



ROADMAP

PV Systemen en Toepassingen

ROADMAP

PV Systemen en Toepassingen

Auteurs:

Wiep Folkerts (SEAC)

Wilfried van Sark (Universiteit Utrecht)

Corry de Keizer (SEAC)

Wijnand van Hooff (TKI Urban Energy)

Menno van den Donker (SEAC)

December 2017

Deze studie is uitgevoerd in opdracht van de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO) in samenwerking met de TKI Urban Energy

Inhoud

Voorwoord: de Zonne-energie Roadmap NL	2
1. Van Nationale Wetenschapsagenda naar Roadmap PV Systemen en Toepassingen	4
2. PV Systemen en Toepassingen	7
3. PV parken op land	16
4. PV en gebouwen	18
4.1. Market drivers voor PV op en aan gebouwen	18
4.2. Innovaties in BIPV	20
4.3. PVT Systemen in de gebouwde omgeving	23
5. PV en infrastructuur	27
6. Drijvende zonneparken	30
7. PV in het energiesysteem	33
8. Overige systeemcomponenten	36
8.1. Omvormers	36
8.2. Schaduwlineariteit, MLPM en smart modules	37
9. Overige toepassingen	38
9.1. Toepassingen van III-V gebaseerde PV	38
9.2. PV toepassingen in de glastuinbouw	39
9.3. PV toepassingen op voer- en vaartuigen	39
10. Innovatiethema's	41
Referenties	44
Dankwoord	46

Voorwoord: de Zonne-energie Roadmap NL

De TKI Urban Energy heeft in samenwerking met het ministerie van Economische Zaken (EZ) en de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO) het initiatief genomen om tot een vernieuwde roadmap zonne-energie voor Nederland te komen. Dit initiatief kan niet los gezien worden van de in 2016 tot stand gekomen Nationale Wetenschapsagenda (NWA) en de Kennis- en Innovatieagenda van de TKI Urban Energy.

De zonne-energie roadmap NL vormt een uitwerking van de NWA op het onderwerp zonne-energie. Daarbij schetst de roadmap ook het perspectief voor de Kennis- en Innovatie agenda voor de langere termijn.

Doelen van de zonne-energie roadmap NL zijn:

- Het in kaart brengen van de verschillende zonnestroom (PV)-toepassingen in Nederland en de potentiëlen per toepassing;
- Visie op de innovatierichting, die nodig is voor realisatie van de genoemde potentiëlen;
- Monitoring van voortgang van het innovatieprogramma;
- Sturing en focus voor de onderzoeks- en ontwikkelingsactiviteiten in Nederland (zowel m.b.t. technologie als m.b.t. systemen en toepassingen);
- Eventuele bijstelling van het innovatiebeleid en/of de innovatie-instrumenten vanuit het ministerie van Economische Zaken (EZ).

De zonne-energie roadmap NL draagt bij aan het realiseren van de doelen en ambities van Nederland en de Nederlandse zonne-energie sector. Onderstaande tabel vat de meest recente status (2016) van deze doelen en ambities samen. Op basis van o.a. deze nieuwe Roadmap PV Systemen en Toepassingen, wordt onderstaande tabel binnenkort geactualiseerd.

Tabel 1: Doelen en ambities van de zonne-energie sector in Nederland (Bron: TKI Urban Energy)

Sector goals and ambitions (NB: indicative numbers still to be verified)	Unit	Achieved in	Ambition for		Potential
		2015	2020	2030	2050
Total installed capacity of solar PV systems in NL	GWp	1,5	6	20	>100
Annual solar energy generated by PV systems in NL (total annual consumption is ≈100 TWh)	TWh	1,2	5	16	>80
Annual turnover of the Dutch solar PV sector	Miljard €	2	3	4	6
Annual export of the Dutch solar PV sector	Billion €	0,2	1	2	3
Total employment in het Dutch solar PV sector	FTE	10.000	15.000	20.000	30.000

Deze ambitieuze doelstellingen zijn alleen haalbaar als technologieën doorontwikkeld worden en optimaal worden geïntegreerd in de leefomgeving. Daarom bestaat de zonne-energie roadmap NL uit een viertal onderdelen:

1. Wafer based crystalline silicon PV technologies [1]
2. Thin films PV technologies (TF PV technologies) [2]
3. Hybrid tandem PV technologies (combined the first two technology fields)
4. PV Systemen en Toepassingen

Dit rapport beschrijft het als vierde genoemde onderdeel: de Roadmap PV Systemen en Toepassingen. Het energie-innovatiebeleid van het ministerie van EZ(K) in Nederland is sinds 2012 gericht op specifieke thema's, waaronder innovatieve zonne-energiesystemen en -toepassingen. Door de ontwikkelingen op dit gebied en om vragen ten aanzien van de technologische en economische haalbaarheid van technologieën en product-marktcombinaties te kunnen beantwoorden, is er behoefte aan een duidelijke roadmap voor de korte (1-5 jaar) en de middellange (5-15 jaar) termijn, met een doorkijk tot 2050, het jaar dat in het algemeen als ijkpunt voor de voltooiing van de energietransitie wordt gezien.

De huidige status van producten, technieken en innovatie voor PV-integratie kenmerkt zich door:

- Een beginnende markt met actieve kleine spelers en afwachende grotere spelers.
- Relatief dure producten door te weinig schaalgrootte, gebrek aan standaardisatie en onvoldoende rationalisatie van het productieproces.
- Een veelheid van relatief kleine innovatieprojecten. Deze projecten bevatten weliswaar vaak goede ideeën, maar de individuele projecten beogen meestal een specifieke TRL-stap [10] te maken met enkele specifieke partijen op een specifieke product-marktcombinatie, waarbij vaak te weinig sprake is van samenhang tussen de projecten en nog te weinig voortgebouwd wordt op elkaars resultaten.

De kernvragen die op het gebied van PV systemen en toepassingen voor ons liggen kunnen samengevat worden als:

- Hoe kunnen zonne-energieparken op land beter functioneel en visueel geïntegreerd worden?
- Hoe kunnen bouwproducten succesvolle zonne-energiebouwproducten worden?
- Hoe kunnen we PV op een succesvolle manier integreren in onze fysieke infrastructuur?
- Hoe kunnen we succesvol ons waterareaal benutten voor de opwekking van zonne-energie?
- Hoe kunnen we grote hoeveelheden PV optimaal integreren in ons energiesysteem?

Dit zijn complexe vraagstukken, alle met diverse technische, economische en maatschappelijke aspecten. Met deze roadmap willen we richting geven aan het innovatieprogramma dat de genoemde vraagstukken adresseert. Daarbij kiezen we qua geografische scope voor een focus op Nederland. Op de gebieden waar we als Nederland de kans hebben voorop te (blijven) lopen, zoals bijvoorbeeld drijvende zonne-energiesystemen en Gebouw-geïntegreerde PV (Building Integrated PV = BIPV) ontstaan vanzelfsprekend exportkansen.

1. Van Nationale Wetenschapsagenda naar Roadmap PV Systemen en Toepassingen

De energietransitie is een van de onderzoeksthema's (de zogeheten routes) in de Nationale Wetenschapsagenda (NWA). De NWA is in 2016 gepubliceerd door een kenniscoalitie bestaande uit VSNU, KNAW, NWO, Vereniging Hogescholen, TO2, VNO-NCW en MKB-Nederland. De ministeries van Onderwijs, Cultuur en Wetenschap en van Economische Zaken traden namens het kabinet op als opdrachtgever van de kenniscoalitie. De NWA is richtinggevend voor de programmering van de partners van de kenniscoalitie, de ontwikkelingsrichting van de nationale onderzoeksinstituten en de investeringen in grote onderzoeksfaciliteiten [3].

De route Energietransitie beschrijft tien belangrijke en urgente uitdagingen. Twee van deze uitdagingen vinden direct een deeltwerking in de Roadmap PV systemen en toepassingen. Namelijk:

Elk oppervlak wekt duurzame energie op

In deze uitdaging gaat het om efficiënte en goedkope opwekking van zonne-energie, windenergie en aardwarmte door gebouwen, infrastructuur, landschap, water en ondergrond.

En:

Gebouwen als energiecentrale en vervoermiddelen als energiebuffer

Gebouwen en vervoermiddelen kunnen niet alleen veel energie-efficiënter worden, maar ook een actieve rol gaan spelen in het energiesysteem.

Een aantal andere uitdagingen vanuit de energietransitie, gericht op het ontstaan van een flexibel efficiënt en slim energiesysteem, raken weliswaar aan de Roadmap PV systemen en toepassingen, maar vormen niet de kerndoelen. Dit wordt toegelicht in hoofdstuk 7 van dit rapport.

Opwekking van duurzame energie is een belangrijke pijler onder de duurzame energiehuishouding. Kijken we specifiek naar zonne-energie, dan gaat het om efficiënte en goedkope zonne-energie, die op een aantrekkelijke en maatschappelijk geaccepteerde wijze grootschalig wordt ingepast in de beperkte ruimte in Nederland: gebouwen, infrastructuur, landschap, water en ondergrond.

De bijbehorende uitdagingen vallen op te delen in twee categorieën:

Technologie:

Het omzettingsrendement van zonlicht naar stroom moet verdubbelen, de kostprijs moet nog ongeveer een factor 4 omlaag (in de zonnige delen van de wereld betekent dat effectief 1 €/kWh) en er moeten betaalbare flexibele technologieën worden ontwikkeld die integratie van zonnecellen in gebouwen en andere objecten mogelijk maken. Productie van brandstof met behulp van zonlicht moet een volwaardige bouwsteen voor het energiesysteem worden.

Systemen en toepassingen:

Er moeten aantrekkelijke en betaalbare oplossingen komen voor integratie van zonnecellen in gebouwen, infrastructuur en landschap. Wateroppervlak, en uiteindelijk de zee moeten worden ontsloten om zonne-energie op te wekken.

In de Kennis- en Innovatieagenda [4] van de TKI Urban Energy zijn vijf programmalijnen ontwikkeld:

1. Zonnestroomtechnologie
2. Warmte- en koude-installaties
3. Multifunctionele bouwdelen
4. Flexibele energie-infrastructuur
5. Energieregelsystemen en -diensten

We kunnen de relatie tussen deze roadmap en de vijf programmalijnen als volgt samenvatten:

Tabel II: Relatie tussen deze roadmap en de programmalijnen uit de Kennis- en Innovatieagenda van de TKI Urban Energy.

Roadmap PV Systemen en toepassingen	Kennis- en Innovatieagenda van de TKI Urban Energy
Zonneparken op land	Uitdagingen m.b.t. landschappelijke en functionele integratie van zonneparken zijn nog onvoldoende belegd in de kennis- en innovatieagenda.
PV en gebouwen	Programmalijn 3 voor integratieproducten. Programmalijn 1 voor geavanceerde PV modules voor gebouwen en voor andere systeemcomponenten voor de gebouwde omgeving. Programmalijn 2 voor integratie met zonthermische installaties (PVT) en warmtepompen.
PV en infrastructuur	Programmalijn 3 voor integratieproducten. Programmalijn 1 voor andere systeemcomponenten voor integratie in de infrastructuur.
Drijvende PV parken	Nog onvoldoende goed belegd in de kennis- en innovatieagenda.
Grootschalige PV in het energiesysteem	Programmalijnen 4 en 5. Het betreft hier o.a. combinaties van PV opwekking met opslag, bevorderen van zelfconsumptie, verbinding van PV systemen met smart grids.
Overige onderwerpen	Programmalijn 1 voor BOS componenten en omvormers. Nog onvoldoende belegd in de kennis- en innovatieagenda zijn PV toepassingen in voer- en vaartuigen.

In een rapport van het Planbureau voor de Leefomgeving, wordt het klimaatakkoord van Parijs voor Nederland vertaald in de noodzaak om in 2050 minstens 80% CO₂ emissiereductie te realiseren [5]. Zonder CO₂ opslag of kernenergie betekent dit ten minste 80% hernieuwbare energie. Zonne-energie kan hiervan een substantieel deel voor zijn rekening nemen.

De energietransitie heeft enorme consequenties voor de inrichting van de ruimte in Nederland. Zowel grootschalige wind- en zonne-energie als de inrichting van elektriciteits- en warmtenetten hebben grote impact. Vraagstukken van inpassing en planning en het vermijden van ongewenste sub-optimalisaties zijn daarbij belangrijk.

Het rapport Energie en Ruimte [6] behandelt de vraag hoeveel ruimte het duurzaam opwekken van energie zal vragen in Nederland, en hoe dat kan worden ingepast. Aan de orde komen warmte, elektriciteit, besparing, CO₂ opslag, windenergie en zonne-energie. Voor wat betreft PV worden naast toepassing op daken, zonneakkers benoemd, waarbij de overheid regie zal moeten voeren op planologische inpassing. Combinatie met windparken wordt in deze studie noodzakelijk geacht ten behoeve van een aantal grootschalige Nationale Energielandschappen. De ruimtelijke impact van dit

alles wordt door middel van energietransitie kaarten met 2050 als horizon getoond, waarbij ook consequenties van keuzes helder worden gemaakt. Voor PV worden zoekgebieden geïdentificeerd die in potentie 200 PJ energie kunnen opwekken op middellange termijn. Het rapport concludeert dat een groot deel (90 PJ) van de potentie uit private initiatieven moet komen (daken en zonneakkers), naast een kleiner deel (60 PJ) dat opgewekt kan worden op door de overheid in beheer zijnde gebieden, zoals infrastructuur. Het rapport suggereert tenslotte de grote potentie op zee.

Een ander document dat de relatie tussen de energietransitie en het ruimtegebruik in kaart brengt, is de 10-pager Ruimte [6A]. Het aspect ruimte wordt hierin gezien als dwarsdoorsnijdend thema in de Nederlandse energieagenda. Het rapport pleit voor een nationale ruimtelijke strategie voor de energietransitie, met daarin speciale aandacht voor hotspots (zeehavens, knooppunten, landschappen in transitie), de netinfrastructuur inclusief opslag en het inzetten van Rijksvastgoed.

De Roadmap PV Systemen en Toepassingen (deze roadmap) geeft een bottom-up invulling aan de allocatie van PV toepassingen in Nederland en de daarvoor benodigde integratie- en innovatie-uitdagingen.

2. PV Systemen en Toepassingen

Grote zonnestroomcentrales op land worden in een hoog tempo kosteneffectiever. Door kostendaling van de PV technologie in combinatie met slimme financieringsconstructies worden in zogeheten PPA contracten (power purchase agreements) steeds lagere prijsniveaus bereikt. Zo is in 2017 een PPA contract getekend voor 2,1 €/kWh voor een 350 MWp zonnepark te realiseren in Abu Dhabi in 2019. Ook in Duitsland zijn de eerste PPA contracten onder de 5 €/kWh gesloten. Het is dan ook belangrijk om de vraag te stellen: als zonnestroom parken op land zo goedkoop zijn, waarom willen we dan allerlei ingewikkelde zaken doen zoals drijvende PV parken en BIPV?

Daarvoor zijn de volgende motivaties te noemen:

1. Grond is schaars

In veel landen en zeker ook in Nederland is de druk op het ruimtegebruik hoog. Agrarisch grondgebruik, wonen, bedrijven en infrastructuur strijden om ruimtelijke inpassing. Voor een substantiële bijdrage van zonne-energie aan de Nederlandse energietransitie is veel oppervlakte nodig (honderden km²). Een dermate groot gebruik van oppervlakte is in concurrentie met ander landgebruik (verkeersterrein, bebouwd terrein, agrarisch terrein, etc.) tenzij we geïntegreerde oplossingen met dubbel ruimtegebruik implementeren.

Agrarisch Terrein 22000 km ²	Bos 3500 km ²	Woon- terrein 2500 km ²	Bedrijven terrein 900 km ²	Ver- keers terrein 1200 km ²
			Overig 900 km ²	
	Open natuur 1500 km ²	Buitenwater 4000 km ²	Binnenwater 4000 km ²	
	Recreatie 1000 km ²			

Figuur 1: Bodemgebruik in Nederland in 2012, totaal 41.543 km². Bron: CBS [9]. In deze figuur is Buitenwater gedefinieerd als Waddenzee, Oosterschelde, Westerschelde en het gemeentelijk ingedeeld gedeelte van de Noordzee. Daarnaast is er nog de Nederlandse exclusieve economische zone van de Noordzee ter grootte van 57.000 km².

