

Innovatie op het gebied van zon-PV en de betekenis hiervan

TNO 2024 R12418 – 5 december 2024

Innovatie op het gebied van zon- PV en de betekenis hiervan

Auteurs

Harm Jeeninga, Peter Blokker

Rubricering rapport

TNO Publiek

Alle rechten voorbehouden

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

© 2024 TNO

Inhoudsopgave

Inhoud

1	Inleiding.....	5
2	Inzet van zon-PV.....	6
2.1	Betekenis van zon-PV in de energietransitie	6
2.2	Business case voor zon-PV.....	9
2.3	Verzekeren van zon-PV systemen.....	9
2.4	Split incentives.....	10
2.5	Voorkeursvolgorde	10
2.6	Netcongestie.....	11
3	Technologische opties en toepassingsgebieden	14
3.1	Marktaandeel verschillende soorten zonnepanelen	14
3.2	Typen zonnepanelen.....	15
3.3	Toepassingen.....	16
3.3.1	Zon op gebouwen.....	16
3.3.2	Zon op Infrastructuur	18
3.3.3	Zon op Land	20
3.3.4	Zon op Water.....	22
3.3.5	Combinatie toepassingsgebieden en typen zon-PV	23
3.4	Constructieve beperkingen in de utiliteitsbouw	25
3.5	Brandrisico's en mitigatie.....	26
3.6	Noodzaak tot het verder verduurzamen van de huidige generatie zonnecellen	26
3.7	Nieuwe ontwikkelingen	27
4	Aangrijpingspunten voor beleid	29
5	Samenvatting en conclusies	31
	Referenties	33

1 Inleiding

De Provinciale Staten van Limburg hebben aangegeven te streven naar implementatie van zon-PV in toepassingen waarbij sprake is van meervoudig ruimtegebruik. Grootschalig gebruik van landbouwgrond voor zonneparken wordt niet gezien als wenselijke richting. De provincie heeft de wens om innovaties die bij kunnen dragen aan meervoudig ruimtegebruik in kaart te laten brengen, zoals lichtgewicht panelen voor zwakke daken. Tevens wordt gevraagd wat de mogelijkheden zijn voor het substantieel verder verhogen van de opbrengst van zon-PV, bijvoorbeeld door een verhoging van het rendement. Gevraagd wordt om zowel te beschrijven welke toepassingen momenteel al op de markt verkrijgbaar (met een acceptabele terugverdientijd) zijn en van welke toepassingen verwacht mag worden dat deze binnen 5 jaar commercieel beschikbaar zullen zijn. Het gaat hier om een overzicht op hoofdlijnen waarbij concrete voorbeelden opgenomen worden ter illustratie.

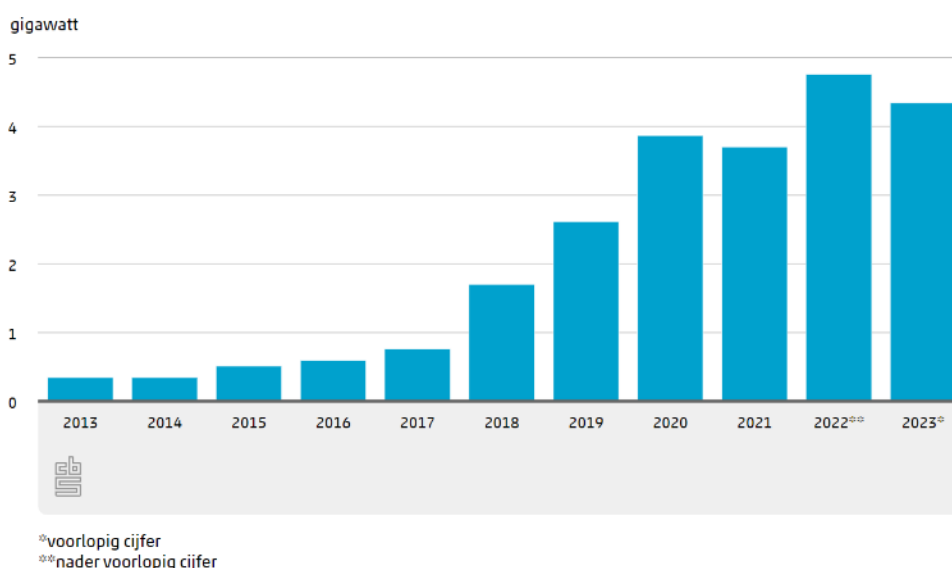
TNO heeft hiertoe allereerst een korte analyse van de relatie tussen de beleidsdoelen voor duurzame energie, veranderingen in de business case voor zon-PV, inzetvolgorde en overige factoren zoals split incentives, verzekeraarbaarheid en netcongestie gemaakt (hoofdstuk 2). In hoofdstuk 3 is allereerst een overzicht gegeven van de huidige op de markt zijnde technologie als ook de specifieke toepassingsmogelijkheden voor zon-PV. Factoren zoals de impact van constructieve beperkingen en brandrisico's zijn hierbij beknopt meegenomen. Vervolgens is een beschrijving gegeven van mogelijke innovaties op het gebied van zon-PV waarbij is aangegeven welke opties mogelijk binnen vijf jaar grootschalig commercieel beschikbaar komen. Tot slot is aangegeven wat de aangrijpingspunten zijn voor de regionale overheid om zon-PV, inclusief innovaties, in de voor de provincie relevante toepassingsgebieden te stimuleren (hoofdstuk 4). Het rapport wordt afgesloten met conclusies en aanbevelingen (hoofdstuk 5).

2 Inzet van zon-PV

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op een aantal belangrijke factoren die van invloed zijn op de toepassing van zon-PV. Allereerst wordt kort ingegaan op het belang van zon-PV voor het behalen van de overheidsdoelen. Vervolgens wordt ingegaan op de business case voor zon-PV, de inzetvolgorde, verzekerbareheid als ook split incentives. Tot slot wordt ingegaan op netcongestie als factor bij bepalen van toepassingsmogelijkheden voor zon-PV.

2.1 Betekenis van zon-PV in de energietransitie

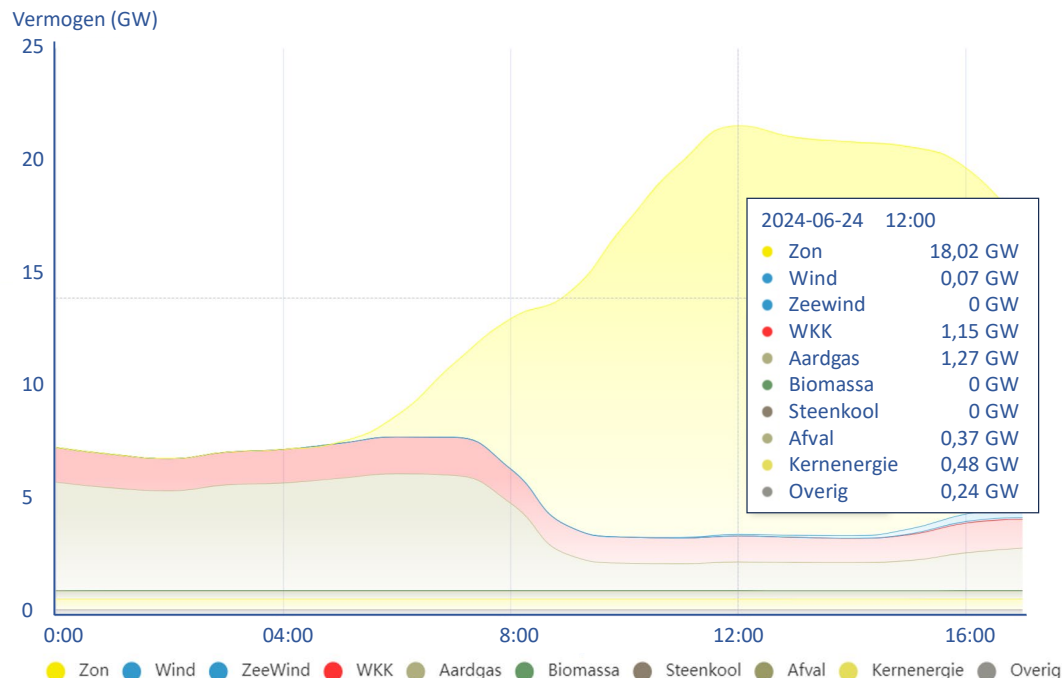
In het Klimaatakkoord [1] worden doelen geformuleerd voor de verduurzaming van de elektriciteitsvoorziening. Elektriciteit uit zon en wind worden gezien als de belangrijkste duurzame bronnen voor Nederland. Om te kunnen voldoen aan de doelstelling van het Klimaatakkoord moet in de periode 2020 – 2030 het totale vermogen aan zon-PV verdrievoudigen en in de periode 2020 – 2050 zelfs vertienvoudigen. Dit betekent in de periode 2020 – 2030 jaarlijks gemiddeld circa 4 GWp additioneel vermogen moet worden geplaatst en in de periode 2030 – 2050 jaarlijks gemiddeld 7 GWp. Een toename met 4 GWp per jaar is vergelijkbaar met het niveau dat de afgelopen jaren is gehaald, zie Figuur 2.1.



Figuur 2.1: Jaar-op=jaar groei opgesteld vermogen (GWp) van zonnepanelen in Nederland [2]

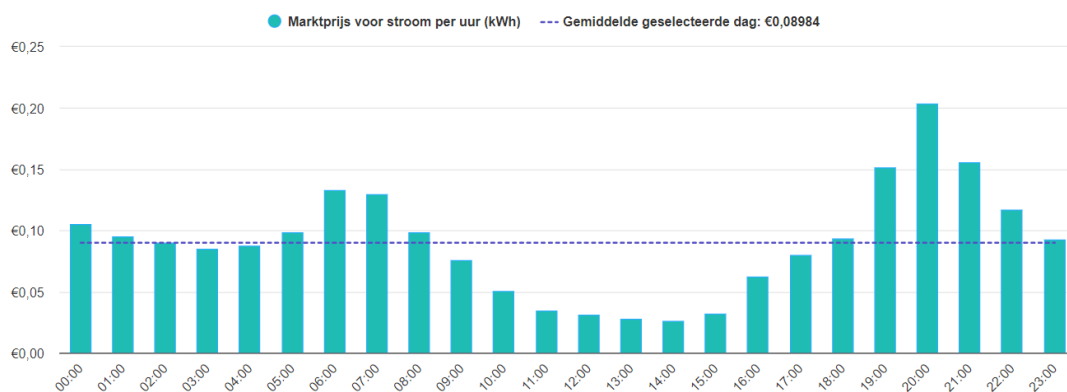
In 2023 produceerden zonnepanelen bijna 20 duizend GWh. Dit is bijna net zoveel als het totale jaarlijkse elektriciteitsverbruik van alle woningen in Nederland en bijna zeventien procent van de totale jaarlijkse netto elektriciteitsproductie [2]. Het totaal opgestelde vermogen in 2024 is voldoende om op dagen met veel zon volledig te voorzien in het totale elektriciteitsverbruik in Nederland [3]. In onderstaand figuur is ter illustratie de elektriciteitsproductie in Nederland weergegeven op 24 juni 2024. Te zien is dat vanaf 7 uur 's ochtends het regelbare vermogen (gascentrales) wordt afgeschakeld. Een aantal centrales (kerncentrale, centrales die ook warmte leveren (WKK)) blijven wel doordraaien. De

hoeveelheid elektriciteit die door zon-PV wordt geleverd is echter voldoende om in de volledige elektriciteitsvraag in Nederland te voorzien (het niveau van de basislast in Nederland ligt op 12 – 14 GW). De bijdrage van wind is op deze dag laag.

