jaar
Mainstream	> 25 jaar

Tabel 15: Carbon Payback Time per type systeem volgens Prognose LANG.

2.5 Carbon payback time volgens de KEV'22

Introductie van de Klimaat- en Energieverkenningen (KEV)

De jaarlijkse KEV, uitgegeven door het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL), is gebaseerd op een gedetailleerd rekenmodel van TNO en geeft onder meer prognoses van de broeikasgasemissies van de Nederlandse elektriciteitsmix.

In het rekenmodel van TNO zijn vele relevante factoren verwerkt: de groei van windstroom, zonnestroom, import, export, batterijen, vraagsturing, groei van de vraag, efficiëntie van apparaten.

De emissies van de elektriciteitsmix zijn de afgelopen 10 jaar gehalveerd dankzij onder andere de vele nieuwe windturbines en zonnepanelen en door het sluiten van kolencentrales. In 2023 bedroeg de gemiddelde CO₂-uitstoot van Nederlandse elektriciteit 230 gram per kilowattuur (bron: CBS).

Deze emissieprognose van onze elektriciteit wordt ook gebruikt binnen de SDE++-regeling om te berekenen hoeveel emissies worden bespaard door een bepaald project. Op deze manier kan de subsidie-intensiteit worden berekend voor alle projecten.

Een soort cirkelredenering maar met een kleine fout

Verreweg de meeste groei in schone opwek van 2025 komt volgens de KEV'22-prognoses door Wind-op-Zee. Maar ook de hoeveelheid zon-PV groeit een beetje in de prognoses. Daardoor kun je niet zuiver berekenen wat de impact is van een PV-systeem dat in 2024 wordt geplaatst. De verdere verlaging van broeikasgasemissies in het model wordt immers deels veroorzaakt door extra zonnepanelen die in latere jaren worden geplaatst. Dat geeft een soort cirkelredenering.

De fout die hierdoor wordt veroorzaakt is echter klein, omdat de KEV'22, gepubliceerd in oktober 2022, ervan uitgaat dat de zon-PV-capaciteit³⁵ geleidelijk groeit van 15 GW per eind 2021 naar 25 GW in 2030.

Maar met 4 GW in 2022 en 2023 is de PV-capaciteit veel sneller gegroeid dan in de KEV-prognose: eind 2023 stond er al 24 GW, terwijl het PBL dat pas voorzag voor 2030. Hierdoor zijn de broeikasgasemissies in 2024-2028 in werkelijkheid al lager dan wat is aangenomen in de KEV.

Jaarlijks vermeden broeikasgasemissies

De bruto-opwek met jaarlijkse degradatie wordt getoond als de eerste rij van tabel A16.

In de KEV'22 geeft het PBL een prognose voor de CO₂-emissies in **2025** en **2030**. Het PBL geeft dit voor **2034** op basis van hetzelfde rekenmodel in het rapport *Eindadvies SDE++ 2023*.

Na interpolatie voor de tussengelegen jaren ontstaat de tweede rij in tabel A14.

Vermenigvuldiging van de eerste en tweede rij resulteert in de jaarlijks vermeden BKG-emissies:

³⁵ PBL, KEV'22, pagina 93, Figuur 4.4.

Prognose KEV'22		Bespaarde BKG-emissies door 1 kWp PV systeem, aangesloten op 1-1-2024										
		2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
Bruto opwek + degradatie	kWh	840	840	840	840	840	840	840	840	840	840	840
Gemiddelde emissies elektriciteitsmix*	kg CO2	0,230	0,210	0,190	0,172	0,154	0,136	0,118	0,100	0,090	0,084	0,077
Bespaarde BKG emissies / kWp / jr	kg CO2	-193	-165	-149	-134	-120	-105	-91	-76	-69	-64	-58

Tabel 16: bespaarde emissies van 1 kWp-zonnepanelen volgens de KEV'22.

CO₂-terugverdiëntijd volgens prognose KEV'22

Tabel 17 toont het jaarlijkse emissiesaldo. De carbon footprint is terugverdiend zodra het emissiesaldo negatief is (aangeduid met groene cijfers).