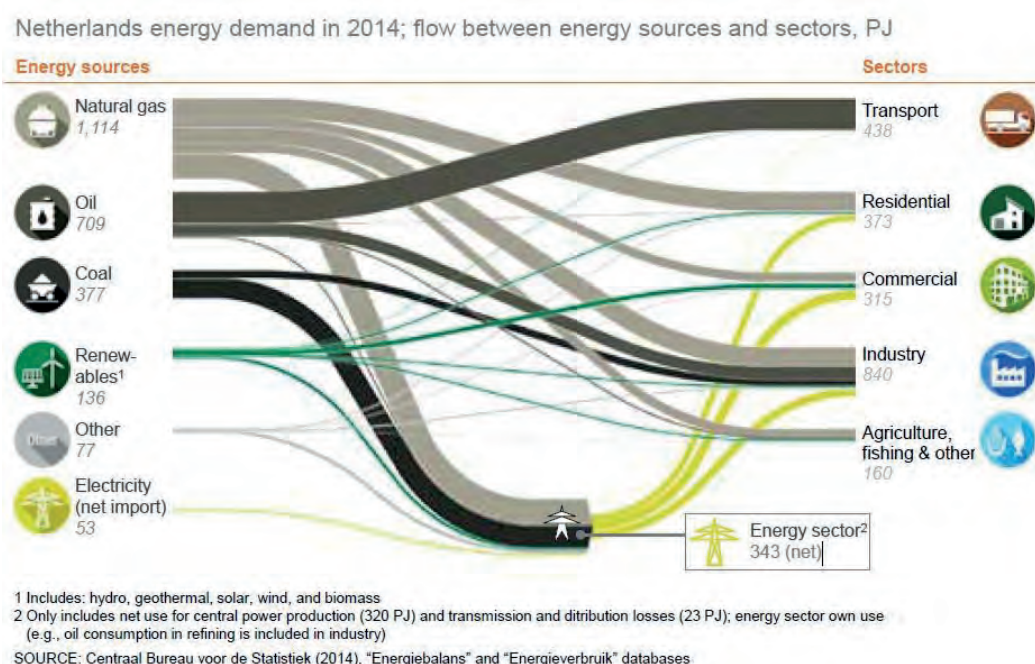
Als het om de aanleg van grootschalige PV parken gaat, speelt behalve kwantitatieve beschikbaarheid van grond en ruimte, ook de kwaliteit van de publieke ruimte een belangrijke rol. Dit wordt vaak duidelijk door bezwaren van omwonenden en andere belanghebbenden die de zonneparken lelijk vinden of niet passend in de omgeving. Onvoldoende oog voor landschappelijke inpassing brengt hoge stakeholder management kosten met zich mee voor de ontwikkelaar of zelfs een blokkade op de aanleg van het beoogde PV park.

Ook in bredere zin is maatschappelijk draagvlak essentieel. Wordt het acceptabel geacht om landbouwgrond op te offeren, zo lang veel dakoppervlak nog onbenut is?

Het is daarom van belang om enerzijds naar andere uitvoeringsvormen dan zonneparken op land te kijken, en anderzijds opties te ontwikkelen voor betere landschappelijke en functionele integratie van zonneparken op land.

2. Opwek waar de vraag is

Figuur 2 geeft het flowdiagram tussen energiebronnen en energiegebruik voor Nederland. Samen met opslag en transport vormt dit flowdiagram de blauwdruk van het Nederlands energiesysteem. Opslag is nodig als (voor de totale energiemix) opwekking en gebruik niet op dezelfde tijd plaatsvinden. Transport is nodig als opwekking en gebruik niet op dezelfde plaats plaatsvinden. Opslag en transport gaan gepaard met grote investeringen. Ongeveer 32% van het energiegebruik in Nederland vindt plaats in en om gebouwen (residentieel en commercieel).



Figuur 2: Flowdiagram tussen energiebronnen en energiegebruik [8].

Om onnodig grote investeringen in de energie transport- en distributie-infrastructuur te vermijden, is het belangrijk om waar mogelijk de energie op te wekken daar waar de vraag is. Het vermijden van deze investeringen door de netbeheerders betreft een publiek belang, dat via regelgeving vertaald wordt in economische prikkels voor private partijen en huishoudens. Een voorbeeld hiervan is regelgeving m.b.t. (bijna) energieneutraal bouwen.

3. Kosteneffectiviteit door multifunctionaliteit

Integratie van PV in gebouwen en infrastructuur kan behalve het ontsluiten van meer beschikbaar oppervlak voor PV ook vanuit kosten gemotiveerd zijn. Dat is het geval als bijvoorbeeld vanwege dubbel materiaalgebruik, de toegevoegde kosten van het PV systeem in het geïntegreerde product lager zijn dan de kosten van een PV park op land.

Behalve de hierboven genoemde drie belangrijkste motivaties, kunnen er nog andere redenen zijn voor een systeemoplossing die afwijkt van een standaard net-gekoppeld zonnepark op land. Op locaties waar geen elektriciteitsnet aanwezig is en het duur is om dat aan te leggen, kan men kiezen

voor een stand-alone PV systeem in combinatie met (batterij-) opslag. In Nederland speelt deze market driver een zeer beperkte rol.

Verder willen we op deze plaats nog noemen dat in sommige gevallen de meerwaarde van een gekozen PV toepassing juist zit in de combinatie van verschillende technologieën. Dit geldt bijvoorbeeld voor de toepassing van PVT systemen in energie-neutrale woningen (zie paragraaf 4.4) en voor de toepassing van combinaties van PV met opslag (zie ook hoofdstuk 7).

In de tabel hieronder geven we een overzicht voor de genoemde categorieën van PV systemen en toepassingen in relatie tot de onderliggende motivaties.

Tabel III: Overzicht van (maatschappelijke) motivaties voor innovatieve PV toepassingen.

PV Systemen en Toepassingen		<i>Motivatie ("Waarom iets anders doen dan standaard netgekoppelde zonneparken op land?")</i>				
Overzicht product-markt combinaties		1	2	3		
<i>Product</i>	<i>voor:</i>	<i>Grond is schaars (draagvlak)</i>	<i>Opwek waar de vraag is</i>	<i>Kosteneffectief door multifunctie</i>	<i>Vraag waar geen net-koppeling</i>	<i>Meerwaarde in technocombi</i>
1. PV parken op land en gebouwen						
Zonneparken op land	locaties waar landschappelijke inpassing <i>wel</i> van belang is	X				
2. PV en gebouwen						
PV systemen	schuine daken, met name woningbouw	X	X	X		
PV systemen	platte daken, met name utiliteitsbouw	X	X	X		
PV systemen	agrarische daken, met name schuren en stallen	X	X	X		
PV systemen	gevels	X	X	X		
Semitransparante PV systemen	ramen, overkappingen en atriums	X	X	X		
Semitransparante PV systemen	kassen		X	X		
PVT systemen	(bijna) energieneutrale of gasloze woningen		X	X		X
3. PV en infrastructuur						
Geïntegreerde PV systemen	dijken, stortplaatsen, wegdek, geluidschermen	X		X		
4. Drijvende PV parkern						
Drijvende zonneparken	golflagcategorie 1 (bassins), t/m 3 (groot binnenwater)	X		x		
Drijvende zonneparken	golflagcategorie 4 (zee)	X				
5. Integratie PV in het energiesysteem						
Combisystemen PV met opslag	wijken en appartementencomplexen					X
Combisystemen PV met opslag	locaties zonder elektriciteitsnet				X	
6. Overig						
Geïntegreerde PV systemen	voer- en vaartuigen				X	
PV systemen	ruimtevaart				X	

De volgende stap is om te kijken naar marktpotentie van de verschillende genoemde toepassingen. We kijken daarvoor allereerst naar het totaal aanwezige oppervlak met een bepaalde functionaliteit (daken, gevels, dijken, etc.). Om deze getallen te verkrijgen hebben we gebruik gemaakt van CBS gegevens [9].

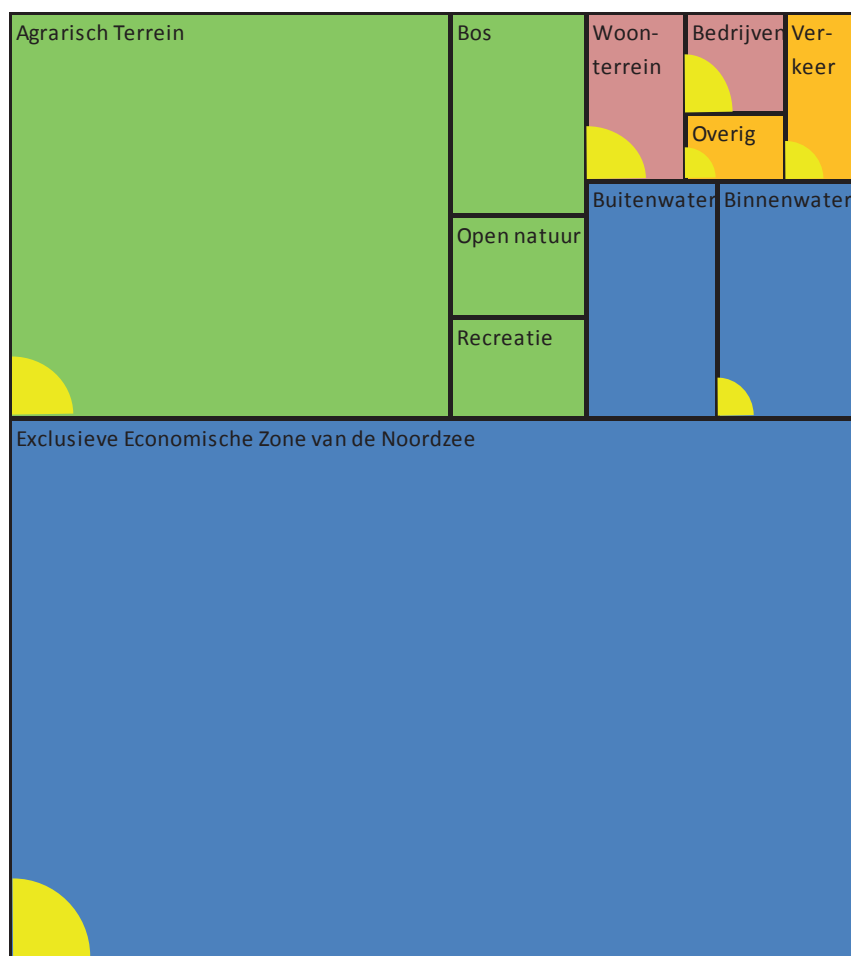
Vervolgens hebben we een inschatting gemaakt van hoeveel procent van de beschikbare ruimte daadwerkelijk voorzien zal zijn van PV in 2050. Deze inschatting is gebaseerd op drie factoren: concurrerend gebruik van het oppervlak, geschiktheid van het oppervlak en huidig TRL (technology readiness level [10]).

Concurrerend gebruik

Vooraf bij (landbouw)grond speelt het concurrerend gebruik (voor landbouw, staduitbreiding of nieuwe natuur) een grote rol. We verwachten dat toewijzing van landbouwgrond voor standaard PV parken beperkt zal blijven tot 0,5% a 1% van het areaal. Daarnaast zijn er kansen om met multifunctioneel landgebruik (landbouw plus PV) en met landschappelijke inpassing nog circa 1% extra te ontsluiten.

Geschiktheid

Niet al het beschikbare oppervlak is even geschikt. Bijvoorbeeld bij schuine daken zal een deel van de daken minder geschikt zijn - dat wil zeggen een lagere energieopbrengst hebben dan ideale daken - (onder meer vanwege beschaduwing, vreemde maat of vorm of vanuit monumentenzorg).



Figuur 3: Potentieel gebruik van bodem en wateroppervlak voor zonne-energie in Nederland in 2050. (Het geel gemarkeerde deel geeft een indicatie van het voor PV te gebruiken areaal).

Van de geschikte daken zullen de noordelijk georiënteerde daken slechts beperkt van PV worden voorzien. Op sommige veel geschikte daken zal de vullingsgraad moeilijk boven de 70% te krijgen zijn vanwege overige objecten op het dak waaronder dakramen en schoorstenen.

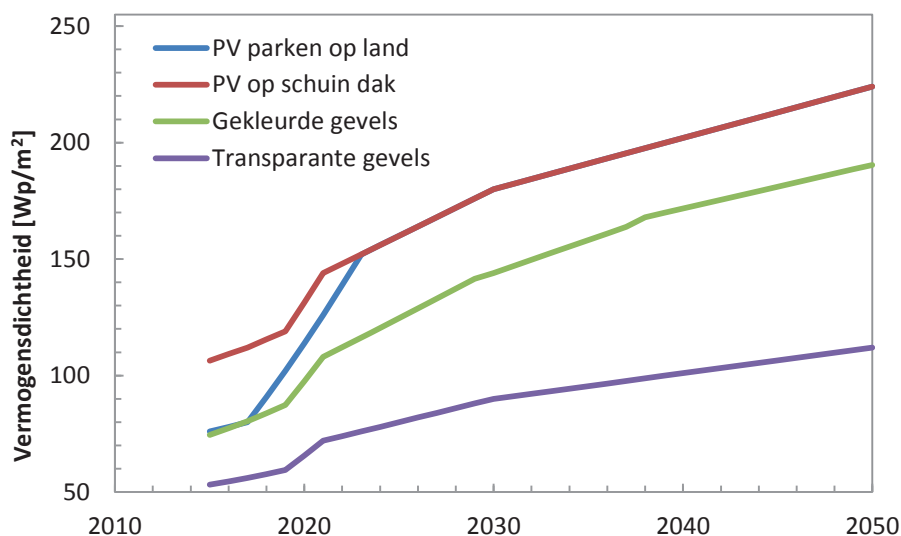
Huidig TRL

Toepassingen met een huidig hoog TRL zullen eerder marktrijp en bankable worden. Toepassingen met een huidig laag TRL vereisen voordien nog een langer innovatietraject en vervolgens vaak nog een doorontwikkeltraject om de kostprijs te verlagen.

Het resultaat van deze exercitie staat weergegeven in figuur 3. Deze inschatting van potentieel gebruik van bodem en wateroppervlak kunnen we natuurlijk niet los zien van de hoeveelheid PV vermogen die per type areaal uitgerold kan worden en van de verwachte energieproductie daaruit.

Een belangrijke parameter hierin is de vermogensdichtheid in Wp/m^2 (zie figuur 4). Voor PV parken op land groeit deze naar verwachting van 80 Wp/m^2 nu naar 224 Wp/m^2 in 2050. Een deel van deze ontwikkeling komt uit verbeterde efficiency van de PV technologie [1], een ander deel komt uit de transitie van voornamelijk zuidgeoriënteerde PV parken naar OW georiënteerde parken en toepassing van verticaal gepositioneerde bifaciale panelen.

Voor schuine daken groeit de PV vermogensdichtheid naar verwachting van 112 Wp/m^2 nu naar 224 Wp/m^2 in 2050. Dit is ook deels gerelateerd aan de verwachte technologieontwikkeling naar 28% module efficiency in 2050, tezamen met het beschikbaar komen van kosteneffectieve op-maat oplossingen en kosteneffectieve oplossingen voor schaduwlineariteit. Deze twee ontwikkelingen worden in figuur 4 weergegeven rond het jaar 2020.



Figuur 4: mogelijke ontwikkeling van de vermogensdichtheid van PV parken op land op daken en in gevels (zie tekst voor uitleg).

De tweede belangrijke parameter is de specifieke opbrengst, die verschilt per toepassing en per uitvoeringsvorm, tussen 2,2 en 3,4 PJ/GWp. De specifieke opbrengst is relatief lager voor verticale orientaties en voor horizontale orientaties met substantiële kans op vervuiling. De specifieke opbrengst is relatief hoger bij toepassingen op water vanwege de hogere instraling en koelingseffecten.

Het resultaat van deze bottom-up analyse is weergegeven in tabel IV. Het berekende potentieel komt overeen met een invulling door zonnestroom van 25 á 30% van de Nederlandse (primaire) energiebehoefte in 2050.