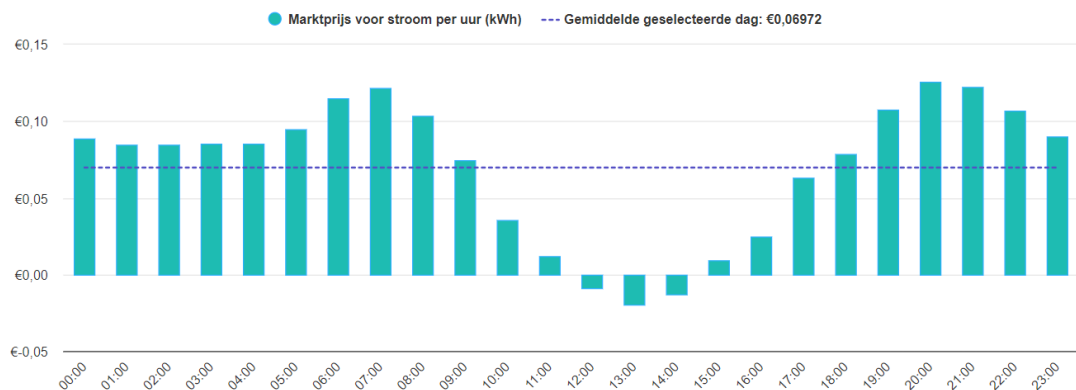


Figuur 2.2: Ontwikkeling van de elektriciteitsproductie (GW) in Nederland op 24 juni 2024 [3].

Doordat er op zonnige dagen meer elektriciteit wordt geproduceerd dan wordt gevraagd, dalen de elektriciteitsprijzen, zie Figuur 2.3 voor 24 juni 2024. Op 25 juni was het overschot aan elektriciteit zelfs zodanig groot dat er gedurende enkele uren sprake was van een negatieve elektriciteitsprijs, zie Figuur 2.4.



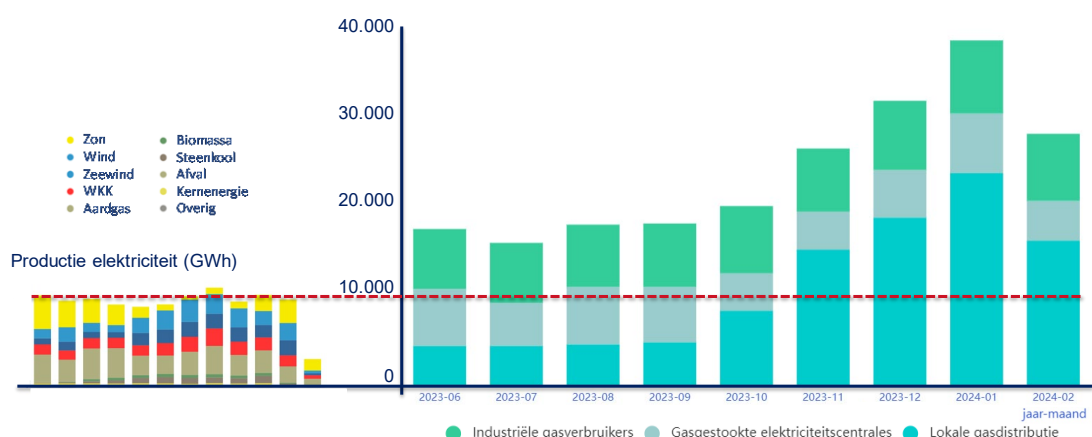
Figuur 2.3: Ontwikkeling van de elektriciteitsprijs op 24 juni 2024 [4]



Figuur 2.4: Ontwikkeling van de elektriciteitsprijs op 25 juni 2024 [4]

Op dagen met veel zon en/of wind is de capaciteit aan duurzame elektriciteit meer dan voldoende om in de huidige vermogensvraag (GW) te voorzien. Het aantal uren met negatieve elektriciteitsprijzen is de afgelopen jaren aanzienlijk toegenomen van 3 uur in 2019 tot 142 uur in het eerste halfjaar van 2023 [5]. Doordat er meer nieuw vermogen aan zon en wind wordt toegevoegd dan dat de eindgebruikstoepassingen worden geëlektrificeerd, neemt het aantal uren met een negatieve prijs nog steeds toe.

Voor het behalen van de overheidsdoelstellingen voor het terugdringen van de uitstoot aan broeikasgassen is het noodzakelijk om het aardgasverbruik sterk terug te dringen. Indien het verbruik aan energie (in GWh) van elektriciteit en aardgas wordt vergeleken, zie Figuur 2.5, dan is te zien dat het totale verbruik van aardgas (in GWh) circa een factor 4 hoger is dan het verbruik van elektriciteit. Dit betekent dat indien Nederland van het gas af wil door een verschuiving naar CO₂-vrije energiedragers zoals elektriciteit, warmte en waterstof, er een sterke toename nodig is van duurzaam geproduceerde elektriciteit. Ofwel: het vermogen aan zon-PV en wind zal zeer sterk toe moeten nemen om te kunnen voldoen aan de klimaatdoelstellingen, in het bijzonder indien Nederland sterk gaat inzetten op groene waterstof.



Figuur 2.5: Ontwikkeling van het elektriciteitsverbruik (GWh) en aardgasverbruik (GWh) in Nederland in 2023

2.2 Business case voor zon-PV

De afgelopen jaren is het vermogen aan zon-PV sterk toegenomen. Reden hiervoor waren in eerste instantie de sterk oplopende energieprijzen gevolgd door een sterke kostendaling van de modules door een overschot aan productiecapaciteit [6], [7]. Het effect van de prijsdaling door overcapaciteit was sterker dan het effect van de toename aan grondstofprijzen, waardoor netto de moduleprijzen zijn blijven dalen. De dalende modulekosten in combinatie met de gestegen elektriciteitsprijs maakte dat de terugverdientijd voor zon-PV sterk terugliep en ruim beneden de door overheid als richtpunt gehanteerde terugverdientijd van 7 jaar lag. Door de afname van de kosten van de PV-modules worden de kosten in steeds sterkere mate bepaald door het materiaal en arbeid die nodig is om de PV-installaties te installeren.

De sterke toename van zon-PV in de gebouwde omgeving heeft geleid tot een sterke stijging van de netwerkkosten. De energiebedrijven zijn begonnen om dit door te belasten en rekenen nu kosten voor het terug kunnen leveren van elektriciteit. Het huidige kabinet is van plan de salderingsregeling voor zonnepanelen af te bouwen en per 1 januari 2027 te beëindigen [8]. De onzekerheid over de afbouw van de salderingsregeling heeft tot een significante afname van de vraag naar nieuwe zon-PV systemen geleid. De combinatie van de afnemende elektriciteitsprijs, de verwachte afschaffing van de salderingsregeling, de dalende terugleververgoeding en de doorbelasting van de netwerkkosten maakt dat de markt voor zon-PV aanzienlijk is verslechterd. Opgemerkt moet worden dat met name de onzekerheid over de salderingsregeling hierbij een belangrijke rol heeft gespeeld.

Een optie om de zelfconsumptie van zon-PV te vergroten, hierdoor wordt minder elektriciteit teruggeleverd aan het net, is de thuisbatterij. Onderzoek van CE Delft geeft aan dat het zeker 15 jaar kost om een thuisbatterij terug te verdienen [9]. De verwachting is dan ook dat de komende jaren de business case voor zon-PV niet significant zal verbeteren door de introductie van de thuisbatterij.

Tot slot moet bedacht worden dat naar mate de tijd verstrijkt de goed toegankelijke oppervlakken zullen zijn voorzien van zon-PV. Dat betekent dat het resterende potentieel voor een toenemend aandeel bestaat uit daken met een minder gunstige opbrengst (minder gunstige oriëntatie, beschaduwning etc.). Voor de nog niet benutte oppervlakken is de gemiddelde business case vermoedelijk niet representatief en is aanvullende stimulering nodig om dit potentieel te kunnen benutten.

2.3 Verzekeren van zon-PV systemen

Het verzekeren van zon-PV installaties is voor verzekeraars een steeds belangrijker onderwerp geworden. Door de sterke toename van het aantal installaties nam ook het aantal branden waarbij PV-systemen een rol speelden toe. Soms was het PV-systeem hierbij de oorzaak van de brand, werd het blussen van de brand bemoeilijkt of kwamen er delen van het PV-systeem in de omgeving terecht, zie ook zie paragraaf 3.5. Belangrijk is om vooraf te overleggen met de verzekeraar(s) voordat PV-installaties worden aangelegd om te bepalen of en hoe alle risico's kunnen worden verzekerd [10].

Indien de eigenaar van het dak niet de eigenaar van de PV-installatie is, bijvoorbeeld doordat het dak wordt verhuurd aan een energiemaatschappij, kan door een recht van opstal te vestigen op de PV-installatie de eigendomsconstructie geregeld. Hier kunnen

vervolgens de verzekeringen op worden afgestemd. Daarnaast stellen verzekeraars voorwaarden aan de installatieconstructie van de PV-panelen dit om het risico op totaalschade, bijvoorbeeld door de aanwezigheid van brandbaar isolatiemateriaal, te beperken. Naast schade aan het gebouw is ook de dekking van schade door verontreiniging van de omliggende omgeving van belang. Dit speelt in het bijzonder bij PV-installaties op daken van agrarische bedrijven. Wanneer opruimingskosten zijn meeverzekerd op een gebouwenverzekering, dan zijn doorgaans alleen de kosten voor het eigen perceel of dat van de direct aangrenzende percelen zijn verzekerd. Er moet goed bekeken worden of schade aan gewassen op omliggende percelen, doordat deze niet kunnen worden geoogst door vervuiling met glasdeeltjes, is gedekt. Voor consumenten is het van belang na te gaan of zij aan de verzekeraar moeten melden dat er een (nieuw) PV-systeem op de woning is geïnstalleerd (opstalverzekering). Dit verschilt per verzekeraar [10].

2.4 Split incentives

Indien de eigenaar van een gebouw of woning niet gelijk is aan de gebruiker, dan komen de voordelen (lagere energierekening voor de huurder) en de kosten (investering door de gebouweigenaar) bij verschillende partijen terecht. Dit vormt een barrière voor de investeringen in verduurzaming van deze gebouwen en woningen. In principe is de gebouweigenaar verantwoordelijk voor onderhoud en investeringen aan het gebouw en de gebouwinstallaties. De huurder betaalt de energierekening. Gebouweigenaren hebben daardoor geen direct financieel voordeel van het verduurzamen van hun panden en zijn daarmee minder snel geneigd maatregelen voor verduurzaming te nemen [10]. Dit wordt een split incentive genoemd.

Door een goede samenwerking tussen eigenaar en huurder kan de split incentive worden omgezet in een shared incentive waarbij kosten en opbrengsten op een voor alle partijen acceptabele manier verdeeld worden. Er moeten goede afspraken tussen huurder en verhuurder worden gemaakt. Belangrijk hierbij is een transparant proces waarbij voor alle partijen duidelijk is hoe de kosten en opbrengsten verdeeld worden. Hierbij zouden niet alleen de directe investeringen en opbrengsten meegenomen moeten worden maar ook bijvoorbeeld een verandering in vastgoedwaarde. Naast de verdeling van kosten en opbrengsten is wordt tevens aanbevolen aan te sluiten bij natuurlijke onderhouds- en vervangingsmomenten zodat kosten en overlast tot beperkt kunnen worden.