Emissie-saldo Prognose KEV'22 [kg CO2/kWp]		CFP	31-12-2023	31-12-2024	31-12-2025	31-12-2026	31-12-2027	31-12-2028	31-12-2029	31-12-2030	31-12-2031	31-12-2032	31-12-2033
Bespaarde BKG emissies				-176	-160	-144	-129	-114	-99	-84	-76	-71	-64
Ultra-Low Carbon	430	430	254	94	-50	-180	-294	-393	-477	-553	-624	-688	
Low-Carbon	850	850	674	514	370	240	126	27	-57	-133	-204	-268	
Mainstream	1440	1440	1264	1104	960	830	716	617	533	457	386	322	

Tabel 17: Emissiesaldo van drie soorten PV systemen van 1 kWp volgens Prognose KEV.

Tabel 18 toont de Carbon Payback Time volgens de Prognose van KEV'22 voor de 3 cases:

Carbon footprint van PV-systeem	Carbon payback time
Ultra-Low Carbon	3 jaar
Low-Carbon	7 jaar
Mainstream	> 25 jaar

Tabel 18: Carbon Payback Time per type systeem volgens de KEV'22-prognose.

* Bronnen: 2023 - CBS.nl; 2025 en 2030 - PBL, KEV'22; 2034 - PBL, Eindadvies SDE++ 2023.

APPENDIX A: GEMIDDELTE LEVENSDUUR VAN PV

A1 - Introductie

Hoeveel jaren een zonnepaneel stroom opwekt hangt af van verschillende factoren:

- *natuurgeweld* – grote hagelstenen, windhoos, brand, bliksem
- *financiële overwegingen* – soms worden ze na 8 jaar al vervangen door betere zonnepanelen
- *technische degradatie*

Gelukkig is de kans op schade door natuurgeweld in Nederland minder dan een procent per jaar. Ook *repowering* - het vroegtijdig afdanken en vervangen door nieuwe panelen met een hogere efficiency - schijnt in Nederland nog niet vaak voor te komen.

De meeste panelen gaan kapot³⁶ via technische degradatie. Via geleidelijke achteruitgang zoals het vergelen van de encapsulant, microcracks in de cellen, corrosie van busbars, scheuren in backsheet. Of via acute problemen zoals een kortsluiting, een hotspot of glasbreuk.

De levensduur van een PV systeem wordt daarom vooral bepaald door de kwaliteit van de materialen en het paneelontwerp.

Dynamische industrie met veel innovaties

De solar industrie is zeer dynamisch: nieuwe materialen of technologieën hebben vaak binnen een paar jaar al een groot marktaandeel. Dat kan gaan om de celtechnologie (PERC, PERT, TopCon, HJT), de celgrootte, de afmetingen van de panelen, de verbindingen tussen de cellen, de backsheets, de encapsulanten - de *bill of materials* verandert continu.

Veel van deze innovaties zijn slechts kort getest voordat ze breed worden doorgevoerd. Helaas bleek bij een paar van die innovaties dat zonnepanelen binnen een paar jaar al sterk achteruit gingen.³⁷

40 jaar levensduur is mogelijk en bewezen

Het project 'Ticino Solare' bewijst dat zonnepanelen minstens 40 jaar mee kunnen gaan.³⁸ Zonnepanelen van verschillende fabrikanten werden daar in 1982 geïnstalleerd en om de paar jaar doorgemeten. Veel van deze panelen zijn inmiddels kapotgegaan maar één batch panelen van één producent leveren na 40 jaar nog meer dan 85% van hun initiële opwek!

Deze panelen bestonden uit hoogwaardige materialen en een robuust ontwerp:

- De backsheet was opgebouwd uit een staalplaat met een dubbele Tedlar-laag. De hoogwaardige encapsulant PVB werd gebruikt (nu vooral EVA); de silicium zonnecellen waren 300 micron dik (nu 150 micron).

³⁶ Köntges et al., *Assessment of Photovoltaic Module Failures in the Field*, Report IEA-PVPS T13-09:2017, IEA, May 2017

³⁷ Bijvoorbeeld de 'AAA' backsheets van Isovoltaic; bijvoorbeeld LID en PID na de introductie van PERC-cellen.

³⁸ Project Ticino Solare: https://www.supsi.ch/isaac/dms/isaac/docs/fotovoltaiico/TISO/TISO_Catalogo_Web_2022.pdf

