

RUIMTELIJK POTENTIEEL VAN ZONNESTROOM IN NEDERLAND



Inhoud

	3		
			48
	6		51
	7		52
	8		
	11		
			57
			58
			59
	13		
	14		
	18		
	20		62
	22		70
	24		
			73
			97
	26		
	27		
	31		
	35		
	39		
	43		

Samenvatting

Deze studie onderzoekt het ruimtelijk potentieel van zonnestroom in Nederland in 2050. Zonnestroom zal naar verwachting een grote rol spelen in de Nederlandse energietransitie en een belangrijke bijdrage kunnen leveren aan het halen van de CO₂-reductiedoelen voor 2030 en 2050 zoals uitgesproken in het klimaatakkoord en de klimaatwet.

In dat licht is het relevant om over goede informatie te beschikken over de ruimtelijke mogelijkheden en implicaties van zonnestroom in Nederland. Eerdere studies op dit onderwerp onderzochten meestal slechts een deelgebied van Nederland. Ook zijn de aannames uit deze studies door de snelle ontwikkelingen van de techniek veelal aan een herziening toe. Deze studie levert een landsdekkende schatting van het ruimtelijke potentieel op basis van recente gegevens en projecties. Met de resultaten van deze studie kan de discussie over de toekomstige omvang van het zonnestroomvermogen en de plaatsing van dit vermogen in verschillende gebieden in Nederland op basis van actuele feiten gevoerd worden. Voor het bepalen van het ruimtelijk potentieel van zonnestroom is Nederland onderverdeeld in vier ruimtelijke categorieën:

- Gebouwen (woningen en utiliteitsgebouwen)
- Infrastructuur (verkeersinfra en erven/ overige)
- Landschap (landbouwgronden, overig buitengebied)
- Water (binnenwater, buitenwater, EEZ van den Noordzee)

Elk van deze ruimtelijke categorieën is vervolgens op basis van verschillen in toepassingsmogelijkheden van zonnestroom onderverdeeld in landgebruiktypen waarvan de grootte van de oppervlakken is bepaald door gebruik te maken van gemeentelijke basisregistraties zoals de BAG en BGT en aanvullende bronnen.

Vervolgens zijn in deze studie 38 systeemtypologieën geïdentificeerd die gebruikt kunnen worden om op deze landgebruik typen zonnestroom te produceren. Per systeemtypologie is bepaald wat de gemiddelde stroomproductie per oppervlakte-eenheid per jaar is (dus de horizontale projectie van het zonnestroomsysteem waarbij rekening is gehouden met hellingshoek en pakkingsgraad van de panelen, en typische obstakel- en randfracties), op basis van een schatting van de gemiddelde opbrengst van PV-opwekcapaciteit die in 2050 in Nederland geïnstalleerd zou kunnen zijn. Op basis van deze gegevens kan onderzocht worden wat de ruimtelijke impact zou zijn wanneer een bepaalde jaarlijkse hoeveelheid zonnestroom in Nederland gevraagd wordt.

De schattingen over de energieopbrengst en het deel van het oppervlak dat te benutten is in 2050 vallen in deze studie veelal hoger uit dan in eerdere studies op dit gebied. Dit is grotendeels te verklaren doordat we in deze studie met een hoger gemiddeld rendement rekenen (23%), een lagere ondergrens hanteren voor minimaal benodigde instraling (~500 kWh/(kWp*jr)), met hogere maximale bedekkingsgraden rekenen voor daken (65-80%) en doordat we enkele innovatieve systeemtypologieën, zoals lichtgewicht panelen, hebben opgenomen die het mogelijk maken additioneel oppervlak te benutten.