2.5 Voorkeursvolgorde

Zowel door de overheid als door milieuorganisaties is een afwegingskader ontwikkeld voor de inzet van duurzame bronnen of zelfs specifiek voor zon-PV. In de Nationale Omgevingsvisie (NOVI) van de overheid is de langetermijnvisie gegeven op de toekomstige ontwikkeling van de leefomgeving in Nederland [6]. Centraal staat hierbij het versterken van de omgevingskwaliteit in brede zin (natuur, gezondheid, milieu en duurzaamheid). De NOVI gebruikt bij haar afwegingskader een drietal afwegingsprincipes:

- Combinaties van functies gaan voor enkelvoudige functies
- Kenmerken en identiteit van een gebied staan centraal
- Afwentelen wordt voorkomen

De afwegingsprincipes van de NOVI leiden tot een voorkeur voor zonnepanelen op

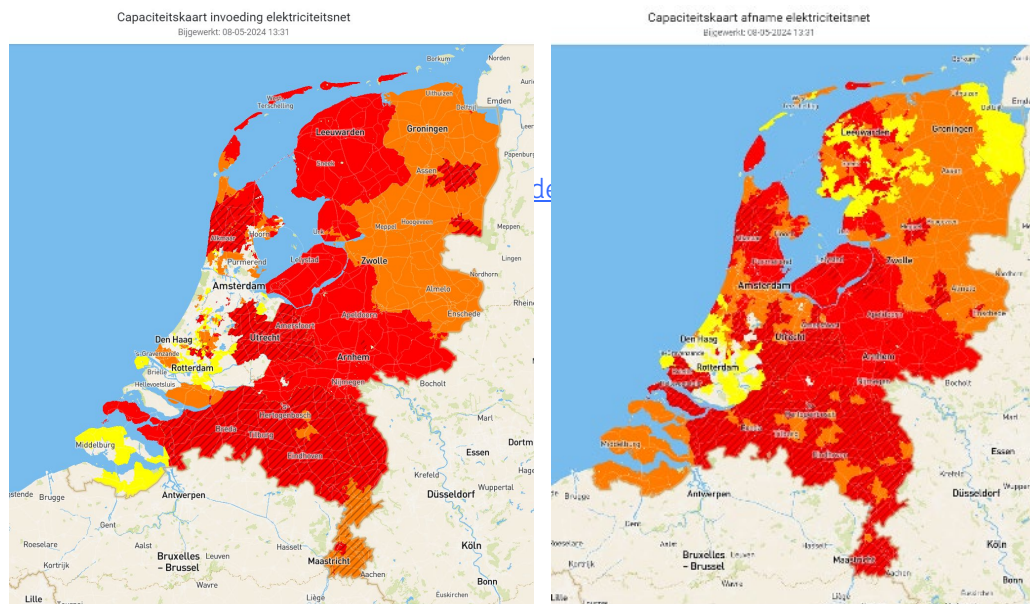
daken en gevels van gebouwen, doordat hierbij sprake is van een combinatie van functies en een relatief beperkte verstoring omdat al sprake is van bebouwing. Onbenutte terreinen in bebouwd gebied zouden vervolgens, conform de afwegingsprincipes van de NOVI, kunnen worden benut. Voor het behalen van nationale doelstellingen kan het nodig zijn om ook zon-PV toe te passen in gebieden die minder goed scoren in het NOVI-afwegingskader. Natuur- en landbouwgebieden worden derhalve niet uitgesloten, maar scoren minder goed dan gebieden met een andere toepassing waarbij sprake is van behoud van de oorspronkelijke functie.

Ook in het Klimaatakkoord [1] is, in lijn met NOVI, aangegeven dat zonnepanelen eerst op gebouwen gelegd moeten worden en vervolgens op ongebruikte terreinen in bebouwd gebied, als ook bij overkapping van parkeerplaatsen. Buiten de bebouwde kom gaat de voorkeur uit naar waterzuiveringsinstallaties, vuilnisbelten, binnenwateren of bermen van spoor- en autowegen. Deze voorkeursvolgorden in oktober 2023 aangescherpt en is er met IPO en VNG een bestuursakkoord gesloten over een beperkt aantal uitzonderingscriteria voor het gebruik van landbouwgrond [13]. Ook door de Natuur en Milieufederaties is specifiek voor zon-PV een afwegingskader ontwikkeld voor de inzet van zon-PV: de constructieve zonneladder [7]. In het afwegingskader worden onder andere ruimtelijke belangen meegenomen. Hoewel het afwegingskader van de constructieve zonneladder niet gelijk is aan dat van de NOVI, komen de resultaten goed overeen en zijn de uitkomsten in lijn met de aanbevelingen van het Klimaatakkoord. Zowel de NOVI als de constructieve zonneladder bieden ruimte om specifieke lokale omstandigheden mee te nemen in de afweging.

In de NOVI wordt behoud van identiteit als belangrijk aspect van het afwegingskader gezien. Dit biedt met name mogelijkheden voor geïntegreerde toepassingen voor PV waarbij de esthetische aspecten een belangrijk aspect zijn in de toepassing. Gedacht kan worden aan systemen waarbij de zonnecellen niet of nauwelijks meer zichtbaar zijn en volledig geïntegreerd zijn in de toepassing door aan te sluiten bij vorm en kleur, zie ook hoofdstuk 3.

2.6 Netcongestie

Zowel voor het grootschalig terugleveren van elektriciteit als ook voor de afname geldt dat de capaciteit van het elektriciteitsnet beperkend is. Dit betekent bijvoorbeeld dat nieuwe zon- en windparken niet aangesloten kunnen worden op het elektriciteitsnet. Ook bij bijvoorbeeld uitbreiding van bedrijfsterreinen of nieuwbouwwijken kan niet in de vermogensvraag worden voorzien [8]. Dit speelt voor vrijwel heel Nederland, zowel voor de invoeding van elektriciteit als ook de afname (zie Figuur 2.6). Er wordt gewerkt aan diverse oplossingen voor dit probleem. Zon- en windparken worden bijvoorbeeld tijdelijk afgeschakeld op momenten dat het elektriciteitsnet onvoldoende capaciteit heeft om de elektriciteit af te voeren. Ook is plaatsing van een grote batterij (elektriciteitsopslag) een optie. In plaats van een wind- of zonnepark uit te schakelen, wordt dan een grote batterij opgeladen. Deze levert dan weer terug aan het net indien er weer capaciteit is (bijvoorbeeld 's nachts).



Figuur 2.6: Capaciteitskaart voor de invoeding en levering van elektriciteit op het elektriciteitsnet [34]

Naast het invoeden van grootschalige productie (zonne- en windparken) speelt dat ook in de gebouwde omgeving (woonwijken) problemen optreden met het invoeden van zon-PV. In bepaalde delen van het elektriciteitsnet in woonwijken loopt de netspanning zo hoog op, dat de omvormers (inverters) van de zonnepanelen uitschakelen. Een verdere toename van de hoeveelheid zon-PV in de gebouwde omgeving zal dit probleem verder vergroten. Tegelijkertijd is er tevens lokaal sprake van vermogenstekort door het opladen van elektrische voertuigen. Het achterliggende mechanisme is echter anders. In de gebouwde omgeving (woonwijken) is doorgaans niet de capaciteit van de elektriciteitskabels de beperkende factor, maar de capaciteit van het transformatorstation.

Er wordt in Nederland gewerkt aan de aardgasloze wijken. Daarvoor zal de vraag naar elektriciteit toenemen, zeker in de wijken waar gekozen wordt voor een all-electric oplossing met warmtepompen. Het is dan van belang om vraag- en (duurzaam)aanbod zo dicht mogelijk bij elkaar te brengen en te zorgen dat de vraag- en (duurzame) productiepatronen zo goed mogelijk op elkaar aansluiten. Het is derhalve zaak om lokaal niet alleen veel energie (elektriciteit) op te wekken, maar ook om er voor te zorgen dat dit lokaal (in de woonwijk) wordt benut. Door gebruik te maken van slimme apparaten kan de energievraag in een wijk beter aansluiten op de lokale productie. De elektrische auto zou bij voorkeur opgeladen moeten worden op momenten dat de zon schijnt i.p.v. de auto om 18h00 aan de laadpaal te zetten wanneer de vraag hoog is. Wordt er in een wijk meer vermogen gevraagd dan via het transformatorstation kan worden geleverd, dan moeten laadpalen tijdelijk afgeschakeld worden. Indien er lokaal een overschot is aan zonnestroom, dan moet gekeken worden naar mogelijkheden om dit lokaal af te zetten, bijvoorbeeld in de vorm van buffers voor warm tapwater en ruimteverwarming of het lokaal laden van elektrische voertuigen. Door het plaatsen van bijvoorbeeld een buurtbatterij wordt het eenvoudiger om vraag en aanbod goed op elkaar aan te laten sluiten. Door het stimuleren van vehicle-to-grid en bi-directionele laadpalen, kan de auto ook als batterij fungeren. Hierbij moet bedacht

worden dat een elektrische auto een relatief grote batterijcapaciteit heeft in vergelijking tot een thuisbatterij⁷ en laadpalen relatief veel vermogen kunnen leveren (11 kW).

Om woonwijken aardgasvrij te maken is het derhalve van belang de lokale productie van elektriciteit door zon-PV te stimuleren, waarbij vraag en aanbod zo goed mogelijk op elkaar worden afgestemd. Indien de elektriciteit niet lokaal wordt geproduceerd maar afkomstig is van grootschalige zonne- en windparken, dan ontstaat zowel een probleem in het elektriciteitsnet (transportcapaciteit) als ook lokaal doordat het transformatorstation niet in staat is om in de toegenomen elektriciteitsvraag (de wijk is van het aardgas af, elektrische voertuigen) te voorzien. De in Nederland optredende netcongestieproblemen, die bij een toename van de elektrificatie alleen maar groter worden, zouden meegenomen moeten worden bij het bepalen van de voorkeurstoepassingen voor zon-PV: vraag en productie bij elkaar brengen.

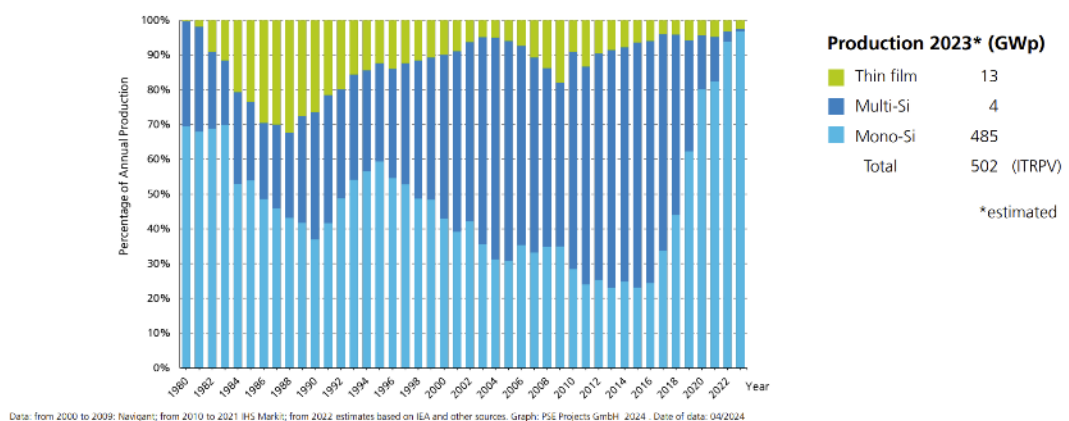
⁷ Circa een factor 10.