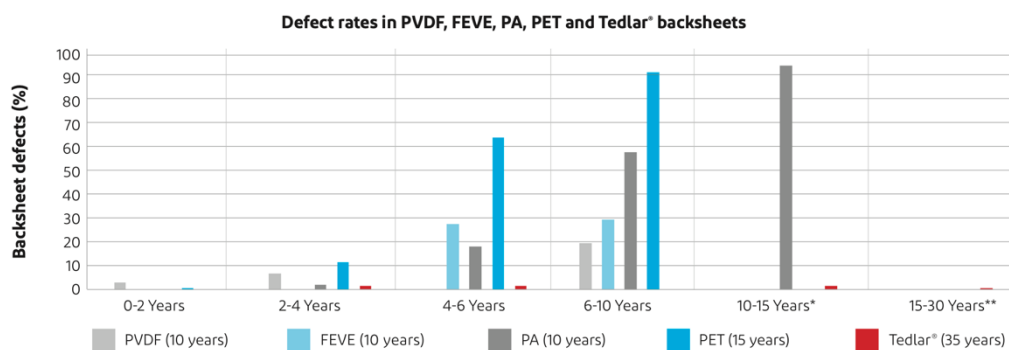
- Het paneel had een robuust ontwerp: afmetingen 120x30 cm (nu vaak 110x180) bij framehoogte 38 mm (nu vaak 30mm) en glasdikte 3,2 mm (nu gelijk of kleiner).

Kwaliteit van mainstream zonnepanelen is achteruit gegaan

Laagwaardige materialen

Door de extreme prijsconcurrentie gebruiken producenten van mainstream zonnepanelen nu goedkopere en laagwaardigere materialen dan in de jaren '80, met name voor de backsheet³⁹ en encapsulant⁴⁰. Deze materialen zijn niet geschikt zijn voor een lange levensduur⁴¹.

Het Amerikaanse Dupont produceert de Tedlar⁴² backsheet. Deze is betrouwbaar en het was de dominante backsheet in de jaren '80 en '90. Maar het is wel prijzig en de afgelopen 20 jaar hebben vele partijen goedkopere backsheets op de markt gebracht. Grote veldonderzoeken van Dupont laat zien dat veel van deze alternatieve backsheets al binnen 5 tot 10 jaar sterk degraderen⁴³. Dupont heeft een groot belang bij die uitkomst maar de onderzoeken lijken toch representatief en betrouwbaar.



Dunner glas en zwakkere frames

Naast de materiaalkwaliteit is de afgelopen paar jaar ook sterk bespaard op de *hoeveelheid* materialen bij mainstream panelen. Het glas is 20% dunner geworden en de frames 25% lager terwijl de panelen zelf veel groter werden (Figuur A2). Dit gaat waarschijnlijk leiden tot hogere percentages breuk bij storm, sneeuw of hagel⁴⁴.

		High Quality PV-modules 2023	Mainstream PV-modules 2023	Verschil
		30-40 jaar	10-12 jaar	
Productgarantie				
Hoogte	cm	170	196	+15%
Breedte	cm	105	113	+8%
Oppervlak	m ²	1,8	2,2	+24%
Frame-dikte	mm	40	30	-25%
Glas-dikte	mm	2.0 + 2.0	1.6 + 1.6	-20%
Encapsulant		POE of TPO	EVA	

Figuur A2: Verschillen tussen mainstream zonnepanelen en hoge kwaliteit zonnepanelen (bijv. Moxeon, MeyerBurger, SolarWatt).

³⁹ Taiyang News, 18 januari 2022, "So many backsheets structures".

⁴⁰ De goedkoopste encapsulant - EVA - is niet geschikt voor een lange levensduur maar heeft wel een marktaandeel >70%. Bron: Pag 41, *International Technology Roadmap for Photovoltaic*, 2023, VDMA.

⁴¹ Oreski et al., *Designing new materials for photovoltaics: Opportunities for lowering cost and increasing performance through advanced material innovations*, Report IEA-PVPS T13-13:2021, April 2021.

⁴² Op basis van het polymeer PolyVinylFluoride (PVF).

⁴³ J. Tracy et al, *Survey of Material Degradation in Globally Fielded PV Modules*, 2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), pp. 0874-0879, doi: 10.1109/PVSC40753.2019.8981140.

⁴⁴ V. Poulek et al., *On site renovation of degraded PV panels*, Solar Energy, Volume 263, 2023, doi.org/10.1016/j.solener.2023.111956.

Ook PV Evolution Labs en STS Certified, leidende organisaties in kwaliteitstests respectievelijk kwaliteitsinspecties van zonnepanelen, verwachten een toename van technische problemen⁴⁵.