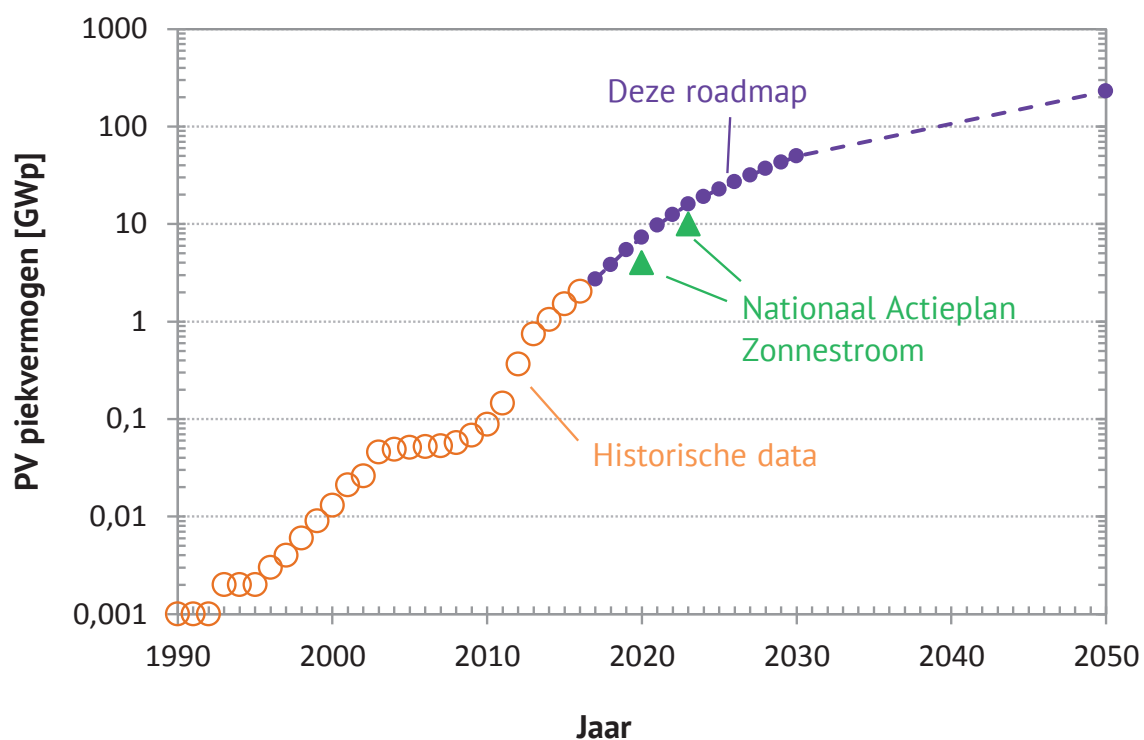
Tabel IV: Potentiële uitrol van PV in Nederland per locatie

	Toepassingsgebied	Huidige TRL	Huidig totaal oppervlak [km ²]	PV bedekking in 2050 [% van huidig oppervlak]	Benut oppervlak voor PV [km ²]	PV vermogen in 2050 [GWp]	Energieproductie in 2050 [PJ]
PV parken op land	Agrarisch terrein		22000	1,5%	325	45	138
	PV parken standaard	9	22000	0,6%	125	25	77
	PV parken met landschappelijke inpassing	5		0,5%	100	10	31
	PV parken met behoud van landbouwgebruik	3		0,5%	100	10	31
	Bos, natuur en recreatie	-		6000	0%	0	0
	Bos	-	3500	0%	0	0	0
	Open natuurlijk terrein	-	1500	0%	0	0	0
	Recreatiegebieden	-	1000	0%	0	0	0
PV en gebouwen	Woonterrein		3000	7%	212	39	106
	Grondgebonden woningbouw, (schuin) dak	9	350	29%	100	20	61
	Grondgebonden woningbouw, gevel	5	350	12%	41	7	15
	Gestapelde woningbouw, (plat) dak	9	50	40%	20	4	12
	Gestapelde woningbouw, opake gevel	6	175	24%	41	7	15
	Gestapelde woningbouw, transparante gevel	5	75	13%	10	1	2
	Niet bebouwd gedeelte van woonterrein	-	2000	0%	0	0	-
	Bedrijfs- en agrarische gebouwen		2300	13%	304	51	135
	Commercieel vastgoed, (platte) daken	9	250	28%	70	14	43
	Commercieel vastgoed, opake gevel	5	600	18%	106	18	39
	Commercieel vastgoed, transparante gevel	5	400	13%	50	5	11
	Agrarische daken, met name schuren en stallen	9	150	33%	50	10	31
	Glastuinbouw	3	100	10%	10	1	3
Niet-bebouwd deel (o.a. parkeerplaats)	-	800	2%	18	3	9	
PV en infra	Infrastructuur		1880	10%	184	33	100
	Wegberm en spoorwegberm	7	300	23%	70	14	43
	Geluidsschermen	7	10	41%	4	1	2
	Spoorweg	4	100	10%	10	1	2
	Wegdek met lichte belasting	4	100	10%	10	1	2
	Wegdek met zware belasting	2	800	3%	20	2	4
	Braakliggende bouwterreinen	8	250	4%	10	2	6
	Stortplaatsen	7	20	25%	5	1	3
	Dijken	5	300	18%	55	11	38
Drijvende PV parken	Binnenwater		3700	4%	133	24	82
	Golfslagcategorie 1 (waterbassins, kleine plassen)	8	1200	4%	44	8	27
	Golfslagcategorie 2 (grote plassen)	5	700	6%	44	8	27
	Golfslagcategorie 3 (IJsselmeer, Markermeer)	3	1800	2%	44	8	27
	Buitenwater		6000	0%	0	0	0
	Golfslagcategorie 3 (Waddenzee, Westerschelde)	3	5000	0%	0	0	0
	Golfslagcategorie 4 (gemeentelijke Noordzee)	2	1000	0%	0	0	0
	Exclusieve Economische Zone		57000	0,4%	250	45	154
	Golfslagcategorie 4 (Noordzee)	2	57000	0,4%	250	45	154
	Productintegratie		30	19%	6	1	2
Voer- en vaartuigen	5	30	10%	6	1	2	
NEDERLAND TOTAAL incl. EEZ		101880	1,4%	1408	237	715	

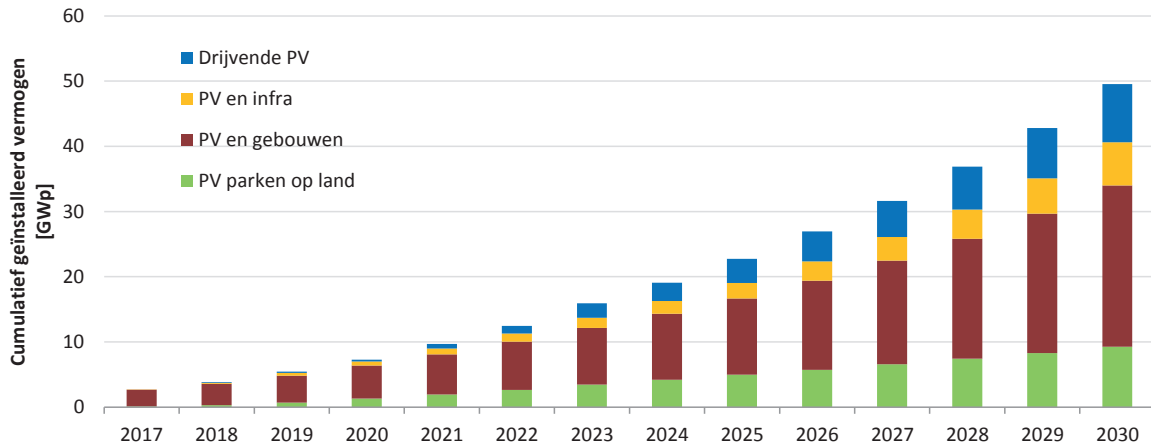
Momenteel (eind 2017) hebben we in Nederland ongeveer 2,6 GWp geïnstalleerd PV vermogen, waarvan verreweg het grootste gedeelte op gebouwen (zie hoofdstuk 5). Onze inschatting van de ontwikkeling in de tijd op basis van tabel IV wordt weergegeven in tabel V. Figuur 5 geeft het cumulatieve PV vermogen in de tijd weer.

Tabel V: Mogelijke ontwikkeling van het PV vermogen (GWp) in Nederland naar toepassingsgebied.

GWp	2017	2023	2030	2050
PV park op land	0,1	3	9	45
PV en gebouwen	2,4	6	25	90
PV en infra	0,05	0,5	7	33
Drijvende PV parken	0,0	2	9	69
Overig	0	0	0	1
TOTAAL	2,6	11	50	237

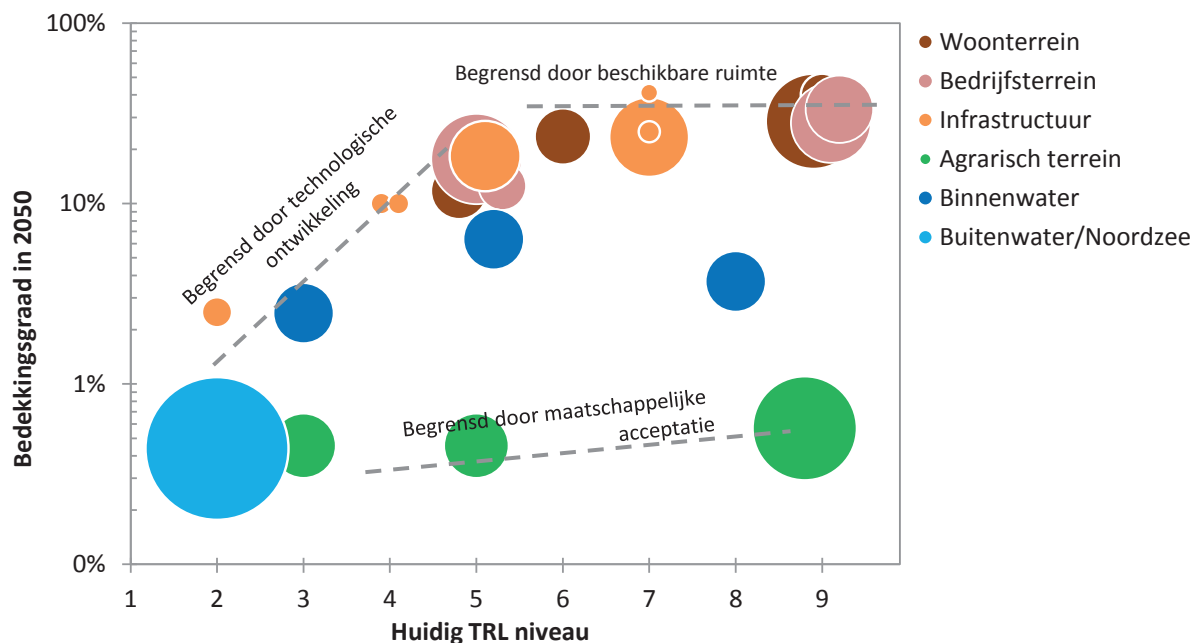


Figuur 5: Roadmap voor de ontwikkeling van het cumulatief PV vermogen in Nederland. Data vanuit het Nationaal Actieplan Zonnestroom zijn toegevoegd [10A].



Figuur 6: Schematische ontwikkeling (verwachting) tot 2030 van de verschillende toepassingsgebieden van PV in Nederland.

PV op en aan gebouwen vertegenwoordigt zoals gezegd op dit moment het grootste toepassingsgebied. Voor dit toepassingsgebied als eerste zal de groei begrensd worden door de beschikbare ruimte. De verdere groei van PV parken op land zal daarentegen eerder begrensd worden door maatschappelijke acceptatie en publiek belang. De groei van PV geïntegreerd in infrastructuur en ook de groei van drijvende zonneparken worden momenteel begrensd door technologische ontwikkeling. Deze conclusie wordt samengevat in figuur 7 en verder uitgewerkt in de volgende hoofdstukken.



Figuur 7: De potentiële bedekkingsgraad in 2050 voor verschillende toepassingen uitgezet tegen het huidige TRL. De grootte van de cirkels geeft de bijdrage aan het vermogen in 2050.

We concluderen dat de belangrijkste toepassingsgebieden zijn:

- PV parken op land. Potentie van 45 GWp. Innovatiekansen voor o.a. landschappelijke inpassing en multifunctioneel landgebruik. Zie hoofdstuk 3.
- PV en gebouwen. Potentie van 90 GWp, met daarin een vrijwel evenredige bijdrage van schuine daken, platte daken en niet-transparante gevels. Dit toepassingsgebied wordt verder beschreven in hoofdstuk 4.
- PV en infrastructuur. Potentie van 33 GWp. In dit segment leveren naar verwachting wegberm en dijken de grootste bijdragen. De innovatie in dit toepassingsgebied wordt verder beschreven in hoofdstuk 5.
- Drijvende zonneparken. Dit is het toepassingsgebied met verreweg de grootste potentie in Nederland, met de mogelijkheid om circa 69 GWp te realiseren. Dit toepassingsgebied zal verder worden beschreven in hoofdstuk 6.

In hoofdstuk 7 bespreken we de onderzoeksvragen die te maken hebben met de grootschalige integratie van zonne-energie in het energiesysteem. In hoofdstuk 8 bespreken we tenslotte kort de toepassingen die in de eerdere hoofdstukken niet aan de orde zijn geweest.

3. PV parken op land

Vanuit het gezichtspunt van een projectontwikkelaar lijkt het ontwikkelen van grootschalige zonneparken op land de meest kosteneffectieve vorm van uitrol te zijn. Het is echter zeer de vraag of dat ook vanuit het algemeen belang de meest wenselijke vorm is. In de praktijk blijkt dat zonneparken niet automatisch kunnen rekenen op steun van omwonenden. Dankzij de sterk dalende kosten van zonne-energietechnologie ontstaat er tegenwoordig ruimte voor vormgeving en (visuele)kwaliteit. Er is creativiteit en een gezamenlijke aanpak nodig om onze leefomgeving mee te laten evolueren met onze energievoorziening, net zoals in het verleden [11].

De auteurs van het position paper *De energietransitie: een nieuwe dimensie in ons landschap* [11] pleiten voor een integrale benadering: planning en ontwerp van duurzame energielandschappen, waarbij milieu-, sociaal-culturele, economische en technologische criteria een rol spelen.

De twee belangrijkste innovatierichtingen voor dit toepassingsgebied zijn visuele integratie en functionele inpassing.

Visuele integratie

Verbeterde visuele kwaliteit van zonneparken kan sterk bijdragen aan de maatschappelijke acceptatie en daarmee het benutbaar areaal vergroten. Een voorbeeld is te vinden in de studie van Rijkswaterstaat naar landschappelijke inpassing van zonne-energie langs de A37 [12]. Enablers voor visuele integratie zijn de beschikbaarheid van PV panelen in verscheidene kleuren, vormen en formaten tegen acceptabele meerkosten. Daarnaast is het belangrijk om systeemoplossingen (configuraties met omvormertechnologie) beschikbaar te hebben voor complexere PV systemen, waarbij panelen met verschillende specificaties en oriëntaties gecombineerd worden.

Functionele integratie van zonne-energie opwekking met landbouw

Het gaat hierbij om innovatieve ontwerpen om agrarische zonneparken te combineren met de bestaande agrarische functies van het land. Niet alle agrarische functies lenen zich hier op voorhand voor. Behalve een ruimtelijke combinatie van functies is het immers hierbij ook essentieel dat het beschikbare zonlicht gedeeld kan worden tussen de twee bestemmingen.

Een interessante optie die meer onderzoek vraagt is de toepassing van verticaal opgestelde bifaciale panelen. Dit is weliswaar niet de configuratie die in de laagste LCOE (€/kWh) resulteert, maar mogelijk wel een uitvoeringsvorm die optimale combinaties met agrarisch gebruik en/of terreinonderhoud mogelijk maakt.



Figuur 8: Voorbeelden van functionele integratie [11, 11A]

Naast de genoemde visuele integratie en functionele integratie, kunnen nog andere multifunctionele aspecten belang zijn [12A]:

- Landregeneratie. Gedegradeerd land (vervuild, te weinig voedingsstoffen door te intensieve landbouw) heeft tijd nodig om weer agrarisch functioneel te worden. In deze regeneratieperiode kan een PV park economisch rendement opleveren.
- Waterzuivering. Land waar PV op staat kan worden gebruikt voor waterzuivering. Meestal betreft dit moerassig land. Met de juiste grondconstructie voor het zonnepark, kan de waterzuivering gecombineerd worden met elektriciteitsopwekking.
- Bescherming en stimulering van flora en fauna. Land waar PV op staat, is uitstekend geschikt (mits juist ingericht) als broedplek voor (beschermde) vogels, zoals de grutto. Nu wordt bijvoorbeeld land apart gealloceerd voor de weidevogels, maar een combinatie met PV is wellicht mogelijk. Het land heeft een economische functie, het systeem staat er voor langere tijd, en zal met rust worden gelaten. En zo ook de dieren en planten die er leven. Met juist ingerichte en naast elkaar geschakelde PV velden kan een natuur corridor worden gemaakt waar natuur zich langs kan verplaatsen (dieren, vogels, zaden).
- Wandelpark. Een PV veld geïntegreerd in een normaal park kan een plek zijn voor mensen om recreatief in te vertoeven, ze kunnen zitten in de schaduw van de panelen of gebruik maken ervan als bescherming tegen de regen.



Figuur 9: Zonnepark De Kwekerij in Hengelo: voorbeeld van een zonnepark waarin elektriciteitsopwekking gecombineerd wordt met een recreatiebestemming.

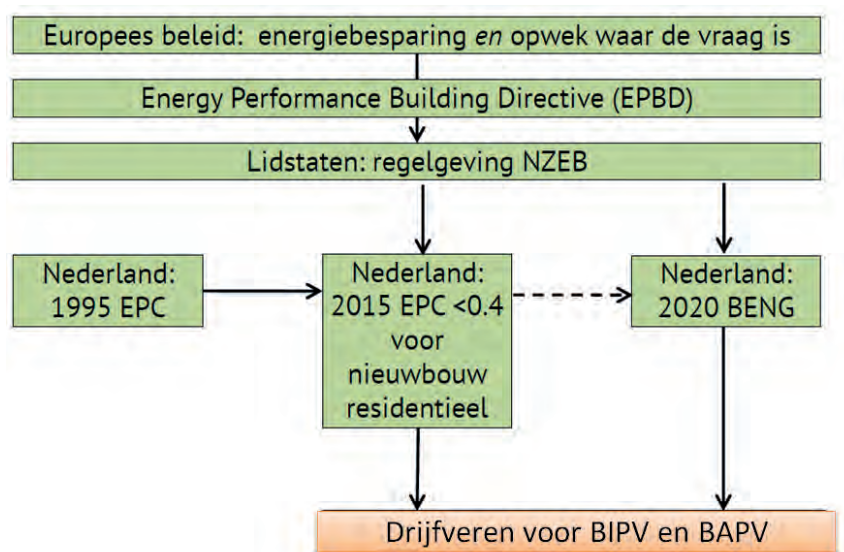
4. PV en gebouwen

4.1. Market drivers voor PV op en aan gebouwen

Een groot deel van het benodigde oppervlak voor PV kunnen we vinden op en aan gebouwen (dak- en geveloppervlak). Er is daarbij een publiek belang om het benutten van dit oppervlak inderdaad ook aantrekkelijk of zelfs verplicht te maken voor de markt.

Zoals besproken in hoofdstuk 2, was eind 2016 circa 95% van het geïnstalleerd PV vermogen in Nederland geplaatst op gebouwen. Dit betreft PV systemen op platte daken (met name utiliteitsbouw), op schuine daken (met name woningbouw) en op agrarische daken (met name schuren en stallen). Deze ontwikkeling is gestimuleerd vanuit regelgeving: Voor grotere systemen de SDE+ en de postcoderoosregeling, voor kleinere systemen de salderingsregeling en de BTW teruggave.

