

III. Duurzaamheidsaspecten en Marktscan Duurzamere Zonnepanelen



- Welke merken en series zonnepanelen
- Indicatieve meerprijzen
- Carbon Footprint, PFAS, Technische levensduur, vermijdbare giftige stoffen

Een initiatief van: **RVO, UPCM en PIANOo**
Uitgegeven door de Buyer Group voor Duurzame zonPV

Versie: 1.0
Datum: februari 2024

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave	2
Doel en achtergrond.....	4
1. De Carbon Footprint van zonnepanelen	6
1.1 Introductie.....	6
1.2 Wat is de impact van een hoge Carbon Footprint?	6
1.3 Low-Carbon zonnepanelen	7
1.4 Overzicht vanuit het marktonderzoek	9
1.5 Suggestie ten aanzien van eisen	10
2. Vermijdbare Toxische stoffen	12
2.1 Introductie.....	12
2.2 Nadere toelichting en alternatieven	12
2.3 Overzicht vanuit het marktonderzoek	16
2.4 Suggestie ten aanzien van de eisen	16
3. Technische Levensduur	17
3.1 Introductie.....	17
3.2 Waarom is een lange levensduur belangrijk.....	18
3.3 Hoe krijg je een grote kans op levensduur >25 jaar?.....	18
3.4 Overzicht vanuit het marktonderzoek	22
3.5 Suggesties ten aanzien van eisen.....	22
4. Arbeidsomstandigheden	23
4.1 Introductie.....	23
4.2 Welke acties worden ondernomen in het Westen, Europa, Nederland.....	25
4.3 Lijst met 'slaafvrije' zonnepanelen?.....	26
4.4 Wat is nu opgenomen in het Inkooptemplate.....	27
Appendix A - Carbon Footprint en Carbon Payback Time.....	28
Introductie.....	29
1. De Carbon Footprint van een PV systeem.....	30
1.1 Zonnepanelen	31
1.2 Montagematerialen	33
1.3 Omvormers	34
1.4 DC bekabeling	35

1.5 De AC-kabels naar de netaansluiting	35
1.6 Het Albedo-klimaatteffect.....	36
1.7 Oceaantransport, installatie, gebruiksfase en afvalverwerking	37
2. Carbon Payback Time	39
2.1 De Bruto Opwek van een PV installatie	41
2.2 Curtailment: hoeveel vollasturen worden nieuwe PV installaties afgeschakeld?	41
2.3 Hoeveel emissies worden vermeden met extra zonnestroom	49
2.4 De Carbon Payback Time volgens Prognoses 'Kort' en 'Lang'	51
2.5 Carbon Payback Time volgens de KEV'22	53
TOELICHTING BIJ APPENDIX A	55
T1 - Groei van de Nederlandse elektriciteitsvraag.....	55
T2 De impact van Vraagverschuiving en Elektriciteitsopslag.....	59
T3 Groei van stroomopwek met windtubines	62
T4 Stroomexport en ontwikkelingen bij buurlanden	64

Doel en achtergrond

Doel van deze gids

De focus van zonnepaneelproducenten ligt al jaren op het verlagen van de productiekosten, het verhogen van de cel-efficiëntie en het verhogen van de productiecapaciteit. Zonnepanelen lijken ook een commodity door de kleine verschillen in uiterlijk, specificaties en prijs.

Maar er zijn wel degelijk grote verschillen in klimaat-effect en milieubelasting. Dit rapport geeft inzicht in de schaduwkanten van zonnepanelen en de verschillen tussen zonnepanelen. Ook worden de duurzamere zonnepanelen met naam genoemd en wordt een indicatie gegeven van de meerkosten.

Onderwerpen

De focus van dit rapport ligt op de volgende duurzaamheidsaspecten:

- *Carbon Footprint* - soms zo hoog dat de *carbon payback time* langer is dan de levensduur;
- *Vermijdbare toxische stoffen* - veel zonnepanelen bevatten een PFAS-folie over de gehele achterkant, lood-houdende soldeer en glas waarin het toxische antimoon is toegevoegd;
- *Technische levensduur* - bij veel zonnepanelen een aanzienlijke kans dat ze niet langer dan 10-15 jaar meegaan; bij hoogwaardige materialen en robuust ontwerp grote kans op 30+ jaar.

Het onderwerp *Dwangarbeid* wordt ook kort besproken. Hierbij zijn objectieve criteria en betrouwbare, onafhankelijke onderzoeken naar producenten nog in ontwikkeling.

De verschillen tussen de omvormers en montagematerialen die naast de zonnepanelen ook nodig zijn voor een PV systeem zijn klein. Deze komen mogelijk in de toekomst aan de orde, nu nog niet.

Aanpak: literatuuronderzoek, marktonderzoek, experts

In 2022 is er uitgebreid literatuuronderzoek gedaan en zijn talloze experts geraadpleegd. Op deze manier zijn de verschillende duurzaamheidsaspecten van zonnepanelen onderzocht. In dit document wordt een korte samenvatting gegeven voor elk duurzaamheidsaspect.

Daarnaast zijn vijftig zonnepaneelproducenten bevroegd over duurzaamheidsaspecten. Op basis hiervan wordt per aspect getoond welke zonnepanelen goed scoren. NB: deze overzichten geven een minimum weer: meer merken of paneeltypen zullen voldoen aan bepaalde criteria dan de zonnepanelen die hier zijn opgenomen.

Veel dank is verschuldigd aan de deelnemers aan de Buyer Group voor duurzame ZonPV die input en feedback gaven: gemeente Amsterdam, gemeente Rotterdam, gemeente Groningen, ProRail, Rijksvastgoedbedrijf; Waterschap Noorderzijlvest, Eneco en HVC.

Ten behoeve van inkoop

Deze gids is één van de drie documenten die horen bij de *'Template inkoop-eisen en gunningscriteria'*:

- I. Het voortraject van een PV project
- II. Het aanbesteden van een PV project en toelichting op de Template
- III. **Duurzaamheidsaspecten en marktscan duurzamere zonnepanelen** (deze gids)

Verantwoording

Deze gids is een initiatief van de *Buyer Group voor Duurzame PV*. Deze Buyer Group maakt onderdeel uit van het Rijksinkoopexpertisecentrum PIANOo en is mogelijk gemaakt door het Ministerie van I&W. Het initiatief voor deze Buyer Groups komt van het Uitvoeringsprogramma Circulaire Maakindustrie (UPCM). De Buyer Group wordt namens RVO geleid door Bart-Jeroen Bierens en Michiel Mensink.

Fouten of aanvullingen?

Deze gids is een 1.0 versie en krijgt verdere updates. Voor verbeteringen of aanvullingen stuur ons graag een email aan het emailadres: BGDPV@pianoo.nl.

Disclaimer

Deze gids heeft als doel om aanbestedende diensten houvast en ondersteuning te bieden bij de voorbereiding van aanbestedingen van PV projecten. De gids is opgesteld aan de hand van inzichten uit de sector en marktonderzoek. De genoemde meerprijzen moeten worden gezien als indicatief, zeker gezien de snel veranderende marktomstandigheden en prijzen.

Het gebruik van deze gids en de criteria valt onder de eigen verantwoordelijkheid van inkopende of aanbestedende organisaties. Gebruikers kunnen geen aanspraak maken op de juistheid en volledigheid van de inhoud of hieraan rechten ontleen.

Auteur

Michiel Mensink

Uitgever

Buyer Group voor Duurzame ZonPV

www.pianoo.nl/BGDPV

Copyright

Rijksdienst voor Ondernemend Nederland, 2024

1. De Carbon Footprint van zonnepanelen

1.1 Introductie

De *raison d'être* van zonnepanelen is het vertragen van klimaatopwarming. Hoe goed zijn zonnepanelen eigenlijk in deze kerntaak? Zijn sommige zonnepanelen hierin beter dan andere?

De broeikasgasemissies (BKG-emissies) tijdens de productie van standaard zonnepanelen zijn groter dan veel mensen zich realiseren. Vooral de volgende processen vergen zeer veel elektriciteit:

- de raffinage van silicium, dat eerst met zoutzuur (HCl) in gasfase (SiCl_3) wordt gebracht en daarna via het Siemens-proces tot de vereiste 99,99999999% (8N) wordt gezuiverd;
- het kristallisatieproces waarbij een monokristal (ingot) uit een smelt wordt getrokken;
- het verzagen van de ingot tot zeer dunne wafers, door diamant-gecoate staaldraden;
- de celproductieprocessen.

China's marktaandeel in deze processen is ongeveer 90%. Maar elektriciteit in China wordt nog steeds grotendeels met kolencentrales geproduceerd. Ondanks nieuwe zonneparken komen er in China ook nog wekelijks nieuwe kolencentrales bij.

Twee kristallijn silicium zonnepanelen, elk 500 Wattpiek, wegen samen circa 50 kg. Zij hebben samen een Carbon Footprint¹ van ongeveer 1000 kg CO₂-equivalent. Dus de CO₂ emissies zijn ongeveer twintig keer het paneelgewicht. Maar is dat nu veel of weinig? Is dat een probleem of niet?

1.2 Wat is de impact van een hoge Carbon Footprint?

Deze vragen kunnen worden beoordeeld door de *Carbon Payback Time* te onderzoeken.

De CO₂-emissies die vrijkwamen tijdens het productieproces worden geleidelijk 'terugverdiend' doordat het zonnepaneel CO₂-emissies van bijvoorbeeld een gascentrale voorkomt.

Als de Carbon Payback Time (CPT) flink korter is dan de levensduur - bijvoorbeeld de helft korter - dan zal het paneel de klimaatopwarming vertragen². Bij een langere terugverdientijd is het nuttige effect klein of zelfs negatief - dan kan het leiden tot een versnelling van de klimaatopwarming.

Via het marktonderzoek is ook duidelijk geworden dat de carbon footprint van bepaalde zonnepanelen vier keer zo laag is als een mainstream zonnepanelen uit China. Deze low-carbon zonnepanelen hebben daarmee een veel kortere CPT en zijn echt effectief tegen klimaatopwarming.

¹ Inschattingen van de carbon footprint in de vakliteratuur variëren van 800 tot 1300 kg CO₂-eq per kWp. Daarbovenop komt nog 100-300 kg CO₂-eq voor de omvormer, onderconstructie, kabels etc.

² Een flinke marge is raadzaam vanwege de onzekerheid in veel factoren. De levensduur van een zonnepaneel is door ofwel economische factoren of door brand of hagel, of door technische degradatie vaak korter dan 25 jaar.

In Nederland is de Carbon Payback Time langer dan in veel andere landen

De CPT van een PV installatie die in 2024 wordt geïnstalleerd op een plat dak in Nederland is een stuk langer dan in veel andere landen. Dat komt door ongunstige factoren in Nederland:

- *Instraling*. Een typische Oost-West opstelling op een plat dak, wekt hier ~800 vollasturen op. In Spanje en Italië is dat het dubbele.
- *Aardgas*. Gascentrales wekken het merendeel van onze elektriciteit op, in tegenstelling tot Duitsland dat veel kolencentrales gebruikt. Zonnestroom vervangt bij ons vooral CO₂ emissies van gascentrales en die emissies zijn relatief laag.
- *Curtailement*. Nederland is wereldwijd nummer 1 in het PV vermogen per inwoner. Ook met wind-op-land en wind-op-zee staan we in de wereldwijde top. Daardoor is er steeds vaker een overschot van elektriciteit en wordt een deel van de zonnepanelen afgeschakeld.
- *Geen stuwmeren*. In tegenstelling tot Frankrijk, Duitsland, Scandinavië heeft Nederland geen stuwmeren en het is nog de vraag of seizoensopslag hier op een andere manier haalbaar is. Ook hierdoor gaan de grote stroomoverschotten in de zomer verloren.

In Appendix A wordt de Carbon Payback Time via verschillende scenario's en prognoses berekend.

De Carbon Payback Time komt voor verschillende zonnepanelen en aannames neer op:

- **Best Case** - ultra-low carbon zonnepanelen, optimistische aannames: **2-3 jaar**
- **Modaal** - standaard zonnepanelen, gemiddelde aannames: **>10 jaar**
- **Worst Case** - standaard zonnepanelen, pessimistische aannames: **wordt niet terugverdiend**

Om klimaatopwarming niet onbedoeld te versnellen zou je in Nederland daarom alleen nog (ultra)low-carbon zonnepanelen moeten gebruiken. Hoe meer zon- of wind er bijkomt in Nederland, hoe lager de carbon footprint van zonnepanelen moet worden.

1.3 Low-Carbon zonnepanelen

Gelukkig zijn er Low Carbon zonnepanelen in twee hoofdgroepen:

- 1) Op basis van *crystalline silicon* (c-Si) waarbij CPT zakt naar 5-8 jaar.
- 2) Op basis van *thin film* zonnecellen met een CPT van 2-3 jaar.

Beide typen worden hieronder toegelicht.

Low-Carbon c-Si zonnepanelen

Variant a): Dezelfde technologie, andere energiemix

De raffinage van metallurgisch silicium tot 'solar grade polysilicon' vergt het meeste energie. Een aantal grote Chinese 'Tier 1' zonnepaneelproducenten koopt daarom een deel van het benodigde polysilicon bij het Europese Wacker. Immers, Wacker gebruikt geavanceerdere technologie en Europa heeft een gunstigere elektriciteitsmix dan China waardoor de Carbon Footprint van het polysilicon van Wacker een stuk lager is dan van polysilicon uit China. Ook een aantal Europese producenten, zoals MeyerBurger en 3Sun, kopen hun polysilicon in Europa en hebben daardoor ook een lagere CFP.

Variant b) Andere technologie voor c-Si cellen

- *FBR*. De Chinese top 5 producent CGL gebruikt voor een deel van hun polysilicon een ander proces. Niet het Siemens proces, maar een proces op basis van een 'Fluidised Bed Reactor';

- *Dunner*. Ook proberen sommigen dunnere wafers te gebruiken met een dikte van 90-110 micron in plaats van de standaard 150 micron. Daardoor kan ongeveer een derde van het silicium worden bespaard. Bijvoorbeeld de Chinese producent Risen zet hier op in. Ook andere bedrijven die heterojunctie celtechnologie gebruiken (MeyerBurger, 3SUN) werken aan dunnere cellen;
- *Innovaties*. Radicaal ander productieprocessen bieden ook een grote belofte. De stap van kristallisatie en wafering wordt hierbij geëlimineerd onder namen als *kerfless*, *direct wafering*, *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 wafers in 2026 op de markt.

Thin film zonnepanelen

Dunne film zonnepanelen bestaan al zeer lang. Al minstens 10 jaar hebben ze een marktaandeel van 5-8%. Dit komt door de iets hogere efficiency en lagere kosten van c-Si zonnepanelen.

Sommige dunne film panelen hebben een **vier keer** lagere Carbon Footprint dan mainstream silicium panelen uit China. Dat komt omdat dunne film zonnecellen slechts 2 à 3 micron³ dik zijn - dus 50 keer dunner dan silicium cellen. Dunne-film cellen bestaan uit halfgeleiders als CIGS, CdTe, amorf-Silicium en Perovskiet. Al deze zeer dunne-film panelen hebben een zeer lage carbon footprint.

Korte toelichting over de verschillende soorten dunne-film zonnepanelen:

- **CdTe**. De CadmiumTelluride technologie heeft al jaren 80% marktaandeel binnen het dunne-film segment. Daarbij is FirstSolar uit de VS veruit de grootste aanbieder. Het is de enige niet-Chinese producent van zonnepanelen die in de wereldwijde top 10 staat. De productie-capaciteit bedraagt nu ca. 12 GW, dit groeit naar 25 GW in 2026.

De module-efficiency van CdTe is iets lager (19%) tov kristallijn silicium (20-22%), al wordt dit verschil grotendeels gecompenseerd door de lagere temperatuurscoëfficiënt van CdTe. De verkoopprijs is vergelijkbaar met c-Si panelen.

Dankzij het toepassen van een glas-glas paneel kan het CdTe niet vrijkomen tijdens de gebruiksfase, zelfs niet bij brand⁴. Bij einde levensduur gaat het paneel naar FirstSolar's eigen recycling-fabriek in Duitsland waar het CdTe wordt teruggewonnen.

Deze panelen zijn iets groter dan mainstream zonnepanelen. Bij de kabel-layout moet rekening worden gehouden met een hogere spanning. Deze modules worden niet verkocht voor residentiële toepassingen maar wel voor grotere platte daken en carports.

- **CIGS** (Copper Indium Gallium Selenide). Geproduceerd door een tiental relatief kleine producenten en vooral gericht op architectonische toepassingen (BIPV). Duurder dan mainstream c-Si panelen en met 15-16% ook een wat lagere efficiency.

³ De CFP is niet 50 keer lager, omdat de CFP van een kristallijn silicium zonnepaneel voor 10-20% wordt bepaald door het glas en het aluminium frame, en die worden ook gebruikt bij de meeste dunne film zonnepanelen.

⁴ P. Sinha, et al., 2018, *Human health risk assessment methods for PV, Part 1: Fire risks*, International Energy Agency (IEA) PVPS Task 12, Report T12-14:2018.

- **Amorf silicium (a-Si).** Deze zonnecellen werden al in de jaren 80 in rekenmachines gebruikt. Productie van dit type panelen was bijna verdwenen maar de Nederlandse producent HyetSolar heeft serieproductie opgestart van een flexibele zonnefolie. De opbrengst per m² is ongeveer de helft lager t.o.v. silicium maar de verkoopprijs en systeemprijs maken het produkt volgens de fabrikant toch commercieel interessant.
- **Perovskiet.** Dit nieuwe type zonnecel is potentieel goedkoop en het heeft een efficiency vergelijkbaar met c-Si. Er wordt wereldwijd veel onderzoek naar gedaan - ook in Nederland en België door TNO/Solliance/IMEC. Uitdaging was altijd de stabiliteit: het materiaal degradeerde relatief snel. Dit schijnt te zijn opgelost - verschillende bedrijven uit China en Europa zeggen massaproductie van Perovskiet zonnepanelen in 2024 te starten.

1.4 Overzicht vanuit het marktonderzoek

Onderstaande tabel (Tabel 1) toont de respondenten die modules kunnen leveren met een lagere Carbon Footprint.

Belangrijke opmerking: deze tabel is een momentopname. Er zijn meer producenten van low-carbon panelen en de hier genoemde merken hebben mogelijk alweer een lagere CFP.

Voor de Chinese producenten in de tabel geldt deze CFP alleen voor *specifieke* moduleseries en niet voor de meeste andere zonnepanelen die ze verkopen. De naam van de specifieke low-carbon serie wordt hier niet genoemd omdat de serie mogelijk al is vervangen door een andere serie met een nog lagere carbon footprint.