Veldonderzoek uit Tsjechië op basis van 85 PV installaties: 12 jaar

Er zijn weinig grootschalige, onafhankelijke veldonderzoeken naar de gemiddelde levensduur van zonnepanelen in de praktijk. In Tsjechië werd in 2023 onderzoek gedaan⁴⁶ naar 85 grotere PV-installaties uit de periode 2009-2010. Alle zonnepanelen kwamen van 'Tier 1' producenten. In dit onderzoek bleek dat vrijwel al deze zonnepanelen vanaf hun 10^e jaar snel achteruitgingen. De gemiddelde technische levensduur van de zonnepanelen van deze 85 PV installaties bleek 12 jaar, dus veel korter dan de 20-25 jaar waar men op rekende.

Conclusie: Uitgaan van 12 jaar levensduur voor *mainstream* zonnepanelen

Helaas is er geen duidelijke aanleiding om aan te nemen dat de *mainstream* zonnepanelen van nu een langere levensverwachting hebben dan de zonnepanelen die in 2010 werden geproduceerd. In tegendeel: de panelen zijn groter geworden terwijl het glas en de frames zwakker werden. Ook zijn er meer backsheets met een lage kwaliteit. De produktgarantie is over het algemeen ook 10 tot 12 jaar.

Wel is de kwaliteit van de EVA encapsulant gemiddeld beter dan in 2010. Ook is de kans op hotspots kleiner dan in 2010, door de *halfcut* cellen.

Al met al is onze *educated guess* een technische levensduur van 12-15 jaar voor *mainstream* zonnepanelen. Inclusief natuurgeweld en repowering iets korter.

NB: Er worden nog steeds ok hoogwaardige zonnepanelen worden geproduceerd die waarschijnlijk *wel* ten minste 25 jaar meegaan. Daarover meer in de onderstaande paragrafen.

Maar de *performance warranty* is 25 jaar?

De solarindustrie draagt zelf bij aan de mist over de levensduur. Door continue aanpassingen in de produkten en door het uitblijven van een standaard test waarmee 25 jaar kan worden aangetoond. En door '*performance warranty*', die voor elk paneel wordt getoond voor een periode van 25 jaar. Terwijl de '*product warranty*' meestal slechts 10 - 12 jaar is. Dit geeft enorm veel verwarring.

Belangrijk is dat een *performance warranty* meestal niets dekt als het paneel na 12 jaar kapot gaat. Want kapot gaan valt onder de produktgarantie.

Ook is het de vraag hoeveel waarde je aan de warrantees moet hechten. Het is moeilijk om de schade te verhalen, de schadevergoeding is vaak laag en de bewijslast hoog. Soms bestaat de leverancier of producent niet meer: het merendeel van de top 20 PV-producenten van 12 jaar geleden is inmiddels failliet gegaan of gestopt. Deze warrantees worden door de zonnepaneelproducenten zelf afgegeven zonder test of keuring van een onafhankelijke organisatie. Ook daarom betekenen deze garanties niet zoveel.

⁴⁵ Zie p17 en p18 van *Solar Risk Assessment: 2022, Quantitative Insights from the Industry Experts*.

www.solaranywhere.com/wp-content/uploads/2022/06/kWhAnalytics_Solar-Risk-Assessment-2022_SolarAnywhere.pdf

⁴⁶ M. Libra et al., *Reduced real lifetime of PV panels – Economic consequences*, Solar Energy, Volume 259, 2023, doi.org/10.1016/j.solener.2023.04.063

Fabrikanten leveren wat de klant wenst

Het is heel goed mogelijk om een zonnepaneel te maken dat ten minste 25 jaar meegaat: met duurdere materialen en een robuust ontwerp. Alle producenten kunnen zonnepanelen produceren die lang meegaan en zeker ook de grote Chinese producenten. Maar fabrikanten focussen op lage productiekosten omdat hun klanten vooral kiezen op basis van de laagste prijs.

A2 - Waarom is een lange levensduur belangrijk

De laagste stroomkosten

De onderhoudskosten van zonnepanelen zijn in Nederland nul of zeer gering. De kosten van zonnestroom wordt vrijwel geheel bepaald door de initiële investering. Dus hoe langer de panelen stroom opwekken des te goedkoper de zonnestroom wordt.

Voorbeeld: bij een project met zonnepanelen van hoge kwaliteit, met een levensduur van 25 jaar, is de investering € 1 per Wattpiek. Bij een gemiddelde opbrengst van 600 kWh/kWp/jaar levert dit project zonnestroom van € 0,07 per kWh (exclusief financieringskosten, onderhoud en degradatie).

Bij goedkopere zonnepanelen met een levensduur van 15 jaar is de investering iets lager: € 0,95 per Wp. Maar de kale stroomprijs stijgt naar € 0,11 per kWh.