Sinds 2015 is daar de regelgeving rond energieprestatie van gebouwen als market driver bijgekomen. Met de verlaging van de Energie Prestatie Coëfficiënt (EPC) norm in 2015 voor residentiële nieuwbouw naar 0,4 is het aantal (kleine) PV systemen op nieuwbouwwoningen sterk toegenomen. Vanaf 2020 wordt in Nederland het BENG beleid van kracht [13], als uitwerking van het Europese beleid m.b.t. energieprestatie in gebouwen (zie figuur 9).



Figuur 9: De relatie tussen het Europees beleid m.b.t. energieprestatie van gebouwen (EPBD) leidend tot Near Zero Energy Buildings (NZEB) en de toename van PV systemen op en aan gebouwen.

Momenteel is meer dan 98% van de PV systemen op en aan gebouwen zogenaamde BAPV (building applied PV). BAPV is een technisch rijpe industrie met een hoog TRL. Ontwikkelingen zijn voornamelijk gedreven door total cost of ownership. Dat wil zeggen ontwikkelingen m.b.t. PV technologie (kosten, efficiency en levensduur, zie de betreffende roadmaps [1,2]), montagesystemen (slim, snel en kosteneffectief) en BOS componenten (met name omvormers).

Er is een aantal redenen waarom de aandacht voor integratie van PV in gebouwen momenteel sterk toeneemt. Deze aandacht betreft zowel esthetische/visuele integratie als functionele integratie. Integratie van PV in gebouwen wordt aangegeven met de term BIPV (building integrated PV, zie figuur 10).

Ontsluiting van oppervlak op daken en gevels

Een beperkende factor voor het verder benutten van daken en gevels voor PV is dat mensen de standaard blauwe en zwarte PV panelen niet (meer) mooi genoeg vinden. Voor verdere uitrol richting de in tabel IV genoemde percentages is een groter en diverser aanbod qua kleur, vorm en formaat nodig.

Energieprestatie van gebouwen

Met de aanloop naar BENG wordt energieprestatie van gebouwen een steeds sterkere market driver voor de toepassing van PV in gebouwen. In veel gebouwen (met name gestapelde bouw en hoogbouw) is het beschikbare dakoppervlak onvoldoende om aan de regelgeving te voldoen. Daarmee komt de gevel steeds meer in beeld als additioneel benutbaar oppervlak voor PV. Hiermee komt PV nadrukkelijker in het architectonisch domein, met de bijbehorende eisen op het gebied van esthetiek en vrijheid in kleur, vorm en formaten.

Transparante gebouwdelen

Een groot deel van het geveloppervlak is transparant raamoppervlak (zie tabel IV). Daarnaast zijn er nog andere transparante toepassingen in de bouw: atriums, serres en overkappingen. Voor toepassing van PV op dit beschikbaar oppervlak is een goede functionele integratie nodig. Dit vraagt om een oplossing met een zekere (hoge) transparantie voor zichtbaar licht, terwijl andere delen van het spectrum voor conversie naar elektriciteit gebruikt kunnen worden.



Figuur 10: Recente ontwikkelingen in BIPV. Van linksboven naar rechtsonder: Uppsala, Amsterdam, Drammen en Zürich. Meer aandacht voor esthetische integratie en kleurgebruik.

Kosteneffectiviteit door multifunctionaliteit

Functionele integratie kan de kosteneffectiviteit van de toepassing van zonne-energie verbeteren. Dit is als materiaal dubbel gebruikt wordt. Met andere woorden: als de zonnestroom genererende elementen worden toegepast in plaats van andere bouwcomponenten. Een voorbeeld hiervan is toepassing van BIPV als gevelbekleding.

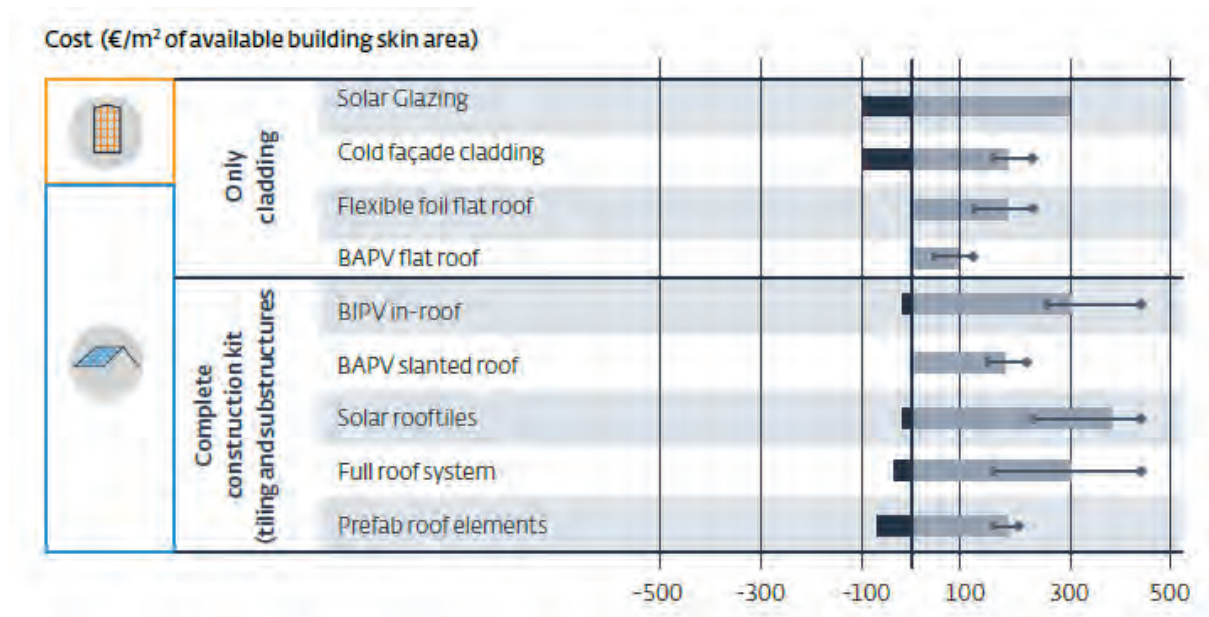
We zien dan ook dat de markt voor BIPV zich in Nederland (maar ook in andere landen in Europa) in een overgangsfase bevindt. In de jaren tot 2016 werd BIPV voornamelijk toegepast als middel om het gebouw een duurzaam imago te geven. De functie van BIPV lag daarmee in het domein van communicatie en uitstraling. Het prominent zichtbaar zijn van BIPV was daarbij een belangrijke factor. Opbrengst (elektriciteit) was daarin minder belangrijk.

Nu de belangrijkste market driver voor BIPV steeds meer de energiestaat van het gebouw wordt, wordt de elektriciteitsopbrengst steeds belangrijker. Tegelijk is het een logisch gevolg van de boven beschreven ontwikkelingen dat BIPV juist zo onzichtbaar mogelijk moet zijn – en daarmee zo min mogelijk beperkend voor het gebouwontwerp.

Deze trends worden beschreven in het SEAC-SUPSI status rapport over BIPV van 2017 [14]. Hierin wordt tevens een lijst van 114 BIPV producten die nu op de markt zijn gepresenteerd. Ook het European Technology & Innovation Platform (ETIP) benoemt een aantal van deze BIPV trends en daarmee samenhangende uitdagingen voor innovatie [15].

4.2. Innovaties in BIPV

Technische innovaties kunnen niet los gezien worden van uitdagingen m.b.t. kosteneffectiviteit. Figuur 11 toont de resultaten van een studie uit 2016 naar marktprijs van beschikbare BIPV systemen. We zien dat in deze studie de geoffreerde prijzen in de range van 200 tot 500 €/m² liggen. Dit is vergelijkbaar met prijzen voor gevelbekleding in het midden en hogere prijssegment.



Figuur 11: Resultaat van een door SEAC in 2016 uitgevoerde studie naar marktprijs van BIPV [14]. De zwarte balkdelen (links van de nul) geven de vermeden kosten van traditioneel bouwmaterial dat vervangen is. De grijze balkdelen (rechts van de nul) geven de netto meerkosten van de BIPV.

Echter de SEAC studie betreft BIPV systemen die qua kleur en maatvoering dichtbij de standaard PV panelen liggen. BIPV met afwijkende maten en/of andere kleuren is vandaag nog substantieel duurder. In de recente Europese “declaration on strategic targets” in het kader van het SET plan, wordt de gezamenlijke intentie uitgesproken om de meerkosten van BIPV in 2020 met 50% te reduceren ten opzichte van 2015 [14A].

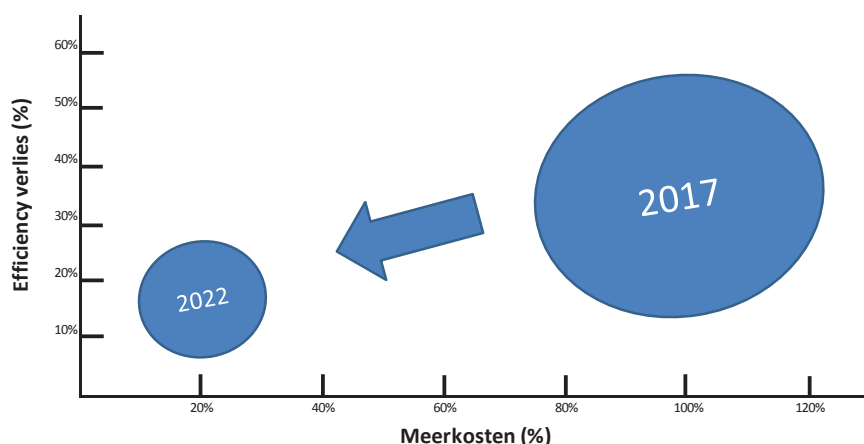
We daarmee komen tot de volgende uitdagingen voor de verdere ontwikkeling van BIPV:

1. Kleur en kleurpatronen

Er zijn diverse ontwikkelingen op het gebied van gekleurde PV modules. De kleur kan o.a. aangebracht worden op de PV cel, in de encapsulant, als folie in de module, als folie op het frontglas of geprint aan de buiten- of de binnenzijde van het frontglas. In al die gevallen gaat het om optimalisatie van:

- Zo laag mogelijk opbrengstverlies ten gevolge van de kleur
- Zo laag mogelijke kostenverhoging door toepassing van de kleur
- Levensduur en betrouwbaarheid van de kleurtechnologie ten minste gelijk aan die van de PV module zonder kleur.

Vandaag de dag zijn de opbrengstverliezen in de range van 10% tot 50% afhankelijk van de kleur en de gebruikte technologie. De product-markt situatie voor gekleurde PV en BIPV is nog dermate nieuw dat voor de kostenverhoging nog geen relevant getal bekend is. Offertes kunnen nu nog gemakkelijk een factor 2 boven de prijs van de zwarte of blauwe variant liggen. Ook over levensduuraspecten van de verschillende kleur-technologieën is nog weinig bekend.

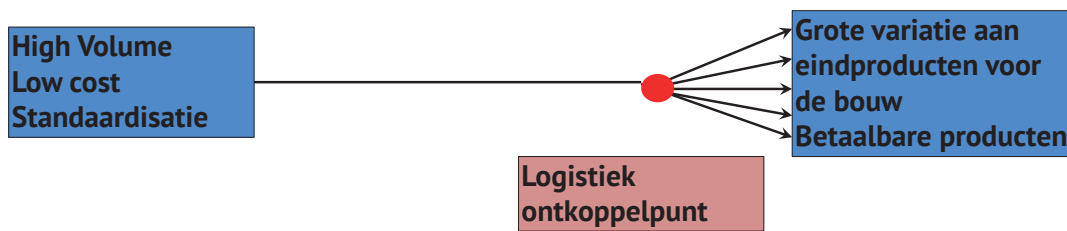


Figuur 12: Mogelijke ontwikkeling van gekleurde PV panelen voor BIPV.

2. Vrijheid van vorm en formaat

Ook vrijheid van vorm en formaat is vandaag de dag al technisch mogelijk. Daarvoor geldt echter ook dat dit substantiële meerkosten met zich meebrengt. Deze meerkosten hebben direct te maken met een afwijking van de standaard en de productie van kleine series. Essentieel om tot een aanbod van een grote maatvariëteit aan BIPV producten te komen tegen aanvaardbare prijzen, zijn ontwikkelingen met betrekking tot slim productontwerp. De uitdaging is om families van PV producten met variabele maatvoering dusdanig te ontwerpen dat de kostenvoordelen van een

gestandaardiseerd halffabricaat gecombineerd kunnen worden met een gediversifieerd aanbod van eindproducten.



Figuur 13: Schematische weergave van een kosteneffectieve keten op basis van slim ontwerp, die kan leiden tot een kostendoorbraak in BIPV met vrijheid van vorm en formaat.

Ontwikkelingen op het gebied van flexibele dunnefilm PV, verwerkbaar vanaf de rol, kunnen hierbij een belangrijke rol spelen. Hiervoor verwijzen we naar de roadmap dunnefilm PV technologie [2].

3. Semitransparante PV

Zoals beschreven in hoofdstuk 3 hebben toepassingen van semitransparante PV een enorm potentieel. Zeker in hoogbouw en gestapelde bouw kan dit een zeer belangrijke en zelfs noodzakelijke technologie worden om energie-neutrale gebouwen te kunnen realiseren.

Op dit gebied zijn nog belangrijke innovatieve ontwikkelingen nodig:

- Uniformiteit. Voor alle beoogde toepassingen is een uniforme semi-transparantie van belang. Technologie op basis van reguliere Si gebaseerde glas-glas panelen waarbij de Si cellen op afstand van elkaar zijn geplaatst, voldoet niet voor het merendeel van de toepassingen, zoals ramen.
- Kleurloze transparantie. De transparante PV panelen dienen spectraal neutraal te zijn, in het zichtbare gebied. Voor toepassing in de gebouwde omgeving is in het algemeen een kleuring van het invallende daglicht niet acceptabel.
- Efficiency. De energieopbrengst per m² is zeer belangrijk teneinde de semitransparante PV ramen een substantiële bijdrage te laten leveren aan de energieneutraliteit van het gebouw. Het ideale stroom-opwekkende raam zet het IR en UV gedeelte van het spectrum om in elektriciteit, en benut van het zichtbare spectrum slechts een beperkt gedeelte op een spectraal neutrale wijze.

4. Prefab bouwelementen met BIPV

Prefabricage is een proces in de bouw waarbij materialen van tevoren in een fabriek of werkplaats tot elementen worden gemaakt, waarna deze naar de bouwplaats worden getransporteerd en aldaar worden verwerkt (zie figuur 14). Bij een prefab benadering van BIPV worden de BIPV panelen niet meer op de bouwplaats gemonteerd, maar off-site verwerkt in grotere elementen bijvoorbeeld in combinatie met een isolatiepakket of in een kladdak. Dit versnelt de bouwtijd in de uitvoeringsfase en leidt daarmee tot een kostenbesparing. Een ander voordeel is dat het eindresultaat van een hogere kwaliteit kan zijn dan wanneer de BIPV panelen op de bouwplaats worden gemonteerd en geïnstalleerd, omdat montage en installatie in een gespecialiseerde en gecontroleerde omgeving zoals een fabriek of werkplaats gebeurt.



Figuur 14: voorbeelden van prefab bouwen die opties bieden voor innovatieve integratie van BIPV in prefab elementen.

4.3. PVT Systemen in de gebouwde omgeving

Een groot deel van de energievraag in de gebouwde omgeving bestaat uit warmte. Tegelijkertijd is er een groot potentieel om binnen de gebouwde omgeving veel van de benodigde warmte en stroom met zonne-energie duurzaam te produceren. De combinatie van PV panelen met een thermische collector in een PVT paneel is een optie om meer energie op eenzelfde oppervlak op te wekken.

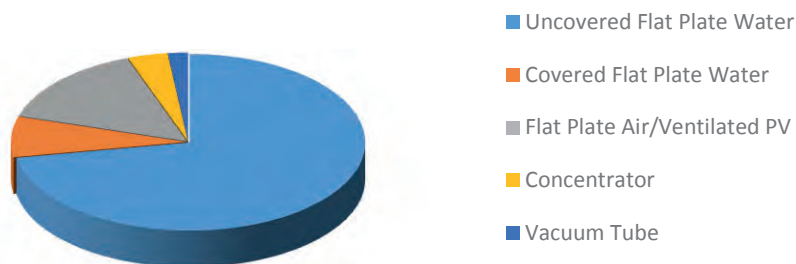
We maken onderscheid tussen afgedekte en onafgedekte PVT modules. Afgedekte PVT systemen hebben een isolerende luchtlaag tussen een extra aangebrachte transparante afdekking (vaak glas) en de thermische absorber. Door de betere isolatie, zijn de warmteverliezen bij hoge temperaturen kleiner. In een onafgedekt PVT paneel is het ongemodificeerde PV paneel rechtstreeks in contact met de buitenlucht.

In de periode tussen 1990 en 2005 werd er in Nederland veel onderzoek naar PVT panelen gedaan. ZEN Solar produceerde zowel onafgedekte als afgedekte PVT panelen, maar dit is nooit een groot commercieel succes geworden. Er zijn verschillende redenen waarom de marktkansen voor PVT nu beter zijn. De prijzen van PV zijn meer dan een factor 10 lager. Bovendien is er nu de drive om woningen volledig tot energie-nul te renoveren of nieuw te bouwen. Tegenwoordig is het meest succesvolle concept de combinatie van PV met een luchtwarmtepomp. Het nog te hoge geluidsniveau van luchtwarmtepompen staat echter een doorbraak van deze toepassing in de weg.