Inschattingen van de CFP van mainstream zonnepanelen (c-Si, 100% made-in-China) lopen uiteen van 850 tot 1.300 kg CO₂/kW_p. Voor mainstream zonnepanelen wordt in dit document gewerkt met 1.000 kg CO₂/kW_p⁵. 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, Q4'22. Destijds lagen marktprijzen voor mainstream zonnepanelen 25-28€/ct/Wp. Inmiddels zijn de marktprijzen flink gezakt. Gezien de prijsvolatiliteit worden alleen indicatieve meerprijzen getoond.

⁵ 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>. Nota bene: de CFP van mainstream c-Si staat beschreven in de *supplemental information*.

Producer	Module series	Carbon Footprint <i>kg CO₂-eq / kW_p</i>	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/wafer	€€€€
Solarge	Solo ULC	445	NL	200 MW/yr	Mostly made in EU, all-polymer	€€-€€€
GCL	<i>Special series</i>	445	China	Global top 10	FBR polySi	€
Meyer Burger	all	479	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	€€-€€€
Longi	<i>Special series</i>	510	China	Global top 10	PolySi from EU	€
JASolar	<i>Special series</i>	530	China	Global top 10	PolySi from EU	€
Jinko	<i>Special series</i>	545	China	Global top 10	PolySi from EU	€
Risen	<i>Special series</i>	545	China	Global top 10	thin wafers, other	€
Canadian Solar	<i>Special series</i>	545	China	Global top 10	PolySi from EU	€
Talesun	<i>Special series</i>	545	China	Global top 10	PolySi from EU	€
Mainstream PV modules		800-1300	China			-

Tabel 1: Zonnepanelen met een lage of ultra lage carbon footprint.

Legenda: indicatieve meerprijzen ten opzichte van mainstream zonnepanelen in Q4'22

- €: +1 tot 5 €ct/Wp
- €€: +10 tot 15 €ct/Wp
- €€€: +15 tot 25 €ct/Wp
- €€€€: +25 tot 40 €ct/Wp

1.5 Suggestie ten aanzien van eisen

Eisen in andere landen

Sinds 2015 hanteert Frankrijk een limiet aan de carbon footprint van zonnepanelen voor het Franse equivalent van de SDE++ regeling. Van de Europese Commissie mocht deze limiet niet te laag worden om voldoende concurrentie te waarborgen en om de energietransitie niet te vertragen. De Franse limiet is al een paar jaar vastgezet op 550 kg CO₂-eq per kWp. Hierdoor kunnen ook een aantal grote Chinese leveranciers meedoen aan de Franse tenders.

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

Meerkosten

Een grote groep producenten voldoet aan de limiet van 550 kg CO₂-eq per kWp. De meerkosten van zonnepanelen die hieraan voldoen zijn 6-30%. Aangezien zonnepanelen ongeveer één derde uitmaken van de totale projectkosten stijgt de totale projectprijs dan met 2-10%.

Suggestie tav eisen

De limiet van 550 kg is opgenomen in het Template omdat de meerkosten beperkt zijn en omdat veel panelen voldoen aan deze limiet. Via de 'gunningscriteria' is het mogelijk om extra punten te geven aan zonnepanelen met een nog lagere carbon footprint.

Hoe de CFP te bepalen

Frankrijk heeft de afgelopen jaren veel ervaring opgedaan. 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.

Veel zonnepaneelproducenten hebben inmiddels een ECs certificaat, ook vele Chinese 'Tier 1' producenten. Ook daarom is een ECs certificaat als eis in het Template opgenomen.

2. Vermijdbare Toxische stoffen

2.1 Introductie

De meeste mainstream zonnepanelen bevatten diverse vermijdbare toxische stoffen zoals PFAS, lood en antimoon. Het is onzeker of toegestane milieunormen (oa RoHS) worden overschreden. Het is echter beter deze stoffen te vermijden omdat er geschikte en betaalbare alternatieven zijn.

PFAS. De meeste zonnepanelen bevatten een PFAS-folie als achterzijde (backsheet). Dit is 60-140 gram aan PFAS per zonnepaneel. Deze PFAS laag kan degraderen en vervolgens als poederdeeltjes of schilfers in de bodem terecht komen. PFAS-vrije zonnepanelen zijn gelukkig ruim beschikbaar. Deze hebben al een groot marktaandeel (>40%) en zijn niet of nauwelijks duurder. Daarom is in de Template als eis opgenomen dat een PFAS-vrije backsheet wordt gebruikt.

Lood. Loodhoudende soldeertin is goedkoop en betrouwbaar. Via de soldeertin bevat een standaard zonnepaneel 5 tot 15 gram lood. Een aantal producenten gebruiken wel loodvrije soldeertin.

Antimoon. Antimoon is een zwaar metaal met vergelijkbare toxiciteit als lood. Het wordt vooral door glasproducenten uit China toegevoegd tijdens de glasproductie, per zonnepaneel 40-80 gram. Het is voor hen gemakkelijker is om het voorzijdeglas ultra-transparant te maken. Een aantal producenten uit Europa en India heeft geen antimoon (of andere toxische stoffen) nodig voor een vergelijkbare of betere kwaliteit solar glas. Een beetje antimoon kan tijdens de gebruiksfase in de omgeving terecht komen, maar vooral bemoeilijkt antimoon hoogwaardige recycling van het glas.

Advies

Bij lood en antimoon zijn de risico's op milieuverontreiniging relatief klein. Het risico zit vooral tijdens en na de afvalverwerking. Het aanbod van loodvrije of antimoonvrije zonnepanelen is helaas nog beperkt. Daarom wordt geadviseerd om lood-vrij of antimoon-vrije panelen niet op te nemen als eis maar wel om dergelijke zonnepanelen extra punten te geven via de gunningscriteria.

Overigens worden naast de drie genoemde stoffen nog andere toxische stoffen gebruikt. Echter in zeer kleine hoeveelheden en meestal onmisbaar voor een goede werking van de cellen.

2.2 Nadere toelichting en alternatieven

2.2.1 PFAS

De buitenste laag van de backsheet van een zonnepaneel bestaat vaak uit een PFAS-folie of -coating, met een dikte van 15-35 micrometer, ofwel 30-70 gram per vierkante meter zonnepaneel.

Deze laag beschermt het zonnepaneel tegen UV-licht en andere weersinvloeden maar ook tegen algen en andere aangroei. Vanaf de jaren '80 had TEDLAR folie van Dupont bijna een monopolie als backsheet in zonnepanelen. Deze folie is zeer goed bestand tegen weersinvloeden en heeft een lange levensduur. Tedlar bestaat uit een kernlaag van PET van 300 micrometer tussen twee dunne lagen polyvinylfluoride (PVF). Het marktaandeel van Tedlar is nog ca. 20%.

Opkomst van PVDF en fluor-coatings

Gezien de hoge kosten van Tedlar en de sterke patentpositie van Dupont zijn er tal van alternatieve backsheets ontwikkeld. Diverse chemische bedrijven in China produceren polyvinylidifluoride (PVDF), een chemisch minder stabiel broertje van PVF. Dit materiaal wordt net als PVF gebruikt als buitenste laag van backsheets en heeft een marktaandeel van ongeveer 50% (bron: ITRPV).

Bij onderzoek naar veldopstellingen bleek dat bij zonnepanelen die pas 6-10 jaar oud waren, met PVF-backsheets, bijna de helft van die backsheets al ernstige degradatie vertoonde (scheuren, schilfers, verpoederding)⁶.

De laatste jaren bieden grote Chinese backsheet-producenten nog goedkopere varianten aan waarbij een *coating* met fluorpolymeren (PFAS) wordt aangebracht op de kernlaag van PET (marktaandeel van ca 10% volgens ITRPV). De levensduur van zo'n coating is onbekend; mogelijk korter dan 5 jaar.

Backsheet onbekend

Helaas vermelden zonnepaneelproducenten niet welke soort backsheet ze gebruiken. Dit is niet verplicht en er is weinig bewustzijn bij inkopers over het belang van de backsheet.

Producenten hebben nu ook de mogelijkheid om op een gegeven moment een andere backsheet toe te passen. Deze flexibiteit kan van pas komen bij prijsstijgingen of leveringsproblemen van backsheets. Volgens de kwaliteitsonderzoekers van PVEL uit de VS wisselen producenten backsheets en andere componenten regelmatig, ook binnen één moduleserie.

Risico op bodemverontreiniging

De kwaliteit van de PFAS-laag loopt sterk uiteen. Het is gebleken dat backsheets met inferieure PFAS soorten snel (binnen 5-10 jaar) kunnen degraderen. Een deel van die PFAS laag kan dan als schilfers of poederdeeltjes op de bodem terecht komen: bodemverontreiniging!

In 2019 werden vele bouwprojecten een half jaar stilgelegd omdat in de bouwgrond een microgram PFAS per kubieke meter werd gemeten. Als de bodem onder 5-10 jaar oude zonnepanelen zou worden onderzocht is het goed voorstelbaar dat op bepaalde plekken de bodem ver boven de norm is verontreinigd met PFAS-poederdeeltjes en -schilfers. Het is lastig en duur om de bodem naderhand te saneren. Vandaar onze aanbeveling om te kiezen voor PFAS-vrije zonnepanelen.

Risico's tijdens het productieproces van PFAS

In Nederland en in de VS zijn grootschalige milieuverontreinigingen aan het licht gekomen, veroorzaakt door lozingen van PFAS-producenten. In een groot gebied zijn bodem en oppervlaktewater zo vervuild dat het wordt ontraden lokale groente of vis te eten. Gezondheidsaandoeningen van omwonenden bleken veroorzaakt door PFAS.

⁶ Diverse papers, oa: 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.

PFAS-vrije alternatieven

Glas. Het marktaandeel van glas-glas zonnepanelen groeit snel. In 2023 heeft al 40% van alle zonnepanelen een glasplaat als achterzijde⁷. Glas is een PFAS-vrij alternatief. Het snel stijgende marktaandeel komt deels door de opkomst van *bifacial* zonnepanelen. Deze zonnepanelen kunnen ook licht dat op de achterkant valt omzetten in elektriciteit.

Andere voordelen van glas-glas panelen:

- grotere weerstand tegen brand
- sterker - kunnen grote hagelstenen overleven
- kans op langere levensduur - de glasplaat is een gasdichte barrière waardoor bepaalde degradatiemechanismen langer duren.

Glas-glas panelen zijn wel iets zwaarder en duurder dan glas-folie panelen (een paar cent per Wp). De meerprijs is gering omdat glas niet veel duurder is dan een kunststof backsheet. Dankzij de grote volumes in de solar industrie kost gehard solar glas slechts € 4-5 per vierkante meter, terwijl kunststof backsheets € 2-3 /m² kosten. Het verschil in productiekosten is minder dan 1 €ct per Wp.

PO en PET. PFAS-vrije kunststof backsheets op basis van met name PET en PO hebben inmiddels een marktaandeel van 10-20%. Diverse backsheet-producenten, waaronder ook producenten met Europese roots zoals Coveme en Endurans, produceren PFAS-vrije backsheets op basis van UV bestendige PET of - PP. Deze zijn naar verluid even goed en niet duurder dan backsheets met PFAS.

2.2.2 Lood

De meeste grote producenten bieden nog geen loodvrije zonnepanelen. Het onderwerp heeft nog niet overal de aandacht die het zou moeten hebben.

De RoHS richtlijn uit 2011 (Restriction of Hazardous Substances) verbiedt het gebruik van lood in de meeste soorten elektronica. Zonnepanelen zijn destijds echter vrijgesteld van deze richtlijn. Zonnepanelen met loodhoudende soldeertin zijn daarom wel toegestaan.

Risico's bij gebruik van loodhoudende soldeertin

Tijdens de gebruiksfase van een zonnepaneel kan het lood niet vrijkomen⁸. Zelfs bij brand ontstaan er geen gevaarlijke lood-concentraties in de lucht of in het grondwater⁹. Het risico op milieuvervuiling komt pas bij *end-of-life*, na de afvalverwerking van zonnepanelen.

Bij die afvalverwerking worden eerst het aluminium frame en de koperen kabels verwijderd. Het aluminium en het koper gaan naar metaalverwerkers. Het overgebleven laminaat van glas, cellen en kunststoffen wordt in volgende stappen vermalen en bijgemengd met oud ijzer. In een smeltoven wordt uit het oud ijzer weer nieuw ijzer geproduceerd (recycling) en de gemalen brokjes glas en plastic helpen in dat proces. Het glas en het lood uit de soldeertin komen niet terecht in het ijzer

⁷ ITRPV, VDMA, 2023

⁸ P. Sinha, et al, 2019, *Human health risk assessment methods for PV, Part 2: Breakage risks*, International Energy Agency (IEA) PVPS Task 12, Report T12-15:2019. ISBN 978-3-906042-87-9.

⁹ P. Sinha, et al, 2018, *Human health risk assessment methods for PV, Part 1: Fire risks*, International Energy Agency (IEA) PVPS Task 12, Report T12-14:2018.

maar in de 'bodemslakken' van de smeltoven. Deze bodemslakken worden vermalen tot granulaat dat wordt gebruikt voor onder andere wegfunderingen. Er is een risico dat het lood via uitloging uit deze bodemslakken in het grondwater belandt. Er is nader onderzoek nodig naar deze risico's en de effecten.

Loodvrije alternatieven

Al vele jaren zijn er vele soorten loodvrije soldeertin beschikbaar. Een aantal fabrikanten gebruiken dat al. Die soldeertin is iets duurder (verhoogt de zonnepaneelkosten met minder dan 0,1%). Er zijn wel andere soldeerinstellingen nodig bij de productie. Bij loodvrije soldeer is ook een zorgvuldige materiaalkeuze- en procesontwikkeling nodig om een lange levensduur te garanderen. Sommige producenten gebruiken lassen (geen soldeer nodig) voor de diodes in de junction box.

2.2.3 Antimoon

Solar glas is veel helderder dan vensterglas. Het laat vrijwel al het zonlicht ongehinderd door. Vensterglas is iets groener van kleur door oa ijzeroxiden in het glas. Daardoor laat het ca 20% minder licht door (vooral minder infrarood licht).

Voor solar glas worden zuiverdere grondstoffen (zandsoorten) gebruikt. Vervolgens wordt het thermisch gehard en krijgt het glas een anti-reflectiecoating. Veel glasproducenten voegen antimoon toe aan het 'zand': 0,3-0,6% van het glasgewicht om een hogere helderheid te krijgen.

Risico's bij gebruik van antimoon in het glas

Antimoon is net als lood een zwaar metaal dat gezondheidsschade kan veroorzaken. In veel landen is de toegestane antimoonconcentratie in drinkwater vergelijkbaar met die van lood.

Gedurende de gebruiksfase kan er een klein beetje antimoon uitlogen uit het glas. Maar net als bij lood zit het voornaamste risico in de afvalverwerking. Het eind van de huidige afvalverwerking van zonnepanelen bestaat uit een smelt- of verbrandingsproces. Daarbij ontstaan bodemslakken die meestal worden gestort als fundering voor bijvoorbeeld wegen. Lood en antimoon kunnen dan via uitloging in het grondwater belanden. Risico en gevolgen zijn helaas nog onbekend; er is nog geen onderzoek naar gedaan.

Antimoon verhindert ook meer hoogwaardige recycling van solar glas, vanwege drie redenen:

- er kunnen giftige dampen vrijkomen als het belandt in een reguliere recycling-glasoven;
- antimoon is verboden voor 'verpakkingsglas' (flessen, glazen, potten);
- het kan lelijke vlekken veroorzaken bij het produceren van float glas.

Antimoonvrije zonnepanelen

Enkele producenten, bijvoorbeeld f-Solar in Duitsland en Borosil in India, leveren antimoonvrij solar glas dat even helder en even sterk is als solar glas met antimoon. Een aantal PV producenten gebruikt dit antimoonvrije solar glas.

Helaas is het marktaandeel van antimoon-vrij solar glas nog erg klein. Bovendien heeft de Europese Commissie geen initiatief genomen om antimoon te verbieden of te eisen dat het wordt vermeld op een label of datasheet.

2.3 Overzicht vanuit het marktonderzoek

Vrijwel alle producenten leveren glas-glas zonnepanelen. Dus vrijwel iedereen heeft een PFAS-vrij alternatief. Het aantal producenten dat antimoonvrije of loodvrije zonnepanelen produceert is nog gering.

Overzicht vermijdbare toxische materialen

Producer	Module series	PFAS-free	Antimony-free	Lead-free	Country	Production capacity	Additional module costs
Meyer-Burger	all	YES	YES	YES	Germany	1 GW	€€€
First Solar	all	YES	YES	YES	USA	Top 10 Global	€
3SUN	all	YES	YES	YES	Italy	Top 5 EU	€€
Several EU producers		YES	YES	YES	Across EU		€€€
Energyra	DynamiQ/EclectiQ	YES	YES	YES	Netherlands		€€-€€€
Solarge	Solo 500	YES	YES	NO	Netherlands		€€-€€€
SunPower	Maxeon 3	YES	NO	YES	USA	Top 20 Global	€€€€
All producers	glass-glass	YES					€

Tabel 2: Overzicht van zonnepanelen met geen of minder toxische materialen.

Legenda: indicatieve meerprijzen ten opzichte van mainstream zonnepanelen in Q4'22

- €: +1 tot 5 €/Wp
- €€: +10 tot 15 €/Wp
- €€€: +15 tot 25 €/Wp
- €€€€: +25 tot 40 €/Wp

2.4 Suggestie ten aanzien van de eisen

In de Template met inkoop-eisen is nu PFAS-vrij opgenomen als eis, omdat PFAS-vrije zonnepanelen ruim beschikbaar zijn tegen een geringe meerprijs. Bij glas-glas panelen komen daar enkele voordelen bij: minder brandbaar, bestand tegen grotere hagelstenen, vaak een langere technische levensduur.

Antimoonvrij en loodvrij zijn vanwege de beperkte beschikbaarheid en de onzekerheid over de risico's nog niet opgenomen als eis in de template. Wel krijgen ze punten via de gunningscriteria.

3. Technische Levensduur

3.1 Introductie

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

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

Gelukkig is de kans op schade door natuurgeweld slechts een paar procent. 'Repowering' komt wat vaker voor in Nederland, zeker als moduleprijzen laag zijn. Hierbij worden alle zonnepanelen vervangen door nieuwere zonnepanelen met meer vermogen. Maar de levensduur wordt vooral bepaald door de kwaliteit van de materialen en het ontwerp.

40 jaar levensduur is mogelijk en bewezen

Het project Ticino Solare bewijst dat zonnepanelen minstens 40 jaar mee kunnen gaan¹⁰. Zonnepanelen van verschillende fabrikanten werden daar in 1982 geïnstalleerd en om de paar jaar doorgemeten. Veel panelen zijn inmiddels kapotgegaan maar de panelen van één producent leveren na 40 jaar nog meer dan 85% van hun initiële opwek! De backsheet was opgebouwd uit een staalplaat met een dubbele Tedlar laag. Bovendien werd een hoogwaardige encapsulant gebruikt en waren de zonnecellen 300 micron dik (tegen 150 micron nu).