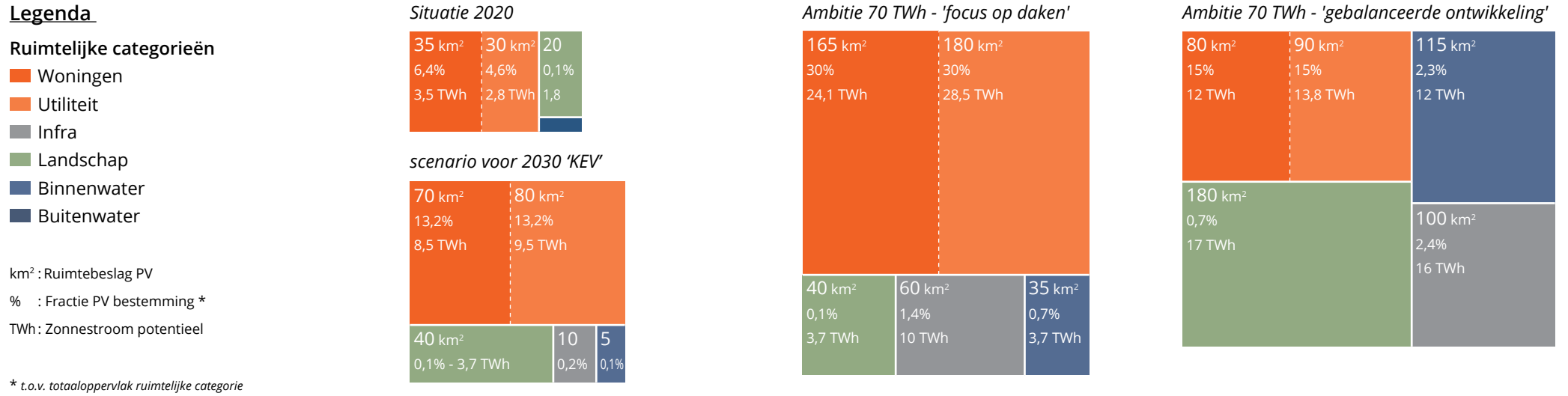
Er zijn vervolgens een aantal varianten verkend waarbij de gevraagde opwek en onderlinge verhouding van de typologieën op elk van de vier functionele hoofdgebieden is gevarieerd.

Uit deze verkenningen blijkt dat de ruimtelijke potentiële voor zonnestroom groot zijn in verhouding tot het huidige geïnstalleerde vermogen, de ambities voor 2030 en de

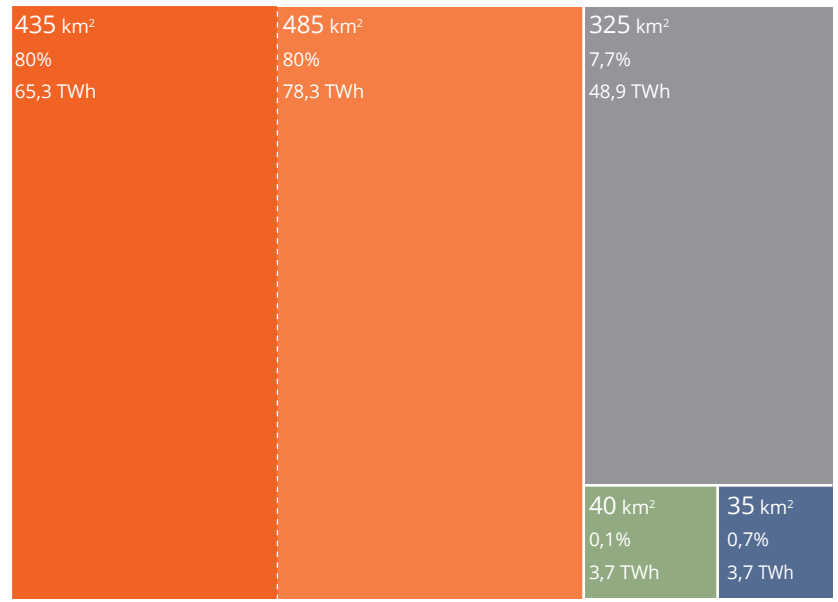
voorspellingen over het geïnstalleerde zonnestroomvermogen in 2050. Het ruimtelijk potentieel op daken en verharde terreinen is voldoende om een groot deel van de opwek te kunnen herbergen bij een opgave van 70 TWh/jr en ook bij een grotere opgave van 200 TWh/jr in 2050. Dit wordt geïllustreerd met scenariovarianten 'focus op daken'. We hebben ook varianten geschetst waarin beide opgaves met een meer gebalanceerde verdeling over alle mogelijke terreinen en toepassingsvormen worden ingevuld. Voor de realisatie van een geambieerde jaarlijkse opwek op een bepaalde termijn is echter niet alleen het ruimtelijk potentieel bepalend. Ook de snelheid waarmee opwek van zonnestroom op de betreffende oppervlakken daadwerkelijk kan worden gerealiseerd speelt een belangrijke rol. Die snelheid wordt bepaald door een scala aan factoren, zoals technische en financiële haalbaarheid, eigendomsconstructies, eisen aan mede-ruimtegebruik en meer. Al deze factoren samen bepalen uiteindelijk de verdeling van zonnestroomsystemen over de verschillende mogelijke terreinen.