Vooraf in de gebouwde omgeving, is de ruimte op het dak vaak beperkend om een woning volledig energieneutraal te maken. PVT kan verschillende functies combineren en daardoor het dak efficiënter gebruiken. Doordat de thermische opbrengst sterk afhangt van de warmtevraag en hoe het systeem in elkaar zit, zijn er nog enkele barrières te overwinnen voor een succesvolle

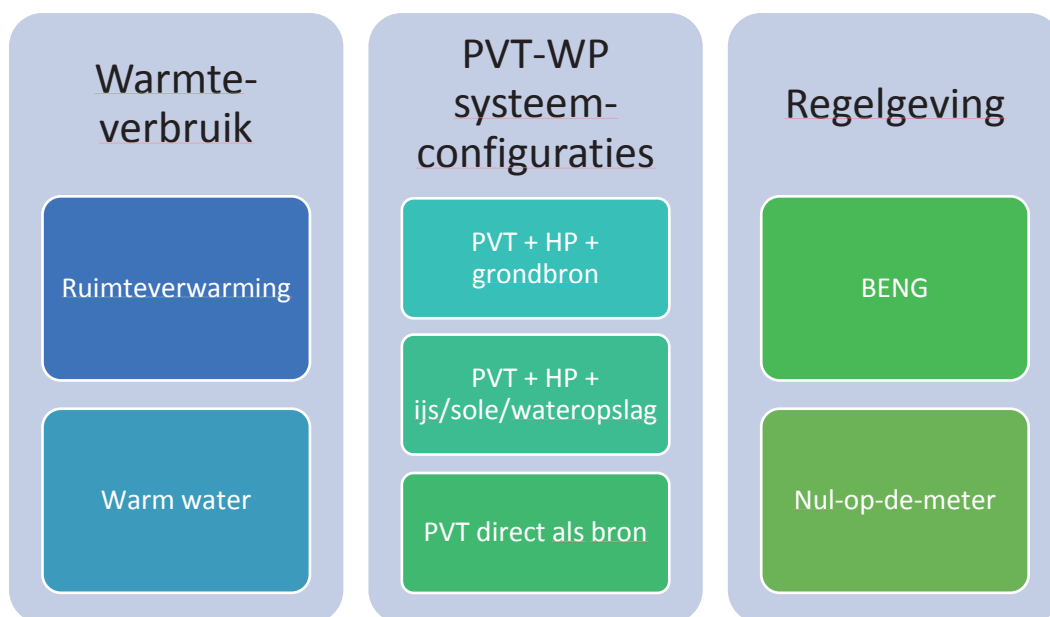
marktontwikkeling. Uit literatuuronderzoek en interviews [16,17] is gebleken dat de grootste barrières voor PVT systemen de complexiteit van het systeem en de prijs van de systemen zijn.

Momenteel zijn er internationaal meer dan 50 verschillende PVT modules op de markt [17]. Het grootste deel hiervan bestaat uit onafgedekte PVT panelen. Omdat deze niet of alleen aan de achterkant geïsoleerd zijn, zijn deze collectoren vooral geschikt voor lage temperatuurtoepassingen. Dit zijn bijvoorbeeld het regenereren van een grondbron of het (voor)verwarmen van water voor een zwembad of warmtapwater. De laatste jaren worden in Nederland opties onderzocht om de warmte die PVT te genereert, te gebruiken als bron voor een warmtepomp. De PVT collector gebruikt hiervoor niet alleen zonnewarmte, maar ook omgevingswarmte. Het doel is dan om in de volledige warmtevraag van een woning te voorzien.

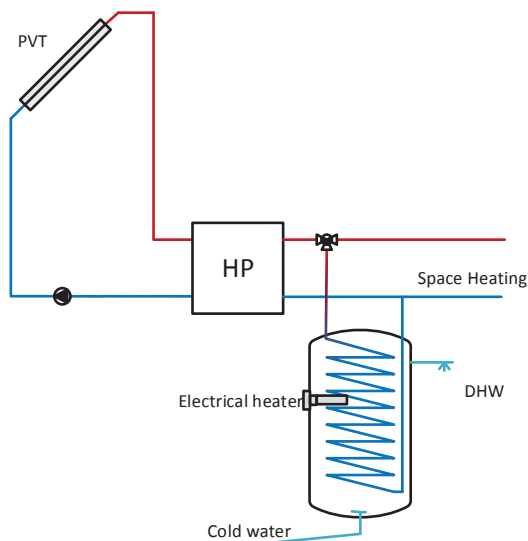


Figuur 15: Type PVT collectoren die beschikbaar zijn op de markt [17]

De technische haalbaarheid van een PVT-warmtepompconcept voor een woning hangt o.a. af van verschillende randvoorwaarden (zie figuur 16). Het warmteverbruik voor ruimteverwarming en warm water bepaalt hoe groot een systeem moet worden, maar leidt ook tot een noodzakelijke dimensionering in de winter. Hierbij is bepalend het ambitieniveau qua energieprestatie in combinatie met de geldende regelgeving. Er zijn meerdere seriële configuraties mogelijk voor PVT-warmtepompconcepten, waarbij de door de PVT geproduceerde warmte gebruikt wordt aan de bronzijde van de warmtepomp. Bijvoorbeeld PVT met warmtepomp en een grondbron, PVT met een ijs/glycoloplossing of wateropslag aan de bronzijde en PVT direct als bron. Een configuratie met PVT direct als bron staat afgebeeld in figuur 17.

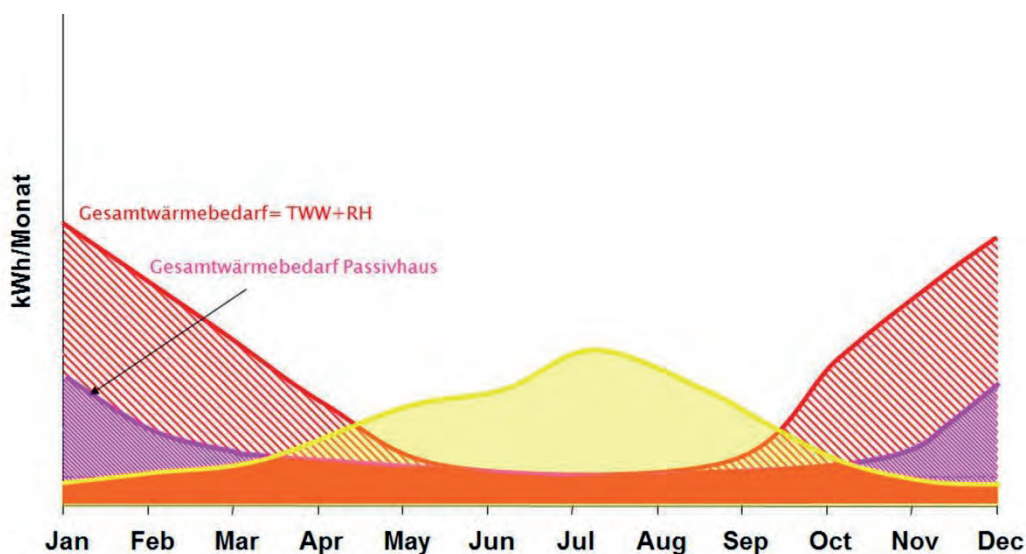


Figuur 16: Factoren die een rol spelen bij de technische haalbaarheid van PVT warmtepomp concepten



Figuur 17: Schematische tekening voor een PVT direct als bron voor de warmtepomp systeem

Figuur 18 laat het warmteverbruik over het jaar zien voor een goed geïsoleerde en een niet goed geïsoleerde woning. De figuur illustreert de kern van de systeemuitdaging voor PVT, namelijk de seizoensmismatch voor vraag en aanbod van warmte. In Nederland worden zonneboilers zo gedimensioneerd, dat ze in de zomer aan 100% van de warmtevraag kunnen voldoen. Voor een energiezuinig huis kunnen de warmte vraag voor warm water en voor ruimteverwarming ongeveer gelijk zijn. Voor de meeste woningen echter, is het warmteverbruik voor ruimteverwarming vele malen hoger dan de vraag voor warm water. Voor een volledige warmtevoorziening ligt de uitdaging vooral in de winter. Dat probleem kan opgelost worden met enige vorm van seizoensopslag. Daaruit leiden we de volgende innovatieve toepassingen en innovatiedoelstellingen af:



Figuur 18: Warmtevraag per maand, warm water (roze stippellijn) plus warmtevraag voor ruimteverwarming voor een goed geïsoleerd huis (roze) of een niet goed geïsoleerd huis (rood) [18]. De gele curve is een maat voor de potentiële warmteopbrengst van een groot zonnecollectoroppervlak. Het oranje gedeelte wordt daadwerkelijk gebruikt.

Toepassing 1: Optimalisatie op zomertoepassing

Onafgedekte PVT systemen voor regeneratie van een grondbron wekken de warmte vooral in de zomer op. De systemen die nu toegepast worden functioneren, een aantal innovaties zijn wenselijk:

- Hogere efficiëntie
- Goedkopere systemen
- Verbeterde dakintegratie van de systemen

Toepassing 2: Optimalisatie op wintertoepassing

Onafgedekte PVT systemen, waarbij de opgewekte warmte als bron voor een warmtepomp gebruikt wordt. Het knelpunt ligt bij dit soort systemen in de winter, waarbij voldoende warmte geogst moet worden uit de omgeving. De volgende innovaties zijn nodig:

- Hogere warmteoverdracht van de omgeving naar de collector
- Goedkopere systemen
- Ook voor deze systemen geldt dat esthetische dakintegratie een toevoeging is.

Overige ontwikkelingen:

Net zoals bij zonnewarmte is warmteproductie in de winter de grootste uitdaging voor dit soort systemen. Binnen andere roadmaps wordt aan seizoenswarmteopslag gewerkt. Veelal heeft een seizoenswarmteopslag een hogere aanvoertemperatuur nodig, dit voert naar een ander PVT collectortype.

Bij een PVT systeem zijn vaak andere kosten dan alleen collectorkosten ook belangrijk. Bijvoorbeeld de BOS kosten en een snelle foutloze installatie. Innovaties op dit vlak zijn wenselijk.

5. PV en infrastructuur

Integratie van PV in de infrastructuur biedt een belangrijke kans voor multifunctioneel ruimtegebruik. We verstaan in deze context onder infrastructuur het functionele ruimtegebruik, niet zijnde agrarisch of gebouwen. Meer specifiek gaat het hier over wegen, dijken, spoorwegen en vuilstortplaatsen.

In hoofdstuk 2 hebben we het korte en lange termijn potentieel voor de verschillende toepassingen besproken. In dit hoofdstuk noemen we de technische en economische uitdagingen. In de meeste gevallen houden deze uitdagingen rechtstreeks verband met de *primaire* functie van de betreffende infrastructuur.

Dijken

De primaire functie van dijken is waterkering en daarmee bescherming tegen overstroming. Tegelijk bieden dijken een enorm potentieel voor uitrol van zonne-energie. De uitdaging is om toepassingsvormen te ontwikkelen die geen enkel risico voor de primaire functie vormen en ook compatibel zijn met benodigde onderhoudsprogramma's. Daarnaast zijn dijken ook kenmerkende landschapselementen die een zekere visuele kwaliteit behoeven. In samenvatting dienen toepassingsvormen voor zonne-energie op dijken te voldoen aan een combinatie van voorwaarden:

- Aantoonbaar geen risico voor de primaire waterkerende functie van dijken, inclusief onderhoud;
- Economisch en technisch haalbare oplossingen voor de energieopwekking;
- Voldoende ruimtelijke kwaliteit.

De ambitie van zowel de waterschappen, Rijkswaterstaat als de zonne-energie sector is om dergelijke oplossingen de komende jaren te ontwikkelen, te demonstreren en uit te rollen.

Interessante toepassingsvormen kunnen zijn:

- Configuraties van bifaciale verticale PV panelen, dusdanig geplaatst dat onderhoud, begrazing en begroeiing mogelijk blijven;
- Een "harde dijk" oplossing met geïntegreerde PV, waarbij vergelijkbare technische oplossingen als bij integratie in wegdek verder ontwikkeld worden;
- Toepassing van een PV geïntegreerde folie, vergelijkbaar met oplossingen die ontwikkeld worden voor toepassing op vuilstortlocaties;
- Configuraties van gekleurde panelen waarmee de visuele kwaliteit geoptimaliseerd wordt;
- Configuraties van montage en verankering van PV systemen, die zo veel mogelijk aansluiten bij de state-of-art van PV parken met (innovatieve) oplossingen die risico voor het dijklichaam uitsluiten.

Wegbermen

Een relatief groot areaal in Nederland dat in het algemeen niet geschikt is voor landbouw, zijn de wegbermen. Dit is ook het areaal dat primaire focus van Rijkswaterstaat geniet in hun streven naar een energieneutrale operatie in 2030. Oplossingen voor PV systemen op wegbermen dienen te voldoen aan criteria van ruimtelijke kwaliteit en veiligheid.

Ook hier is de beschikbaarheid van vrijheid in kleur, formaat en vorm van PV modules tegen aanvaardbaar beperkte meerprijs een belangrijke enabler [12].

Daarnaast ligt er een belangrijke technische uitdaging in de kosteneffectieve realisatie van ruimtelijk langgerekte systemen, die bovendien nog kunnen blootstaan aan dynamische beschaduwning.

Wegdek

Het wegdekareaal in Nederland is circa 900 km² en vormt daarmee een interessante optie voor toepassing van PV. Er bestaan een aantal initiatieven om PV te integreren in wegdek [19]. Ook voor deze toepassing is de primaire functie van het wegdek leidend: veilig transport. De belangrijkste technische uitdagingen zijn:

- Ontwerp en materiaalkeuze met aantoonbaar geen risico voor de primaire functie van het wegdek. Dit betreft o.a. in eisen m.b.t. rolweerstand en wrijving onder een scala aan verschillende weers- en temperatuurs-omstandigheden;
- Ontwerpaspecten met betrekking tot opbrengsten en kosten van een wegdek-geïntegreerd PV systeem;
- Levensduur en betrouwbaarheid, gerelateerd aan zowel slijtage van het oppervlak, aan de belasting door het verkeer als aan vervuiling van het wegoppervlak;
- Ontwerpaspecten met betrekking tot economisch haalbare methodes voor efficiënte installatie van het systeem en voor onderhoud van het systeem;
- Elektrische ontwerpaspecten met betrekking tot een langgerekt PV systeem dat blootstaat aan dynamische beschaduwing.

Het laatstgenoemde punt geldt evenzeer voor toepassingen op dijken, langs wegen, langs spoorwegen en in geluidsschermen.

Geluidsschermen

Een belangrijke reden om PV te integreren in geluidsschermen langs wegen en spoorwegen is dat hier kansen liggen voor multifunctionaliteit door dubbel materiaalgebruik. De bouwconstructie die gemaakt wordt voor de geluidwerend functie kan met relatief beperkte meerkosten uitgebreid worden met de functie zonnestroomopwekking.

De belangrijkste uitdagingen m.b.t. innovatie voor PV geluidsschermen (solar noise barriers) zijn:

- Ontwerpaspecten met betrekking tot opbrengsten en kosten van een modulair PV geluidsscherm. Dit betreft o.a. het minimaliseren van zelfbeschaduwing en het maximaliseren van het dubbel materiaalgebruik;
- Elektrische ontwerpaspecten met betrekking tot een langgerekt PV systeem dat blootstaat aan dynamische beschaduwing;
- Het ontwikkelen van esthetisch aantrekkelijke uitvoeringsvormen, zoals gekleurde solar noise barriers;
- Het doorontwikkelen van bifaciale solar noise barriers voor toepassingen langs NZ lopende wegen en spoorwegen.

Stortplaatsen

In Nederland ligt in totaal voor circa 20 km² aan stortplaatsen. Het merendeel hiervan is niet meer als zodanig in gebruik. De voormalige stortplaatsen bezetten een 'verloren ruimte' die niet of nauwelijks voor andere bestemmingen kan worden ingezet. De reden hiervoor is dat er absoluut voorkomen moet worden dat de bovenafdichting beschadigd zou kunnen raken en er dientengevolge regenwater door het afval heen het grondwater in zou kunnen lekken. De stortplaatsen vormen hiermee een hele mooie opportuniteit voor PV ontwikkelaars. Voor de stortplaatsbeheerder is een PV park namelijk een passief gebruik van de ruimte met een relatief laag risico op beschadiging van de bovenafdichting. Voor de PV park eigenaar is een stortplaats een groot stuk direct beschikbaar land met een relatief lage waarde (pacht).