Klimaat en milieu

De *carbon payback time* van kristallijn-silicium zonnepanelen is relatief lang. Een lange levensduur is daarom erg belangrijk want alleen dan kan een zonnepaneel een goede klimaatbijdrage leveren.

Ook andere milieu-impacts worden kleiner bij een lange levensduur:

- minder productie en gebruik van toxische stoffen;
- minder delfstoffen en mijnbouw nodig;
- minder kritieke materialen nodig;
- de afvalberg van oude zonnepanelen wordt kleiner⁴⁷

⁴⁷ Het is nog niet rendabel om grondstoffen terug te winnen uit zonnepanelen en het is onzeker of dit in de toekomst wel rendabel wordt. Er is in Nederland de afgelopen 10 jaar te weinig geld ingezameld voor de afvalverwerking van huidige zonnepanelen. Die verwerkingskosten moeten door de samenleving worden gedragen. Sinds 1 juli 2023 is er wel een dekkende afvalbijdrage voor nieuwe zonnepanelen.

A3 – Wanneer grote kans op levensduur van meer dan 25 jaar?

Zonnepaneelproducenten gebruiken niet allemaal dezelfde materialen. Ze houden de gebruikte materialen en toeleveranciers meestal strikt geheim. Bovendien past elke producent zijn materialen om de paar jaar een beetje aan. Géén van de materialen die 10 jaar of 20 jaar geleden werden gebruikt worden nu in precies dezelfde samenstelling gebruikt. Er is daarom geen zekerheid dat een module 25 jaar of langer zal meegaan.

Wel kan worden aangegeven onder welke voorwaarden de kans op een lange levensduur groot is. Die kans hangt samen met de materialen, het ontwerp en de resultaten van versnelde levensduurtests.

Er vindt veel onderzoek plaats door universiteiten, onderzoeksinstituten en producenten naar de kwaliteit en levensduur van zonnepanelen en materialen. Het is zowel laboratorium- als veldonderzoek.

Vele tests worden ingezet om de bestendigheid van zonnepanelen te onderzoeken. Ze worden blootgesteld aan klimaatkamers, mechanische tests, UV-licht, hoge elektrische spanningen en gecombineerde stresstests. Vervolgens worden de materialen onderzocht met een scala aan analytische methoden, van elektronenmicroscopie tot röntgenfoto's en kristallografie.

A3.1 Materialen

Uit onderzoekspublicaties en gesprekken met experts kwam naar voren dat 2 materialen een grote rol spelen in de levensduur van zonnepanelen:

- *encapsulant* – de doorzichtige folie tussen de zonnecellen en het glas
- *backsheet* – de kunststof folie of de glasplaat achter de zonnecellen

Encapsulant

In de jaren '70 en '80 werd vaak een PVB of een siliconen-polymeer gebruikt als encapsulant. Dit zijn UV-stabiele materialen waarmee een lange levensduur mogelijk is. Deze materialen zijn echter duur en ook de verwerking is duur. De laatste 20 jaar is het goedkopere en gemakkelijk te verwerken EVA dominant geworden. EVA is helaas inherent minder UV-stabiel. Het kan vergelen en er kunnen acetaatzuren vrijkomen die weer leiden tot corrosie.

De encapsulantsoorten POE (polyolefin) en TPO (thermoplastic polyolefin) zijn wel UV-stabiel, goed te verwerken. Deze komen goed uit de verschillende onderzoeken. Het gebruik van een POE of TPO biedt nog geen garantie - materiaalkwaliteit en het verwerkingproces zijn cruciaal. Het nieuwe materiaal EPE (een dikke laag POE tussen twee dunne laagjes EVA) geeft ook goede resultaten.