Helaas gaan veel moderne zonnepanelen binnen 12 - 25 jaar kapot omdat laagwaardige materialen zijn toegepast.

Wat betekenen de warrantees?

De solar industrie heeft bijgedragen aan onduidelijkheid over de levensduur. Veel fabrikanten geven een '*performance warranty*' van 25 jaar en een '*product warranty*' van 10-12 jaar. Veel klanten begrijpen dit niet. Maar een performance warranty van 25 jaar is niets waard als het paneel na 10 tot 12 jaar kapot ging. Het is ook de vraag hoeveel je aan deze warrantees hebt: de meeste grote PV producenten van 12 jaar geleden zijn failliet gegaan of gestopt.

Risico's door te snel doorgevoerde innovaties

De solar industrie is zeer dynamisch: nieuwe materialen of technologieën krijgen vaak binnen een paar jaar een groot marktaandeel. De celtechnologie (PERC, PERT, TopCon, HJT), de celgrootte, de afmetingen van de panelen, de gebruikte backsheets en encapsulanten veranderen continu. Veel 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 gingen¹¹.

Fabrikanten leveren wat de klant wenst

Het is heel goed mogelijk om een zonnepaneel te maken dat tenminste 25 jaar meegaat. Daarvoor

¹⁰ Project Ticino Solare: https://www.supsi.ch/isaac/dms/isaac/docs/fotovoltaico/TISO/TISO_Catalogo_Web_2022.pdf

¹¹ Bijvoorbeeld de 'AAA' backsheets van Isovoltaic; bijvoorbeeld LID en PID na de introductie van PERC cellen.

zijn wel ietsje duurdere materialen nodig. Alle producenten kunnen zonnepanelen produceren die lang meegaan, zeker ook de grote Chinese producenten. Maar veel fabrikanten focussen op lage productiekosten en laagwaardige materialen omdat veel klanten alleen kiezen op basis van prijs.

3.2 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 hoge kwaliteit zonnepanelen, met een levensduur van minstens 30 jaar, is de investering €1 per Wattpiek. Bij een opbrengst van 800 kWh/kWp/jaar levert dit project zonnestroom van 4,2 €ct/kWh (exclusief financieringskosten, onderhoud en degradatie).

Bij goedkopere zonnepanelen met een levensduur van 15 jaar is de investering slechts iets lager: €0,95 per wattpiek. De effectieve stroomprijs wordt echter ongeveer twee keer zo hoog: 7,9 €ct/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 flinke 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 kleiner¹².

3.3 Hoe krijg je een grote kans op levensduur >25 jaar?

Zonnepaneelproducenten gebruiken niet allemaal dezelfde materialen. Bovendien houden zij de gebruikte materialen en hun toeleveranciers strikt geheim. Helaas kunnen de eigenschappen van hetzelfde soort materiaal verschillen tussen twee leveranciers. Bovendien worden materialen om de paar jaar een klein beetje aangepast. 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.

¹² 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.

Er vindt veel onderzoek plaats door universiteiten, onderzoeksinstituten en producenten naar de kwaliteit en levensduur van zonnepanelen en materialen, zowel laboratorium- als veldonderzoek. Vele soorten tests worden ingezet om de bestendigheid van zonnepanelen te onderzoeken, waaronder: UV-licht, klimaatkamers, mechanische tests, elektrische tests en gecombineerde stress tests. De materialen worden onderzocht met een scala aan analytische methoden, van elektronenmicroscopie tot Röntgen-foto's en kristallografie.

3.3.1 Materialen

Uit onderzoekspublicaties en gesprekken met experts kwam naar voren dat twee 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 glasplaat achter de zonnecellen

Encapsulant

In de jaren '70 en '80 werd vaak siliconen gebruikt, een UV stabiel materiaal waarbij een lange levensduur mogelijk is. Het is echter duur en moeilijk te verwerken. De laatste 20 jaar is het goedkopere en gemakkelijk te verwerken EVA dominant geworden. Dit materiaal is alleen inherent minder UV-stabiel. Het kan vergelen en bepaalde zuren kunnen geleidelijk vrijkomen. Die leiden weer tot corrosie.

De encapsulantsoorten POE (polyolefin) en TPO (thermoplastisch polyolefin) zijn wel UV-stabiel en komen meestal goed uit de verschillende onderzoeken. Dan nog zijn er verschillen tussen types POE en TPO. Het gebruik van POE of TPO biedt nog geen garantie, het proces is ook 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 is een fluorhoudende polymeer (een PFAS). Bij diverse andere soorten backsheets ontstonden binnen 10 jaar problemen als vergeling, scheuren (cracks) en poedervorming (chalking), zo bleek uit veldonderzoek.

De PV-industrie is zeer dynamisch, waarbij producenten ook materialen toepassen die nog niet langjarig zijn getest. Figuur 1 toont de grote variëteit aan backsheet-varianten die worden toegepast in zonnepanelen. Veel van deze varianten zijn niet langjarig getest. Een aantal van deze backsheets zijn niet geschikt voor een lange levensduur.

Enkele nieuwe typen PFAS-vrije backsheets komen goed uit laboratoriumonderzoek, ook na extreme UV-belasting en andere stress tests. Deze hebben een grote kans op een lange levensduur, al ontbreekt een langjarig trackrecord.

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

Feb 18, 2022

BACKSHEET STRUCTURE	Tedlar (PVF) / PET / Tedlar (PVF)	Kynar (PVDF) / PET / Kynar (PVDF)	PVDF / PET / Any other polymer	Tedlar (PVF) / PET / Polyethylene
	TPT	KPK*	KPE	TPE
Air side	Tedlar	Kynar / PVDF	PVDF / Kynar	Tedlar
Core layer	PET	PET	PET	PET
Cell side	Tedlar	Kynar / PVDF	Polyethylene	Polyethylene
	PVDF or Kynar / PET / Coating	Kynar / PET / Polyolefin	Tedlar (PVF) / PET / Coating	Tedlar (PVF) / PET / Polyolefin
	KPC (KPi)	KPO	TPC	TPO
Air side	PVDF / Kynar	PVDF	Tedlar	Tedlar
Core layer	PET	PET	PET	PET
Cell side	Coating	Polyolefin	Coating	Polyolefin
	PET / PET / Polyethylene	Coating / PET / Coating	Polyamide / Polypropylene / Polyolefin	Polypropylene / Polypropylene / Polypropylene
	PPE	CPC	APPO	PPP (all-PP)
Air side	PET	Coating	Polyamide	Polypropylene
Core layer	PET	PET	Polypropylene	Polypropylene
Cell side	Polyethylene	Coating	Polyolefin	Polypropylene

Source: © TaiyangNews 2020

Figuur 1: Vele soorten backsheets met veel verschillende materialen en kwaliteit¹³.

Glas-glas

Bij het gebruiken van een glasplaat als backsheet kunnen waterdamp, zuurstof en andere gassen die zorgen voor degradatie van de cellen alleen via de dunne rand aan de zijkant binnendringen.

Een glas-glas module kan daarom zeer lang meegaan. Sommige producenten verwachten een levensduur van minimaal 40 jaar. Het productieproces van een glas-glas module is wel een stuk lastiger dan bij een glas-folie module. Gelukkig hebben de meeste producenten voldoende ervaring en de juiste machines om goede glas-glas panelen te maken.

3.3.2 Levensduurtests

IEC61215 - zegt alleen iets over de eerste vijf 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, hagelstenen, het gewicht van sneeuw en wind, enzovoorts. Toch zegt 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 mee gaat.

¹³ Bron: Taiyang News, 18 januari 2022, "So many backsheet structures".

PVEL PQP en 3 x IEC61215

Enkele onderzoeksinstituten (onder andere het Amerikaanse PVEL) hebben 'Combined Accelerated Stress Tests' (CAST) ontwikkeld. Daarbij worden klimaatkamers gebruikt waarin de panelen tegelijkertijd worden blootgesteld aan zeer hoge of lage temperaturen (-40C/+80C), zeer 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 de 3 maal IEC61215 heen komt is de kans groot dat de module 25 jaar meegaat.

3.3.3 Module-ontwerp

Glas-folie zonnepanelen

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*92	3,2 - 4,0	40-45
2018	325	175*98	3,2	35-40
2023	400	180*108	2,5-3,2	30

Tabel 3: De evolutie van eigenschappen van zonnepanelen.

Kortom: de afgelopen acht jaar zijn zonnepanelen een langer en breder geworden maar het glas is dunner geworden 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-glas panelen 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 10-20%.

Een andere reden voor de groeiende vraag naar glas-glas is de grotere robuustheid. Ze zijn stijver en sterker dan glas-folie panelen. 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-glas panelen.

3.4 Overzicht vanuit het marktonderzoek

Het onderstaande overzicht geeft een inschatting van de kans dat een zonnepaneel een levensduur van tenminste 30 jaar haalt. Dit is indicatief en geeft uiteraard geen garantie.

Het aantal 'H'-tjes wordt bepaald door het aantal aspecten waarop het paneel een goede score haalt. Hierin worden verschillende aspecten meegenomen: de produktgarantie, de gebruikte materialen, het module ontwerp en het goed doorlopen van extreme levensduur tests.

Producer	Module type	Chance to last >25 years	Product Guarantee years	Extreme lifetime testing?	High quality encapsulant?	High quality backsheet?	Robust module design Relative frame height and glass thickness	Additional module costs
				Type				
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	€
Energyra	ElectiQ	HH	30	3* IEC 61215	EVA	all-PET	3,2 mm; frame 35 mm	€€-€€€
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-foil	?	10-12	none	?	Glass	2,0+1,6 mm glass; 30 mm frame	€
Mainstream GF	Glass-glass	?	25	none	?	? many types of backsheet	2,5 mm glass; 30 mm frame	-

Tabel 4: 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

3.5 Suggesties ten aanzien van eisen

Helaas kan niet worden afgegaan op de *performance warrantees* en ook niet op de *product warrantees*. Deze warrantees worden door de zonnepaneelproducenten zelf afgegeven, helaas niet door een onafhankelijke organisatie op basis van onderzoek en tests.

Met glas-glas panelen is de kans groter op een langere levensduur, maar het is geen garantie. Alleen met de juiste materialen en processen bereik je een lange levensduur. Een lange levensduur is ook mogelijk met sommige kunststof backsheets. De enige objectieve, relevante informatie is of een paneel bestand is tegen ruige, langdurigere tests zoals: PVEL PQP, 3*IEC61215 of IEC63209.

Deze tests zijn niet als een harde eis opgenomen. Wel kunnen modules bonuspunten krijgen via de gunningscriteria als ze deze tests goed doorstonden.

4. Arbeidsomstandigheden

4.1 Introductie

Goede arbeidsomstandigheden in elke stap van de keten - van mijnbouw tot en met installatie. Dat is het streven maar tegelijk is bekend dat in bepaalde industrieën en landen misstanden voorkomen: kinderarbeid, dwangarbeid of uitbuiting van arbeidsmigranten.

Chinese producenten zijn dominant in de solarindustrie: 90% van alle zonnecellen worden in China geproduceerd en ook de meeste zonnepanelen. In de productieketen van zonnepanelen gaat het met betrekking tot arbeidsomstandigheden vooral over de arbeidsomstandigheden in China.

Risico's op dwangarbeid door Oeigoeren

De Oeigoeren, een islamitische ethnische minderheid uit de westelijke provincie Xinjiang, worden door de Chinese overheid onderdrukt. Er is veel berichtgeving geweest over heropvoedingskampen en gevangenissen in Xinjiang waar mensen zonder rechtspraak in belanden. De Nederlandse Tweede Kamer heeft de gebeurtenissen bestempeld tot genocide.

In Xinjiang is ook door vele onderzoekers en journalisten dwangarbeid geconstateerd. Dit gebeurt deels niet alleen in Xinjiang; Oeigoeren worden ook in andere provincies als dwangarbeider ingezet.

Dankzij goedkope kolen en goedkope elektriciteit staat er veel energie-intensieve industrie in Xinjiang. Het gebied is verantwoordelijk voor 32% van de wereldwijde productie van metallurgisch silicium en 40% van het polysilicium, de grondstof voor c-Si zonnecellen. Er staan ook veel fabrieken voor vervolgstappen als kristallisatie, wafering en celproductie.

In het rapport: [In Broad Daylight: Uyghur Forced Labour and Global Solar Supply Chains](#), constateerde de Sheffield Hallam University dwangarbeid in verschillende fabrieken in de solar supply chain. Dit vindt plaats bij de productie van polysilicium maar ook bij andere productieprocessen.

Probleem 1 - ondoorzichtige keten

De productieketen van silicium zonnecellen is zeer complex en ondoorzichtig. Daarom is het zeer lastig te bepalen of ergens sprake was van dwangarbeid. Hieronder de stappen in de keten:

1. Mijnbouw: kolen en silica/quartz
2. Productie van metallurgisch silicium (zuiverheid 98-99%)
3. Productie van polysilicium (zuiverheid 99.9999999%)
4. Kristallisatie en productie van ingots
5. Wafering (verzagen van ingots in dunne wafers)
6. Celproductie
7. Moduleproductie

De meeste Chinese moduleproducenten hebben deels eigen celproductie en deels kopen ze de cellen in. De celproducenten kopen weer wafers in. En de waferproducenten hebben vaak eigen kristallatieafdelingen met ingot-pullers maar ook zij kopen ook ingots in bij verschillende leveranciers.

En de producenten van ingots kopen het polysilicon weer bij verschillende gespecialiseerde producenten, die het metallurgisch silicon weer bij andere producenten kopen. Zelfs producenten die vertikaal geïntegreerd zijn kopen een deel bij andere producenten. Het is een grote brei spaghetti.

De productie van elk van deze stappen vindt plaats op grote industriële complexen waar vele duizenden werknemers werken. Vaak op afgelegen plekken, waarbij veel van die werknemers ook op de fabriekscampus wonen. De fabrieken zijn eigendom van grote bedrijven met een omzet van (tientallen) miljarden Euro.

Stel nu dat er in één polysiliconfabriek dwangarbeid wordt geconstateerd. Alleen als alle partijen in de keten zouden meewerken en alle orders en facturen van leveranciers en klanten zouden vrijgeven, zou het mogelijk zijn te achterhalen waar dat polysilicon precies belandt.

Probleem 2 - ook bij 'Non-XUAR' ketens kan dwangarbeid niet worden uitgesloten

Sommige Chinese modulefabrikanten hebben hun toeleveringsketens opgesplitst waarmee men beweert zonnepanelen vrij van XUAR-inputs (Xinjiang - Uygur Autonomous Region) te kunnen leveren. Dit is ontworpen met het oog op UFLPA-naleving (US Uygur Forced Labor Prevention Act).

Gezien de bovengenoemde intransparantie is het moeilijk te controleren of die *dedicated supply chain* niets uit Xinjiang krijgt. Bovendien worden Oeigoeren ook in andere provincies ingezet als dwangarbeider.

En zelfs als deze non-XUAR keten vrij is dwangarbeid dan kopen deze moduleproducenten voor hun binnenlandse klanten wèl in Xinjiang. De vraag is daarom of een 'XUAR-input-vrije' divisie iets bijdraagt aan het verminderen van dwangarbeid.

Veel Europese zonnepaneelproducenten óók blootgesteld aan dwangarbeid

Veel Europese moduleproducenten kopen hun zonnecellen in China. Een aantal hebben weliswaar eigen celproductie maar kopen de wafers alsnog in China. Europese producenten weten vaak niet hoe de keten van toeleveranciers in elkaar zit. Ze hebben ook zo'n klein aandeel in de omzet van hun leveranciers dat ze niet bij machte zijn om keuzes in de keten af te dwingen of zelfs om volledige informatie te krijgen.

Slechts een enkele producenten hebben een productieketen volledig buiten China.

Probleem 3 - een andere perceptie bij de Chinese overheid

De perceptie van de Chinese overheid op 'dwangarbeid door Oeigoeren' is heel anders dan de onze. Vrij vertaald - men vindt het eerder opleidingen of werkstages voor onderontwikkelde mensen die eerder een gevaar vormden (vanwege bomaanslagen in het verleden door Oeigoeren).

De Chinese overheid is het ook 100% oneens met het Westerse oordeel 'dwangarbeid'. Zij vinden het Westen hypocriet en zeggen dat de ophef in het Westen niets meer is dan geopolitiek.

Op de websites van sommige bedrijven worden projecten die wij dwangarbeid noemen met trots gepresenteerd als 'Social Return', als goede werken voor de maatschappij.

Deze fundamentele verschillen in perspectief maken het voor onmogelijk om transparantie te krijgen in de productieketens, laat staan om bepaalde leveranciers te vragen om te stoppen met dwangarbeid. Zonder een akkoord met de Chinese overheid, waarbij expliciete medewerking wordt toegezegd en waarbij onafhankelijk onderzoek wordt toegestaan, is betrouwbare informatie vrijwel onmogelijk.

Het is ook niet zonder risico om als Westerse persoon of organisaties ter plaatse onderzoek te doen: vele onderzoekers zijn al in de gevangenis beland, zowel uit China als uit het buitenland. Ons Ministerie van Buitenlandse Zaken ontraadt mensen ten strengste om naar Xinjiang te reizen.

4.2 Welke acties worden ondernomen in het Westen, Europa, Nederland

Er zijn diverse initiatieven om dwangarbeid bij de productie van zonnepanelen te voorkomen.

Angelsaksische aanpak: boycot en regels voor producenten

In de VS, Australië en het Verenigd Koninkrijk is wetgeving aangenomen met als doel om producten te boycotten waar mogelijk dwangarbeid aan te pas kwam. Er is een omgekeerde bewijslast: de producent of importeur moet uitgebreid en gedetailleerd onderbouwen dat de er geen dwangarbeid aan te pas kwam.

De Amerikaanse '*Uyghur Forced Labor Prevention Act*' is al in 2023 in werking getreden en boycot producten uit Xinjiang tenzij goed en onafhankelijk is onderbouwd dat er geen dwangarbeid aan te pas kwam.

De *Modern Slavery Act* van Australië en Engeland is breder van opzet. Daarbij moeten zonnepaneel-producenten uitgebreid rapporteren welke risico's er in hun supply chain zijn bij alle toeleveranciers - ook die buiten China; hoe zijn de risico's onderzocht en welke acties zijn er genomen om uitbuiting en erger te voorkomen.

Europese aanpak: due diligence en gesprekken door afnemers

Richtlijnen van de OECD en aankomende Europese wetgeving - het '*Corporate Sustainability Reporting Directive*', richten hun pijlen vooral op de inkopende organisaties. Van de bedrijven en overheden die PV projecten inkopen wordt verwacht dat ze onderzoek (due diligence) doen naar de keten van leveranciers als je redelijkerwijs kan vermoeden dat er sprake is van schending van mensenrechten. Het doel hierbij is niet een *boycot* maar in gesprek raken en overtuigen.