Hierbij zijn er ruwweg drie type toepassingen te onderscheiden:

1. Vlakke stortplaatsen (op landhoogte) die reeds afgedicht zijn. Er ligt circa één meter grond bovenop de afdichtingsfolie. Deze grondlaag kan gebruikt worden om het PV systeem in te verankeren. Er moet nog enige grasgroei plaats vinden onder de PV panelen om te voorkomen dat de grondlaag wegspoelt. Ook dient het PV systeem bestendig te zijn tegen inklinking van de grond.
2. Hoge stortplaatsen (tot circa 100 meter boven de omringende landhoogte) die reeds afgedicht zijn. Deze stortplaatsen kennen steile taluds waarbij het gevaar van erosie van de grondlaag zeer reëel is. Verankering is lastig. PV systemen dienen er voor te zorgen dat er geen erosie plaatsvindt. Een mogelijkheid is de anti-erosie functionaliteit van het gras te vervangen door bijvoorbeeld het aanleggen van bestrating of een geomembraan. Een ander mogelijkheid die in te toekomst op zou kunnen komen is het intact laten van de plantengroei door het op enige afstand van elkaar verticaal plaatsen van bifaciale zonnepanelen. Naast deze eisen dient het PV systeem mee te kunnen bewegen met de inklinkende grond. Dit is een kans voor flexibele zonnepanelen, maar kan tevens door een flexibel montagesysteem opgelost worden.
3. Hoge stortplaatsen die nog niet afgedicht zijn. De komende 10 jaar zal er meer dan 5 km² actieve stortplaats afgedicht moeten worden. Deze afdichting biedt kansen voor een geïntegreerd product of aanpak, waarin de stortplaats afdichting tegelijkertijd plaatsvindt met het plaatsen van een PV systeem. Indien de grondlaag weggelaten zou kunnen worden, en het PV systeem daarvoor in de plaats de waterdichting verzorgt, levert dat een grote besparing op voor de stortplaatsafdichting.

Alle drie deze toepassingen zijn reeds gedemonstreerd. In Nederland is een voorbeeld van type 1 het Solarpark Azewijn en van type 2 het Ecopark Waalwijk. Rond type 3 vinden er diverse proeven plaats, onder meer op de stortlocaties in Eerbeek en in de Maasvlakte [19A]. In het buitenland is type 3 bijvoorbeeld al grootschalig toegepast op Deponie Hellsiek (Duitsland) en Hickory Ridge (USA). Het is de verwachting dat PV park ontwikkelaars hun pijlen de komende jaren sterk op voormalige en actieve stortplaatslocaties zullen gaan richten.

TRL	JAAR															
	2017	'18	'19	'20	'21	'22	'23	'24	'25	'26	'27	'28	'29	'30	'31	'32
Dijken	5	6	7	8			9									
Wegbermen	6	7	8			9										
Wegdek (geen auto's)	4	5		6	7	8	9									
Wegdek (met auto's)	2	3	4	5		6	7	8	9							
Geluidsschermen	7	8		9												
Stortplaatsen	7	8		9												

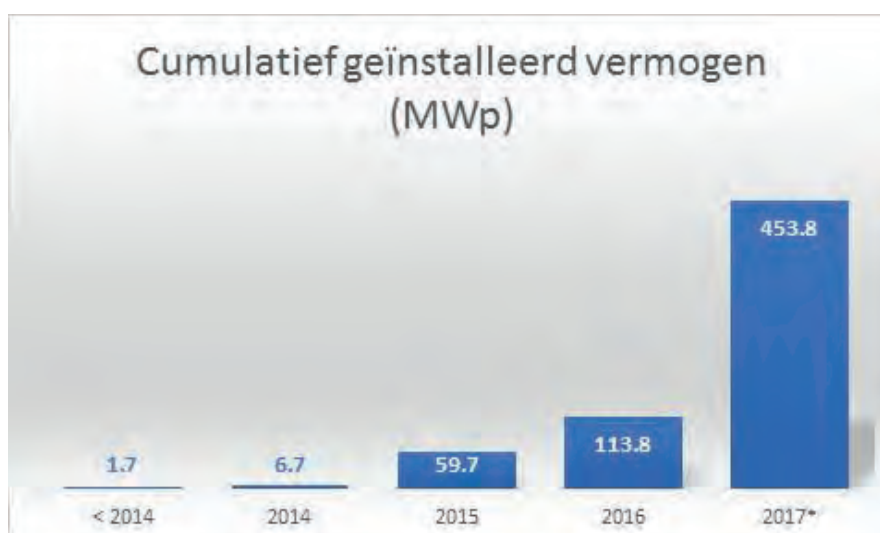
Figuur 19: Prognose van de ontwikkeling van het TRL voor de verschillende toepassingen voor PV in de infrastructuur.

6. Drijvende zonneparken

Drijvende zonneparken is een relatief nieuwe uitvoeringsvorm van grootschalige opwekking van zonnestroom. Zoals betoogd in hoofdstuk 3, is de belangrijkste motivatie voor deze toepassing de schaarste aan geschikt en beschikbaar land voor zonneparken. Wateroppervlaktes zoals irrigatiebekkens, baggerdepots, zandwinplassen en bassins bij zuiveringsinstallaties kunnen ingezet worden voor opwekking van zonne-energie. Een andere manier om waterareaal in te zetten is doormiddel van nieuw gecreëerde eilanden (bv in het Markermeer) met diverse bestemmingen, waaronder zonne-energie. Op de langere termijn zullen ook zonneparken op zee technisch en economisch haalbaar worden, bijvoorbeeld in combinatie met offshore windparken.

Interessante aspecten van “zon op water” zijn daarnaast:

- Zon op water zal gemiddeld grootschaliger uitgevoerd kunnen worden dan zon op land. Dit brengt een kostenvoordeel met zich mee.
- Zon op water projecten zullen in het algemeen op minder maatschappelijke weerstand stuiten. Zeker in die gevallen waar de aanleg van een drijvend zonnepark niet strijdig is met mogelijk andere functies van het betreffende water.
- Zon op water kan een hogere stroomopbrengst opleveren. Aspecten die hierbij een rol spelen zijn: natuurlijke koeling van de panelen, reflecties van licht aan het wateroppervlak en hogere instraling boven water vergeleken met boven land.
- In een aantal gevallen kan het drijvende PV park multifunctioneel zijn als afdekking van het wateroppervlak. Dit is als deze afdekking meerwaarde heeft door het tegengaan van vervuiling of verdamping van het water.
- Zon op water projecten zullen relatief vaak uitgevoerd worden op locaties waar ook windenergie wordt opgewekt. Aangezien zonne-energie en windenergie in hoge mate complementair zijn in de tijd, kan hiermee een effectiviteitsvoordeel behaald worden voor wat betreft de investering in de benodigde elektrische infrastructuur.



Figuur20: Ontwikkeling van de markt wereldwijd voor drijvende zonneparken [20]. Circa 97% van het huidige geïnstalleerd vermogen bevindt zich in China en Japan. Voor 2017 zijn de cijfers tot en met het derde kwartaal.

Voordat zon op water in Nederland echt grootschalig uitgerold zal worden, zal er nog voortgang geboekt moeten worden op twee belangrijke terreinen:

1. Vergunbaarheid

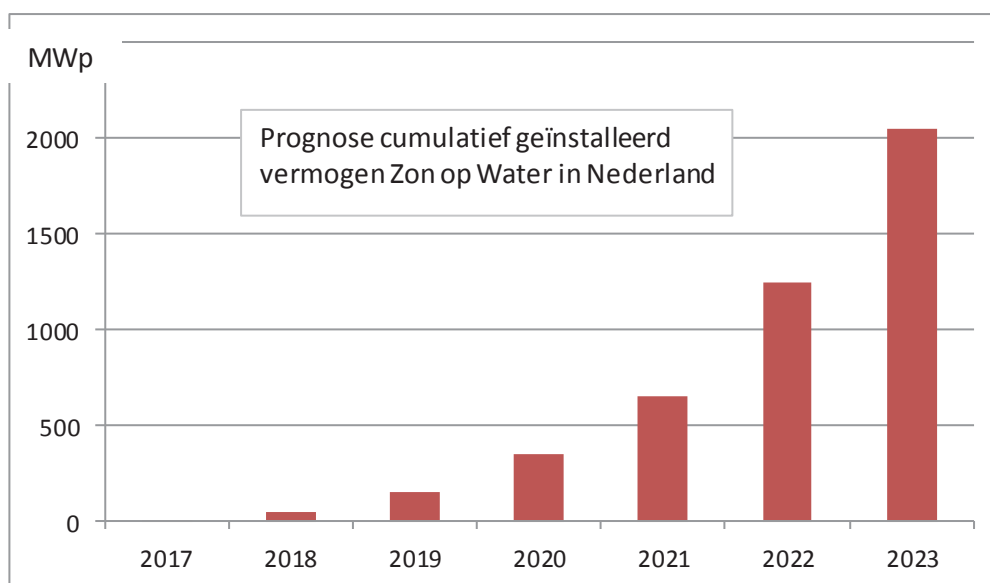
Voor de waterbeheerders (overheden), zoals Rijkswaterstaat, de Waterschappen en de Provincies, is het belangrijk om te komen tot een geharmoniseerd beleid met betrekking tot vergunningverlening voor zon op water parken. Hierbij spelen o.a. veiligheid, ecologische aspecten en waterkwaliteit een rol. Voor projectontwikkelaars en andere spelers in de keten is het belangrijk om een transparante procedure te hebben voor de vergunningsverlening.

2. Technische uitdagingen

De belangrijkste technische uitdagingen liggen op de volgende onderwerpen:

- Golf- en windbestendigheid van de drijvende PV systemen. Dit betreft het ontwerp van het systeem zelf en de verankeringsmethode.
- Relatie tussen ontwerp en logistiek. Hoe kan het systeem zo ontworpen worden dat een snelle opbouw van het drijvende PV park op locatie mogelijk is? Hoe vinden we de juiste balans tussen off-site productie van systeemonderdelen, transportkosten en opbouw op locatie? Hoe kunnen de onderhoudswerkzaamheden geminimaliseerd worden door optimaal ontwerp?
- Levensduur en betrouwbaarheid onder vochtige en corrosieve omstandigheden.
- Ontwerpaspecten met betrekking tot opbrengsten en kosten. Dit betreft o.a. optimalisatie van het koelingseffect, eventueel toepassing van sun-tracking of bifacial, keuze van de tilthoek in relatie tot windload en instralingsoptimalisatie.

Het Nationaal Consortium Zon op Water is een Nederlands consortium bestaande uit 32 partijen (overheden, kennisinstellingen en bedrijven) met als doel om 2 GWp drijvende PV te realiseren in Nederland tussen nu en 2023. In de najaarsronde 2016 van de SDE+ zijn voor het eerst drie drijvende zonnestroomprojecten toegekend. In de voorjaarsronde van 2017 werden er 13 projecten toegekend. Figuur 21 toont de verwachting van het Nationaal Consortium voor de ontwikkeling van het geïnstalleerd vermogen drijvende zonneparken op basis van informatie van de waterbeherende partijen in het Nationaal Consortium Zon op Water.



Figuur 21: Prognose van het cumulatief geïnstalleerd vermogen drijvende PV parken in Nederland.

Een schatting voor de totale potentiële uitrol voor zon op water in Nederland wordt hieronder gemaakt. Qua toepasbare technologie is het van belang om water te onderscheiden naar moeilijkheidsgraad voor deze toepassing, gebaseerd op golfslagcategorie.

Golfslagcategorie 1 noemen we de wateren met heel geringe golfslag. Het betreft ondiepe kleine wateren, met een geringe strijklengte van de wind. Van de circa 1200 km² is circa 3-5% geschikt.

Grotere binnenwateren, zoals baggerdepots, grotere meren, drinkwaterbassins en zandwinplassen vormen circa 700 km². Echter hiervan is een groter percentage van circa 5-10% geschikt.

De volgende categorie binnenwater met golfhoogtes tot zelfs 2 meter, beslaat circa 1800 km², waarvan naar verwachting 2-3% geschikt.

Tenslotte de categorie Zee, met golfhoogtes van 10 meter (en meer) is de meest uitdagende. Ook wat betreft de genoemde corrosieve omstandigheden. Uitgaande van de 2400 km² gereserveerd voor windenergie, komen we op een schatting van 51 GWp tussen de windmolenparken. Het totale potentieel in Nederland is weergegeven in tabel VI.

Waddenzee en Westerschelde laten we vanwege bijzondere ecologische waarde buiten beschouwing.

Tabel VI: Schatting van het totaal potentieel aan drijvende zonneparken in Nederland onderverdeeld naar golfslagcategorie.

Golfslagcategorie		GWp
1	Waterzuiveringsbassins, klein binnenwater, kleine zandwinplassen	8
2	Slufter Maasvlakte, Tjeukemeer, Veluwe randmeren, grote zandwinplassen	8
3	IJsselmeer, Markermeer, Zeeuwse wateren, rivierarmen	8
4	Zee	51
TOTAAL		75

Voor golfslagcategorie 1 is er inmiddels ervaring opgedaan en bestaan er gekwalificeerde systemen waarvoor grote partijen garanties willen afgeven. Er is echter nog onvoldoende kennis over de levensduur van deze systemen op langere termijn. Deze toepassing heeft daarmee TRL8.

Voor golfslagcategorie 2 loopt er momenteel een pilot vanuit het Nationaal Consortium Zon op Water. In afwachting van de resultaten bevindt deze toepassing zich op TRL5.

Voor golfslagcategorie 3 zijn de eerste kleinschalige proeven gedaan: TRL 3.

Voor golfslagcategorie 4 zijn de eerste concepten geformuleerd: TRL2.

Figuur 22 geeft onze prognose van de TRL ontwikkeling voor drijvende zonneparken voor de verschillende toepassingsgebieden.

TRL	JAAR																
	2017	'18	'19	'20	'21	'22	'23	'24	'25	'26	'27	'28	'29	'30	'31	'32	
Golfslag-categorie	1	8			9												
	2	5	6	7	8			9									
	3	3	4		5		6	7	8			9					
	4	2		3	4		5		6	7	8			9			

Figuur 22: Prognose van Technology Readiness Levels (TRL) voor drijvende zonneparken voor de verschillende golfslagcategorieën (toepassingsgebieden).

7. PV in het energiesysteem

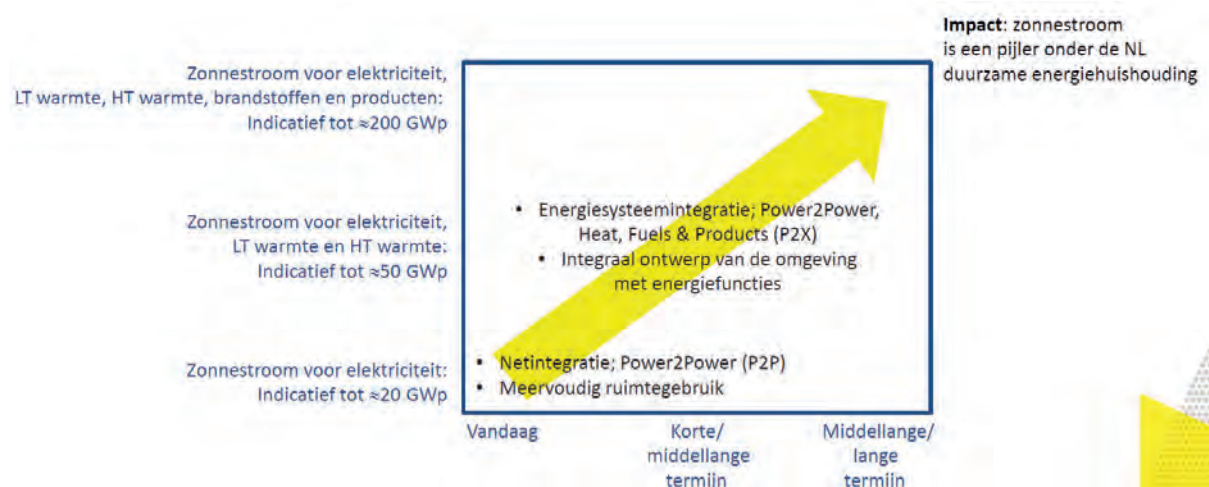
Inpassing van PV in het energiesysteem kent een aantal aspecten, die afhangen van de schaalgrootte van de toepassing. Kenmerkend voor zonne-energie (en windenergie) is dat de opwekcapaciteit niet regelbaar is (maar wel steeds beter voorspelbaar). Daardoor brengt de energietransitie een grote uitdaging met zich mee met betrekking tot balancering van het elektriciteitsnet.

In de gebouwde omgeving vindt invoeding van vermogen plaats op het laagspanningsnet dat daar niet voor is ontworpen. Met de toenemende hoeveelheid PV systemen op daken en geïntegreerd in de gebouwschil zal de beschikbare capaciteit van het net en transformatoren overschreden worden indien er geen maatregelen worden genomen. Mits goed verdeeld over het laagspanningsnet kan verspreid over Nederland 16 GWp worden geïnstalleerd zonder dat dat problemen oplevert [21].

PV parken op land zijn aangesloten op het middenspanningsnet, en inpassing van vermogens van 10-100 MW is vergelijkbaar met de inpassing van windparken van gelijke omvang.

Naast de groei van PV systemen zal de toenemende elektrificatie van mobiliteit en warmte in gasloze wijken leiden tot een zwaardere belasting van het elektriciteitsnetwerk. Energiemanagement van netten om deze stijgende vraag en aanbod te allen tijden in balans te houden, ook op lokaal niveau, wordt een grotere uitdaging. Daarbij zullen opties zoals lokale elektriciteitsopslag in huishoudbatterijen of buurtbatterijen nodig zijn, maar ook opties als het omzetten van vermogen naar warmte die kan worden opgeslagen. Meer en meer zullen zelfconsumptie en zelfvoorzienendheid op huis, straat of buurt niveau in de gebouwde omgeving van belang worden.

In figuur 23 is schematisch weergegeven wat de impact van PV zal zijn in de Nederlandse energievoorziening. Op de korte termijn levert PV elektriciteit voor huishoudelijk en commercieel gebruik. Bij toenemende vermogens en warmte/mobiliteitsvraag zal grootschalige PV daar ook voor worden in gezet. Op lange termijn zal PV een pijler zijn onder de Nederlandse duurzame energiehuishouding, met een integraal systeemontwerp als basis daarvan.