3 Technologische opties en toepassingsgebieden

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de verschillende soorten PV die momenteel beschikbaar zijn als ook de volgende generatie zon-PV waarvan verwacht wordt dat deze binnen vijf jaar commercieel beschikbaar zal zijn. Daarnaast worden verschillende toepassingsgebieden voor zon-PV geschetst. Voor een deel van deze toepassingsgebieden worden specifieke eisen gesteld, zoals bijvoorbeeld lichtgewicht panelen. Ook hebben bepaalde typen PV voordelen die in bepaalde toepassingen benut kunnen worden, zoals bijvoorbeeld panelen die tweezijdig zonlicht kunnen invangen (bifacial panelen).

3.1 Marktaandeel verschillende soorten zonnepanelen

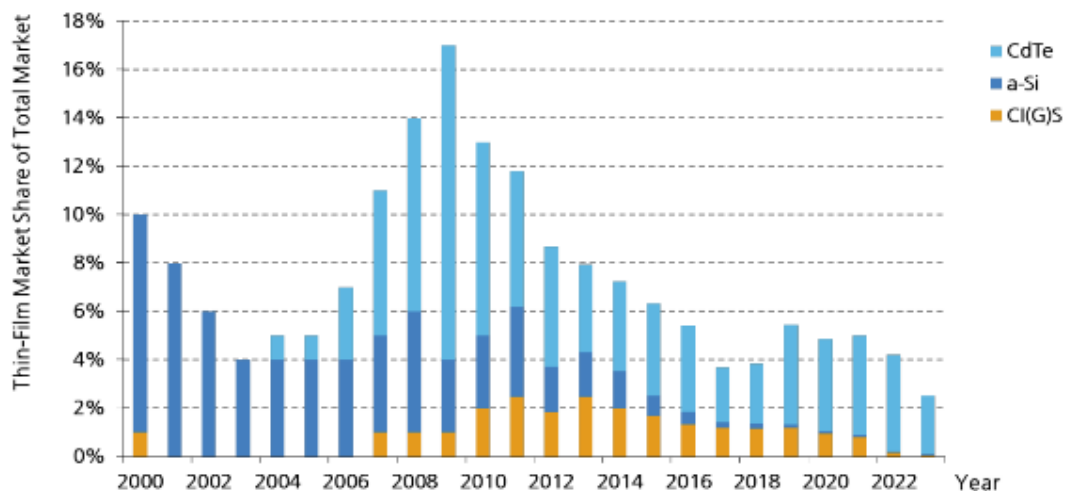
In de jaren 90 werd verwacht dat de markt voor zon-PV op termijn overgenomen zou worden door zogeheten dunne film PV, omdat er problemen werden voorzien met betrekking tot de hoeveelheid silicium die beschikbaar zou zijn voor hoogwaardige toepassing in de PV-industrie. Door de bouw van fabrieken die zich specifiek richten op de productie van silicium voor zon-PV werd het probleem van de beschikbaarheid opgelost. Dit heeft geleid tot een situatie in de markt waarbij nu de productie primair bestaat uit silicium gebaseerde zonnepanelen, zie Figuur 3.1.



Figuur 3.1: PV productie per technologie [9]

Silicium gebaseerde zonnepanelen zijn op verschillende manieren te classificeren. Er kan onderscheid worden gemaakt tussen kristalstructuren (mono en multikristallijn), type dotering (n-type en p-type) en hoe de zonnecellen verder zijn opgebouwd (TOPCon, Heterojunctie (n-type) of PERC (p-type)). Dit zijn echter geen relevante stuurparameters vanuit een beleidsperspectief. In de basis gaat het om voor consumenten ogenschijnlijk identieke panelen.

Het marktaandeel van dunne film zonnepanelen is gedaald tot rond de 2,5% van de totale wereldwijde productie, zie Figuur 3.2. De productie van amorf silicium en CIGS-dunne film is de laatste jaren sterk afgenomen en is vrijwel verwaarloosbaar op mondiale schaal met CdTe als dominante dunne film technologie in de huidige markt. CdTe-zonnepanelen bieden echter, wat betreft de productie van duurzame energie, geen significante voordelen meer ten opzichte van siliciumzonnepanelen. Ook siliciumzonnepanelen zijn inmiddels zeer licht van gewicht te maken en toepasbaar op gebogen oppervlakken met een diameter van één meter of meer. CdTe-zonnepanelen bevatten het zware metaal cadmium, hetgeen bij vrijkomen zeer schadelijk is voor het milieu en de volksgezondheid. Stimulering van dit type zonnepanelen wordt om die reden niet aanbevolen.



Figuur 3.2: Marktaandeel dunne film zon-PV [9]

De huidige markt wordt derhalve gedomineerd door siliciumzonnepanelen. Deze zijn de afgelopen 20 jaar sterk in kosten gedaald en ook het rendement, dat de 25% nadert, is sterk toegenomen.

3.2 Typen zonnepanelen

Naast het basismateriaal waarvan een zonnecel is gemaakt (zie paragraaf 3.1), kan tevens een onderscheid worden gemaakt naar vier typen siliciumzonnepanelen:

- **Conventionele (enkelzijdige) zonnepanelen:** Deze hebben, doordat ze zijn voorzien van een relatief zware glasplaat aan de voorzijde, een gewicht van rond de 15 kg/m².
- **Lichtgewicht zonnepanelen:** Hierbij is de glasplaat² vervangen door kunststof. Deze panelen zijn doorgaans lichter dan 4 kg/m² voor een paneel met een standaard formaat.
- **Bifacial zonnepanelen (tweezijdig):** Hierbij is de achterzijde ook gemaakt van doorzichtig materiaal, zodat het zonnepaneel aan twee kanten licht kan opvangen. Dit biedt voordelen bijvoorbeeld bij een verticale opstelling met een oost/west oriëntatie. De productie vindt dan plaats gedurende een groot aantal uren per dag doordat 's ochtends de achterzijde wordt benut en aan in de namiddag de voorzijde, zie Figuur 3.8. Bifacial zonnepanelen hebben de meeste meerwaarde in agri toepassingen en op industriële

² Het verschil in gewicht zit met name in het gewicht van de glasplaat. De silicium zonnecellen zelf zijn, zowel bij conventionele als lichtgewicht panelen, circa 120 µm dik en wegen vrijwel niets.

daken met witte dakbedekking (epdm) waar de paneeldichtheid lager moet zijn vanwege de belasting.

- **Gekleurde panelen:** Door het aanbrengen van een folie kan een paneel elke gewenste kleur krijgen. Hierbij zijn ook gecompliceerde patronen mogelijk, waarmee PV panelen esthetisch goed geïntegreerd worden in bijvoorbeeld gebouwen of woningen, zie Figuur 3.3. Wel gaat het aanbrengen van een gekleurd folie ten koste van het rendement van het zonnepaneel. Het rendementsverlies is afhankelijk van de mate van bedekking (de folie kan als stipjes met een meer of minder hoge bedekkingsgraad maar ook egaal worden aangebracht), zie bijvoorbeeld Figuur 3.4 en Figuur 3.9.
- **Zon-thermische panelen:** Deze panelen wekken tegelijkertijd elektriciteit en warmte op (combinatie zonneboiler en PV paneel). Door de PV-panelen als zonnecollector te gebruiken wordt warm water geproduceerd dat ingezet kan worden voor ruimteverwarming en warm tapwater, terwijl tegelijkertijd de PV-panelen worden gekoeld. Dit laatste heeft een positief effect op het rendement. Alhoewel deze systemen al een aantal jaren op de markt zijn, is een doorbraak en daarmee de benodigde kostendaling uitgebleven.

Naast bovenstaande typen zonnepanelen kan gekozen worden voor een productiemethode waarbij de eigenschappen van de PV panelen (vorm, kleur, gewicht etc.) specifiek zijn toegesneden op de toepassing waarin de zonnecellen worden geïntegreerd. Dit wordt ook wel “mass-customization” genoemd.

3.3 Toepassingen

Voor het beschrijven van de verschillende soorten toepassingen wordt doorgaans uitgegaan van onderstaande typologieën [10]:

- Gebouwen
 - Woningen
 - Utiliteit
- Infrastructuur
- Landschap
- Water

Bovenstaande onderverdeling wordt ook gebruikt in bijvoorbeeld het uit het Klimaatakkoord voortgekomen Meerjarige Missiegedreven Innovatie Programma (MMIP) dat zicht richt op hernieuwbare elektriciteit op land [11].

Naast bovenstaande typologieën kan tevens in voertuigen (VIPV) of trailers geïntegreerde PV genoemd worden. VIPV kan een (bescheiden) bijdrage leveren aan het verminderen van de netcongestie doordat een deel van de elektriciteit voor het voertuig op de auto zelf opgewekt wordt. Voor geïntegreerde PV op trailers, bijvoorbeeld koelwagens, is vermindering van brandstofverbruik en geluidsoverlast (geen aggregaat meer nodig) het belangrijkste voordeel.

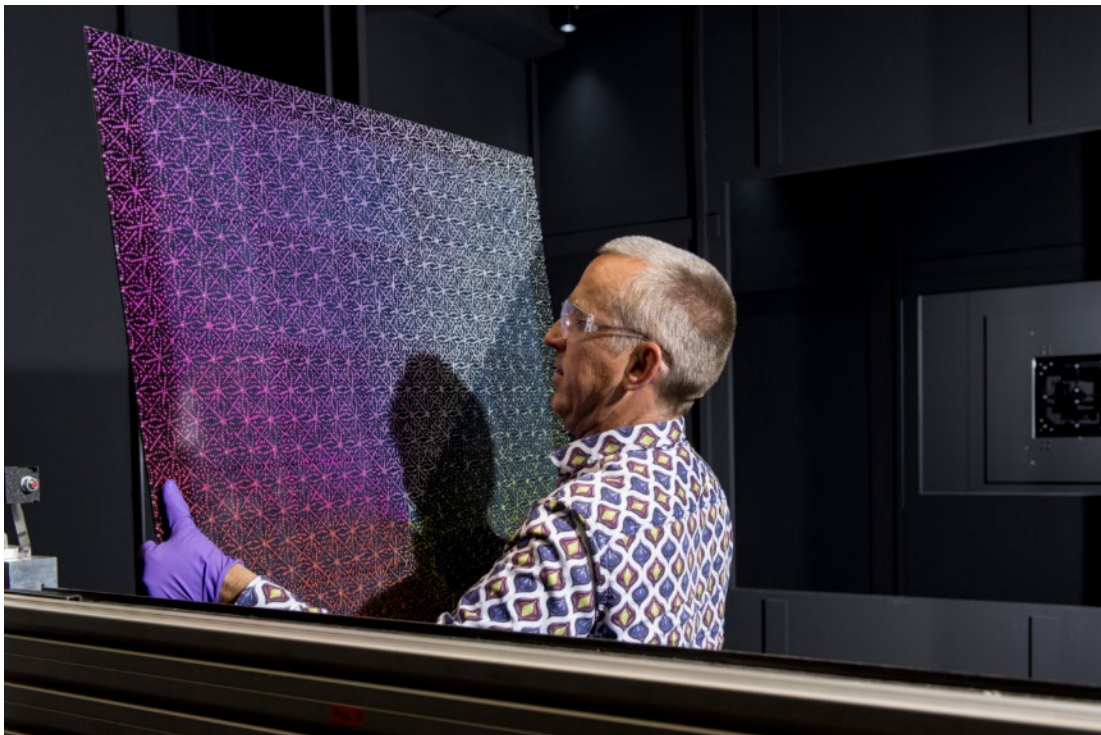
3.3.1 Zon op gebouwen

In de basis is er nog zeer veel ruimte beschikbaar op daken waarbij standaard zonnepanelen over de dakbedekking wordt gemonteerd, de zogenaamde building added PV (BAPV). Standaard panelen kunnen ook zeer goed worden toegepast op veel utiliteitsgebouwen.