Backsheets

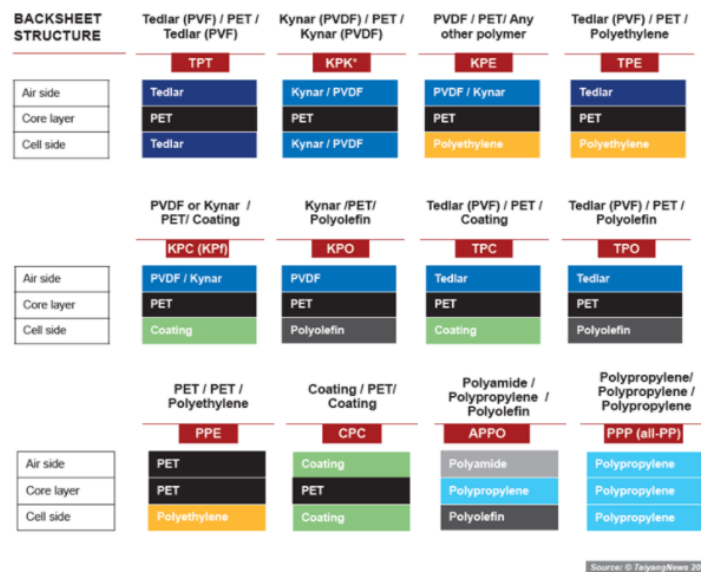
DuPont's Tedlar is een bewezen backsheet met een lang trackrecord. Maar het is relatief duur en het bestaat uit een fluorhoudende polymeer - een PFAS. Bij diverse andere kunststof backsheets ontstonden binnen 10 jaar problemen als vergeling, scheuren (cracks) en poedervorming (chalking), zo bleek uit veldonderzoek.

Figuur A3 toont de grote variëteit aan backsheet-varianten die momenteel worden toegepast in zonnepanelen – daaronder ook veel materialen die nog niet langjarig zijn getest. Een aantal van deze backsheets zijn niet geschikt voor een lange levensduur.

So Many Backsheet Structures

Overview On Different Configurations For Solar Module Backsheets Available In Today's Market

Feb 18, 2022



Figuur A3: Vele soorten backsheets met veel verschillende materialen en kwaliteit.⁴⁸

Glas-glas

Bij het gebruiken van een glasplaat als backsheet kunnen waterdamp, zuurstof en andere gassen die zorgen voor degradatie alleen via de dunne rand aan de zijkant binnendringen. Een glas-glas module kan daarom zeer lang meegaan. Sommige producenten verwachten een levensduur van meer dan 40 jaar. Het productieproces van een glas-glasmodule is wel lastiger. Gelukkig hebben de meeste producenten voldoende ervaring en de juiste machines om goede glas-glaspanelen te maken.

A3.2 Levensduurtests

IEC61215 – zegt alleen iets over de eerste 5 jaar!

Helaas is er nog geen test waarmee je de levensduur kan voorspellen. Alle zonnepanelen die in Europa op de markt worden gebracht moeten voldoen aan de Europese normen met betrekking tot elektrische veiligheid en kwaliteit. De belangrijkste norm voor zonnepanelen is de IEC61215. Deze test bestaat uit verschillende tests met een doorlooptijd van enkele maanden.

Om aan de norm te voldoen moeten de zonnepanelen intense UV-belichting en vele uren in klimaatkamers doorstaan, met hagelstenen, het gewicht van sneeuw en wind, enzovoorts. Toch zegt

⁴⁸ Bron: Taiyang News, 18 januari 2022, "So many backsheets structures".

deze test alleen iets over de kans dat het paneel de *eerste 5 jaar* overleeft. Het bewijst niet dat het paneel 10 jaar of langer meegaat.

PVEL PQP en 3 x IEC61215

De IEC 63209-1 Extended Stress Test is al een rigoureuzere stresstest dan de IEC 61215. Enkele onderzoeksinstituten (onder andere het Amerikaanse PVEL) hebben zogeheten '*Combined Accelerated Stress Tests*' (CAST) ontwikkeld. Daarbij worden klimaatkamers gebruikt waarin de panelen tegelijkertijd worden blootgesteld aan extreme temperaturen (-40 °C tot +80 °C), een hoge luchtvochtigheid, UV-licht en een elektrische spanning op het frame. Deze tests duren ook langer.

Veel moduleproducenten maken inmiddels gebruik van deze tests. Als alternatief voor deze PVEL CAST-test voeren sommigen de tests uit IEC61215 drie keer achter elkaar uit. Als een module goed door de PVEL CAST-test of door de drie maal IEC61215 heen komt, is de kans groot op een levensduur van 25 jaar of langer.

A3.3 Module-ontwerp

Glas-foliezonnepanelen

Onderstaande tabel toont de evolutie van mainstream zonnepanelen de afgelopen 8 jaar:

	Vermogen (Wp)	Afmetingen (cm)	Glasdikte bij glas-folie- zonnepanelen (mm)	Framehoogte (mm)
2015	250	165 xx92	3,2-4,0	40-45
2018	325	175 x 98	3,2	35-40
2023	400	180 x 108	2,5-3,2	30

Tabel A1: de evolutie van mainstream zonnepanelen.