Figuur 23: Schematische ontwikkeling van de impact van PV in het energiesysteem (© Wim Sinke).

Bij zeer grote PV vermogens in ons land (ordegrootte 100 GWp) zal waarschijnlijk de huidige manier van elektriciteitstransport via een hoogspanningsnet niet meer adequaat zijn. Dan moet eerder gedacht worden aan oplossingen zoals het produceren van brandstoffen uit zonnestroom op locatie.

Het energiesysteem bestaat in algemene zin uit de vier elementen: opwek, gebruik, transport en opslag. Daarbij komt dat elk van deze elementen aspecten hebben op lokaal niveau, op wijkniveau en op nationaal (en Europees) niveau.

Informatiesystemen en big data

Van het allergrootste belang is een betrouwbaar informatiesysteem met data over opwekvermogen, gebruik, transportcapaciteit en opslagcapaciteit. Alleen op basis van een krachtig en volledig datasysteem, dat behalve data uit het heden en het verleden ook hoge kwaliteit forecasting data bevat, is een optimale regeling van het energiesysteem mogelijk, en zijn optimale investeringsbeslissingen mogelijk. Kijken we daarbij naar de PV gerelateerde aspecten dan gaat het specifiek om:

- Geïnstalleerd vermogen (kWp)
- Elektriciteitsopbrengst per geïnstalleerd vermogen (kWh/kWp)
- Forecasting van de elektriciteitsopbrengst (kWh/kWp)
- Potentieel voor nog te installeren PV vermogen (kWp)

Een goede mogelijkheid voor een betrouwbare database van geïnstalleerd PV vermogen is het PIR (Productie Installatie Register), dat de netbeheerders gezamenlijk beheren, en waar ieder PV systeem in moet worden geregistreerd. Voor betrouwbaarheid van het PIR register is handhaving op de registratieplicht van belang. Een goede controlemogelijkheid is het ten minste jaarlijks maken van luchtfoto's en de analyse daarvan. Weergave van PV installaties (vanwege privacyregelgeving op postcode 4 niveau) zal met behulp van een GIS systeem kunnen worden ontsloten.

Een stap verder is het koppelen de PIR met de actuele, real-time, of per 15 minuten, opgewekte hoeveelheid PV energie. Hiermee wordt inzichtelijk gemaakt hoeveel en waar zonnestroom wordt opgewekt in Nederland. Real-time weergave van PV opwek kan alleen als alle data van omvormers automatisch wordt verzameld in een nationale database. Hieraan kan ook een automatische methode worden toegevoegd die checkt op de systemen goed functioneren. Dit is alleen dan mogelijk als goede lokale instalingsdata beschikbaar zijn, naast natuurlijk een correcte beschrijving van de PV systeem onderdelen en onder welk hoek en richting het systeem is geïnstalleerd.

De volgende uitdaging is een accurate voorspelling van PV opwek met hoge ruimtelijke (~100 meter) en tijdsresolutie (minuten). En ten slotte als vierde goede data over potentieel voor nog te installeren PV vermogen, ook met hoge ruimtelijke resolutie.

Deze vier PV gerelateerde aspecten kunnen in combinatie met data over andere opwekcapaciteit, energiegebruik, transportcapaciteit en opslag het benodigde datasysteem vormen op basis waarvan het energiesysteem gemanaged wordt en op basis waarvan optimale investeringsbeslissingen genomen kunnen worden.

Vermijden van onnodige investeringen in het elektriciteitsnet

Investerings in verzwaring van het elektriciteitsnet kunnen beperkt worden door middel van de factoren zelfconsumptie en zelfvoorzienendheid op lokaal (residentieel) niveau en op wijkniveau. Een daling van kosten voor batterijen en een toename van vehicle-to-grid mogelijkheden zullen deze ontwikkelingen ondersteunen.

Zelfconsumptie is de mate waarin de opgewekte energie zelf momentaan gebruikt wordt. Zelfvoorzienendheid is de mate waarin in het eigen verbruik voorzien wordt door zelf opgewekte energie op bijvoorbeeld dag-, maand- of jaarbasis.

Kijken we naar de PV gerelateerde aspecten van dit vraagstuk dan gaat het specifiek om de ontwikkeling en demonstratie van:

- Systemen die op lokaal niveau PV, opslag en energiemangement (demand-side management en tariefgestuurd verbruik) combineren.
- Systemen die op wijkniveau PV, opslag en energiemangement (gebruikmakend van verschillende gebruikersprofielen binnen de wijk, demand-side management en tariefgestuurd verbruik) combineren. In feite gaat het hier om constructies van een minigrid dat beperkte interactie met het nationaal grid heeft. Wijkniveau kan hier natuurlijk ook betekenen een appartementencomplex.
- Systemen die het mogelijk maken om gericht PV capaciteit af te schakelen om overbelasting van het net te voorkomen.

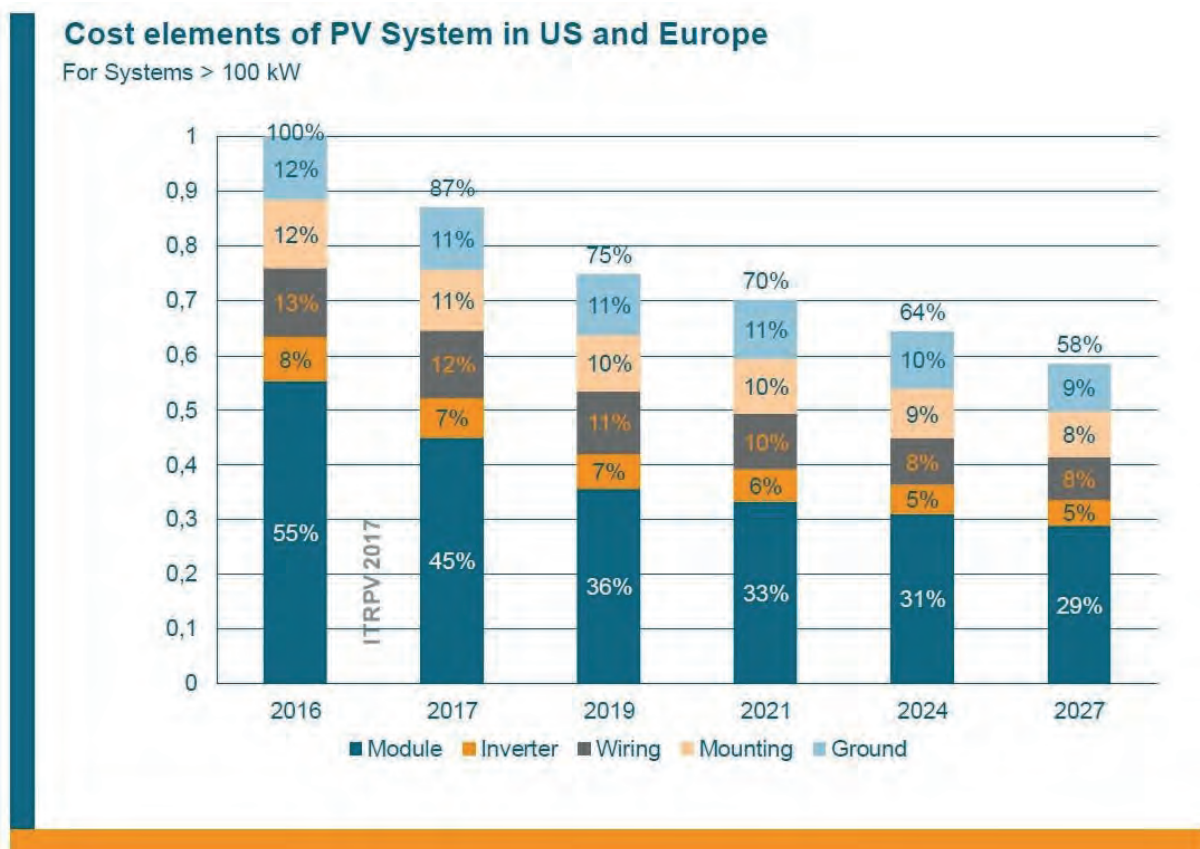
In samenvatting zijn de belangrijkste benodigde ontwikkelingen en innovaties voor integratie van PV in het energiesysteem:

- Slimme systemen om de betrouwbaarheid van databases met geïnstalleerd PV vermogen te optimaliseren;
- Slimme systemen die real-time data verzamelen van PV opwek via koppelen van data van omvormers. Eventueel in combinatie met een automatische performance check;
- Accurate voorspelling van PV opwek met hoge ruimtelijke (~100 meter) en tijdsresolutie (minuten);
- Betrouwbare slimme methodes om potentieel voor nog te installeren PV vermogen te bepalen met een hoge ruimtelijke resolutie;
- Slimme systemen die voorspellen waar en wanneer inderdaad extra PV vermogen geïnstalleerd gaat worden (als functie van prijzen en regelgeving en met inachtneming van sociale mechanismes zoals olievlekwerking) ;
- Ontwikkeling en demonstratie van combinaties van PV vermogen met opslag op verschillende schaalgroottes en op basis van verschillende business modellen;
- Systemen die het mogelijk maken om gericht PV capaciteit af te schakelen om overbelasting van het net te voorkomen (curtailment).

8. Overige systeemcomponenten

8.1. Omvormers

Als gevolg van de sterke prijsdaling van PV modules, wordt het kostenaandeel van andere componenten zoals de omvormers relatief belangrijker. Figuur 24 toont de verwachte prijsontwikkeling van PV systemen in de VS en Europa onderverdeeld naar de verschillende systeemcomponenten [7].



Figuur 24: Prognose van de kostenontwikkeling voor PV systeemcomponenten [7].

Een recente ontwikkeling in de architectuur van omvormers is de uitfasering van trafo-gebaseerde omvormers ten gunste van een trafo-loze omvormer-architectuur. Dit draagt in belangrijke mate bij tot de kostenreductie van de omvormers tot circa 15€ct/Wp voor residentieel tot 0,10 15€ct/Wp voor grote zonneparken [22]. Dunnefilm PV modules zijn nog niet allemaal geschikt voor toepassing met trafo-loze omvormers.

Andere belangrijke ontwikkelingen met betrekking tot string omvormers zijn:

- Het introduceren van een zogenaamde “shadow-mode”. Als het PV systeem geïnstalleerd wordt op een locatie met partiële beschaduwing, kan de omvormer ingesteld worden in deze shadow-mode. Dan wordt met een zekere frequentie een sweep door de I-V curve gemaakt en het optimale MPPT punt opnieuw ingesteld. Hiermee wordt voorkomen dat het systeem

in een lokaal (niet optimaal) werkpunt op de IV functioneert. Door de functionaliteit is het opbrengstvoordeel van MLPM oplossingen ten opzichte van een string omvormer sterk verminderd [23].

- Het creëren van toegang tot omvormers door netbeheerders ten behoeve van curtailment en veiligheid.
- Remote monitoring functionaliteit.

8.2. Schaduwlineariteit, MLPM en smart modules

Integratie van PV elementen in de gebouwde omgeving zal vanwege de afnemende kosten meer en meer ook op niet ideale plaatsen plaatsvinden. “Niet ideaal” kan betekenen:

- Onder een andere dan de voor opbrengst optimale oriëntatie. Veelal worden op platte daken al systemen gecombineerd op het westen en oosten geïnstalleerd om het vermogen per vierkante meter te optimaliseren. Ook zal bij een steeds groter geïnstalleerd PV vermogen in ons land de waarde van de opgewekte stroom aan de randen van de dag hoger liggen dan rond het middaguur.
- Op plaatsen met gedeeltelijke beschaduwing, bijvoorbeeld door schoorstenen, dakkapellen en nabij gelegen gebouwen.

Deze ontwikkelingen hebben een negatief effect op de opbrengst in kWh/Wp. Innovaties om dit effect te minimaliseren zijn belangrijk.

Schaduwlineariteit betekent dat de op het PV oppervlak vallende instraling naar verhouding (lineair) wordt omgezet in elektrische stroom. In het algemeen geeft beschaduwing meer dan evenredige verliezen in de stroomopbrengst. Schaduwlineariteit kan verbeterd worden:

- Op systeemniveau: door de toepassing van power optimizers of micro-omvormers, een familie van componenten vaak samengevat onder de term MLPM (module level power management).
- Op module-niveau: door de module elektrisch onder te verdelen in substrings met elk hun eigen MPPT werkpunt.
- Op module-niveau: door de module op te bouwen uit afzonderlijke cellen die kleiner zijn dan normaal en dat te combineren met een geavanceerde configuratie van cellen tot een module.

De twee laatst genoemde innovatierichtingen zijn voorbeelden van zogenaamde smart modules. Onder een smart module wordt verstaan een PV module met geïntegreerde elektronica. Deze elektronica kan diverse functionaliteiten hebben:

- Monitoring en diagnostiek
- Veiligheidsfunctionaliteit
- Optimalisatie van opbrengst onder partiële beschaduwing of bij mismatch tussen modules
- DC-AC conversie; het betreft dan een ac-module of een module met geïntegreerde micro-omvormer
- DC-DC conversie; het betreft dan een geïntegreerde eerste trap van een power optimizer
- Interface voor smart grid functionaliteit

9. Overige toepassingen

9.1. Toepassingen van III-V gebaseerde PV

Het primaire toepassingsgebied voor III-V cellen is de ruimtevaart waar deze cel-technologie een onaantastbare positie heeft. Dit is gebaseerd op de hoge vermogen/gewicht verhouding, en weerstand tegen extreme condities zoals elektron-, proton- en harde UV straling en cyclische temperatuurwisselingen in de range tussen min en plus 100 °C. De ruimtevaartmarkt wordt vrijwel volledig bediend door drie cel-producenten (Spectrolab, SolAero/Emcore en Azur Space). De triple-junction cellen die deze producenten voor deze toepassing produceren, voldoen aan de strenge ruimtevaartkwalificatie eisen en hebben een rendement >30% onder AM0 condities.

Multi-junctie III-V cellen kunnen ook geschikt zijn voor toepassing in concentrerende systemen met een hoge concentratiefactor (>100x): concentrating photovoltaics (CPV). In het laboratorium worden onder deze condities rendementen >40% behaald op basis van min of meer commercieel beschikbare cellen. Deze worden geproduceerd door de drie producenten voor ruimtevaartcellen aangevuld met nog een zestal bedrijven en tevens door onderzoeksinstituten waar III-V cellen worden ontwikkeld en op beperkte schaal geproduceerd [24].

Tabel VII: overzicht van de grootste zonneparken [25] op basis van III-V CPV technologie, in gebieden met hoge directe instraling (DNI).

Initiële ontwikkelaar	Huidige Partij/naam	Grootste Power field	Omvang [MWp]	Lokale DNI [kWh/(m ² .jr)]
Emcore	Suncore	Colmud 1, China	80	1774
Soitec/Concentrix	STACE	Touwsriver, S-Africa	44	2413
Amonix	Arzon Solar	Alamosa, USA	35	2482

Er is inmiddels beperkt ervaring opgedaan met zonneparken op basis van CPV (zie tabel VII) [25]. De systemen in deze tabel zijn allen gebaseerd op een Fresnellens technologie met een concentratiefactor van rond de 500x. Alternatieve concentratie systemen kunnen gebaseerd zijn op spiegels of light-guides met microlenzen.

De doorontwikkeling van CPV systemen verloopt simultaan langs drie min of meer onafhankelijk lijnen:

- de III-V multi-junctie cellen
- de module (optica en celreceiver)
- het zonvolgsysteem

Vooral de continue rendementsverbetering van de III-V cellen is een belangrijke drijfveer in de performance/kosten ontwikkeling van CPV systemen. Door de hoge concentratiefactor is de benodigde omvang aan III-V cellen in het systeem gering (voor een c-Si systeem van vergelijkbare omvang is een 500 maal grotere celproductie-capaciteit nodig). Hierdoor kunnen nieuwe ontwikkelingen op laboratoriumschaal relatief snel in productie worden geïmplementeerd. Het toepassingsgebied waarin CPV mogelijk competitief is t.o.v. c-Si kan zich de komende jaren steeds meer uitbreiden in de richting van gebieden met lagere niveaus van directe instraling (DNI). Voor uitrol in Nederland lijkt echter CPV geen rol te gaan spelen.

Naast bovengenoemde CPV zonneparken, is er ook een variëteit aan CPV systemen in ontwikkeling waarmee toepassing in de gebouwde omgeving wordt beoogd. In het geval van een hoge concentratiefactor worden ook hierin III-V cellen toegepast. Deze systemen maken veelal gebruik van innovatieve optische en zonnvolgsystemen om het licht te concentreren en hebben naast het genereren van elektriciteit vaak nog een tweede functionaliteit zoals het opwekken van warmte of het reguleren van daglicht. In Nederland werken o.a. Wellsun en SunCycle ondersteund door diverse universiteiten en instituten aan de ontwikkeling en implementatie van dergelijke systemen.

9.2. PV toepassingen in de glastuinbouw

Met circa 100 km² lijkt de glastuinbouw een interessant areaal voor toepassing van PV. De eerste studies naar deze toepassing laten echter zien dat het een enorme uitdaging is om een economisch haalbare toepassing te ontwikkelen op het kassendak, die niet of nauwelijks ten koste mag gaan van de groei van de gewassen in de kassen.

Zowel het gewas in de kassen als de PV maakt gebruik van het invallende zonlicht. Het betreft hier dus niet alleen concurrentie om het oppervlak, maar ook concurrentie om het zonlicht. De gewassen gebruiken echter slechts een deel van het spectrum van het zonlicht (bijvoorbeeld het rode en blauwe deel van het zichtbare spectrum, dit verschilt echter van gewas tot gewas).