Waar echter hogere architectonische eisen gelden, is het gewenst dat de zonnepanelen beter passen bij de architectuur van het gebouw. Dit stelt specifieke eisen aan de esthetiek, veiligheid en technische inpasbaarheid van de producten. Hierbij kan men denken aan kleur, vorm, oppervlakte, speciale panelen die onderdeel zijn van een bouwelement, en technologieën om de panelen nog veiliger te maken. Dit laatste verdient extra aandacht, zeker gezien de specifieke brandveiligheidseisen voor geïntegreerde producten (zoals op gevels), maar ook voor de toepassing op distributie centra vanwege strenge verzekeringseisen. Daarnaast kunnen lichtgewicht zonnepanelen worden geplaatst daar waar de huidige dakconstructie de plaatsing van conventionele panelen niet toestaat. Hierbij kan bijvoorbeeld ook gedacht worden aan het vervangen van asbestdaken door lichtgewicht PV-daken. Het monteren van lichtgewicht panelen is hierbij niet automatisch een voorwaarde. De noodzaak tot het gebruik van lichtgewicht panelen wordt vooral bepaald door de leeftijd en type van het gebouw, zie ook paragraaf 3.4.



Figuur 3.3: Esthetische gevel PV panelen (donkere driehoek links op de gevel en het donkere rechthoekige gedeelte met de afbeelding van de corona van de zon) aan het Harry van den Kroonenberg lab op de TNO locatie in Petten



Figuur 3.4: Voorbeeld van een gekleurd zonnepaneel

3.3.2 Zon op Infrastructuur

In de loop der jaren zijn er veel innovatieprojecten geweest rondom zonnepanelen op infrastructuur, zoals het SolarHighways-project, dat heeft geresulteerd in het geluidsscherm langs de A50 in Uden, en het SolarRoad-concept voor fietspaden en wegen (zie Figuur 3.5). Geen van deze projecten heeft uiteindelijk geresulteerd in commercieel beschikbare producten die specifiek zijn ontworpen voor deze toepassing. Gegeven de resultaten van deze pilotprojecten wordt niet verwacht dat toepassing van zon-PV in wegen en fietspaden de komende vijf jaar betrouwbaar en kosteneffectief kan worden toegepast. Wel zien we veel standaardpanelen die op een innovatieve manier worden toegepast, bijvoorbeeld op geluidschermen, zoals recentelijk in Alkmaar (zie Figuur 3.6). Langs de A50 bij Uden zijn bifaciale zonnepanelen toegepast in het geluidsscherm, zie Figuur 3.7.



Figuur 3.5: SolarRoad



Figuur 3.6: Geluidsscherm voorzien van conventionele zonnepanelen aan de N245 in Alkmaar [12]



Figuur 3.7: Bifaciale zonnepanelen langs de A50 in Uden

3.3.3 Zon op Land

Voor zon op land moet een onderscheid worden gemaakt tussen grootschalige zonneparken, waarbij de ruimte primair wordt benut voor de productie van duurzame elektriciteit, en situaties waarbij wordt gestreefd naar meervoudig gebruik. Zon-PV kan bijvoorbeeld ook een functie vervullen bij de bescherming van gewassen. Hierbij kan het zowel gaan om het creëren van schaduw (verlaging van temperatuur, tegengaan van verdroging) als om het beschermen van kwetsbare gewassen tegen hagel of regen en het verminderen van de effecten van nachtvorst. [13]. Zon-PV draagt hier bij aan het behoud van de oorspronkelijke functie (mitigerende maatregel). Zo zijn er bijvoorbeeld experimenten gedaan met het plaatsen van zonnepanelen op dijken, zie Figuur 3.9. In het project ‘Zon op Dijken’ is onder meer onderzocht of en hoe dit kan worden uitgevoerd zonder de waterkerende functie van de dijk aan te tasten. Hierbij was het doel het verminderen van de uitdroging van dijken met als bonus de productie van duurzame elektriciteit. De experimenten wezen overigens uit dat het niet eenvoudig is om een goede mate van beschaduwing te creëren. Bij een te hoge mate van beschaduwing werd het gras onder de panelen en daarmee de sterkte van het dijklichaam te veel aangetast [14].



Figuur 3.8: Verticale bifaciale zonnepalen voor agrarische toepassingen (Energie Coöperatie Vrijstad)



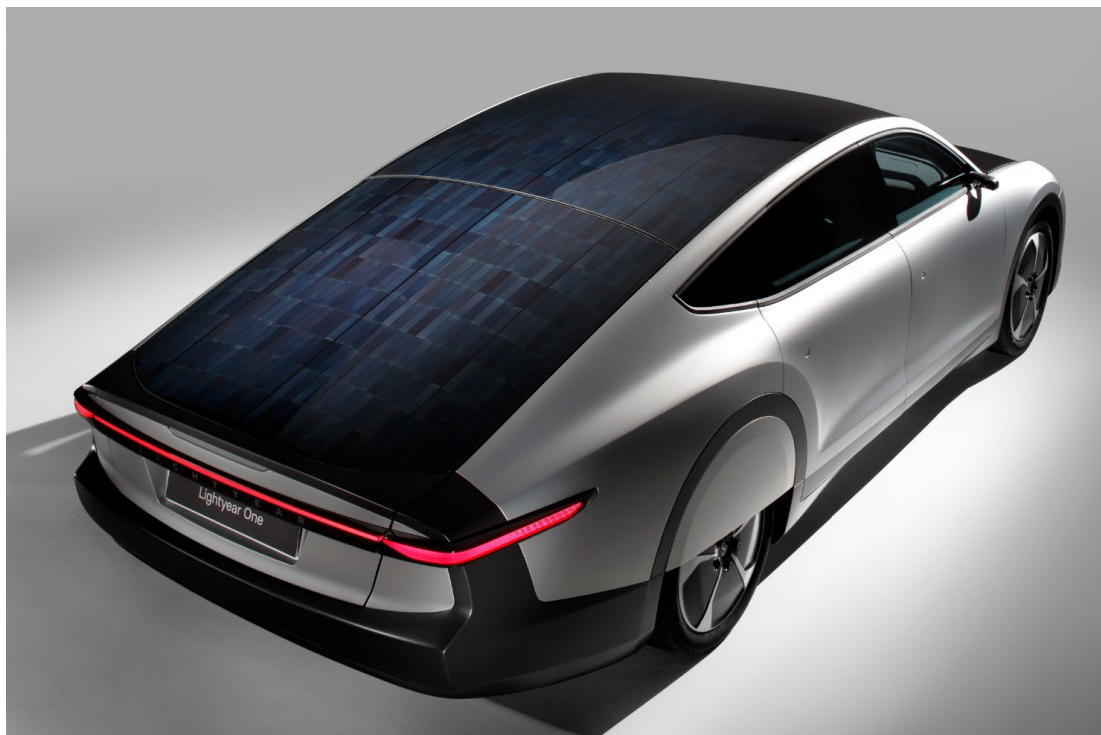
Figuur 3.9: Testopstelling voor Zon op Dijken in Ritthem

3.3.4 Zon op Water

Het gebruik van water als oppervlak voor zonneparken biedt in vele landen een aantrekkelijke vergroting van het geschikte areaal voor opwekking van duurzame energie (zie Figuur 3.10). Ook hier zijn er kansen voor meervoudig oppervlakte gebruik. In Zuid Europa wordt dit bijvoorbeeld toegepast om verdamping en algengroei in waterbassins die bedoeld zijn voor irrigatie tegen te gaan. Wateroppervlakken (bijv. bepaalde zand en grindaftgravingen) die geen andere (recreatieve) functie hebben en zonder ecosysteemfunctie (geen planten, dieren) zijn bij uitstek geschikt voor het plaatsen van drijvende zonnepanelen. Bij wateroppervlakken die een andere bestemming hebben (i.e. recreatie) moet goed gekeken worden naar de plaatsing van de zonnepanelen. Hierbij is het tevens van belang niet te veel licht in het water weg te nemen, om negatieve effecten op het bestaande ecosysteem te voorkomen. Onderzoek naar de relatie tussen beschaduwing door drijvende zonnepanelen en impact op de ecologie loopt [15].



Figuur 3.10: TNO testopstelling voor drijvende zonnepanelen

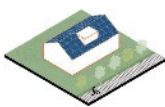


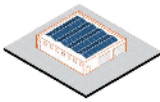
Figuur 3.11: Voorbeeld van een auto met een dak waarin zonnecellen zijn geïntegreerd

3.3.5 Combinatie toepassingsgebieden en typen zon-PV

In Tabel 3.1 is een overzicht gegeven van de belangrijkste toepassingsgebieden voor zon-PV als ook het type PV wat hiervoor het meest geschikt is. De conventionele zonnepanelen worden met name geproduceerd in China. Echter, in Nederland zijn een aantal spelers actief die zonnepanelen leveren die specifiek geschikt zijn voor een bepaalde toepassing. Zo zijn er meerdere spelers actief op het gebied van lichtgewicht zonnepanelen, geïntegreerde voldak-systemen, PV in gevels, gekleurde PV panelen als ook PV dakpannen. Dit is, niet uitputtend, aangegeven in de tabel.

Tabel 3.1: Belangrijkste PV typologieën

Typologie	Technologie	Beschikbaarheid	Nederlandse fabrikant	Mogelijkheden
 Volledig geïntegreerd dak [16]	Standaard monofacial siliciumzonnepanelen. Enkele dakpan gebaseerde producten op de markt.	Veelal Aziatische standaard producten	Standaard: https://www.elsun.nl/ https://www.energyracom.nl/ Dakpan: https://solinso.nl/	Toevoeging van kleur, vorm en betere dakintegratie maakt op termijn vervanging van standaard dakbedekking mogelijk