Kortom: de afgelopen 8 jaar zijn zonnepanelen groter geworden maar het glas dunner en het frame zwakker. Hierdoor is de kans op celbreuk of glasbreuk ten gevolge van wind, sneeuw of hagel toegenomen. Gelukkig hebben sommige fabrikanten het dikkere glas en de hogere frames behouden.

Glas-glas zonnepanelen

Tien jaar geleden waren glas-glaspanelen nog zeldzaam, maar tegenwoordig hebben ze een marktaandeel van 40%. Dat groeiende marktaandeel komt deels door de opkomst van *bifacial* zonnecellen. Daarbij kan de achterzijde van de cel ook licht omzetten in elektriciteit. Op een dak hebben deze zonnepanelen weinig nut maar in een veldopstelling stijgt de opbrengst met 10-20%.

Een andere reden voor de groeiende vraag naar glas-glas is de grotere robuustheid. Ze zijn stijver en sterker dan glas-foliepanelen. Door de symmetrische opbouw ondervinden de cellen ook minder krachten. Bij een extreme hagelbui in 2015 in Brabant met hagelstenen zo groot als tennisballen gingen alle zonnepanelen kapot op twee na – allebei glas-glaspanelen.

A4 - Overzicht vanuit marktonderzoek

Tabel A2 geeft een indicatieve inschatting of een zonnepaneel een levensduur van 25 jaar haalt.

Deze inschatting is subjectief⁴⁹. Hierin worden verschillende aspecten gewogen: de produktgarantie, de gebruikte materialen, het moduleontwerp en extreme levensduurtests.

Producer	Module type	Chance to last >25 years	Product Guarantee years	Extreme lifetime testing? Type	High quality encapsulant?	High quality backsheet?	Robust module design <i>Relative frame height and glass thickness</i>	Additional module costs
Sunpower	Glass-foil	HHHH	40	PVEL PQP + IEC63209	POE	PET-alu-PET	3,2 mm glass; frame 40 mm	€€€€
Meyer Burger	Glass-glass	HHHH	30	3* IEC 61215	POE	Glass	2,0+2,0 mm glass; frame 35 mm	€€€
Meyer Burger	Glass-foil	HH	25	3* IEC 61215	POE	PET-alu-PET	3,2 mm; frame 35 mm	€€€
3SUN	Glass-foil	HH	25	PVEL PQP*	POE	PET-alu-PET	3,2 mm; frame 30 mm	€€
FirstSolar	Glass-glass	HH	12	PVEL PQP + IEC63209	POE	Glass	2,0+2,0 mm glass; 35 mm frame + midsupport frame	€
Longi	Glass-glass	?	12	PVEL PQP	?	Glass	2,0+1,6 mm glass; 30 mm frame	€
Longi	Glass-foil	?	12	PVEL PQP	?	?	3,2 mm glass; 30 mm frame	-
Mainstream GG	Glass-glass	?	15-25	-	?	Glass	2,0+1,6 mm glass; 30 mm frame	€
Mainstream GF	Glass-foil	small	10-12	-	?	-	2,5 mm glass; 30 mm frame	-

Tabel A2: inschatting van de kans op een lange levensduur voor een reeks van zonnepanelen.

Legenda: indicatieve inschatting van de kans dat een module 25 jaar levensduur haalt

HHHH: Hoogst

HH: Hoog

?: Onbekend

⁴⁹ Bij geen van de vele test- en onderzoeksorganisaties vonden wij een dergelijk overzicht met de verwachte levensduur van zonnepanelen. Mocht u wel zo'n onderzoek kennen laat het ons weten!

APPENDIX B: MEERPRIJS VAN (ULTRA) LOW CARBON

Tabel B1 toont een aantal producenten die PV-modules leveren met een lagere carbon footprint.

Deze tabel is een momentopname en toont een deel van de beschikbare zonnepanelen. De komende jaren komen er nieuwe (ultra)low-carbon zonnepanelen op de markt. Moduleseries veranderen snel en daarom is het belangrijk om producenten en groothandels te vragen welke paneelseries worden aangeboden met een lage carbon footprint.

Inschattingen van de CFP van mainstream zonnepanelen (c-Si, made in China) lopen uiteen van 800 tot 1.200 kg CO₂/kWp. Voor mainstream zonnepanelen wordt in dit document gewerkt met 1.000 kg CO₂-eq/kWp.⁵⁰ De (ultra) low-carbon zonnepanelen in de tabel hebben een 2 tot 4 keer lagere CFP.

De inschattingen van de meerprijzen zijn indicatief voor de periode van het onderzoek (Q1 2024).