De OECD heeft richtlijnen gemaakt hoe je dat onderzoek zou moeten doen. Het idee is dat vele bedrijven en overheden de verschillende Chinese fabrikanten benaderen met vragen. Om eerst de

risico's op dwangarbeid te identificeren en vervolgens de hoop dat deze fabrikanten via gesprekken worden overtuigd om arbeidsvoorwaarden te verbeteren.

Het Solar Stewardship Initiative van SolarPowerEurope (SPE)

SPE is de Europese branchevereniging van de PV sector. Voorheen een groep van importeurs, groothandels en EPC'ers, tegenwoordig zijn ook grote Chinese producenten aangesloten.

In samenwerking met grote Chinese producenten als Trina en Jinko werkt SPE aan het '*Solar Stewardship Initiative*'. Hierbij wordt via een standaard vragenlijst, protocol en verklaring ontwikkeld waarmee Chinese producenten kunnen voldoen aan vragen die worden gesteld vanuit de *due diligence*. Met deze uniforme verklaring en rapportage wordt voorkomen dat honderden Europese organisaties de Chinese producenten bestoken met vragen en site visits. Dat zou onwerkbaar worden en voor beide partijen hoge extra kosten met zich mee brengen. Het SSI is nog in ontwikkeling.

Het SER IMVO convenant

De Sociaal Economische Raad werkt samen met grotere Nederlandse bedrijven en organisaties uit de sectoren Wind op Zee en ZonPV aan het IMVO convenant (Internationaal Maatschappelijk Verantwoord Ondernemen). Er is een secretariaat opgericht dat organisaties gaat ondersteunen bij het uitvoeren van de *due diligence*. Het initiatief is nog in een vroege fase.

4.3 Lijst met 'slaafvrije' zonnepanelen?

Tony Chocoloney adverteerde met '*slaafvrije chocola*'. Ondanks jarenlange inspanningen om rechtstreeks bij boeren in te kopen kon Tony toch niet garanderen dat er geen slavernij aan te pas kwam - door intransparante handelsketens en gebrekkige onafhankelijke audits.

Zijn er *slaafvrije zonnepanelen*?

Er is geen lijst. Er zijn wel twee categorieën zonnepanelen met een grotere kans daarop:

- *Dunne film* zonnepanelen. Die hebben geen silicium nodig.
- *c-Si panelen, 100% made-in-Europe*. Enkele producenten maken niet alleen de panelen en zonnecellen in Europa maar ook de wafers en polysilicon.

Statements en rapportages van grote zonnepaneelproducenten

Enkele grote Amerikaanse zonnepaneelproducenten hebben uitgebreide rapporten gemaakt die voldoen aan de Engelse en Australische *Modern Slavery Act*. Ook een aantal grote Chinese producenten werken aan dergelijke rapportages.

Hierbij schakelen de producenten vaak adviesburo's in om te helpen met deze rapportages en met het onderzoek. Die adviesburo's gebruiken meestal '*desk research and site visits when possible*' om de risico's in kaart te brengen. Na de instorting van de financiële sector in 2008, mede werd veroorzaakt door de independent rating agencies die triple A beoordelingen gaven aan slechte leningen is er twijfel over de betrouwbaarheid van de rapporten van deze adviesburo's, zolang de beoordeelde het rapport betaalt.

4.4 Wat is nu opgenomen in het Inkooptemplate

In het template is nu een eis opgenomen over de arbeidsvoorwaarden tijdens de installatie van PV projecten. Omdat er ook misstanden zijn geconstateerd zoals uitbuiting van arbeidsmigranten.

Er is geen eis opgenomen over de arbeidsomstandigheden bij de productie van de zonnepanelen. Omdat het niet duidelijk is hoe die objectief kunnen worden vastgesteld.

'Due Diligence' ?

In de tender kan een 'Due Diligence' naar dwangarbeid conform OECD richtlijnen worden geëist. De aannemer, EPC'er of installateur moet dan een DD laten uitvoeren op de zonnepaneelproducent.

Het is alleen de vraag of dat zinvol is:

- Is het *effectief* - er is alleen deskresearch mogelijk, leidt dat tot minder dwangarbeid in China?
- Is het *betrouwbaar* - want onderzoeken zonder controle, op basis van deskresearch?
- Is het *gevaarlijk* - fysiek onderzoek in China leidt mogelijk tot de gevangenisstraf
- Is het *proportioneel* - staan de inspanningen en de kosten in verhouding tot de omzet?
- Is het *efficiënt* - om honderden Nederlandse opdrachtnemers dezelfde onderzoeken naar dezelfde producenten in China te laten uitvoeren?

Het is ook de vraag of iemand nog inschrijft als een Due Diligence eis wordt opgenomen.

Rapportage conform 'Modern Slavery Act'?

Een andere optie is een rapportage conform de Engelse of Australische '*Modern Slavery Act*' te vragen. Maar ook deze optie kent nadelen:

- weinig keuze - slechts een beperkt aantal producenten die in Nederland leveren, hebben deze rapportages gemaakt;
- benadeelt kleine producenten - deze rapportages zijn duur en bewerkelijk. Dit werpt een hoge drempel op voor kleine producenten.

Tot slot

Misschien komt er via de SER één nationaal onderzoek naar de verschillende producenten. Of nog beter één *Europees* onderzoek - dan is er voldoende *leverage* richting China en de grote producenten.

Betrouwbare informatie komt waarschijnlijk pas als de Europese Commissie hierover afspraken maakt met de Chinese overheid. De Chinese centrale overheid in Beijing zou moeten toestaan dat onafhankelijke organisaties (bijv accountantskantoren) de boekhouding van producenten in de gehele keten mogen doorspitten, en dat onafhankelijk onderzoek naar de arbeidsomstandigheden in alle fabrieken in Xinjiang wordt toegestaan. Dat kan nog even duren.

Appendix A -

Carbon Footprint en Carbon Payback Time

van zonnepanelen geplaatst in 2024 in Nederland

Introductie

Zonnepanelen worden geïnstalleerd voor een schone groene toekomst. Maar de klimaatwinst kan tegenvallen door de beperkte levensduur en de hoge *carbon footprint*.

Bij uitstek in Nederland is het belangrijk om te kiezen voor *low carbon* zonnepanelen. Want door verschillende factoren is de netto opwek van zonnepanelen lager dan in andere landen:

- de helft van de instraling in Zuid-Europa;
- zon-op-dak installaties, meestal in Oost-West oriëntatie;
- de omvormercapaciteit is beperkt tot 50% van de DC vermogen;
- steeds worden nieuwe PV installaties afgeschakeld door stroomoverschotten.

Een flink deel van de PV installaties die in 2024 worden geïnstalleerd, verdient de eigen carbon footprint mogelijk niet terug. Dan wordt klimaatopwarming eerder versneld dan vertraagd. Om die kans te verkleinen is het erg belangrijk *low-carbon* zonnepanelen toe te passen.

Aanpak

In hoofdstuk 1 wordt de Carbon Footprint (CFP) van de zonnepanelen en de andere componenten van een PV systeem toegelicht en ingeschat. Op basis van de hoge en lage inschattingen worden drie scenario's gemaakt voor de CFP een Zon-op-Dak systeem: *Best Case*, *Modaal* en *Worst Case*.

Vervolgens wordt in hoofdstuk 2 de *Carbon Payback Time* berekend. Hiervoor zijn prognoses nodig van een aantal factoren. Ook hier zijn er hoge en lage inschattingen en daarom worden er verschillende prognoses gemaakt van de CPT: *Prognose Kort*, *Prognose Lang* en *KEV'22*.

Feedback?

De analyses en inschattingen in deze Appendix zijn zorgvuldig gemaakt, maar het blijven inschattingen. Mocht u fouten zien, zaken missen of betere inschattingen hebben - stuur ons graag een email via: BGDPV@pianoo.nl.

Tot slot

Het staat vast dat het klimaat meer is geholpen met *low-carbon* of *ultra-low carbon* zonnepanelen. Deze zijn niet veel duurder dan standaard panelen en goed beschikbaar.

1. De Carbon Footprint van een PV systeem

De Carbon Footprint (CFP) is de hoeveelheid broeikasgassen, uitgedrukt in CO₂-equivalent, die vrijkomt tijdens de levensloop van een produkt of systeem.

In het geval van zonnepanelen wordt de CFP uitgedrukt in kilogram CO₂ per kilowattpiek (kWp). Bij zonnepanelen van 330 tot 500 Wattpiek per stuk zijn er 2 à 3 panelen nodig voor 1 kWp. Naast panelen zijn er kabels, omvormers, bevestigingsmateriaal nodig voor een PV systeem.

De CFP kan via een Life Cycle Analysis (LCA) worden bepaald. De hele levensloop wordt onder de loep genomen, alle broeikasgasemissies worden ingeschat: van mijnbouw tot productie tot transport.

Waar vinden de broeikasgasemissies plaats?

Veruit de meeste broeikasgassen komen vrij bij de productie van de materialen:

- Het zeer zuivere silicium (8N)
- Glas en aluminium
- Koper - de DC kabels en de AC kabels
- Staal - montagematerialen

Bij de assemblage van de zonnepanelen en het transport naar Europa (via containerschip) komen relatief weinig emissies vrij, evenals bij het installatieproces en de afvalverwerking.

Inschatting van de Carbon Footprint via Best Case, Modaal en Worst Case

De CFP is afhankelijk van de technologie, de producent en diens productieland en ontwerpkeuzes. Daarom zijn er grote verschillen in CFP tussen het ene en het andere PV systeem.

De onderstaande tabel toont de bandbreedte van de Carbon Footprint van een Zon-op-Dak systeem en een Zon-op-Land systeem, met de bijdrage per component.

In de onderstaande paragrafen wordt ingegaan op elke component.

De Carbon Footprint is gemaakt voor drie scenario's:

- **Best Case** - optimale keuzes, optimistische aannames, veel factoren zitten mee
- **Modaal** - mainstream componenten, gemiddelden, factoren zitten deels mee en deels tegen
- **Worst Case** - mainstream componenten, voorzichtige aannames, factoren zitten tegen

Carbon Footprint PV systeem 1 kWp [kg CO ₂ -eq/kWp]	Zon-op-Dak			Zon-op-Land		
	Best Case	Modaal	Worst Case	Best Case	Modaal	Worst Case
Zonnepanelen	270	1.000	1.300	270	1.000	1.300
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	1.000
Albedo effect	0	100	200	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	440	1.350	1.840	660	1.895	3.440

Tabel A1: Carbon Footprint van PV systeem van 1 kWp, op Dak en op Land, volgens 3 verschillende inschattingen

1.1 Zonnepanelen

1.1.1 Best Case: Dunne-Film zonnepanelen

Dunne-film zonnepanelen hebben de laagste Carbon Footprint. Deze zonnepanelen gebruiken geen kristallijn silicium zonnecellen maar andere halfgeleiders. Een dunne film zonnecel is 2-3 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 in 2024 of 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 zijn 3 micron dik en wegen 40 gram per zonnepaneel.

De Carbon Footprint van deze panelen is **267 kg CO₂-eq/kWp**. Volgens onderzoekers van NREL¹⁴ wordt dit 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 0,3% in de CFP. De onzekerheid van de CFP van FirstSolar is relatief klein (ordegrootte 10%) omdat de emissies tijdens de productie van glas en aluminium bekend zijn - hun toeleveranciers zijn gevestigd in Europa of in de VS.

De onzekerheid in de CFP van FirstSolar's panelen komt door de volgende factoren:

- De elektriciteitsmix in het land waar het aluminium (voor de frames) wordt geproduceerd en de moduleproductie (FirstSolar: VS, Maleisie, Europa).
- Variaties in elektriciteitsverbruik van moduleproductie tussen fabrieken.
- Het percentage gerecycled aluminium (FirstSolar ging uit van 0% gerecycled).

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 voor PV industrie:

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

Via industriebeleid:

- Glas schoner produceren met groen gas of H₂.
- Lagere emissies van de elektriciteitsopwek.

¹⁴ 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>.

1.1.2 De Carbon Footprint van *mainstream* zonnepanelen

Meer dan 95% van de in Nederland geïnstalleerde zonnepanelen bevatten c-Si zonnecellen uit China. Om die zonnecellen te maken zijn energie-intensieve processen nodig. Maar helaas maken de vele Chinese zonnecelproducenten geen LCA analyses van de Carbon Footprint van deze zonnecellen.

Dat is ook zeer complex - elke celproducent heeft verschillende fabrieken, verschillende processen en machines en verschillende operationele prestaties. Dat leidt tot een flinke variatie van de carbon footprint. Ook heeft elke celproducent een mix van toeleveranciers (van wafers) die op hun beurt weer diverse toeleveranciers hebben van polysilicon. Veel toeleveranciers hebben diverse locaties en processen. Daarnaast is deze industrie extreem dynamisch; sommige machines worden al na 2 jaar vervangen. Door de grote overcapaciteit staat de helft van de productielijnen soms stil.

Door het gebrek aan LCA analyses door de Chinese producenten zijn er geen objectieve data om een 'industry average' te berekenen van de CFP van c-Si zonnecellen.

Inschattingen

Jaarlijks verschijnen er wel veel wetenschappelijke artikelen over de LCA van zonnepanelen. Die gebruiken allemaal als basis de gegevens uit de *Life Cycle Inventory (LCI)*¹⁵, die elke 5 jaar wordt ingeschat door de IEA PVPS Task 12 werkgroep. Deze PVPS Task 12 werkgroep bestaat uit een kleine groep wetenschappers uit Europa en Amerika werkzaam in Solar R&D.

Bij gebrek aan objectieve data maakt deze werkgroep *inschattingen* van de verbeteringen die zijn gemaakt ten opzichte van 10 tot 15 jaar oude analyses, en gegevens van toenmalige Europese producenten. Ook worden inschattingen gebruikt van machinebouwers.

De onzekerheidsmarge en foutmarge is daarom groot. Helaas wordt dit nergens genoemd in de LCI publicaties. Hoe men tot de inschattingen is gekomen wordt niet toegelicht. Ook wordt niet aangegeven of de getallen een *industry average* zouden voorstellen of een *best case* (optimale processen, hoge yield, volle bezetting, machines vervangen na 10 jaar, etc).

Op basis van deze LCI uit 2020 volgt voor *mainstream* c-Si zonnepanelen een Carbon Footprint (geproduceerd in China) van ca. 800 kg CO₂/kWp. Maar het is de vraag of dit een *industry average* is. Ook is er een risico op een te rooskleurige blik van deze werkgroep¹⁶ - de werkelijke Carbon Footprint van *mainstream* c-Si zonnepanelen is mogelijk 20% of 30% hoger.

¹⁵ 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

¹⁶ Sommige artikelen zijn kritisch op de werkgroep vanwege de geheime inschattingen en omdat de 'slager eigen vlees keurt'

Recente LCA's

Enkele recente publicaties komen uit op de volgende inschattingen voor de Carbon Footprint van mainstream c-Si zonnepanelen uit China:

- 800 kg CO₂/kW_p - door Fraunhofer ISE¹⁷, m.n. op basis van de IEA LCI (PVPS T12, 2020)
- 1075 kg CO₂/kW_p - door NREL¹⁸, op basis van LCI data uit de VS en internationale literatuur
- 1300 kg CO₂/kW_p - door Universiteit van Kunming¹⁹, incl input van een Chinese producent

Conclusie

Op basis van het bovenstaande en van het voorzorgprincipe wordt in dit document 1.000 kg CO₂/kW_p gebruikt als de gemiddelde Carbon Footprint van *mainstream* c-Si zonnepanelen (scenario *Modaal*).

Voor scenario *Worst Case* wordt gebruikt: 1200 kg CO₂/kW_p (het gemiddelde + 20%).

Voor scenario *Best Case* wordt de CFP van het CdTe zonnepaneel gebruikt: 270 kg CO₂/kW_p.

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-Land installaties 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.

Zon-op-dak systemen

De meeste montagesystemen voor platte daken gebruiken stalen profielen (bijv. 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/kW_p**.

Per onderdeel een korte toelichting:

- *Aluminium*: 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_{alu}²⁰ terwijl aluminium uit China een veel hogere CFP heeft van 18 kg CO₂/kg_{alu}. Andere Europese aluminium producenten zitten ergens tussen deze twee uitersten. De CFP van 100% gerecycled aluminium uit Noorwegen²¹ (op basis van schone elektriciteit) heeft een lagere carbon footprint met ca 2,3 kg CO₂/kg_{alu}. Kortom, de

¹⁷ 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>

¹⁸ 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>

¹⁹ Fan et al., *LCA of Crystalline Silicon Wafers for PV Power Generation*, Silicon (2021); <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00670-4>

²⁰ <https://www.epd-norge.no/epder/bygg/stal-armering-aluminiumskonstruksjoner/hydro-75r-aluminium-extrusion-ingot>

²¹ <https://www.epd-norge.no/epder/bygg/stal-armering-aluminiumskonstruksjoner/hydro-4-0-aluminium-extrusion-ingot>

CFP van aluminium kan een factor 10 verschillen. Extrusie en anodisatie zijn ingeschat op 1 kg CO₂/kg_{alu}.

- *Staal*: ook hier 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-zink coating, hebben een carbon footprint van 0,8 kg CO₂/kg_{staal}²². De variant op basis van ijzererts (*virgin*) komt uit op 2,6 kg CO₂/kg_{staal}²³. Profielvorming en bewerkingen zijn ingeschat op 0,5 kg CO₂/kg_{staal}
- *Ballast*: de hoeveelheid ballast voor een zon-op-dak systeem kan een factor vier 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*: RVS bouten, klemmen, kunststof onderdelen, verpakking en transport.

Carbon Footprint van montagesystemen voor platte daken	Gewicht	CFP	CFP	CFP	CFP
	per m2	per kg	per m2	Aluminium systeem	Staal systeem
	PV systeem	materiaal		per kWp	per kWp
	kg	kg CO ₂	kg CO ₂	kg CO ₂ /kW _p	kg CO ₂ /kW _p
A) Aluminium systeem	3-4	3-20	9-80	45-400	
B) Staal systeem	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 A2: 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-land systemen

Vanwege de funderingen (vaak stalen schroefpalen) en de draagconstructie is voor een Zon-op-Land systeem per vierkante meter drie á vier 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/kW_p**.

Zon-op-water systemen

Er is nog te weinig informatie beschikbaar voor een inschatting.

1.3 Omvormers

Het onderzoeksburo Treeze, eigendom van LCA-expert en EcoInvent-oprichter R. Frischknecht, heeft in 2016 onderzoek verricht naar de Carbon Footprint van omvormers²⁴. Bij kleine omvormers van 5 kW voor residentieel gebruik komen de onderzoekers op **120 kg CO₂/kW_{p-AC}** en voor middelgrote omvormers van 20 kW op **75 kg CO₂/kW_{p-AC}**. Voor grotere PV projecten op grote platte daken, met een

²² [https://europe.arcelormittal.com/repo/fce/transfer/XCarb Recycled and Renewably Produced Magnelis_EPD.pdf](https://europe.arcelormittal.com/repo/fce/transfer/XCarb%20Recycled%20and%20Renewably%20Produced%20Magnelis_EPD.pdf)

²³ <https://epd-online.com/PublishedEpd/Download?id=19562>

²⁴ https://treeze.ch/fileadmin/user_upload/downloads/Publications/Case_Studies/Energy/174-Update_Inverter_IEA_PVPS_v1.1.pdf

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/kW_{p-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 (ivm netcongestie).