 Lichtgewicht producten voor industriële daken [16]	Speciale lichtgewicht producten, ontworpen voor daken met lage draagkracht	Vooral flexibele, non-glas producten van Aziatische oorsprong. Enkele nieuwe concepten op de markt. Nederlandse Solarge maakt duurzame producten	https://solarge.com/	Industriële daken worden nog relatief weinig ingezet, met name beperkte draagkracht van deze daken en slechte verzekerbaarheid. Ontwikkeling van veiligere lichte producten.
 Producten voor op gevels en ramen [16]	Specialistische producten veelal op basis van standaard kristallijn silicium, maar met opties voor kleur en gebruik materialen die passen bij gebruik in de bouw wat 20-30% rendementsverlies geeft	Enkele producenten in EU, weinig Aziatische producten beschikbaar op EU markt. Producten voor ramen zijn op de markt, maar met laag rendement.	https://kameleonsolar.com/nl/ https://www.energyra.com/nl/ https://solarix-solar.com/en https://www.zigzagsolar.nl/	Technisch zijn er veel mogelijkheden om goed geïntegreerde architectonische producten te maken. Vanwege lage oplage nog hoge prijzen.
 Complexe dakvormen [16]	Veelal specialistische lichtgewicht producten op basis van dunne film technologie.	Enkele procenten van de wereldmarkt zonnepanelen is op basis van dunne film [9].	https://www.hyetsolar.com/	Flexibele producten geven de mogelijkheid om oppervlaktes te ontsluiten die met standaardpanelen niet mogelijk zijn
 Wegen en geluidsschermen [16]	Mix van dunne film en silicium producten zijn gedemonstreerd over de laatste 10 jaar.	Er zijn weinig specifieke producten op de markt. Er wordt echter wel gebruik gemaakt van standaard Aziatische producten. De business case voor speciale producten is voornamelijk niet sterk.	Geen Nederlandse producenten meer	Regelgeving maakt dubbelrolfunctie op infrastructuur lastig. Geluidsschermen kunnen zich echter als oppervlak lenen voor zonnepanelen.
 Voertuigen [16]	Veelal kristallijn Silicium producten. Kansen voor dunne film producten vanwege vormvrijheid	Markt nog sterk in ontwikkeling en groeiende. Mogelijkheid voor sterke EU productie	https://lightyear.one/	Nu nog nichemarkt. De effecten en voordelen, bijvoorbeeld op energiesystemen worden nu onderzocht
 Parkeerterrein [16]	Voornamelijk standaard bifacial kristallijn Silicium panelen vanwege lichtdoorlaatbaarheid en gebruik gereflecteerd licht	Standaard Aziatische producten, maar met veel kansen voor Nederlandse constructiebouwers	Meerdere leveranciers van producten	Parkeerterreinen met zonnepanelen zijn een goede toepassing, zeker wanneer het aantal elektrisch aangedreven voertuigen gaat toenemen.
 Stortplaatsen, dijken en wallen [16]	Standaard siliciumzonnepanelen. Mono en bi-facial mogelijk afhankelijk van de constructie	Standaard Aziatische producten, maar met kansen voor Nederlandse constructiebouwers		Omdat het vaak zichtlocaties betreft niet altijd geschikt. Als de primaire functie waterkering is, zijn alleen specialistische constructies mogelijk

 Op land [16]	Beste optie zijn bifacial, semitransparante panelen vanwege lichtopvang aan beide zijdes en lichtdoorlaatbaarheid	Standaard silicium mono- of bifacial beschikbaar uit Aziatische markt	Nederlandse bedrijven produceren vnl monofacial panelen	Zonnepanelen, biodiversiteit en landbouw gaan prima samen. Met name agri-PV is sterk in ontwikkeling.
 Water [16]	Beste opties zijn bifacial, semitransparante panelen vanwege lichtopvang aan beide zijdes en lichtdoorlaatbaarheid	Standaard silicium mono- of bifacial beschikbaar uit Aziatische markt. Kansen voor Nederlandse constructiebedrijven. Lichtdoorlaatbaarheid bevordert plantgroei.	https://www.texel4tradition.nl/	Terwijl er al veel producten voor locaties met lage golfslag op de markt zijn, is de toepassing op zee nog volop in ontwikkeling.

3.4 Constructieve beperkingen in de utiliteitsbouw

Uit een enquête uitgevoerd door de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO) blijkt dat constructieve beperkingen de voornaamste reden zijn voor SDE-vrijval en worden ervaren als de grootste beperking voor de uitrol van grootschalige zon-PV-systemen op daken. Naar aanleiding van deze enquête hebben TKI Urban Energy en RVO SystemIQ gevraagd te onderzoeken hoeveel procent van het Nederlandse grootschalige zon-op-dak-potentieel een vorm van constructieve beperking heeft en welke interventies, en tegen welke meerkosten, daken met een beperking kunnen worden ontsloten [17].

De belangrijkste bevindingen uit dit onderzoek zijn dat ongeveer 40% van de daken geen beperkingen heeft, 45% lichte beperkingen en 15% zware beperkingen die meerdere interventies vereisen. In het rapport wordt onderscheid gemaakt tussen vier gebouwtypen: distributiecentra, agrarische bijgebouwen, (niet zware) industriepanden en oude panden. De meeste agrarische panden hebben een lichte beperking. Een kwart van de distributiecentra en industriepanden heeft een zware beperking. De belangrijkste conclusies en aanbevelingen uit dit rapport zijn [17]:

- Met kleine aanpassingen is meer dan de helft van de grote daken op Nederlandse utiliteitsbouw, geschikt voor zonnepanelen. Vooral agrarische gebouwen en oude panden zijn kansrijk. Dit kan in Nederland een extra 1,1 TWh/jr bijdragen aan de 2030 doelstelling.
- Onderzoek hoe financierbaarheid van interventies bevordert kan worden om ervoor te zorgen dat constructieve beperkingen geen barrière vormen. Interventies kunnen lastig meegefinancierd worden met een zon-op-dak project, marges voor zon-op-dak projecten dalen hierdoor.
- Dakeigenaren en de markt informeren dat een groot deel (80-90%) van de utiliteitsdaken 'geen of lichte' constructieve beperking hebben en dat interventies voor gemiddeld €15 eur per m² beschikbaar zijn. Daarbij benadrukken dat professionalisering en innovatie hebben geleid in recente kostendaling van interventies (e.g., gording-tot-gording installatie).

3.5 Brandrisico's en mitigatie

Het TNO-rapport over brandincidenten met zonnepanelen, uitgevoerd in opdracht van RVO, heeft geleid tot meer aandacht en onderzoek naar de oorzaken en mitigerende maatregelen [17]. Dit heeft geresulteerd in een betere controle op de kwaliteit van zon-PV-installaties. Vanaf 1 januari 2023 is een zogenaamde Scope 12-keuring verplicht voor gebouwen met 50 of meer zonnepanelen. Sommige verzekeraars kunnen ook een Scope 12-keuring vereisen voor installaties met minder dan 50 zonnepanelen.

Scope 12 is een specifiek inspectie- en beoordelingsprotocol voor zonne-energie-installaties in Nederland. Het is ontwikkeld door de SCIOS Stichting in samenwerking met verzekeraars en de inspectiesector om de toenemende inzet van zonne-energie en de bijbehorende risico's, met name op het gebied van brandveiligheid, aan te pakken. De Scope 12-inspectie omvat een initiële speciale inspectie (ISI) en periodieke inspecties (PI). Deze inspecties beoordelen verschillende aspecten, zoals de technische staat van de installatie, de kwaliteit van de constructie, naleving van normen en mogelijke brandveiligheidsrisico's. Dit protocol helpt ervoor te zorgen dat zonne-energie-installaties veilig en betrouwbaar zijn, wat steeds belangrijker wordt nu meer verzekeraars deze inspecties vereisen voor brandverzekeringspolissen.

Het Nederlands Instituut voor Publieke Veiligheid (NIPV) heeft met de Handreiking Risicobeheersing Advies Veilige PV-systemen richtlijnen gegeven voor het veilig installeren en gebruiken van Zon-PV systemen om brandrisico's te minimaliseren [17]. Het document behandelt de werking en kenmerken van PV-systemen, de kwaliteit van materialen, certificering en normering, en specifieke veiligheidsmaatregelen voor verschillende gebouwtypen. Ook worden brandpreventieve maatregelen en aandachtspunten voor incidentbestrijding besproken. De handreiking benadrukt het belang van onafhankelijke inspecties, zoals de SCIOS Scope 12 certificering, om de veiligheid van PV-installaties te waarborgen.'

3.6 Noodzaak tot het verder verduurzamen van de huidige generatie zonnecellen

Bij de zon-PV panelen die tot dusverre geïnstalleerd zijn, dit zijn voornamelijk siliciumzonnepanelen, zie Figuur 3.1, is tijdens het ontwerp weinig tot geen rekening gehouden met de noodzaak om deze na gebruik te kunnen recyclen. De panelen zijn niet eenvoudig te scheiden in verschillende materialen en de vrijkomende materialen worden verwerkt in laagwaardige materiaalstromen (downcycling). Ook bevatten deze panelen soms schadelijke stoffen als PFAS en Fluor, wat het proces van recycling verder compliceert. Een aantal fabrikanten zet inmiddels in op panelen die zo ontworpen zijn dat de panelen aan het einde van de levensduur beter te scheiden zijn. Ook bevatten deze panelen geen schadelijke stoffen als PFAS en zware metalen zoals lood.

Naast de mogelijkheden om panelen na gebruik te recyclen en het gebruik van schadelijke stoffen te minimaliseren, is tevens de vermindering van de CO₂-voetafdruk bij de productie van de panelen een belangrijk aandachtspunt. Voor de productie van siliciumcellen uit siliciumkwarts is een grote hoeveelheid elektriciteit nodig. Dit is een proces dat in belangrijke mate plaats vindt in China, waarbij een groot deel van de elektriciteit afkomstig is uit elektriciteit uit kolencentrales. Een aantal Europese fabrikanten streeft ernaar om de CO₂ voetafdruk verder te verminderen door het gebruik van siliciumzonnecellen die gemaakt zijn

met gebruik van duurzame energie. De volgende generatie zonnecellen (perovskiet) heeft een CO₂ voetafdruk die veel lager is dan de die van siliciumzonnepanelen. Perovskietzonnepanelen zijn echter momenteel nog niet grootschalig commercieel verkrijgbaar. Verwacht wordt dat deze in de komende vijf jaar wel beschikbaar zullen komen (zie paragraaf 3.4).

Tot slot zijn aanwijzingen dat een aantal Chinese fabrikanten gebruikmaakt van dwangarbeid bij de productie van hun zonnepanelen. Er wordt in Europees verband gewerkt aan systemen voor certificering waarbij, naast ecologische aspecten, ook het vrij zijn van dwangarbeid wordt meegenomen.

3.7 Nieuwe ontwikkelingen

In paragraaf 3.1 is een overzicht gegeven van het marktaandeel van de verschillende soorten zonnepanelen die nu commercieel verkrijgbaar zijn. Belangrijke ontwikkelingen voor de komende vijf jaar zijn de volgende generatie zonnecellen (perovskiet) als ook mass customized productie waarbij zon-PV geïntegreerd wordt in een toepassing.

Een grote belofte is de zonnecel op basis van perovskiet. Een zonnecel op basis van perovskiet heeft een aantal voordelen [17]:

- De grondstoffen voor perovskieten zijn niet schaars, ze worden op vele plekken op de wereld gevonden.
- Er is slechts een heel dun laagje perovskiet nodig (tussen de 0,5 en 1 micrometer) om een zonnecel te maken. Dat bespaart grondstoffen en heeft een positief effect op de productiekosten.
- Het productieproces waarbij perovskiet op een ondergrond wordt aangebracht is eenvoudig en het kan bij lage temperaturen. Hierdoor kost het minder energie om ze te maken en is de CO₂ voetprint relatief laag in vergelijking tot silicium zonnecellen.

Perovskiet is een dunne film zonnecel. Inmiddels worden met perovskiet zonnecellen al hogere rendementen gehaald dan met andere dunne-filmtechnologieën zoals CdTe en CIGS. Mondiaal wordt zowel door onderzoeksinstituten als industriële partijen hard gewerkt aan de opschaling van perovskiet zonnecellen (productieproces), verdere verhoging van het rendement en de stabiliteit (langere levensduur) en vermindering van de hoeveelheid lood (Pb) die nu nog wordt gebruikt. Opgemerkt moet worden dat hoewel veelbelovende resultaten worden geboekt, het hier vooral nog gaat om zonnecellen op cm² niveau.