De resultaten van deze studie laten zien dat zonnestroom van Nederlandse bodem ruimtelijk gezien een grote rol kan spelen in onze toekomstige energievoorziening en dat er nog veel keuzeruimte is om invulling te geven aan de zonnestroom opgave in 2050. Ook laat deze studie zien dat innovatie op de toepassingsgebieden offshore zonnestroom en zonnestroom in de infrastructuur en op gevels tot significant extra potentieel kunnen leiden. Ten slotte wordt inzichtelijk gemaakt wat de ruimtelijke implicaties zijn van huidige beleidskeuzes en maatschappelijke voorkeuren op het gebied van zonnestroom bij woningen, in zonneparkontwerp en qua prijs-prestatie verhouding van zonnepanelen.

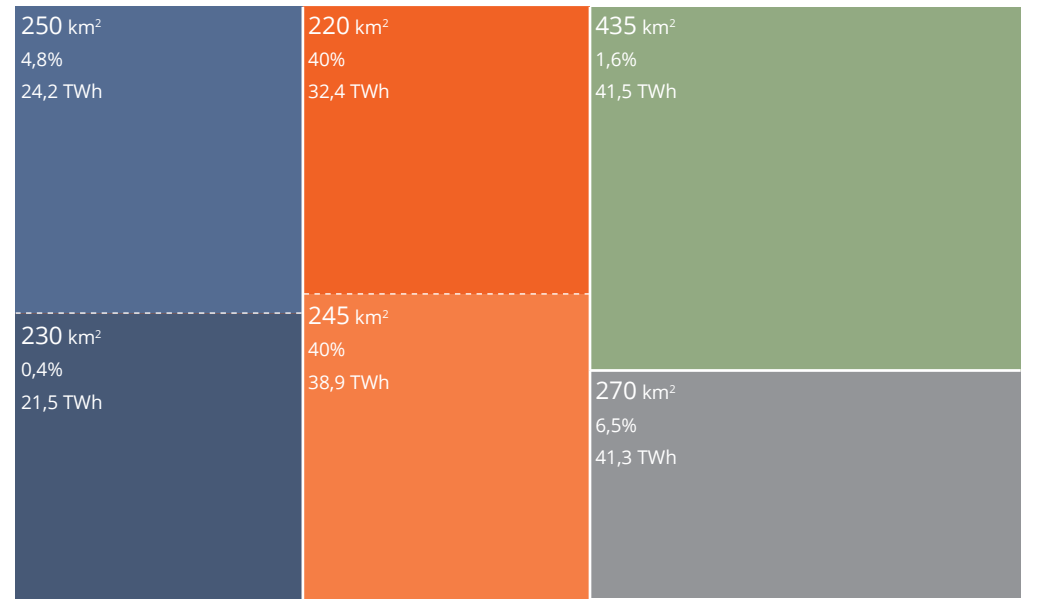
Figuur 1. Bruto ruimtebeslag zonnestroom in 2020, in 2030 en bij verschillende varianten voor 2050



Ambitie 200 TWh - 'focus op daken'



Ambitie 200 TWh - 'gebalanceerde ontwikkeling'