Conclusie

Voor omvormers wordt gerekend met een bandbreedte van: **25 - 40 kg CO₂/kW_p**. (50-80% * 50 kg CO₂). Mogelijk zijn er grotere verschillen tussen omvormers. We hopen hier komende jaar meer aandacht aan te besteden.

1.4 DC bekabeling

De CFP van de DC kabels (tussen de zonnepanelen tot de omvormer), de kabelgoten, combinerboxen en bevestigings-materialen 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 kW_p
- *Kabeldoorsnede*: **6** mm per string met 5 kW_p vermogen
- *Kopergewicht* per meter kabel (6 mm): ca. **250** g per meter
- *Carbon Footprint* van koper: **4** kg CO₂ per kg koper²⁵

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

Conclusie

Aanname mbt 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/kW_p**.

1.5 De AC-kabels naar de netaansluiting

Zon-op-Dak

Bij zon-op-dak projecten 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-Dak projecten 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/kW_p**.

²⁵ Ecoinvent LCI database v3.3

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 buro Treeze²⁶ bedraagt de CarbonFootprint per 20 kilometer AC kabel **1.000** kg CO₂/kW_p bedraagt. Als een zonnepark vlak naast een bestaande netaansluiting wordt de Carbon Footprint geschat op **50** kg CO₂/kW_p. De bandbreedte wordt op deze manier: **50 tot 1.000** kg CO₂/kW_p.

1.6 Het Albedo-klimaat-effect

Een wit geschilderd huis (zoals in Griekenland), of een witte auto, blijft in de zomer veel koeler dan een huis of auto met een donker kleur²⁷. *Albedo* staat voor het deel van de zonnestraling dat wordt gereflecteerd- zowel zichtbaar licht als infrarood en UV.

De IPCC beschouwt verlaging van Albedo als een versneller van klimaatopwarming. Als gletschers en sneeuwvlakten wegsmelten, of als gras en bomen worden vervangen door wegen of bebouwing, dan levert dit een 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 maar een paar graden warmer zijn dan de lucht; gras en bomen blijven koel dankzij reflectie en *verdamping*.

Het is nog onduidelijk hoe groot het klimaat-effect is van de lage Albedo van zonnepanelen. Daarom wordt hieronder een inschatting gemaakt. De Albedo kan in theorie variëren tussen 0% tot 100%. In wetenschappelijke publicaties²⁸ die de IPCC ook gebruikt wordt ingeschat dat bij 'droge oppervlakken' elke 1% Albedoverlaging, per vierkante meter een klimaat-effect heeft dat gelijk staat aan de uitstoot van 7 kg CO₂ per jaar. Gezien de lage zoninstraling in Nederland zal het Albedo-klimaat-effect hier ook kleiner zijn. In dit document wordt dit geschat op 2 kg CO₂ per procent Albedo.

Aan de andere kant wordt bij zonnepanelen 20% van het zonlicht²⁹ niet omgezet in warmte maar in elektriciteit. Dus als een zonnepaneel de Albedo van een dak verlaagt van 25% naar 5% dan zou dat 'klimaatneutraal' moeten uitpakken. Water of groene oppervlakken die koel blijven door verdamping hebben waarschijnlijk een *effectieve Albedo* die vergelijkbaar is met witte oppervlakken.

De onderstaande tabel geeft een overzicht van de Albedo van diverse oppervlakken.

²⁶ treeze.ch/fileadmin/user_upload/downloads/Publications/Case_Studies/Energy/itten-2014-electricity-mix-v1.3.pdf

²⁷ Het *urban heat island effect* wordt ook veroorzaakt door verschillen in Albedo en verdamping. Steden stimuleren daarom groene daken en lichtere bestrating.

²⁸ Hashem Akbari et al 2012 Environ. Res. Lett. 7 024004

²⁹ Aannames: 20% module efficiency en Performance Ratio 90%

Albedo natuur ³⁰		Albedo kunstmatige oppervlakken ³¹	
Verse sneeuw	85-95%	Wit gevelrd dak	75-85%
Wolken	40-90%	Witte dakfolie (EPDM/PVC/TPO)	70-80%
Zand/rotsen (droog)	30-50%	Wit grint	50-60%
Grasland	25-30%	Beton	15-40%
Bos	10-20%	Grijs grint of grijze steenslag op bitumen	15-25%
Grondaarde (nat)	5-15%	Donkergrijs grint	10-20%
Water (meren, zee)	6-10%	Bitumen, EPDM folie (na 1 jaar)	10-15%

Tabel A3: Albedo van natuurlijke en kunstmatige oppervlakken.

Het Albedo-klimaateffect van een PV installatie is dus sterk projectafhankelijk. De onderstaande tabel toont een indicatieve bandbreedte van het effect.

	Albedo zonder PV installatie	Effectieve Albedo verlaging	Klimaateffect** per kWp
Zon-op-Dak	20-40% (afh. van 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 A4: Albedo-klimaateffect van diverse typen PV installaties.

*) Bij Zon-op-Land en Zon-op-Water projecten is het nog erg onzeker, vandaar de grijze letters.

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

De zonnepanelen uit het 'best case' scenario komen niet uit Europa maar uit Maleisië of de VS, daarom wordt ook oceaantransport meegerekend in dit scenario.

Zeetransport

Best case - bij een zuinig, volgeladen containerschip dat niet te snel vaart, met LPG als brandstof, glasfolie panelen, bedragen de emissies van het zeetransport ca **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-glas panelen, zijn de emissies van het zeetransport ca **30 kg CO₂-eq** per kWp.

Deze getallen zijn berekend op basis van de volgende aannamen:

- Afstand oceaanroute Shanghai-Rotterdam: **22.000 km**
- Containerschip GHG emissies: **5 tot 20 gram CO₂-eq per ton per km³²**

³⁰ <https://nl.wikipedia.org/wiki/Albedo>

³¹ https://www.epa.gov/sites/default/files/2017-05/documents/reducing_urban_heat_islands_ch_4.pdf

³² 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.

- Gewicht 40-voets container (leeg): **3.800 kg**
- 380 kWp aan zonnepanelen per container³³
- Containergewicht per kWp zonnepanelen: **~10 kg**
- Gewicht zonnepanelen per kWp: ca. **50 kg** glas-folie panelen, ca. **60 kg** voor glas-glas³³
- Transportgewicht (aandeel container + 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/kW_p**.

Gebruiksfase

Tijdens de gebruiksfase zijn de emissies vooral afkomstig van het transport dat nodig is om één of twee 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/kW_p**.

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 ca 5-7 kilo aan plastics (encapsulant, backsheet) verbrand³⁴.

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

³³ Op basis van datasheets van oa: JASolar, Longi, Jinko, Risen, Canadian Solar, GCL

³⁴ 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

De *Carbon Payback Time* betekent de hoeveel tijd die nodig is om de *Carbon Footprint* van de PV installatie terug te verdienen via het voorkomen van emissies uit fossiele elektriciteitsopwek.

Onderstaande analyse wordt gemaakt voor nieuwe zonnepanelen die eind 2023 worden geïnstalleerd in Nederland³⁵.

Deze analyse richt zich op het meest voorkomende type PV installatie³⁶: Zon-op-Dak systemen.

Drie bepalende factoren

De bespaarde broeikasgasemissies hangen af van drie bepalende factoren:

1. De bruto **opwek** van een nieuwe Zon-op-Dak PV installatie;
2. **Curtailment**: hoeveel uren worden nieuwe PV installaties afgeschakeld;
3. De **fossiele emissies** die worden voorkomen met de extra zonnestroom.

Factor 1 staat gelukkig vast. Maar factoren 2 en 3 verschillen van land tot land en van jaar tot jaar. De ontwikkeling van deze factoren voor de komende 10 jaar is ook onbekend. Bijvoorbeeld: in 2023 bleek dat sommige PV installaties tijdens 370 zonnige uren werden afgeschakeld. Hoeveel afschakeluren zijn er de komende jaren? Die prognoses kunnen sterk uiteenlopen.

In §2.1 - §2.3 worden deze factoren toegelicht en wordt een prognose gemaakt voor de komende tien jaar met een *minimale* en *maximale* inschatting.

Drie prognoses voor de Carbon Payback Time

In §2.4 worden deze 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.

Gezien de onzekerheden wordt in § 2.5 ook een prognose gemaakt met een andere rekenmethode: via de de 'Klimaat- en Energieverkenning' van het Planbureau voor de Leefomgeving KEV'22.

Focus op de komende 10 jaar

In de prognoses wordt maximaal 10 jaar vooruitgekeken omdat een Carbon Payback Time langer dan 10 jaar al erg lang is ten opzichte van de gemiddelde levensduur van een zonnepaneel. De levensduur van een zonnepaneel wordt bepaald door economische en technische factoren. Hoogwaardige zonnepanelen kunnen technisch gezien 25 jaar of langer meegaan, maar niet alle zonnepanelen zijn hoogwaardig en veel panelen worden om economische redenen al na 8-15 jaar vervangen.

³⁵ De analyse klopt niet voor de zonnepanelen die er al liggen.

³⁶ Via de SDE++ regeling en 'Zonneladders' wordt Zon-op-Land ontmoedigd.

Resultaat

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 A5:

Carbon Payback Time van PV installatie					
Geïnstalleerd 1-1-2024, in NL, op een plat dak					
	Aannames	CFP [kg CO ₂ /kWp]	Prognose 'Kort' [jaar]	Prognose 'Lang' [jaar]	PBL KEV'22 [jaar]
Best Case	Low-Carbon panelen, optimistische aannames	440	2,4	2,8	2,9
Modaal	Mainstream PV panelen, gemiddelde aannames	1350	11	>25	18
Worst Case	Mainstream PV panelen, voorzichtige aannames	1740	>25	>25	>25

Tabel A5: Carbon Payback Time van een PV installatie in Nederland volgens 3 verschillende prognoses.

Ofwel:

- *Best Case systeem*: **2 à 3 jaar CO₂ terugverdientijd; vertraagt klimaatopwarming.**
- *Modaal systeem*: Klimaatopwarming kan beperkt worden vertraagd of zelfs iets versneld.
- *Worst Case systeem*: Klimaatopwarming wordt versneld volgens alle drie prognoses.

Conclusie

Helaas is het marktaandeel van 'Best Case' installaties in Nederland in de orde van 1%. Tenminste 95% van de PV installaties in Nederland is gebouwd met mainstream zonnepanelen uit China. Die zonnepanelen en PV systemen vallen in de categorie 'Modaal' of 'Worst Case'.

Als partijen in 2024 weer *mainstream* zonnepanelen toepassen is de kans aanzienlijk dat deze nieuwe PV installaties klimaatopwarming eerder zullen versnellen dan vertragen.

Het is verstandig om vanaf nu alleen nog (ultra)low-carbon zonnepanelen in Nederland te installeren, en om ook bij andere ontwerp- en inkoopkeuzes rekening te houden met de carbon footprint.

NB. Het Duitse Fraunhofer Instituut heeft analyses gemaakt van de Energy Payback Time³⁷, en komt daarbij uit op een EPBT van 1 à 2 jaar. Vaak wordt deze EPBT verward met de Carbon Payback Time. Het probleem is dat de door Fraunhofer gebruikte aannames niet representatief zijn voor PV-systemen in Nederland (o.a. instraling, yield, curtailment).

³⁷ Zie p34-37 van Fraunhofer ISE, Photovoltaics-Report 2022:

<https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>

2.1 De Bruto Opwek van een PV installatie

Deze analyse wordt gemaakt voor het dominante type PV installatie: op een plat dak.

Oost-West opstellingen op plat dak: 850 vollasturen

In Nederland worden de meeste nieuwe PV installaties op platte daken 'Oost-West' georiënteerd, met een tilthoek van ongeveer 10 graden. De representatieve bruto opwek voor het midden van Nederland (regio Utrecht) is daarbij 850 kilowattuur per kWp per jaar³⁸ (ook wel genoemd: 850 vollasturen).

AC vermogen 50% van DC vermogen: van 850 naar 800 vollasturen

Volgens de nieuwe SDE++ regeling moet de omvormercapaciteit voor nieuwe PV projecten worden beperkt tot 50% van het vermogen van de zonnepanelen. Deze maatregel is genomen om de netcongestie te beperken. Daardoor zakt de opwek van 850 naar 800 kWh/kWp/jaar³⁹.

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 variatie en foutmarge is klein. Daarom wordt deze bruto opwek voor alle drie prognoses gebruikt. Voor alle scenario's geldt daarom: **800 vollasturen**, 1,5% degradatie in jaar 1, daarna 0,4% p jaar.

2.2 Curtailment: hoeveel vollasturen worden nieuwe PV installaties afgeschakeld?

Steeds vaker is er in Nederland een **stroomoverschot** tijdens zonnige uren. Dan moet een deel van de PV installaties worden afgeschakeld want de stroomopwek mag niet groter zijn dan de stroomvraag.

De omvormers van niet-residentiële PV installaties kunnen op afstand met een signaaltje worden uitgezet. Dit afschakelen gaat helemaal automatisch via software die is verbonden met de energiemarkten. Veel financiers van PV installaties eisen ook zo'n afschakelsysteem omdat de stroomprijzen steeds vaker negatief zijn. In dat geval moet je *betalen* als je stroom levert!

Bij bepaalde setpoints (negatieve prijsnivo's) is het voor de eigenaar van het PV systeem financieel aantrekkelijker om de panelen af te schakelen.

2.2.1 Extra zonnestroom gaat verloren tijdens 'afschakeluren'

Tijdens deze *afschakeluren* is er een stroomoverschot. Extra zonnestroom is op die momenten zinloos. Want stel je voor dat een extra PV systeem zou zijn geïnstalleerd. Dan zou dat systeem tijdens die afschakeluren óók worden afgeschakeld.

³⁸ Berekend met PVGIS https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/

³⁹ Berekend met Sunnydesignweb, de software van SMA voor het dimensioneren van omvormers.
<https://www.sunnydesignweb.com/sdweb/#/Home>

In het geval van extra zonnepanelen op woningen is vanwege de salderingsregeling voor die specifieke panelen geen *incentive* om af te schakelen. Maar deze extra stroom 'duwt' wel andere zonnepanelen van het net. Zakelijke PV installaties worden door die extra stroom extra afgeschakeld.

Het is voor deze analyse niet van belang welke zonnepanelen worden afgeschakeld. Het gaat er om dat extra zonnestroom zinloos is tijdens afschakeluren.

2.2.2 Hoeveel vollasturen worden gemist door het afschakelen?

Voor het berekenen van de CO₂ terugverdientijd van extra zonnepanelen moet het afschakelen worden verrekend met de jaarlijkse bruto opwek (800 vollasturen).

Het aantal vollasturen dat door afschakelen wordt gemist wordt bepaald door:

- Het aantal afschakeluren in 2023 (zie §2.2.4)
- De conversie van afschakeluren naar vollasturen (zie §2.2.5)
- Prognoses van het aantal afschakeluren voor de komende jaren (zie §2.2.6)

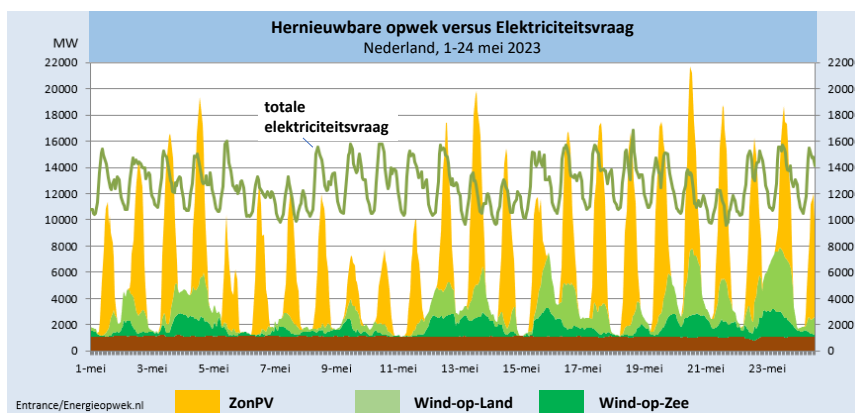
In de onderstaande paragrafen worden deze vragen uitgewerkt en wordt een prognose gemaakt. Maar eerst een toelichting over het hoe en waarom van het afschakelen.

2.2.3 Achtergrond: de elektriciteitsvraag en de groeiende opwek door Zon en Wind

De Nederlandse elektriciteitsvraag is al 18 jaar vrijwel constant 112 TWh per jaar ± 3% (bron: CBS). Gemiddeld is dit een vermogen van 13 GW per uur met een vast dagpatroon: een piek van 16-17 GW van 18 uur tot 21 uur en een dal van 8 GW van 01 uur tot 04 uur in de nacht.

Eind 2023 stond in Nederland een PV-vermogen opgesteld van 24 GW. Als het zonnig is rond het middaguur wekken deze PV installaties samen 12-16 GW op. Dus soms is de opwek van alleen onze zonnepanelen al hoger dan onze totale vraag! Op die momenten ontstaat er direct een stroomoverschot.

Daarnaast zijn er in Nederland ook veel windturbines; eind 2023 al 6,5 GW Wind-op-Land en 4,5 GW Wind-op-Zee⁴⁰. Als de zon schijnt en als het een beetje waait ontstaat er vaak een stroomoverschot. Het onderstaande plaatje toont dit voor mei 2023; de opwek van zon en wind samen (gele pieken) was die maand al 12 dagen een aantal uur hoger dan de vraag (de groene lijn).

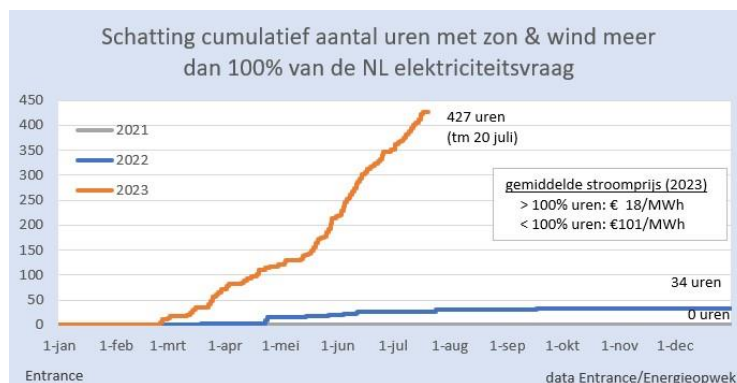


Figuur A1: Totale vraag vs opwek uit wind en zon, mei 2023. Bron: Entrance/Energieopwek.nl.