De verwachting is dat perovskiet zonnepanelen binnen een aantal jaren commercieel verkrijgbaar zullen zijn. Naar verwachting zal het hierbij in eerste instantie gaan om een zogeheten tandemzonnecel, waarbij bovenop een siliciumzonnecel een perovskiet zonnecel is aangebracht. Hiermee moet het rendement van een zonnepaneel op termijn op 35% komen te liggen. Het bedrijf Oxford PV heeft recentelijk aangekondigd te starten met de levering van silicium/perovskiet tandem zonnecellen die geproduceerd wordt op een pilot productielijn [18]. Het gaat hier om relatief beperkte aantallen met een rendement van 24,5%. Beoogd wordt om de productie op te schalen naar een gigawatt schaal.

De introductie van een volledig perovskiet zonnecel (als dunne film) zal naar verwachting enkele jaren later plaatsvinden. De BOM en TNO werken aan een blauwdruk voor een dunne film perovskiet fabriek. Ambitie is om in de provincie Noord-Brabant een gigawattfabriek te realiseren [19], [20]. Het uiteindelijke doel is om een zogeheten tandem perovskiet zonnecel te ontwikkelen, waarbij elk deel van de perovskiet cel zo ontworpen is dat deze een ander

deel van het zonnenspectrum omzet in elektriciteit. De eerstkomende vijf jaar zullen naar verwachting alleen de silicium/perovskiet tandem zonnecellen grootschalig commercieel beschikbaar komen. Deze tandemzonnecellen kunnen in de basis op dezelfde manier worden toegepast als de huidige siliciumzonnecellen, zie paragraaf 3.2 en 3.3.

Het is niet de verwachting dat andere typen zonnecellen, zoals organische zonnecellen of varianten op CIGS zonnecellen, de komende vijf jaar grootschalig commercieel beschikbaar zullen komen. Dit geldt ook voor zonnepanelen waarbij elektriciteit direct wordt omgezet in waterstof.

Naast de hierboven beschreven technologische ontwikkelingen, zijn er marktrijpe productiemethoden, dit wordt ook mass customization genoemd, die het mogelijk maken om grote stappen te maken op het gebied van integratie van zonnepanelen in gebouwen (gevels, daken). De komende vijf jaar zullen naar verwachting verdere stappen worden gezet in de ontwikkeling hiervan. Beschikbaar oppervlak wordt hiermee beter benut waarbij esthetiek nadrukkelijk wordt meegenomen. De zonnecellen kunnen zo worden verwerkt in diverse toepassingen dat de toepassing hiervan nauwelijks opvalt of zelfs een positief esthetisch effect hebben, bijvoorbeeld door gebruik van kleuren en patronen die in de omgeving passen.

4 Aangrijpingspunten voor beleid

Zowel vanuit de overheid als de milieubeweging zijn er afwegingskaders ontwikkeld voor de volgorde waarin zon-PV op diverse oppervlakken zou kunnen worden toegepast [1], [6], [7]. In de basis vertonen de afwegingskaders een grote gelijkheid. Zowel meervoudig ruimtegebruik als rekening houden met de specifieke lokale omstandigheden zijn belangrijke criteria. Gebruik maken van het beschikbare oppervlak in de gebouwde omgeving is de preferente optie. Enkelvoudig gebruik waarbij zon-PV op areaal wordt gezet dat anders ingezet zou worden voor agrarische toepassingen wordt als minst wenselijk optie gezien.

In de NOVI is het belang om rekening te houden met het behoud van de identiteit van een gebied opgenomen [6]. Dit sluit aan op nieuwe ontwikkelingen op het gebied van zon-PV. Door gebruik te maken van zogeheten ‘mass-customized’ PV-producten kunnen zonnecellen zodanig geïntegreerd worden dat het oorspronkelijke visuele beeld blijft behouden. Hierbij wordt tevens het beschikbare oppervlak effectiever benut, wat leidt tot een hogere productie. Hier zou vanuit het regionale beleid op kunnen worden gestuurd, bijvoorbeeld door het stimuleren van voorbeeldprojecten voor integratie van zon-PV in daken (voldaksystemen) en gevels (BIPV) bij zowel nieuwbouw als grootschalige renovatie van woningen en kantoren. Dit biedt tevens kansen voor de Nederlandse PV-industrie die sterk inzet op het ontwikkelen van producten voor dit type toepassing. Doordat het gaat om een methode die (nu nog) niet standaard is in de bouwpraktijk zijn hier nu nog meerkosten aan verbonden. Indien functies gecombineerd worden, bijvoorbeeld omdat er geen dakpannen meer nodig zijn bij een voldak PV-systeem, zullen deze meerkosten snel dalen indien deze systemen gangbaar worden in de huidige bouwpraktijk. Dit geldt in het bijzonder voor die gevallen waarbij door gebruik te maken van geïntegreerde PV een constructie en bouwwijze kan worden geïntroduceerd die minder arbeidsintensief is. Voor de korte termijn is dit vooral relevant als demonstratieproject bij nieuwbouw en grootschalige renovatie.

Het vervangen van aardgas door CO₂-vrije energiedragers (elektriciteit, waterstof, warmte) vraagt om een sterke toename van duurzaam geproduceerde elektriciteit [1]. Stimulering van de toename van duurzame energie blijft noodzakelijk. Zowel het verhogen van het rendement van zonnepanelen als de betere benutting van het beschikbare oppervlak draagt hieraan bij. De huidige markt voor zon-PV wordt gedomineerd door siliciumzonnepanelen (zie paragraaf 3.1). Hiervan neemt het rendement nog beperkt toe. Een aanzienlijke rendementssprong kan gemaakt worden door gebruik te maken van tandemzonnepanelen, waarbij op een siliciumzonnecel een perovskiet zonnecel wordt gestapeld. Hiermee zijn op termijn rendementen van 35% mogelijk. Perovskiet zonnecellen zijn vooral nog een grote belofte. Wereldwijd wordt sterk ingezet op de ontwikkeling van dit type zonnecel en de verwachting is dat de eerste producten, in de vorm van een silicium/perovskiet tandem zonnecel, binnen vijf jaar commercieel beschikbaar zullen komen. De komende jaren zal een vergroting van de bijdrage van zon-PV vooral gerealiseerd moeten worden door de beter benutting van beschikbaar oppervlak en slechts in beperkte mate door rendementsverhoging. Dit is mogelijk met bestaande typen zonnecellen maar vraagt vooral

om productiemethodes voor PV-producten die zowel in formaat, kleur en/of gewicht geschikt zijn om in specifieke toepassingen geïntegreerd te worden.

Bij de stimulering van de verdere toepassing van zon-PV dient rekening gehouden te worden met netcongestie. Het betreft hier een complex vraagstuk dat vraagt om een integrale aanpak. Het bij elkaar brengen van vraag en aanbod, zoals bij woningen, kantoren en bedrijfsterreinen levert een positieve bijdrage. Het op elkaar aan laten sluiten van vraag en aanbod vraagt zowel om vraagsturing (gebruik elektriciteit als het volop beschikbaar is) als ook om opslag. Stimulering van bi-directionele laadpalen, zodat elektrische voertuigen op passende momenten kunnen worden geladen (opslag) en ontladen is een optie die overwogen kan worden. Hoe het congestievraagstuk op te lossen en vraag en aanbod op elkaar aan te laten sluiten valt buiten de scope van deze opdracht.

De verwachting is dat meervoudig gebruik van zon-PV in de agrarische sector de komende jaren sterk toe zal nemen. Het gaat hierbij om de combinatie van functies. De door klimaatverandering veroorzaakte gemiddelde mondiale temperatuurstijging zet zich in Nederland versterkt door [18]. Het verminderen van uitdroging en verlaging van temperatuur door het creëren van schaduw kan de effecten van temperatuurstijging mitigeren. De duurzaam opgewekte elektriciteit kan daarbij ingezet worden voor de eigen bedrijfsvoering. Daarnaast kan zon-PV worden ingezet voor bescherming van kwetsbare gewassen tegen hagel en vorst [13].

Voor de zonnepanelen die de afgelopen decennia zijn geïnstalleerd geldt dat bij het ontwerp nauwelijks tot niet rekening gehouden is met recycling. Voor het behalen van de overheidsdoelstellingen moet de hoeveelheid zon-PV nog sterk toenemen [1]. Het is van groot belang dat deze panelen zodanig zijn ontworpen dat deze goed te recyclen zijn. Gebruik van PFAS zou hierbij verboden kunnen worden. Ook kan gestuurd worden op de CO₂-voetafdruk en zouden alleen zonnepanelen gebruikt moeten worden waarvan de fabrikant kan garanderen dat de productie heeft plaatsgevonden zonder dwangarbeid. Ook de regionale overheid kan hier op sturen door voorwaarden op te nemen aan het verstrekken van subsidie. De subsidieregeling 'Duurzame Amsterdamse energie bijzondere zonnepanelen' voor duurzaam geproduceerde of lichtgewicht zonnepanelen is hiervan een voorbeeld [31]. Aanbevolen wordt om incentives te laten aangrijpen op deze generieke eigenschappen van zon-PV en ook de integratie van zon-PV en niet-specifieke technologie te stimuleren.

5 Samenvatting en conclusies

Om te voldoen aan de doelstellingen van het Klimaatakkoord en de transitie naar een aardgasvrij Nederland te maken, zal de productie van duurzaam geproduceerde, CO₂-vrije energiedragers, zoals elektriciteit, warmte en waterstof, tot 2050 met ongeveer een factor 10 moeten toenemen. Nederland zet hierbij vooral in op zon-PV en wind op zee. Het is derhalve van belang om volop in te blijven zetten op de verdere groei van zon-PV (paragraaf 2.1). Zowel de door de overheid als milieuorganisaties ontwikkelde afwegingskaders, zoals de NOVI en de zonneladder, geven aan dat allereerst ingezet moet worden op meervoudig gebruik van functies (meervoudig ruimtegebruik). In de NOVI wordt hierbij expliciet het belang van het behoud van het oorspronkelijke karakter benadrukt. Benutting van het potentieel in de gebouwde omgeving (woningen, kantoren, bedrijfsterreinen) wordt gezien als de eerste optie (paragraaf 2.2).

Op zonnige dagen is het (elektrisch) vermogen (GW) dat geproduceerd wordt door zon-PV meer dan voldoende om te voorzien in de totale Nederlandse elektriciteitsvraag (GW). Doordat het nieuwe vermogen aan zon-PV en wind sneller toeneemt dan de elektrificatie van de vraag, is ook het aantal dagen met lage of zelfs negatieve energieprijzen toegenomen. De toename van productie uit zon-PV en wind en de elektrificatie van de energievraag draagt bij aan de congestieproblemen op het elektriciteitsnet. De verwachting is dat de problemen rondom netcongestie de komende jaren verder zullen toenemen. De problematiek rond netcongestie vraagt om complexe, integrale oplossingen. Het bij elkaar brengen van vraag en aanbod is een maatregel die positief bijdraagt aan het oplossen van de congestieproblematiek, al zal een brede set aan oplossingen nodig zijn om dit probleem effectief op te lossen (paragraaf 2.6). Dit valt echter buiten de scope van deze opdracht.

Door gebruik te maken van geïntegreerde oplossingen (BIPV), zoals voldaksystemen bij nieuwbouw en grootschalige renovatie alsook integratie van zon-PV in gevels, wordt het beschikbare oppervlak effectief benut. Deze systemen zijn esthetisch zodanig vorm te geven dat dit, in lijn met de NOVI aanbevelingen, niet ten koste gaat van het karakter van de omgeving. De Nederlandse PV-industrie zet vol in op deze zogeheten mass-customized producten waarbij in vorm, kleur en/of gewicht aangesloten wordt op de eisen die gesteld worden aan geïntegreerde producten (paragraaf 3.3).