Een oplossingsrichting voor het combineren van PV met kassenbouw is daarom mogelijk gelegen in het ontwikkelen van een methode waarbij alleen het deel van het spectrum dat niet nodig is voor de gewassen, voor de fotovoltaïsche omzetting gebruikt wordt.

Hierbij zijn twee oplossingsrichtingen in onderzoek:

- PV technologie die selectief delen uit het spectrum gebruikt en andere delen doorlaat. Bij voorkeur zou deze spectrale afhankelijkheid ook nog te kiezen zijn d.m.v. finetuning van het actieve PV materiaal.
- Een optisch systeem dat het spectrum scheidt in een deel voor de gewassen en een deel voor de PV.

9.3. PV toepassingen op voer- en vaartuigen

De primaire motivatie voor de toepassing van PV op voer- en vaartuigen zit niet zo zeer in de mogelijkheid om veel GWp te kunnen installeren, maar veeleer in de constatering dat voer- en vaartuigen mobiel zijn en derhalve niet aan een vast elektriciteitsnet zitten. Zowel in boten als in auto's kan PV gebruikt worden om de zich aan boord bevindende accu's of batterijen op te laden.

De technologieontwikkeling voor integratie van PV in zowel boten als auto's wordt in sterke mate gestimuleerd door wedstrijden op dit gebied tussen veelal teams van studenten van verschillende universiteiten.

Toyota heeft een prototype gepresenteerd waarbij PV integratie gebruikt wordt als range extender voor een elektrische auto [27]. Het Nederlandse startup bedrijf Lightyear kondigde aan te werken aan een elektrische auto die volledig door zonlicht opgeladen wordt [28].

De belangrijkste uitdagingen qua innovatie op dit gebied zijn:

- Ontwikkeling van een vervormbaar PV systeem dat geïntegreerd kan worden conform de contouren van een auto- of bootontwerp;

- Ontwikkeling van een elektrische configuratie die de opbrengstverliezen als gevolg van de onderling verschillende oriëntaties van de toegepaste PV cellen minimaliseert (zie ook paragraaf 8.2);
- Ontwikkeling van PV materialen die de beperkingen voor de ontwerpers van auto's of boten minimaliseren. Te denken valt bijvoorbeeld aan een (lieftst hoog efficiënte) semi-transparante PV folie, die als eindresultaat voldoende vrijheid aan de kleurperceptie toelaat.

De IEA-PVPS (International Energy Agency – Photovoltaic Power Systems Programme) heeft onlangs initiatief genomen tot een nieuwe internationale samenwerking op dit gebied [29].



Figuur 25: Ontwerp van een elektrische auto met geïntegreerde PV als range extender [27].

10. Innovatiethema's

In voorgaande hoofdstukken zijn de te verwachten groeiontwikkeling van de Nederlandse PV-markt, de belangrijkste marktontwikkelingen en -belemmeringen, en de belangrijkste innovatiethema's & ontwikkeluitdagingen beschreven van vier groepen van toepassingsgebieden. Bepaalde innovatiethema's zijn heel specifiek voor een bepaald toepassingsgebied, en een aantal innovatiethema's gelden voor meerdere toepassingsgebieden. In onderstaande tabel zijn de belangrijkste innovatiethema's overzichtelijk weergegeven inclusief de relatie met de verschillende toepassingsgebieden.

Het eerste cluster van innovatiethema's richt zich met name op het optimaliseren van de performance van zonnecellen en -modules teneinde de Levelised Costs of Electricity (LCoE) naar beneden te kunnen brengen. Veel van deze innovatiethema's worden nader uitgewerkt in een, of enkele van de andere roadmaps gericht op kristallijn silicium PV-technologieën, dunne film PV-technologieën, en hybride PV-technologieën.

Voor zonnestroomsystemen op/ in daken en gevels van woonhuizen, kantoren, industrieel vastgoed en agrarisch vastgoed betekent het verbeteren van de esthetische kwaliteit dat er behoefte is aan zonnestroomsystemen in verschillende kleuren, diverse maten van transparantie, en met diverse texturen. Verschillende kleuren omdat de architect de vrijheid wil hebben om een gebouw te ontwerpen waarbij hij/ zij niet wordt beperkt door de kleur van de gevel/ dak-elementen. Maar bij zonneparken op agrarisch grondgebieden of in de infrastructuur is kleur ook steeds meer van belang om het zonnestroomsysteem te kunnen integreren in het landschap.

Om een (gedeelte van een) gevel of dak geheel te kunnen vullen met zonnestroomelementen is het van groot belang dat zonnestroomelementen beschikbaar komen in een groot aantal verschillende vormen en maten. Overigens geldt dit niet alleen voor gevels en daken maar ook voor modules die gebruikt worden in zonneparken op agrarische gronden en in de infrastructuur. Belangrijkste driver in deze laatste categorie is opnieuw het faciliteren van de gewenste landschappelijke inpassing.

In plaats van het toevoegen van zonnepanelen ten behoeve van het opwekken van zonnestroom op een bepaalde locatie is er een belangrijke ontwikkeling gaande richting het integreren van functies die op die plaats zo wie zo plaatsvinden. Voorbeelden van een dergelijke functionele integratie zijn:

- Het zonnestroomsysteem ook gebruiken om een dak of gevel wind- en waterdicht te maken.
- Een zonnestroomsysteem te integreren in een geluidsscherm langs de snelweg zodat het systeem zowel het geluid van de snelweg kan weren als zonnestroom kan opwekken.
- Een zonnestroomsysteem geïntegreerd in het wegdek waarbij het zonnestroomsysteem dus ook de gewenste mechanische eigenschappen van het wegdek levert.
- Een zonnestroomsysteem dat tevens zorgt voor het afdekken van een vuilstortplaats.
- Een zonnestroomsysteem dat wordt geplaatst in een bouwelement dat voor schaduw zorgt. Denk hierbij aan overkappingen in stations, parkeerplaatsen, atria, etc.
- Een drijvend zonnestroomsysteem dat een waterpartij dusdanig 'afsluit' dat verdamping van het water wordt tegengegaan en/of vervuiling van het water wordt tegengegaan/ verminderd.

Tabel VIII: Overzicht van innovatiethema's in deze roadmap.

INNOVATIETHEMA'S	Zonneparken op land	PV op gebouwen	PV in de infrastructuur	Drijvende zonneparken
Performance (LCOE)				
fabricagekosten van modules en andere systeemcomponenten verlagen	X	X	X	X
elektriciteitsopbrengst per oppervlakteenheid verhogen (modulerendement - %)	X	X	X	X
elektriciteitsopbrengst per oppervlakteenheid verhogen (vermogensdichtheid - Wp/m ²)	X	X	X	X
elektriciteitsopbrengst onder praktijkomstandigheden (kWh/kWp) verhogen (performance ratio)	X	X	X	X
degradatie van het PV rendement over tijd verminderen	X	X	X	X
kosten voor installatie van zonnestroomsystemen verlagen	X	X	X	X
kosten voor onderhoud en beheer van zonnestroomsystemen verlagen	X	X	X	X
Esthetische kwaliteit				
zonnestroomsystemen in elke gewenste kleur, transparantie en textuur beschikbaar maken	X	X	X	
zonnestroomsystemen in elke gewenste vorm en maat beschikbaar maken	X	X	X	
Functionele integratie				
effectief combineren van een PV installatie met functionele mechanische eigenschappen		X	X	
effectief combineren van een PV installatie met de functie wind en waterdichtheid		X		X
effectief combineren van een PV installatie met de functie geluidswering		X	X	
effectief combineren van een PV installatie met het afdekken van een stortplaats			X	
effectief combineren van een PV installatie met het creëren van schaduw	X	X	X	
effectief combineren van een PV installatie met het tegengaan van vervuiling of verdamping van water behalve het leveren van zonnestroom levert het systeem ook zonnewarmte (PVT-systeem)		X		
effectief combineren van een PV installatie met een agrarische functie (of natuur of recreatie)	X			
Overige technische uitdagingen				
afhankelijkheid van partiële (dynamische) beschaduwing verminderen		X	X	
integrale duurzaamheid (LCA, MPG) verbeteren	X	X	X	X
integratie met lokaal energy management systeem (w.o. opslagsystemen) verbeteren	X	X	X	X
koppeling met (slimme) energienetwerken verbeteren (remote monitoring, curtailment, ..)	X	X	X	X
optimalisatie van het productontwerp voor de productie- en logistieke keten		X	X	X
effectief elektrisch systeemontwerp voor langgerekte PV systemen			X	
verminderen van het effect van vervuiling	X	X	X	X
golf- en windbestendigheid van het PV systeem				X
verminderen van toepassingsspecifieke degradatie (bv corrosieve omgeving)			X	X
opbrengstoptimalisatie door koeling en/of ventilatie		X		X
optimalisatie van instraling en orientatie (bv OW configuraties en sun-tracking)	X			X

- Een systeem dat in staat is om zowel zonnestroom als zonnewarmte te oogsten (PVT-systeem).
- Een zonnestroomsysteem geplaatst op agrarische- of recreatieve gronden waarbij de originele functie wordt gecombineerd met de opwekking van zonnestroom. Voorbeeld hiervan zijn vrije uitloop van kippen of schapen onder de panelen van een zonnepark, het verticaal plaatsen van bifacial panelen in een boomgaard waarbij de constructie van de panelen eventueel zelfs gebruikt kan worden om de agrarische functie te verbeteren. In dit kader kan ook gedacht worden aan bijvoorbeeld het toevoegen van een zonnestroomfolie op een kunstgrasveld voor de momenten dat het kunstgrasveld niet gebruikt wordt, en het integreren van PV-panelen in een kasdek waarbij alleen de golflengtes van het licht dat relevant is voor de groei van de planten wordt doorgelaten en de rest van de golflengtes wordt gebruikt om zonenstroom op te wekken.

Tenslotte zijn er nog een aantal technische uitdagingen geïdentificeerd die niet in bovenstaande categorieën vallen. De eerste betreft innovatieve oplossingen om de afhankelijkheid van zonnestroomsystemen voor partiële beschaduwning te verminderen. Dit is met name van belang voor zonnestroomsystemen op daken en gevels van gebouwen, maar ook voor zonneparken in en langs (snel)wegen en spoorwegen is er sprake van (dynamische) partiële beschaduwning van zonnepanelen. Bijkomende uitdaging bij deze laatste toepassingen is het ontwerpen van zeer langgerekt zonnestroomsystemen, wat met name consequenties heeft voor het elektrische systeemontwerp.

Natuurlijk is elk zonnestroomsysteem onderdeel van het energiesysteem en beïnvloedt daarmee dat systeem ook direct. Om de balans tussen de vraag en het aanbod van duurzame energie op een tijdinterval van dagen, uren, minuten goed te kunnen regelen wordt een koppeling tussen het zonnestroomsysteem en elektriciteitsopslagsystemen (lokaal en regionaal) van steeds groter belang. Hiervoor zullen, naast batterijsystemen, ook innovatieve energieregelsystemen ontwikkeld moeten worden. Daarnaast zal het steeds belangrijker worden dat zonnestroomsystemen van afstand uitgelezen en gestuurd kunnen worden. Hiervoor moeten innovatieve slimme elektrotechnische componenten ontwikkeld worden.

Tijdens operatie kunnen zonnestroomsystemen vuil worden waardoor het systeem minder stroom zal opwekken. Voor diverse toepassingen is behoefte aan oplossingen om het effect van vervuiling te verminderen. Dit is van toepassing op daken, gevels, zonneparken op land, in de infrastructuur en ook voor drijvende zonneparken. Denk bij deze laatste vooral aan aangroei van planten en zoutafzetting op het systeem. Overigens zijn voor deze laatste toepassing nog twee innovatie-uitdagingen van toepassing en dat is het verminderen van de degradatie van het systeem als gevolg van de extreem corrosieve omgeving op water in het algemeen en op zee meer in het bijzonder, en de gewenste bestendigheid van het systeem tegen wind en hoge golven.

Uiteraard wordt elk zonnestroomsysteem zo geïnstalleerd dat het rendement van het systeem zo optimaal mogelijk is. Wat optimaal is hangt af van de specifieke toepassing. De opbrengst kan bijvoorbeeld worden geoptimaliseerd door het actief of passief koelen van de panelen, het optimaal oriënteren van de panelen t.o.v. de zon (zuidoriëntatie vs oostwestoriëntatie, sun tracking, etc.).

Tenslotte zal de integrale duurzaamheid van een zonnestroomsysteem steeds belangrijker worden. Hierbij dient gedacht te worden aan het gebruiken van niet schaarse materialen, het beperken van energie om een systeem te produceren, en de mogelijkheid om een systeem te recyclen. Ook dit zijn belangrijke innovatiethema's voor zonnestroomsystemen in de nabije toekomst.

Referenties

- [1] *xSi PV Technologies Roadmap – TKI Urban Energy and ECN* – Wim Sinke, Wijnand van Hooff, Ingrid Romijn, Jan Kroon, Bonna Newman and Arthur Weeber (2016).
- [2] *Thin film PV roadmap in Dutch perspective* – Ando Kuypers (2017).
- [3] *Nationale Wetenschapsagenda* – wetenschapsagenda.nl (2015).
- [4] *Kennis- en Innovatieagenda 2016-2019* - TKI Urban Energy (2015).
- [5] *Opties voor energie- en klimaatbeleid* – Planbureau voor de Leefomgeving (2016).
- [6] *Energie en Ruimte, een nationaal perspectief*, Dirk Sijmons, Vereniging Deltametropool (2017).
- [6A] *Ruimte 10-pager*, Stuurgroep uitwerking Energieagenda (2017).
- [7] *International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) 8th edition* – www.itrpv.net (2017).
- [8] *Accelerating the energy transition: cost or opportunity?* – McKinsey&Company (2016).
- [9] www.cbs.nl (2016).
- [10] en.wikipedia.org/wiki/Technology_readiness_level.
- [10A] *Nationaal Actieplan Zonnestroom 2016*, Jasper Lemmens e.a., www.nationaalactieplanzonnestroom.nl (2016)
- [11] *De energietransitie: een nieuwe dimensie in ons landschap*, Position paper van ECN en WUR, Martine Uyterlinde e.a. (2017).
- [11A] *Grondgebonden zonneparken – ruimtelijke inpassing in Nederland*, RVO.nl (2015).
- [12] Start verkenning Drentse Zonneroute A37, www.rijkswaterstaat.nl (2017).
- [12A] *PV and biodiversity*, ECN rapport, Machteld Lamers, Koen de Groot, John. van Roosmalen (2015).
- [13] *Bijna Energie Neutrale Gebouwen*, www.rvo.nl.
- [14] *Building Integrated Photovoltaics: Product overview for solar building skins*, www.seac.cc (2017).
- [14A] *SET Plan - Declaration on Strategic Targets in the context of an Initiative for Global Leadership in Photovoltaics* (2017).
- [15] *BIPV Position Paper*, ETIP, Silke Krawietz e.a., www.etip-pv.eu (2016).
- [16] *PVT and the Battle of the Roof; A techno-financial feasibility study on photovoltaic/thermal modules in the Netherlands*, Master Thesis TU Eindhoven, J.D. Bottse (2017).

- [17] *PVT benchmark study*, Corry de Keizer, Jeffrey Bottse, Minne de Jong, www.seac.cc (2017).
- [18] *Lectures Solarthermie* - Kassel University, K. Vajen and U. Jordan (2012).
- [19] www.solarroad.nl; www.wattwaybycolas.com; www.solarroadways.com
- [19A] *PV on landfills – A Dutch case study using flexible PV modules*, K. Sinapis, e.a., EU-PVSEC (2017).
- [20] Data door de auteurs van dit rapport, op basis van een internetsearch.
- [21] *Het potentieel van zonnestroom in de gebouwde omgeving van Nederland*, Planbureau voor de Leefomgeving en DNV GL (2014).
- [22] *U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark*, Ran Fu e.a. (2016).
- [23] *A comprehensive study on partial shading response of c-Si modules and yield modeling of string inverter and module level power electronics*, K.Sinapis e.a., *Solar Energy* 135, P. 731-741 (2016).
- [24] *Current status of concentrator photovoltaic (CPV) technology*, M. Wiesenfarth, S.P. Phillipps, A.W. Beth, K. Horowitz and S. Kurtz, ISE/NREL study (2017).
- [25] Online data base: <http://cpvconsortium.org/projects> (2017) .
- [26] *Perspectief zonnestroom in de agrarische sector*, Joanneke Spruijt en Andrea Terbijhe (2016).
- [27] <http://toyota.jp/priusphv> (2017).
- [28] www.lightyear.one (2017).
- [29] <http://iea-pvps.org> (2017).
- .

Dankwoord

De auteurs bedanken de volgende mensen voor inspirerende discussies, waardevolle feedback en tekstuele bijdragen:

Jaap Baarsma	Holland Solar
Peter Blokker	ECN
Rolf Heijnen	Good!
Huib van den Heuvel	Solliance
Rik Jonker	Rijkswaterstaat
Ton van Korven	LTO
Ando Kuypers	TNO
Machteld Lamers	ECN
Henk Miedema	TNO
Bonna Newman	ECN
Laetitia Ouillet	TU Eindhoven
Angèle Reinders	Universiteit Twente
John Schermer	Radboud Universiteit Nijmegen
Wim Sinke	ECN
Arno Smets	TU Delft
Paul Wyers	ECN