⁴⁰ Bron: CBS.nl

2.2.3.1 In 2023 al 700 uren met overproductie door wind en zon

Energie-expert Martien Visser deelt dagelijks een energiegrafiek via X/Twitter. In de onderstaande grafiek (Figuur A2) toonde hij dat er tot en met 20 juli al 427 uren met overproductie door wind en zon waren in 2023. Voor heel 2023 komt dit neer op circa 700 uur.



Figuur A2: Aantal uren stroomoverschot uit alleen hernieuwbaar.

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

2.2.3.2 Andere factoren: Must-Run en stroomexport

Daarnaast zijn er andere factoren die een belangrijke rol spelen bij Vraag en Aanbod. De belangrijkste twee factoren:

1. 'Must-run' stroomopwek door centrales die niet worden afgeschakeld.
2. Stroomexport naar het buitenland.

1. 'Must-Run' stroomopwek - verhoogt het stroomoverschot

Bij Must-Run stroomopwek is het onwenselijk of duur om af te schakelen:

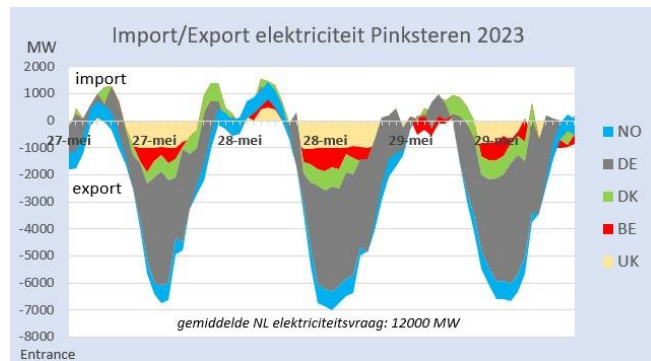
- afvalverbranding;
- verbranding van hoogovensgas;
- standby gascentrales - draaien op een laag pitje voor netbalancing.

Deze gascentrales zijn nodig als regelbaar vermogen: om het net stabiel te houden op een frequentie van 50 Hz en als backup. Ze kunnen zeer snel meer vermogen leveren als de wind wegvalt of als er onverwacht meer bewolking komt. Samen produceren deze centrales 1,5 à 2 GW. Dit kan worden gezien als een soort 'basisopwek' die niet wordt afgeschakeld. Door deze basisopwek stijgt in 2023 het aantal uren met een stroomoverschot naar meer dan 1.000 uur.

2. Stroomexport - verlaagt het stroomoverschot

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 A3 toont een voorbeeld van de stroomexport en -import tijdens het zonnige Pinksterweekend in 2023. Rond het middaguur werd met 6-7 GW steeds zeer veel stroom geëxporteerd - de helft van de binnenlandse vraag en de maximale capaciteit van onze internationale kabels. In de nacht was er een beetje import, vooral uit Noorwegen (uit waterkrachtcentrales).



Figuur A3: Export en import van elektriciteit door stroomoverschot, Pinksterweekend 2023
Bron: Martien Visser, data Entrance/ Energieopwek.nl.

Voor deze landen was import van Nederlandse stroom aantrekkelijk omdat de prijs 0 of zelfs negatief was. De stroomexport wordt bepaald door de stroombehoefte, de internationale stroomprijzen en het vermogen van de internationale kabels.

Het vermogen van onze stroomkabels naar buurlanden⁴¹:

- Noorwegen: 0,7 GW
- Denemarken: 0,7 GW
- UK: 1 GW
- België: 1,7 GW
- Duitsland: 4,2 GW.

2.2.4 In 2023 werd een deel van de PV installaties al 370 uren afgeschakeld

Steeds meer zakelijke PV installaties worden afgeschakeld als dat voordelig is.

Diverse bedrijven hebben hiervoor een *energie-management systeem* ontwikkeld. Bij bepaalde prijsnivo's op energiemarkten krijgen omvormers een uitschakelsignaal.

Dit gebeurt bij negatieve prijzen via twee markten:

- de EPEX day-ahead markt - in 2023 circa 270 uur (zie figuur A4b)
- de intraday-markt - in 2023 circa 370 uur (zie figuur A4a)

Het afschakelen van PV installaties via de *intraday*-markt groeit snel. Zoals te zien in figuur A4 kon je door curtailment van een PV installatie van 1 MW_p in 2023 via de *day-ahead* markt ruim €8.000 verdienen, maar via de intradaymarkt zelfs €18.000. De intradaymarkt was elk jaar lucratiever en het aantal afschakeluren was elk jaar ook groter dan op de day-ahead markt.

Alleen al het bedrijf Spectral.energy verzorgt curtailment voor meer dan 380 MW_p aan PV installaties⁴². Deze installaties worden grotendeels via de *intraday*-markt afgeschakeld.

⁴¹ Bron: <https://www.clo.nl/indicatoren/nl0595-interconnectiecapaciteit-elektriciteit>

⁴² <https://spectral.energy/product/stellar>.

Conclusie

In 2023 werd een deel van de PV installaties gedurende tenminste 370 uren afgeschakeld.



Figuur A4: Curtailment van PV installaties via de day-ahead markt en intraday markt.

a) Onbalansmarkt: afschakeluren en -waarde voor wind en PV installaties in 2021, 2022, 2023.

b) Day-aheadmarkt: afschakeluren en -waarde voor PV installaties, 2021, 2022, 2023.

Bron: Spectral.energy Webinar, te november 2023.

2.2.5 Conversie van afschakeluur naar vollastuur

Hoeveel vollasturen hebben de afgeschakelde PV installaties gemist door het afschakelen?

Negatieve stroomprijzen komen vaak voor op zonnige dagen rond het middaguur (zie figuur A5).

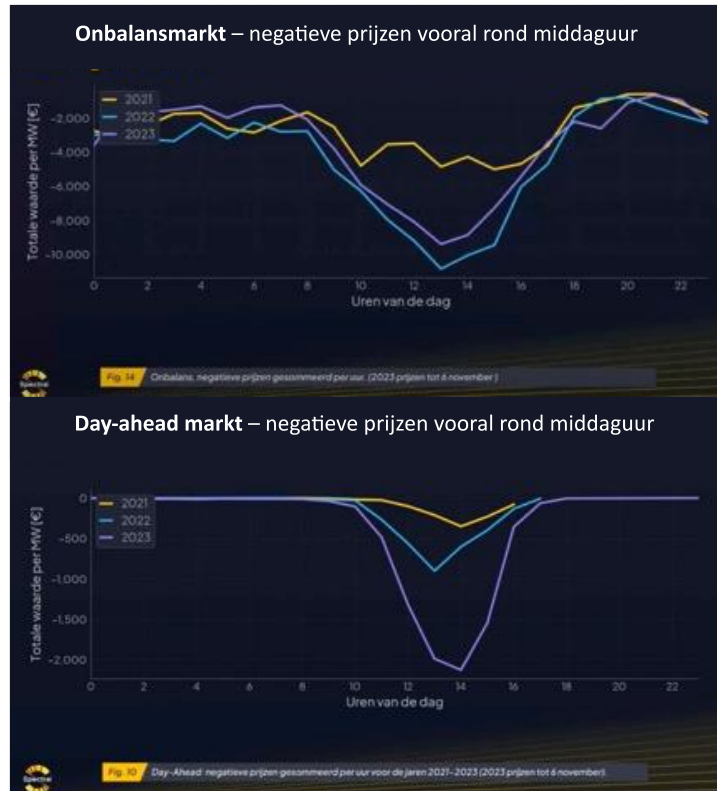
In theorie levert een PV installatie met een piekvermogen van 1 kW_p gedurende een uur met optimale omstandigheden precies 1 kWh, ofwel 1 vollastuur.

Maar in de praktijk komt dit zelden voor omdat de zon meestal geen optimale hoek van inval heeft of omdat de temperatuur te hoog is. En belangrijker, bij nieuwe PV installaties met SDE++ regeling geldt de eis dat het omvormervermogen maximaal 50% is van het piekvermogen van de zonnepanelen. Deze PV installaties kunnen daarom per uur maximaal 50% van een vollastuur leveren. Tijdens een klein deel van de afschakeluren was 50% opwek niet haalbaar.

Conclusie

Volgens onze (ruwe) analyse werd gemiddeld 48% van een vollastuur gemist tijdens de 370 afschakeluren in 2023. Dit betekent een gemis van $48\% \times 370 = 178$ vollasturen.

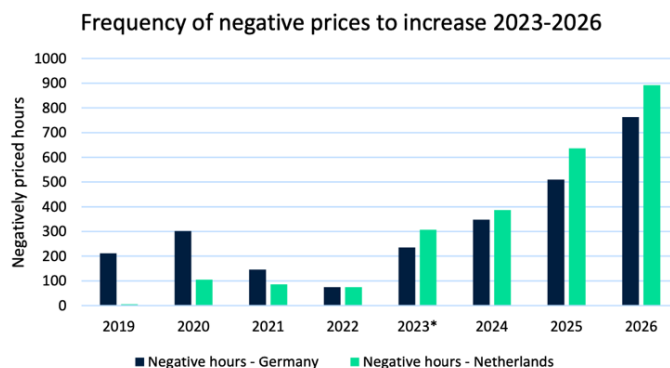
Netto leverden sommige zakelijke PV installatie in 2023 daarom slechts **622 vollasturen** (=800-178).



Figuur A5: Negatieve prijzen zijn zowel bij de day-ahead- als de onbalansmarkt geconcentreerd rond het middaguur. Bron: Spectral.energy, November 2023.

2.2.6 Prognoses van het aantal afschakeluren in de periode 2024-2023

Energie-onderzoeksburo ICIS Analytics voorziet een verdrievoudiging (zie figuur A6) van het aantal uren met negatieve energieprijzen op de day-ahead markt tot zelfs 900 uren in 2026.



Figuur A6: Prognose aantal uren met negatieve stroomprijzen op de Day-Ahead markt, NL en D. Bron: ICIS Analytics, 2023⁴³

⁴³ https://www.linkedin.com/posts/ellie-chambers1_german-and-dutch-negative-price-hours-to-activity-7092055361754423296-0sMO/

Prognose met minimum en maximum aantal afschakeluren

Het is lastig een prognose van het aantal PV-afschakeluren voor de komende tien jaar te maken omdat deze afhangt van vele factoren:

- Groei van onze *ZonPV capaciteit*.
- Groei van onze *Windopwek*.
- Groei van de totale *Nederlandse stroomvraag*.
- Groei van *Vraagsturing en Elektriciteitsopslag*.
- Ontwikkelingen in *Buurlanden*.

Politieke beslissingen en economische ontwikkelingen hebben een grote invloed op deze factoren:

- Gaat een nieuw kabinet ZonPV en Windopwek stimuleren of juist afremmen?
- Hoeveel gaat de stroomvraag groeien de komende 10 jaar? De stroomvraag is al 18 jaar gelijk aan 112 TWh per jaar. Maar in 2023 is de vraag met 5% gedaald⁴⁴ omdat een aantal energie-intensieve bedrijven zijn gestopt of failliet gegaan⁴⁵.
- Gaan meer energie-intensieve bedrijven Nederland verlaten?
- Zorgt nieuw politiek beleid voor een snelle groei van elektrische auto's en warmtepompen?
- Komt flexibilisering meer van de grond
- Komt er subsidie voor elektriciteitsopslag ?
- Wat is de impact van de snelle groei van zonnepanelen in Duitsland en België?

Vanwege de grote onzekerheden in deze factoren zijn er twee scenario's gemaakt voor het aantal afschakeluren: 'Prognose Kort' en 'Prognose Lang'.

Uitgangspunten voor Prognose Kort en Prognose Lang

De uitgangspunten:

- realistische, praktische haalbare maxima en minima;
- om een 'cirkelredenering' te voorkomen, wordt aangenomen dat er in Nederland géén extra zonnepanelen meer bijkomen na 1 januari 2024;
- weinig verschil in de prognoses voor 2024-2026, grotere verschillen vanaf 2027.

In de 'Toelichting bij Appendix A' worden de minimale en maximale prognose voor de verschillende factoren nader toegelicht. Het aantal PV-afschakeluren is op basis van die factoren ingeschat.

Uitkomsten: Prognose Kort en Prognose Lang

Aannames voor beide scenario's tot 2027

- De windopwek neemt fors toe door de bouw van reeds vergunde windparken/windturbines.
- Elektriciteitsvraag daalt (lagere vraag industrie, lichte daling andere sectoren).
- Voorzetting groei van vraagsturing, thuisbatterijen en netbatterijen.
- In Duitsland groeit ZonPV explosief verder: 15 GW erbij in zowel 2024 als 2025.

Hieruit volgt een snelle groei van het aantal PV-afschakeluren in 2024-2026, zoals ook ICIS Analytics voorspelt.

⁴⁴ Bron: CBS.nl

⁴⁵ Bijvoorbeeld: aluminiumsmelterij Aldel in Delfzijl en Zinksmelterij Nyrstar Budel.

Prognose Lang, vanaf 2027

Deze prognose gaat uit van een voortzetting van het ingezette energiebeleid in Nederland en Duitsland:

- Uitbouw Wind-op-Zee conform plannen Rutte IV (21 GW Wind-op-Zee per 2033)
- In Duitsland blijft de PV opwek stijgen conform plannen regering Scholz (+20 GW/jaar)

Daarnaast wordt in dit scenario aangenomen dat een aantal factoren tegenzit:

- De elektriciteitsvraag gaat na verdere daling tot en met 2027 weer geleidelijk groeien en komt in 2031 weer uit op de vraag van het jaar 2019
- Er komen weinig netbatterijen bij - vanwege netcongestie en de matige business case.
- De impact van vraagsturing is klein, consumenten en bedrijven verschuiven maar een heel klein deel van het elektriciteitsverbruik.
- Autofabrikanten maken 'vehicle-to-grid' onmogelijk of onaantrekkelijk.
- De productie van groene waterstof blijft zeer klein vanwege hoge kosten.

Bij deze prognose stijgt het aantal afschakelingen nog verder.

Prognose Kort, vanaf 2027

Deze prognose gaat uit van een gewijzigde politieke koers in Nederland en Duitsland:

- Vanaf 2027 komen er geen windturbines meer bij in Nederland, niet op land en niet op zee
- Door verlaagde elektriciteitsbelastingen groeit de elektriciteitsvraag bij bedrijven en industrie
- In Duitsland valt het aantal nieuwe PV installaties terug naar 1-3 GW per jaar

Ook wordt in dit scenario aangenomen dat er een aantal meevallers zijn:

- Het aantal netbatterijen, thuisbatterijen en bedrijfsbatterijen stijgt door sterke prijsdalingen.
- De meeste autofabrikanten gaan maken 'vehicle-to-grid' mogelijk.

Onder deze aannamen gaat het aantal afschakelingen vanaf 2029 weer dalen.

Conclusie

De prognoses 'Kort' en 'Lang' zijn uitersten. De werkelijkheid ligt er waarschijnlijk tussenin.

Tabel A6 toont het aantal afschakelingen op basis van de genoemde aannames.

PV-afschakelingen	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
Prognose 'Lang'	370	550	700	800	900	1000	1025	1050	1075	1100	1100
Prognose 'Kort'	370	450	600	700	800	850	800	750	700	650	625

Tabel A6: Prognoses ontwikkeling van het aantal PV-afschakelingen per jaar

2.3 Hoeveel emissies worden vermeden met extra zonnestroom

In 2023 Nederland wekten gascentrales nog ongeveer 50% van de elektriciteitsvraag op. Ze zijn snel regelbaar – afhankelijk van de opwek uit wind en zon leveren ze snel meer of minder elektriciteit.

In een ideale situatie bespaart elke kilowattuur zonnestroom de broeikasgasemissies van één kWh uit een gascentrale⁴⁶. De broeikasgasemissie van een Nederlandse gascentrale is circa 380 gCO₂/kWh.

In werkelijkheid is emissiebesparing lager. Dit komt omdat de verdrongen opwek niet alleen van gascentrales komt maar ook deels van schone opwek⁴⁷. De komende jaren worden de emissies van onze energiemix steeds lager. Het doel (Nationaal EnergiePlan) 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 (zie §2.1.2.3).

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

- gascentrales
- biomassacentrales
- batterijen (netgekoppelde batterijen, in de toekomst mogelijk elektrische auto's)
- stroomimport (waterkracht uit Noorwegen, kernenergie uit Frankrijk, wind/zon uit Duitsland)

Emissies residual mix in 2023

Kijkend naar de uren waarin zonnepanelen voldoende daglicht kregen om stroom op te wekken, waren in 2023 de gascentrales nog dominant in de residual supply mix⁴⁸. Vaak gaven gascentrales de laatst benodigde opwek, de marginale opwek. Zonnestroom voorkwam daardoor meestal uitstoot van een gascentrale. Beide prognoses gaan daarom uit van 380 g CO₂/kWh in 2023.

Emissies residual mix in 2035

Volgens het 'Nationaal EnergiePlan' is opgenomen dat de Nederlandse elektriciteitsopwek per 2035 emissievrij moet zijn. Dit kan worden bereikt door een mix van maatregelen:

- Extra windturbines op land en op zee
- Carbon Capture & Storage (CCS) infrastructuur op gascentrales
- Grootschalige elektrische opslag
- Nieuwe kerncentrales (grote centrales en/of SMR's)
- Extra kabels naar bijvoorbeeld Noorwegen, Engeland, België

De gascentrales worden hierbij geleidelijk uitgefaseerd, al blijft een aantal centrales mogelijk nog emissievrij in bedrijf, via groen gas of een CCS installatie.

⁴⁶ Kolencentrales zijn niet snel regelbaar worden waarschijnlijk in 2025 gesloten, daarom niet relevant voor deze analyse.

⁴⁷ 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.

⁴⁸ Gegevens via Energieopwek.nl. Helaas vonden wij geen analyse van de emissies van de residual supply in Nederland.

Belangrijk punt: elk van de genoemde maatregelen voor net-zero elektriciteit brengt CO₂ emissies met zich mee tijdens de bouwfase. Deze emissies worden verrekend via de opgewekte stroom. De *carbon intensity* varieert voor de genoemde maatregelen van 6 tot ca. 50 g CO₂ per kWh.

Voor Prognose 'Lang' wordt aangenomen dat de elektriciteitsopwek in 2035 in Nederland emissievrij is. De emissies van de maatregelen worden meegenomen in de meest prudente manier door de BKG-emissies van de residual mix vanaf 2035 niet gelijk te stellen aan 50 gram CO_{2-eq} per kWh.

Voor Prognose 'Kort' duurt de transitie naar emissievrije elektriciteit 5 jaar langer: tot 2040. De 'residual mix' heeft in dit scenario in 2035 nog een uitstoot van 150 gram CO_{2-eq} per kWh.