De verwachting is dat het belang van meervoudige toepassing van zon-PV in de agrarische sector de komende jaren sterk toe zal nemen. Bedacht moet worden dat de doelstelling om de gemiddelde temperatuurstijging door klimaatverandering te beperken betrekking heeft op een mondiaal gemiddelde. De gemiddelde temperatuur in Nederland is, met ruim 2 °C sinds 1901, ruim een factor twee sneller gestegen dan het mondiaal gemiddelde. Zon-PV kan hierbij ingezet worden voor het creëren van schaduw, verlaging van temperatuur en het tegengaan van verdroging en bescherming van kwetsbare gewassen tegen hagel en nachtvorst. Bijkomend voordeel is dat de opgewekte elektriciteit inzetbaar is voor de eigen bedrijfsvoering.

Grote stappen in het rendement van zon-PV zijn niet meer haalbaar met de conventionele silicium gebaseerde zonnecellen die nu de markt domineren. Van perovskiet zonnecellen, die alom worden gezien als grote belofte voor de nabije toekomst, wordt verwacht dat deze binnen vijf jaar grootschalig commercieel beschikbaar komen. Verwacht wordt dat deze in eerste instantie toegepast zullen worden in combinatie met een silicium cel waarbij een silicium/perovskiet tandemzonnecel ontstaat. Hiermee kan op termijn een rendement van circa 35% worden behaald. Op de lange termijn zou de silicium bodemcel hierbij mogelijk vervangen kunnen worden door een perovskiet zonnecel zodat een perovskiet/perovskiet tandem zonnecel ontstaat. De eerstkomende jaren zal een verhoging van de productie van opwek uit zon-PV vooral behaald moeten worden door een betere benutting van het beschikbare oppervlak. De verwachting is dat pas over een jaar of vijf de bijdrage door verhoging van het rendement van zon-PV een significante bijdrage gaat leveren bij het commercieel beschikbaar komen van tandem zonnecellen.

Aanbevolen wordt om bij het sturen op meervoudig gebruik in specifieke toepassingsgebieden tevens algemene criteria op te nemen die betrekking hebben op circulariteit en arbeidsomstandigheden tijdens de productie van de zonnepanelen [31]. Een voorbeeld hiervan is de subsidieregeling 'Duurzame Amsterdamse energie bijzondere zonnepanelen' voor duurzaam geproduceerde of lichtgewicht zonnepanelen. Op een vergelijkbare wijze zou duurzame PV-panelen gestimuleerd kunnen worden door een koppeling met subsidieregelingen voor asbestsanering. Er zou bij voorkeur inzet moeten worden op panelen zonder PFAS met een lage CO₂-voetprint die zodanig zijn ontworpen dat recycling tot hoogwaardige materialen (in plaats van downcycling) mogelijk is.

Referenties

- [1] Klimaatakkoord, „Klimaatakkoord,” [Online]. Available: <https://www.klimaatakkoord.nl/elektriciteit>.
- [2] CBS, „Vermogen zonnepanelen iets minder sterk toegenomen in 2023,” [Online]. Available: <https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2024/25/vermogen-zonnepanelen-iets-minder-sterk-toegenomen-in-2023#:~:text=Het%20totale%20opgestelde%20vermogen%20was,2023%20bijna%204%20duizend%20watt..>
- [3] N. E. Dashboard, „Dataportaal Totale Elektriciteitsproductie,” [Online]. Available: <https://ned.nl/nl/dataportaal/energie-productie/elektriciteit/totale-elektriciteitsproductie>.
- [4] N. Stroom, „Actuele Energieprijzen,” [Online]. Available: <https://nieuwestroom.nl/actuele-energieprijzen/>.
- [5] COMCAM. [Online]. Available: <https://www.comcamenergy.com/blog/record-negatieve-stroomprijs-2023/>.
- [6] DNB, „Hoe we economisch geraakt worden door de oorlog in Oekraïne,” 17 3 2022. [Online]. Available: <https://www.dnb.nl/algemeen-nieuws/achtergrond-2022/hoe-we-economisch-geraakt-worden-door-de-oorlog-in-oekraïne/>. [Geopend 10 2024].
- [7] SolarMagazine, „Strengere regels China voor nieuwe fabrieken zonnepanelen om prijzenoorlog te stoppen,” 12 6 2024. [Online]. Available: <https://solarmagazine.nl/nieuws-zonne-energie/i38023/strengere-regels-china-voor-nieuwe-fabrieken-zonnepanelen-om-prijzenoorlog-te-stoppen>. [Geopend 10 2024].
- [8] Rijksoverheid, „Blijft de salderingsregeling voor zonnepanelen bestaan?,” [Online]. Available: <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/energie-thuis/vraag-en-antwoord/blijft-de-salderingsregeling-voor-zonnepanelen-bestaan#:~:text=Het%20kabinet%20wil%20de%20salderingsregeling,moeten%20dit%20plaan%20nog%20goedkeuren..> [Geopend 10 2024].
- [9] C. Delft, „Thuisbatterijen in de energietransitie. Netcongestie, elektriciteitshandel en overheidsbeleid,” 11 2023. [Online]. Available: <https://ce.nl/publicaties/thuisbatterijen-in-de-energietransitie/>. [Geopend 10 2024].
- [10] D. V. / S. e. verzekeringswerken, „Risico's bij zonnepanelen en de rol van de assurantieadviseur,” 15 mei 2023. [Online]. Available: <https://vereende.nl/kenniscentrum/risico-s-bij-zonnepanelen-en-de-rol-van-de-assurantieadviseur>. [Geopend 10 2024].
- [11] RVO, „Van Split Incentive naar Shared Incentive; Publicatienummer: RVO-217-2021/BR-DUZA,” december 2021. [Online]. Available: https://www.rvo.nl/files/file/2021/12/Rapport-van-split-incentive-naar-shared-incentive-_0.pdf. [Geopend 10 2024].
- [12] M. v. B. Z. e. Koninkrijksrelaties, „Meer over de Nationale Omgevingsvisie,” [Online]. Available: <https://www.denationaleomgevingsvisie.nl/actueel/over+de+novi/nationale+omgevingsvisie+in+het+kort/default.aspx>.

- [13] M. v. B. Z. e. Koningrijksrelaties, „Aangescherpte voorkeursvolgorde zon,” 26 10 2023. [Online]. Available: <https://open.overheid.nl/documenten/5421fe0d-fb6f-4c83-bb80-f4546457578a/file>. [Geopend 10 2024].
- [14] N. e. Milieufederaties, „Constructieve Zonneladder,” [Online]. Available: <https://www.natuurenmilieufederaties.nl/nieuws/constructieve-zonneladder-helpt-overheden-bij-goede-inpassing-zonne-energie/>.
- [15] Tennet, „Netcapaciteitskaart,” [Online]. Available: <https://www.tennet.eu/nl/de-elektriciteitsmarkt/congestiemanagement/netcapaciteitskaart>.
- [16] I. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, „Photovoltaics report,” Fraunhofer, ISE, Freiburg, 2024.
- [17] T. U. Energy, „Ruimtelijk potentieel van zonnestroom in Nederland,” 2021. [Online]. Available: https://topsectorenergie.nl/documents/136/Ruimtelijk_potentieel_van_zonnestroom_in_Nederland.pdf.
- [18] Klimaatakkoord, „Kennis- en innovatieagenda,” [Online]. Available: <https://www.klimaatakkoord.nl/themas/kennis--en-innovatieagenda>.
- [19] G. Alkmaar, „Het Energieleverend Geluidsschermb – feiten en fabels,” [Online]. Available: <https://www.alkmaar.nl/actueel/het-energieleverend-geluidsschermb-feiten-en-fabels/>.
- [20] Groenleven, „AGRI-PV,” [Online]. Available: <https://groenleven.nl/agri-PV/>.
- [21] TNO, „Zon op Dijken,” 2023. [Online]. Available: <https://publications.tno.nl/publication/34640577/cHfx9W/TNO-2023-R10323.pdf>.
- [22] TNO, „Fieldlab drijvende zonnepanelen,” [Online]. Available: <https://www.tno.nl/nl/technologie-wetenschap/laboratoria/fieldlab-drijvende-zonnepanelen/>.
- [23] T. U. Energy, „Ruimtelijk Potentieel van zonnestroom in Nederland,” TKI, Utrecht, 2021.
- [24] RVO, „Constructieve beperkingen voor zon-op-dak in Uitlithitsbouw - Eindrapport,” 29 11 2021. [Online]. Available: https://www.rvo.nl/sites/default/files/2021/12/rapportage%20voor%20zon%20op%20gebouwen%20constructieve%20beperkingen_zon%20op%20gebouw.pdf. [Geopend 10 2024].
- [25] E. Bende en N. Dekker, „Brandincidenten met fotovoltahische (PV). Een inventarisatie,” TNO, <https://publications.tno.nl/publication/34633946/bhxqSn/TNO-2019-R10287.pdf>, 2019.
- [26] NIPV, „Handreiking risicobeheersing - Advies veilige PV-systemen,” [Online]. Available: <https://nipv.nl/wp-content/uploads/2022/03/20201201-BRWNL-Handreiking-risicobeheersing-Advies-veilige-PV-systemen.pdf>.
- [27] TNO, „Perovskietzonnecellen,” [Online]. Available: <https://www.tno.nl/nl/duurzaam/hernieuwbare-elektriciteit/zonnetechnologie/perovskietzonnecellen/>.
- [28] S. Magazine, „Oxford PV start levering nieuwe generatie zonnepanelen met perovskiet tandemtechnologie,” [Online]. Available: <https://solarmagazine.nl/nieuws-zonne-energie/i38456/oxford-PV-start-levering-nieuwe-generatie-zonnepanelen-met-perovskiet-tandemtechnologie>. [Geopend 10 2024].
- [29] TNO, „Solar maakindustrie terug naar Brabant,” 10 2024. [Online]. Available: <https://www.tno.nl/nl/duurzaam/hernieuwbare-elektriciteit/zonnemodules-massamaatwerk/solar-maakindustrie/>.

- [30] BOM, „InnovatieCoalitie Solar haalt Solar-maakindustrie terug naar Brabant,” 10 2024. [Online]. Available: <https://www.bom.nl/showcases/innovatiecoalitie-solar-haalt-solar-maakindustrie-terug-naar-brabant>.
- [31] KNMI, „KNMI nieuws,” [Online]. Available: <https://www.knmi.nl/over-het-knmi/nieuws/nederland-warmt-ruim-2-keer-zo-snel-op-als-de-rest-van-de-wereld>.
- [32] G. Amsterdam, „Subsidie Duurzame Amsterdamse energie bijzondere zonnepanelen,” [Online]. Available: <https://www.amsterdam.nl/subsidies/subsidieregelingen/subsidie-duurzame-amsterdamse-energie/>. [Geopend 10 2024].
- [33] Rijksoverheid, „Klimaatverandering,” [Online]. Available: <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/klimaatverandering/gevolgen-klimaatverandering#:~:text=Gevolgen%20klimaatverandering&text=natuur%20en%20milieu,-,Zo%20is%20de%20gemiddelde%20temperatuur%20van%20de%20aarde%20in%20de,veranderen%2C%20bijvoorbeeld%20d>.
- [34] N. Nederland, „Inzicht in capaciteit van het net,” [Online]. Available: <https://www.netbeheernederland.nl/artikelen/nieuws/inzicht-capaciteit-van-het-net>.

Energy & Materials Transition

Westerduinweg 3
1755 LE Petten
www.tno.nl