Producer	Module series	Carbon Footprint* kg CO ₂ -eq / kW _p	Country	Production capacity	Why lower CFP	Additional module costs
FirstSolar	All	267	USA	Global Top 10	Thin film technology	€
Sunpower/Maxeon	Maxeon 3	339	USA	Global Top 20	EU PolySi/ingot/wafers	€€€€
Solarge	Solo ULC	445	NL	200 MW/yr	PolySi from Taiwan	€€€
GCL	NT10/72GDF	495	China	Global top 10	FBR polySi	€
Meyer Burger	All	480	Germany	Top 5 EU	Mostly made in EU	€€€
3Sun (EnelGreenPower)	All	490	Italy	Top 5 EU	Mostly made in EU	€€
Energyra	All	500	NL	200 MW/yr	Mostly made in EU	€€€€
JASolar	JAM54S0/MR	550	China	Global top 10	PolySi from EU	€
Risen	Special: RSM40-8-xxxM	550	China	Global top 10	Thin wafers, other	€
Longi	Special: LR5-54HTH-430M CRE	550	China	Global top 10	PolySi from EU	€
Trina	Special series	550	China	Global top 10	PolySi from EU	€
Jinko	Special series	550	China	Global top 10	PolySi from EU	€
Canadian Solar	Special series	550	China	Global top 10	PolySi from EU	€
GMEGC	Special series	550	China	Global top 10	PolySi from EU	€
DAS solar	Special series	550	China	Global top 15	PolySi from EU	€
Talesun	Special series	550	China	Global top 15	PolySi from EU	€
Mainstream PV modules		800-1200	China			-

Tabel B1: Voorbeelden van zonnepanelen met een lage of ultra lage carbon footprint.

Legenda: indicatieve meerprijzen ten opzichte van mainstream zonnepanelen per Q1'24

- €: + € 0,005 tot € 0,03/Wp
- €€: + € 0,05 tot € 0,10/Wp
- €€€: + € 0,15 tot € 0,25/Wp
- €€€€: + € 0,25 tot € 0,40/Wp

⁵⁰ Bron: Wikoff et al., *Embodied energy and carbon from the manufacture of cadmium telluride and silicon photovoltaics*, Joule (2022), <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.06.006>. NB De CFP van mainstream c-Si staat beschreven in de *supplemental information*.

Eisen in de inkooptemplate

Andere landen

Sinds 2015 hanteert Frankrijk een limiet aan de carbon footprint van zonnepanelen voor het Franse equivalent van de SDE++ regeling. Diverse Chinese producenten maken speciaal voor de Franse tenders een moduleserie die voldoet aan de Franse eisem.

Naast Frankrijk limiteert ook Zuid-Korea sinds 2020 de carbon footprint van zonnepanelen. Diverse andere landen zijn ook van plan een limiet in te stellen.

Meerkosten

Een grote aantal producenten kan een moduleserie leveren die voldoet aan de Franse limiet van 550 kg CO₂-eq /kWp. De meerkosten van deze zonnepanelen zijn meestal 0,5 tot 3 eurocent per Wp. Aangezien de totale investering voor een typisch PV project in de orde ligt van €0,60-€0,90 per Wp stijgt de investering met slechts 1-5% bij gebruik van (Ultra) Low Carbon panelen.

Suggestie ten aanzien van eisen

De Franse limiet van 550 kg CO₂/kWp is nu opgenomen in de Template - omdat de meerkosten beperkt zijn en omdat veel panelen beschikbaar zijn die voldoen aan deze limiet. Via de 'gunningscriteria' worden extra punten gegeven aan zonnepanelen met een lagere carbon footprint om het gebruik van ultra-low carbon panelen te stimuleren.

Hoe de CFP te bepalen

Frankrijk heeft sinds 2015 veel ervaring opgedaan met de Carbon Footprint limiet. Het heeft stap voor stap de *Evaluation Carbone Simplifiée* (ECs) ontwikkeld waarmee producenten de carbon footprint kunnen bepalen. Deze methode is goedkoper, sneller en fraudebestendiger dan andere methoden.

Diverse onafhankelijke organisaties, waaronder CertiSolis, KIWA en PI Berlin, beschikken over de vereiste accreditaties (ISO 17065, ISO 17025) om deze ECs uit te voeren. Hierbij moeten producenten bepaalde cijfers goed onderbouwen met facturen, inkooporders en pakbonnen. Hierdoor is het Franse systeem tamelijk fraudebestendig.