Conclusie

Onderstaande tabel toont de prognose van de bespaarde broeikasgasemissies in gram CO_{2-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
<i>Prognose Kort</i>	380	361	342	323	303	284	265	246	227	208	188	169	150
<i>Prognose Lang</i>	380	353	325	298	270	243	215	188	160	133	105	78	50

Tabel A7: Prognose broeikasgasemissies van de *residual mix* bij daglicht, volgens de twee scenario's

2.4 De Carbon Payback Time volgens Prognoses 'Kort' en 'Lang'

Methode

De jaarlijks vermeden broeikasgasemissies worden berekend via:

- o De bruto opwek: 800 vollasturen, 1,5% degradatie in jaar 1 en daarna 0,5% per jaar (§2.1)
- o Het aantal afschakeluren per jaar volgens Prognose Kort of Prognose Lang (§2.2, tabel A6)
- o De conversie van afschakeluren naar vollasturen
- o De BKG-emissies van de 'residual mix' volgens Prognose Kort of Prognose Lang (§2.3, tabel A7)

Deze jaarlijks bespaarde emissies worden gesaldeerd met de Carbon Footprint van het PV systeem volgens de drie cases: *best case*, *modaal*, *worst case*.

2.4.1 Carbon Payback Time volgens Prognose 'Kort'

Jaarlijks vermeden broeikasgasemissies

Tabel A8 toont de jaarlijks bespaarde BKG emissies volgens de aannames van Prognose Kort:

Prognose 'Kort'		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	800	788	784	780	776	772	768	765	761	757	753
Prognose aantal PV-afschakeluren	uur	370	450	600	700	800	850	800	750	700	650	625
Conversie afschakeluur -> gemist vollastuur	%		45%	44%	43%	42%	41%	42%	42%	42%	43%	44%
Gemiste vollasturen	kWh		-203	-264	-301	-336	-349	-336	-315	-294	-280	-275
Netto geleverde vollasturen	kWh		586	520	479	440	424	432	450	467	478	478
Bespaarde uitstoot per netto geleverde kWh	kg CO2		0,361	0,342	0,323	0,303	0,284	0,265	0,246	0,227	0,208	0,188
Bespaarde BKG emissies	kg CO2		-211	-178	-155	-134	-120	-115	-111	-106	-99	-90

Tabel A8: Jaarlijkse besparing broeikasgassen in kg CO₂ per kilowattpiek van een extra PV systeem volgens Prognose Kort

CO₂ terugverdiendtijd volgens Prognose 'Kort'

Tabel A9 toont het jaarlijkse emissiesaldo per case. De berekening start met de Carbon Footprint die jaarlijks wordt verminderd met de vermeden emissies. De Carbon Footprint is terugverdiend zodra het emissiesaldo negatief is (aangeduid met negatieve, groene cijfers).

Emissie-saldo [kg CO ₂ /kWp]	CFP	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
Bespaarde BKG emissies			-211	-178	-155	-134	-120	-115	-111	-106	-99	-90
Best Case PV Systeem	440	440	229	51	-103	-237	-357	-472	-583	-688	-788	-878
Modaal PV Systeem	1350	1350	1139	961	807	673	553	438	327	222	122	32
Worst Case PV Systeem	1740	1740	1529	1351	1197	1063	943	828	717	612	512	422

Tabel A9: Emissiesaldo van 1 kWp PV systeem volgens Prognose Kort voor Carbon Footprints Best Case, Modaal en Worst Case .

Tabel A10 toont de Carbon Payback Time volgens Prognose Kort voor de drie cases:

Carbon Footprint van PV systeem	Carbon Payback Time
Best Case	2,4 jaar
Modaal	11 jaar
Worst Case	>25 jaar

Tabel A10: Carbon Payback Time per type systeem volgens Prognose Kort

2.4.2 Carbon Payback Time volgens Prognose 'Lang'

Jaarlijks vermeden broeikasgasemissies

Tabel A11 toont de jaarlijks bespaarde BKG emissies volgens de aannames van Prognose 'Lang'.

Prognose 'Lang'		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	800	788	784	780	776	772	768	765	761	757	753
Prognose aantal PV-afschakeluren	uur	370	550	700	800	900	1000	1025	1050	1075	1100	1100
Conversie afschakeluur -> gemist vollastuur	%		45%	44%	42%	41%	40%	39%	38%	37%	36%	35%
Gemiste vollasturen	kWh		-248	-308	-336	-369	-400	-400	-399	-398	-396	-385
Netto geleverde vollasturen	kWh		541	476	444	407	372	369	366	363	361	368
Bespaarde uitstoot per netto geleverde kWh	kg CO2		0,353	0,325	0,298	0,270	0,243	0,215	0,188	0,160	0,133	0,105
Bespaarde BKG emissies	kg CO2		-191	-155	-132	-110	-90	-79	-69	-58	-48	-39

Tabel A11: Jaarlijkse besparing broeikasgassen in kg CO₂ per kilowattpiek van een extra PV systeem volgens Prognose Lang

CO₂ terugverdientijd volgens Prognose Lang

Tabel A12 toont het emissiesaldo. De Carbon Footprint is terugverdiend zodra het emissiesaldo negatief is (aangeduid met negatieve, groene cijfers).

Emissie-saldo Prognose Lang [kg CO ₂ /kWp]	CFP	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
Bespaarde BKG emissies			-191	-155	-132	-110	-90	-79	-69	-58	-48	-39
Best Case	440	440	249	95	-37	-147	-238	-317	-385	-444	-491	-530
Modaal	1350	1350	1159	1005	873	763	672	593	525	466	419	380
Worst Case	1740	1740	1549	1395	1263	1153	1062	983	915	856	809	770

Tabel A12: Emissiesaldo van 1 kWp PV systeem volgens Prognose Lang voor Carbon Footprint Best Case, Modaal en Worst Case.

Tabel A13 toont de Carbon Payback Time volgens Prognose 'Lang' voor de drie cases:

Carbon Footprint van PV systeem	Carbon Payback Time
Best Case	2,8 jaar
Modaal	>25 jaar
Worst Case	>25 jaar

Tabel A13: 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 komt in de KEV'22 prognoses van Wind-op-Zee. Maar ook de hoeveelheid ZonPV groeit een beetje in de prognoses. Daardoor kan je niet zuiver berekenen wat de impact is van een PV systeem dat in 2024 wordt geplaatst - immers de verdere verlaging van broeikasgasemissies in het model wordt 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 uit gaat dat de zonPV capaciteit⁴⁹ 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 A14.

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:

⁴⁹ 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	800	788	784	780	776	772	768	765	761	757	753
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	165	149	134	120	105	91	76	69	64	58	
Bespaarde BKG emissies / kWp / jr	kg CO2	-165	-149	-134	-120	-105	-91	-76	-69	-64	-58	

Tabel A14: Bespaarde emissies van 1 kWp zonnepanelen volgens de KEV'22.

CO₂ terugverdientijd volgens Prognose KEV'22

Tabel A15 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	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
Bespaarde BKG emissies			-165	-149	-134	-120	-105	-91	-76	-69	-64	-58
Best Case PV Systeem	440	440	275	126	-9	-128	-233	-324	-400	-469	-533	-591
Modaal PV Systeem	1350	1350	1185	1036	901	782	677	586	510	441	377	319
Worst Case PV Systeem	1740	1740	1575	1426	1291	1172	1067	976	900	831	767	709

Tabel A15: Emissiesaldo van Prognose KEV'22 voor Best Case, Modaal en Worst Case.

Tabel A16 toont de Carbon Payback Time volgens Prognose KEV'22 voor de drie cases:

Carbon Footprint van PV systeem	Carbon Payback Time
Best Case	2,9 jaar
Modaal	18 jaar
Worst Case	>30 jaar

Tabel A16: Carbon Payback Time, per type systeem volgens de KEV'22 prognoses.

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

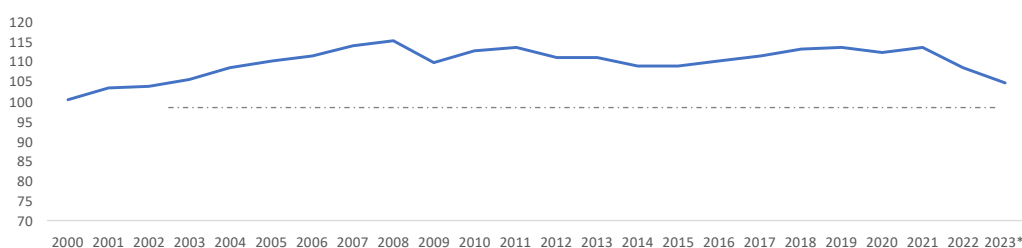
TOELICHTING BIJ APPENDIX A

T1 - Groei van de Nederlandse elektriciteitsvraag

Er zijn veel scenario's voor de groei van de elektriciteitsvraag in Nederland de komende 10 jaar. Veel hangt af van regeringsbeleid. Hieronder wordt een realistische bandbreedte ingeschat.

Afgelopen 18 jaar: geen groei

Het is verrassend maar sinds 2005 is ons totale elektriciteitsverbruik ruwweg gelijk gebleven op 112 TWh (Terawattuur), met schommelingen van ± 3 TWh. In 2023 is de elektriciteitsvraag echter met **5% gekrompen** ten opzichte van 2021, naar 105 TWh, het verbruik dat Nederland ook had in 2003.



Figuur T1: Netto elektriciteitsverbruik Nederland in TWh (miljoen kWh). 2023 nog een voorlopig cijfer.
Netto e-verbruik = opwek + invoer - uitvoer - distributieverliezen. Bron: CBS.

In de periode 2005-2023 is de bevolking met ongeveer 10% gegroeid en kwamen er in onze huishoudens vele elektrische apparaten bij. Ook kwamen er een half miljoen elektrische auto's op de weg en een vergelijkbaar aantal warmtepompen in onze woningen.

Desondanks blijkt deze extra vraag te zijn gecompenseerd door hogere efficiëntie: LED lampen, zuiniger witgoed, zuinigere televisies, zuinigere elektromotoren in de industrie, automatisch uitschakelen, enzovoorts. Ook is een deel van onze energieintensieve productie verplaatst naar het buitenland⁵⁰.

Hieronder wordt gekeken naar de ontwikkelingen bij huishoudens, het bedrijfsleven en groene waterstof. Tenslotte wordt een bandbreedte gemaakt voor de groei van de elektriciteitsvraag.

Komende 10 jaar: elektriciteitsverbruik bij huishoudens (incl auto's) groeit niet veel

Elektrische auto's

Voor elke 1 miljoen elektrische auto's die er bij komen stijgt het totale elektriciteitsverbruik met 2 TWh. Dat is slechts 1,8% van het huidige elektrische verbruik.

Aannames

- Gemiddelde rij-afstand 12.000 km per jaar.
- Gemiddeld verbruik 6 km per kWh.

⁵⁰ Bijvoorbeeld in 2022/2023: Aldel, Nyrstar, Yara, OCI hebben productie in Nederland gestopt of beperkt.

Warmtepompen

Voor elke 1 miljoen full-electric warmtepompen die worden geïnstalleerd in bestaande woningen stijgt het totale elektriciteitsverbruik met 3 TWh. Dit is 3% van het huidige elektrische verbruik.

Aannames

- Gemiddeld huishouden verbruikt 1200 m³ gas per jaar (bron: CBS).
- 1 m³ aardgas wordt omgezet in 10 kWh warmte.
- sCOP van de gemiddelde warmtepomp in gemiddelde woning is 4.0.

De groeisnelheid van warmtepompen en elektrische auto's

Het is onzeker hoeveel elektrische auto's en hoeveel warmtepompen er de komende 10 jaar bijkomen. Er waren forse subsidies nodig om tot de huidige ~ 400.000 volledig elektrische auto's (Battery Electric Vehicles - BEV) te komen. De afgelopen 3 jaar werden er jaarlijks 70.000-80.000 gekocht.

De sector vreest dat de verkoop vanaf 2024 gaat inzakken - immers elektrische auto's zijn nog steeds een stuk duurder terwijl subsidies en fiscale voordelen worden afgebouwd. Ook zijn de elektriciteitsprijzen hard gestegen. De groei van het aantal elektrische auto's zal vooral afhangen van nieuwe regeringsbeleid, netcongestie en de ontwikkeling van de gas- en olieprijs.

De groei van het aantal warmtepompen is ook onzeker. In 2022 steeg het aantal jaarlijkse installaties naar ca. 100.000 per jaar, maar na een aanvankelijke stijging in 2023 zakte de verkoop in. Ook hier zal de groei afhangen van de hoogte van subsidies, het oplossen van netcongestie en de beschikbaarheid van personeel en componenten.

Conclusie: groei elektriciteitsverbruik huishoudens

Aanname -de bevolkingsgroei en verbruik door extra apparaten (airco's) wordt gecompenseerd door de hogere efficiëntie van apparaten.

Inschattingen voor de komende 10 jaar:

- Warmtepompen: 1 -2 miljoen erbij (3 - 6 TWh)
- Elektrische auto's: 0,5 - 2 Mln erbij (1 - 4 TWh)
- **Totaal extra verbruik door huishoudens: 4 tot 10 TWh over 10 jaar.**

Groei in elektriciteitsverbruik door industrie en bedrijfsleven

De vraaggroei bij bedrijven en industrie is onzeker. Aan de ene kant is er veel ambitie bij bedrijven en samenleving om te elektrificeren: het wagenpark en de verwarming elektrificeren, en productieprocessen zoals ovens aanpassen: elektrisch verwarmen in plaats van met aardgas.

Aan de andere kant zijn er hindernissen en krimpfactoren:

- Netcongestie en wachtlijsten voor het vergroten van de netaansluiting.
- Investerings voor elektrificering en onzekere vooruitzichten.
- Hogere efficiëntie.
- Verplaatsing van productie naar het buitenland.

Nederland heeft een grote industriële basis met veel energie-intensieve bedrijven dankzij het goedkope aardgas uit Groningen. Dat werd een tijd vervangen door goedkoop aardgas uit Rusland.

Hierdoor kon de petrochemische industrie, kunststofproductie, aluminiumproductie, kunstmestproductie goed gedijen. En dankzij goedkoop aardgas was er ook goedkope elektriciteit.

Maar door de inval van Rusland in Oekraïne, en door het sluiten van het Groningenveld is het tijdperk van goedkoop aardgas in Nederland voorbij. Aardgas wordt grotendeels per LNG tanker ingevoerd en daardoor is de gasprijs structureel hoger dan in de VS en andere gasrijke landen.

De gasprijs is ook bepalend voor de elektriciteitsprijs in Nederland. De kosten voor netbeheer zijn in Nederland aanzienlijk hoger dan in andere landen. Ook de belastingen zijn hoger. Daarbovenop komen de CO₂ heffingen via het ETS en de nationale 'floor' van de CO₂ prijs. Door dit alles is elektriciteit hier vele malen duurder dan in de VS, China en veel EU landen.

Nieuwe energie-intensieve bedrijven zullen zich niet vestigen in Nederland. Het is de vraag of de huidige energie-intensieve bedrijven in Nederland blijven en hier gaan investeren in het vergroenen en elektrificeren van hun productie, ondanks de relatief hoge elektriciteitsprijzen, of verplaatsen zij hun productie naar landen met lagere prijzen en lagere belastingen voor elektriciteit en gas.

Groene waterstof

Bij het omzetten van elektriciteit of aardgas in waterstof gaat veel energie verloren. Tijdens het koelen, comprimeren en opslaan gaat eveneens veel energie verloren. Volgens de 'waterstofladder' is de meest waarschijnlijke toepassing van groene waterstof de chemische industrie. Want daar wordt (grijze) waterstof al in grote hoeveelheden gebruikt.

Productie van 'groen staal' in Nederland is misschien een optie als het lukt om waterstof tegen een concurrerende prijs te produceren of te importeren. Volgens de waterstofladder van waterstofguru M.Liebreich zijn er voor veel andere toepassingen als transport, verwarming, seizoensopslag goedkopere emissievrije alternatieven (batterijen, e-fuels, biogas).

Vóór de Russische inval in Oekraïne was de Nederlandse regering van plan om voor 2035 grote hoeveelheden (5 tot 10 GW) groene waterstof te produceren, op basis van electrolyzers gevoed door windturbines op zee. Technisch is dit een uitdaging omdat de grootste electrolyzers ter wereld een paar jaar geleden nog een capaciteit hadden van 1 MW - een factor 1.000 opschaling nodig in 10 jaar tijd. Die opschaling is wel begonnen: Shell gaat als pilotproject een serie electrolyzers bouwen met een capaciteit van 200 MW. RWE is van plan electrolyzers ter grootte van 600 MW te bouwen als onderdeel van hun bod op windpark Hollandse Kust West II. Dit project is mogelijk gereed in 2030.

De commerciële vooruitzichten voor groene waterstof uit Nederland zijn minder gunstig dan een paar jaar geleden. In April 2021 onderzocht TNO⁵¹ prognoses voor de kostenontwikkeling van blauwe waterstof (op basis van aardgas via steam methane reforming + carbon capture and storage) en groene waterstof (op basis van stroom van wind op zee). Hieruit bleek dat groene waterstof nog minstens 10 jaar duurder zou zijn dan blauwe waterstof.

⁵¹ TNO, April 2021: *Ontwikkeling productiekosten klimaatvriendelijke waterstof*, R.J. Detz et al, P10332

Sinds 2021 zijn de kosten van groene waterstof hard gestegen: materiaalkosten en personeelskosten voor de bouw en installatie van de electrolyzers, maar ook de kosten van Wind-op-Zee projecten. Daarnaast is de rente hard gestegen. Hierdoor duurt het mogelijk nog veel langer voor groene waterstof uit Nederland kan concurreren.

Bedrijven kunnen ook inzetten op emissie-vrije alternatieven (geïmporteerde waterstof, blauwe waterstof, e-fuels, biogas, kleine kernreactoren (SMR's) en andere technologieën).

Door gebrek aan een business case voor het grootschalig produceren van groene waterstof in Nederland, en de benodigde doorlooptijd als het op een zeker moment toch haalbaar wordt, wordt in deze analyse aangenomen dat groene waterstof de komende 10 jaar niet op substantiële schaal (meer dan 1 TWh/jaar) in Nederland wordt geproduceerd.

Bandbreedte van de groei van het elektriciteitsverbruik

Politieke keuzes hebben een grote invloed op het elektriciteitsverbruik de komende 10 jaar.

Als er na de verkiezingen van 22 november 2023 een centrumlinkse regering wordt gevormd die verder gaat met het ingezette energiebeleid en die subsidies voor warmtepompen en elektrische auto's weer verhoogd, dan kan het verbruik van huishoudens (inclusief elektrische auto's) groeien met 10 TWh de komende 10 jaar. Als echter de 'fossiele subsidies' worden afgebouwd door de energiebelastingen voor bedrijven verder te verhogen dan leidt dit tot een lagere elektriciteitsvraag bij bedrijven.

Als er een centrum-rechtse regering komt die minder geld reserveert voor verduurzaming en energietransitie, dan komt er waarschijnlijk een lagere groei van de elektriciteitsvraag bij huishoudens. Maar zo'n kabinet zou de elektriciteitsbelastingen verlagen en dat zorgt voor een groeiende vraag bij bedrijven.

De conclusie is dat beide politieke uitkomsten waarschijnlijk leiden tot een beperkte groei van de elektriciteitsvraag. Ook door tal van praktische problemen (netcongestie, industriële krimp, hoge energieprijzen en -belastingen) is het lastig om de elektriciteitsvraag in Nederland snel te laten groeien.

Conclusie

Met 105TWh bleek de vraag in 2023 flink gekrompen tov 2021 (114 TWh). Deze krimp zet waarschijnlijk nog door in 2025 en 2026, tot een vraag van ca 100TWh. Vanaf 2027 kan er weer lichtere of sterkere groei komen.

Maximaal (Prognose Kort) verwachten we vanaf 2027 - 2033 een groei die leidt tot een vraag van 125 TWh in 2033. Dit komt neer op maximaal 1% groei per jaar over de periode 2024-2033.

Minimaal (Prognose Lang) verwachten we vanaf 2027 - 2033 een groei die leidt tot een vraag van 112 TWh in 2033, ofwel gemiddeld 0,4% groei per jaar over de periode 2024-2033.

T2 De impact van Vraagverschuiving en Elektriciteitsopslag

Voor het inpassen van een hoog percentage aan weersafhankelijke opwek moet het elektriciteits-systeem flexibeler worden gemaakt. Overschotten van schone elektriciteit kunnen met behulp van dikkere kabels naar andere regio's en landen worden verplaatst.

Daarnaast worden nog twee hulpmiddelen ingezet:

- **Vraagverschuiving.** Bijvoorbeeld de wasmachine aanzetten en de elektrische auto opladen als de zon schijnt of als het waait. Hierdoor wordt de vraag verschoven naar momenten dat er een stroomoverschot is. Op die momenten is de stroomprijs ook laag. Via een *dynamisch contract* kunnen stroomgebruikers profiteren van deze uren met lage stroomprijzen. Het stroomoverschot wordt zo verlaagd en daarmee het aantal uren met een negatieve prijs.
- **Electriciteitsopslag.** Batterijen die aan het net zijn gekoppeld kunnen ook op twee manieren helpen. Ze verhogen de vraag bij een stroomoverschot waardoor het aantal uren met negatieve prijzen kan worden verlaagd. Bovendien kunnen ze de schone stroom weer leveren als de prijs hoog is - in de praktijk tijdens de pieken in de vraag. Zo wordt de inzet van gascentrales verminderd.

Er zijn verschillende verwachtingen over groei van vraagverschuiving en elektriciteitsopslag de komende 10 jaar. De bandbreedte van die inschattingen wordt hier samengevat.

Vraagverschuiving

Met een dynamisch contract varieert de prijs per kilowattuur op uurbasis. Deze wordt bepaald via de *EPEX day-ahead* markt. Elke dag om 13 uur worden de uurprijzen bekend gemaakt voor de volgende dag. Een consument ziet de uurprijzen op een App op de telefoon en besluit wanneer de wasmachine moet worden aangezet of wanneer de elektrische auto moet worden opladen. Meestal midden in de nacht of rond het middaguur. De warmtepomp kan dan ook boiler vat vullen en in goed geïsoleerde woningen kan de warmtepomp extra verwarmen.

Sommige bedrijven en publieke organisaties hebben grote stroomverbruikers die maar een paar uur per dag aanhoeven en die kunnen worden verschoven in de tijd. Bijvoorbeeld de pompen van een waterschap. Over 10 jaar gebeurt dit waarschijnlijk grotendeels automatisch - bijvoorbeeld via warmtepompen die via internet de prijzen van de EPEX beurs krijgen.

Welk deel van het verbruik wordt verschoven

Op dit moment hebben 225.000 huishoudens (ca 3%) een dynamisch contract en ca 25.000 bedrijven en andere organisaties (ca 1,7% van alle aansluitingen)⁵². Deze vertegenwoordigen samen ongeveer 2% van alle aansluitingen.

Voor het jaar 2033 wordt ingeschat dat minimaal 10% en maximaal 20% van alle aansluitingen een dynamisch contract heeft en daar actief gebruik van maakt. Er is geen onderzoek gevonden welk deel van het verbruik wordt verschoven. Dit wordt ingeschat op minimaal 5% en maximaal 10% van het jaarlijkse verbruik als *gemiddelde* voor zowel consumenten als bedrijven.

⁵² Bron: ACM.

Op basis van bovenstaande inschattingen wordt in 2033 minimaal 0,5% en maximaal 2% van het verbruik verschoven. Dit wordt verdeeld over het dal in de middag en het dal in de nacht.

Prognoses

Het gemiddelde verbruik in Nederland is 330 GWh per dag. De vraagverschuiving gaat deels naar het dal in de nacht en deels het dal in de middag. Hieruit volgt dat er in 2033 elke dag tijdens de zonnige uren minimaal 1 GWh en maximaal 3,5 GWh aan elektriciteitsvraag blijkt.

Extra elektriciteitsvraag rond het middaguur door vraagverschuiving via dynamische contracten												
GWh	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	
<i>Minimaal (prognose Lang)</i>	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1	
<i>Maximaal (prognose Kort)</i>	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0	1,2	1,5	1,8	2,3	2,8	3,5	

Tabel T1: Prognose extra elektriciteitsvraag per dag rond het middaguur door vraagverschuiving.

Elektriciteitsopslag

Batterijparken

In Nederland zijn de afgelopen jaren enkele 'batterijparken' geïnstalleerd met een capaciteit van 20 tot 50 MWh, bijvoorbeeld in Lelystad. Deze 'batterijen' bestaan meestal uit een zeecontainer vol met lithium *battery packs*. In een zeecontainer (40 voet) past typisch een capaciteit van 4 MWh bij een vermogen van 2 MW.

Het bedrijf Gigastorage is van plan om in de failliete Aldel fabriek in Delfzijl, dat over een hoogspanningsaansluiting met een vermogen van 300 MW beschikte, gefaseerd batterijen te plaatsen met een uiteindelijke capaciteit van 600 - 900 MWh.

Tegelijkertijd is het onzeker of deze en andere batterijparken worden gerealiseerd:

- *Geen goede business case.* Volgens Maarten van den Heuvel, voorzitter Energy storage NL, kan de business case van veel energie-opslag projecten niet uit⁵³. De batterijen en bijbehorende componenten vergen een hoge investering. Daarnaast zorgen stroomtransporttarieven (onderdeel netbeheerskosten) voor forse operationele kosten. Daarnaast zijn de toekomstige prijsverschillen tussen inkoop (laden) en verkoop (ontladen) onzeker waardoor ook de terugverdientijd lang en onzeker is. Bovendien is er een risico op kannibalisatie: hoe meer batterijen er komen des te lager de inkomsten per batterij.
- *Carbon footprint.* Er komen ook meer vragen over de carbon footprint van de batterijen. Hoe lang duurt het om deze terug te verdienen. Zijn er ook low-carbon varianten?
- *Netcongestie.* Ook voor het aansluiten van batterijen zijn er wachtlijsten.

Eind 2023 stond in Nederland 150 MWh aan grote netgekoppelde batterijen opgesteld⁵⁴. Door de slechte business case en netcongestie gaat dit vermogen de komende paar jaar waarschijnlijk nauwelijks groeien. Bij bepaalde politieke keuzes kan dit vermogen wel flink gaan groeien vanaf 2027.

Het totaal aan netgekoppelde batterijen per 2033 wordt ingeschat op minimaal 0,5 GWh en maximaal 3 GWh.

⁵³ <https://www.solar365.nl/nieuws/energieopslag-is-onmisbaar-handel-daar-dan-ook-naar-65ACB4B3.html>

⁵⁴ Bron: Entrance/Martien Visser, grafiek via Twitter op 22 januari 2024.

Thuisbatterijen

Pas als de salderingsregeling flink is afgebouwd en de prijs van thuisbatterijen is gedaald komt er een business case voor thuisbatterijen. Dit is waarschijnlijk het geval in de periode 2028 tot 2030. Tot die tijd blijft de hoeveelheid thuisbatterijen verwaarloosbaar. Vanaf 2029 kan de capaciteit via thuisbatterijen wel flink groeien, en tot en met 2033 oplopen tot minimaal 1 en maximaal 3 GWh onder de volgende aannamen:

- Gemiddelde opslagcapaciteit thuisbatterij: 5 kWh
- Aantal huishoudens met zonnepanelen in 2033: 3 Mln (in 2023: 2,4 Mln)⁵⁵
Percentage huishoudens met een thuisbatterij per 2033: minimaal 6,6%, maximaal 20%.

Vehicle-to-grid (bidirectioneel laden)

Het kan financieel interessant zijn om stroom te verhandelen met de batterij van de eigen elektrische auto. Als de prijs laag is wordt elektriciteit opgeslagen en bij een hoge prijs weer aan het net geleverd. Via een dynamisch stroomcontract is dit mogelijk. Dit kan 2 keer per dag geld opleveren.

Het opladen bij lage prijzen gebeurt al. Het probleem is alleen dat het terugleveren (*vehicle-to-grid*) wordt geblokkeerd. Fabrikanten geven garanties op de batterij waarbij rekening is gehouden met normaal rijgedrag. Daarbij worden de accu's 1 of 2 keer per week deels opgeladen. Maar als ze worden inzet om te handelen worden ze 2 keer per dag geladen en ontladen - dat betekent 10 keer zoveel laad- en ontladcycli. De levensduur van de batterij gaat dan sneller achteruit. Daarom zijn fabrikanten huiverig om dit toe te staan. Nu is 'bidirectioneel laden' alleen mogelijk bij de Nissan Leaf.

Als fabrikanten dit in rond 2030 zouden toestaan, eventueel afgedwongen door regelgeving, dan komt er een aanzienlijke elektrische opslagcapaciteit beschikbaar.

Uitgaande van 1 miljoen elektrische auto's per 2030 komen we op een handelscapaciteit van minimaal 0,4 GWh tot maximaal 3 GWh.

Aannamen voor deze inschatting

- In 2030 zijn er 1 Mln volledig elektrische auto's in Nederland
- Bidirectioneel laden wordt toegelaten door: minimaal 50% en maximaal 100%;
- De gemiddelde batterijcapaciteit: 70 kWh;
- Minimaal 10% en maximaal 20% van deze auto's zijn zowel rond het middaguur als in de ochtend/avond/nacht aangesloten op een laadpaal;
- Gemiddeld wordt minimaal 10% en maximaal 20% van de batterijcapaciteit beschikbaar gesteld voor het handelen.

⁵⁵ Bron: Nationaal Solar Trendrapport 2024, Dutch New Energy Research.

Conclusies

Tabel T2 toont de ingeschatte bandbreedte voor de capaciteit van elektrische opslag.

Capaciteit van net-gekoppelde elektriciteitsopslag

GWh

	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
Scenario Kort											
e-auto's	0,01	0,02	0,05	0,1	0,3	0,8	2	3	3,4	4	4,5
batterijpark	0,15	0,2	0,25	0,3	0,5	1	2	3	4	5	6
thuisbatterij	0,1	0,1	0,1	0,3	0,5	1	2	3	3,5	4	5
Totaal	0,3	0,3	0,4	1	1	3	6	9	11	13	16
Scenario Lang											
e-auto's	0,01	0,01	0,01	0,02	0,04	0,1	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0
batterijpark	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,8
thuisbatterij	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,7	1,0	1,2	1,4	1,6
Totaal	0,3	0,3	0,4	0,5	0,7	1	1,5	2	2	3	3

Tabel T2: Prognoses elektriciteitsopslag.

T3 Groei van stroomopwek met windtubines

Wind op Land

De huidige capaciteit van 6 GW aan Wind-op-Land blijft de komende jaren geleidelijk doorgroeien. Op basis van de bestaande pijplijn van SDE++ beschikkingen komt er de komende drie jaar naar verwachting 500 MW per jaar bij. De groei na 2027 is afhankelijk van het beleid van een nieuwe regering: wordt Wind-op-Land nog gestimuleerd via de SDE++ regeling, of niet.

In *Prognose Lang* wordt uitgegaan van een groei met 500 MW per jaar.

In *Prognose Kort* stopt de uitbreiding na 2027.

Jaar	Scenario 'Lang'		Scenario 'Kort'	
	extra wind op land (GW)	Totaal Wind op Land (GW)	extra wind op land (GW)	Totaal Wind op Land (GW)
2022		6		6
2023	0,5	6,5	0,5	6,5
2024	0,5	7	0,5	7
2025	0,5	7,5	0,5	7,5
2026	0,5	8	0,5	8
2027	0,5	8,5	0,5	8,5
2028	0,5	9	0	8,5
2029	0,5	9,5	0	8,5
2030	0,5	10	0	8,5

Tabel T3: Prognoses groei elektriciteitsopwek uit Wind-op-Land.

Correlatie Wind-op-Land en Zon

In tegenstelling tot wat velen denken is er in de maanden Mei t/m Augustus een sterke correlatie tussen de opwek uit zon en wind op land⁵⁶. Extra wind-op-land zorgt de komende jaren voor:

- stijging van het aantal uren met een stroomoverschot;
- stijging van het stroomoverschot gedurende de uren met een overschot.

Wind-op-Zee

Windturbines op zee leveren stroom gedurende 5.500 uren per jaar (2/3e van 8.760 uren), met een totaal van ca. 4.000 vollasturen. De opwek is weliswaar hoger in de winter dan in de zomer maar ook in de zomer en bij zonnig weer levert wind-op-zee veel vermogen.

De verdere groei van Wind-op-Zee leidt de komende jaren tot:

- Een stijging van het aantal uren met een stroomoverschot.
- Een stijging van het stroomoverschot gedurende de uren dat er al een stroomoverschot is.

Onderstaande tabel toont de groei van Wind-op-Zee de komende jaren (bron: Wikipedia) en de vergunde windparken die zeer waarschijnlijk de komende jaren worden gebouwd. De groei na 2027 is afhankelijk van het beleid van een nieuwe regering.

In Prognose Kort wordt aangenomen dat er geen Wind op Zee meer wordt geïnstalleerd na 2028. In Prognose Lang wordt aangenomen dat er wordt bijgebouwd tot 21 GW per 2033.

Jaar	Nieuw windpark		Extra capaciteit (GW)	Totale capaciteit wind op zee (GW)
2022				2,5
2023	Hollandse Kust Zuid		1,5	4,0
2024	Hollandse Kust Noord		0,7	4,7
2025				4,7
2026	Hollandse Kust West I & II		1,5	6,3
2027	Hollandse Kust West III		0,7	7
	Scenario 'Lang'		Scenario 'Kort'	
	extra wind op Zee (GW)	Totaal Wind op Zee (GW)	extra wind op zee (GW)	Totaal Wind op Zee (GW)
2028	1	8	0	7
2029	2	10	0	7
2030	2	12	0	7
2031	3	15	0	7
2032	3	18	0	7
2033	3	21	0	7

Tabel T4: Prognoses groei elektriciteitsopwek uit Wind-op-Zee.

⁵⁶ Bron: entrance.nl; analyse uurdata van diverse KNMI weerstations 2022.

T4 Stroomexport en ontwikkelingen bij buurlanden

Eerder werd al getoond dat de opwek uit zon en wind in 2023 al gedurende ca 700 uur konden voorzien in de volledige stroomvraag in Nederland, en inclusief de 'basisopwek' zelfs 1.000 uur. Desondanks waren er slechts 370 afschakelingen. Dit werd verklaard door export.

Een klein deel van het overschot gaat naar Noorwegen om stuwmereen te vullen door het omhoogpompen van water. Een ander deel ging naar Engeland en België. Maar veruit het grootste deel ging naar Duitsland, vaak 3 tot 4 GW.

Gaat deze export van ons zonnestroomoverschot de komende jaren toenemen of afnemen?

Duitsland: explosieve groei zonnestroom

Als onderdeel van de 'Energiewende' heeft de regering Scholz alle kerncentrales gesloten. Daarnaast heeft deze regering geïnvesteerd in het versneld installeren van zonnepanelen en windturbines.

In 2023 heeft Duitsland 14,3 GW aan zonnepanelen bijgeplaatst⁵⁷. Dit is meer dan de helft van de totale Nederlandse capaciteit en hiermee is de Duitse PV-capaciteit met een kwart gegroeid tot 80 GW. In 2024 en 2025 wil men 15 tot 18 GW installeren en de jaren daarna 20 GW per jaar.

Hierdoor heeft Duitsland eind 2024 dezelfde capaciteit als Nederland in 2023. De hoeveelheid windstroom per inwoner is in Duitsland al iets hoger dan in Nederland. In Nederland leidde deze capaciteit aan wind- en zonopwek al tot ca 1.000 uur overcapaciteit.

Gezien de correlatie van 88% voor zonopwek tussen Duitsland en Nederland is de kans groot dat;

- Nederland nauwelijks nog zonnestroom kan exporteren naar Duitsland;
- Nederland vaker te maken gaat krijgen met zonnestroomoverschotten en negatieve prijzen uit Duitsland.

Noorwegen, België en het Verenigd Koninkrijk

De exportcapaciteit naar Noorwegen blijft de komende 10 jaar gelijk op ca 0,7 GW. Het uitbreiden van deze capaciteit zou ongeveer 10 jaar in beslag nemen endaarom niet relevant voor deze analyse. In België heeft men besloten de kerncentrales langer open te houden. Het aantal zonnepanelen groeit gestaag in België, al is het tempo lager dan in Duitsland. De export van Nederlandse zonnestroom naar België kan nog een aantal jaar doorgaan al zal dit geleidelijk afnemen.

Het Verenigd Koninkrijk zet in op windenergie uit de Noordzee. De komende paar jaar wordt er nog flink bijgebouwd. Maar recent zijn veilingen mislukt voor windparken die na 2026 zouden worden gebouwd vanwege prijsstijgingen. De BritNed kabel tussen het VK en de Maasvlakte heeft een capaciteit van 1 GW. Via deze kabel kunnen onze zonnestroom-overschotten mogelijk nog 10 jaar aan het VK worden geleverd.

⁵⁷ Bron: Bundesnetzagentur.de

Conclusie stroomexport

Door de explosieve groei van ZonPV in Duitsland zal de export van zonnestroom naar Duitsland de komende paar jaar al sterk verminderen. Door de groei van ZonPV in andere buurlanden zal de export van zonnestroom richting die landen ook dalen. Het aantal uren met negatieve stroomprijzen zal door deze ontwikkelingen de komende jaren snel stijgen.

Het is onzeker hoe lang de Duitse zonnegroei doorgaat na 2025. Vanaf 2026 kan een nieuwe regering besluiten om te stoppen met het uitbreiden van ZonPV. In de prognose 'Lang' gaat de groei door zoals gepland, in prognose 'Kort' stopt de groei in zonopwek na 2026.