1. INLEIDING

1.1 Aanleiding van deze potentieelstudie

Het klimaat verandert door de uitstoot van broeikasgassen door menselijke activiteiten¹. In diverse internationale verdragen en akkoorden heeft de grote meerderheid van de landen op de wereld ambities en afspraken onderschreven om deze klimaatverandering te beperken. Het akkoord van Parijs verwoordt het concrete doel om de opwarming te beperken tot ruim onder 2 graden voor pre-industriële niveaus² (UN, 2016). De Europese Unie heeft het akkoord van Parijs geratificeerd en heeft afgesproken dat de Europese unie in 2030 als geheel 40% minder broeikasgassen uitstoot dan in 1990³ en op dit moment wordt deze ambitie waarschijnlijk verhoogd naar minstens 55% reductie⁴. Daarnaast is de ambitie geuit om te streven naar een klimaat neutraal Europa in 2050⁵. In Nederland heeft dit geresulteerd in de klimaatwet en het Klimaatakkoord⁶ (2019)

Het Nederlandse klimaatakkoord streeft naar 49% CO₂ uitstootreductie in 2030 ten opzichte van 1990 en 95% reductie in 2050. Eén van de concrete doelstellingen uit het akkoord is een CO₂-emissievrij elektriciteitssysteem in 2050, met als tussendoel 84 TWh/jr opwekking uit zon en wind in 2030. Nederland moet nog beslissen op welke manier de nationale doelen zullen worden aangepast op de Europese doelstelling van 55%. Daarmee zullen de doelen voor 2030 voor hernieuwbare opwek uit zon en wind waarschijnlijk ook opgehoogd gaan worden.

Het totale elektriciteitsverbruik in Nederland lag in 2018 op ca. 121 TWh/jr⁷ (CBS, 2019). De voorgenomen toenemende elektrificatie van vervoer, verwarming en industriële processen zal naar verwachting ondanks verdere efficiëntieverbetering leiden tot een stijging van de vraag naar elektriciteit.

De schattingen van de elektriciteitsvraag in 2050 lopen flink uiteen en zijn ook gecorreleerd aan de verwachte CO₂ reductie in 2050. In een studie van het PBL en ECN uit 2011 wordt uitgegaan van minimaal 150 TWh/jr⁸ maar in scenario's, zoals de 'Transform' en 'Adapt' scenario's van TNO⁹ en de Integrale Infrastructuurverkenning 2030-2050 van Berenschot en Kalavasta¹⁰, die uitgaan van een vergaand geëlektrificeerd energiesysteem dat voor een groot deel draait op primaire opwek uit windenergie en zonnestroom zou dit op kunnen lopen tot 300-400 TWh/jr.

In alle recente scenario's is er een substantiële rol weggelegd voor zonnestroom van Nederlandse bodem. Energie uit zon en wind worden nu algemeen beschouwd als de twee meest voor de hand liggende opties voor CO₂-emissievrije opwek in Nederland op de lange termijn. Het potentieel van energie uit water is in Nederland vrij beperkt¹¹. Kernenergie lijkt op dit moment niet aan te sluiten bij de huidige visie en beleidsrealiteit in Nederland^{12,13}, al is het recent weer onderwerp van debat geworden^{14,15,16}. Voor biomassa is de verwachting dat dit in de toekomst in toenemende mate te kostbaar is voor baseload-stroomopwekking maar vooral ingezet zal worden voor andere toepassingen, met wellicht een beperkte productie van flexibele elektriciteit en warmte^{17,18}.

Over de toekomstige haalbaarheid van grootschalige import van duurzame elektriciteit of uit duurzame elektriciteit gevormde energiedragers is nog veel onbekend^{19,20}.

Grootschalige opwek van zonnestroom op Nederlandse bodem is dus één van de mogelijke pijlers onder het halen van de klimaatdoelen voor 2050. Een gefundeerde schatting van het ruimtelijk zonnestroompotentieel in Nederland, en een uitwerking hiervan in een aantal scenario's voor de sector, zijn van groot belang in discussies over de rol van zonnestroom in de energietransitie en de ruimtelijke implicaties daarvan in Nederland.

Deze publicatie geeft een schatting van dit potentieel en laat helder zien op welke aannames dit berust en door welke maatschappelijke keuzes dit potentieel beïnvloed wordt.

1.2 Scope van deze studie

Bij het in kaart brengen van het potentieel van zonnestroom dient goed gedefinieerd te worden wat de scope is van dit potentieel. We kunnen onderscheid maken naar verschillende typen potentiëlen. Naar analogie van diverse potentieelstudies van duurzame energie technieken^{21,22}, onderscheiden en definiëren we de volgende potentiëlen:

Theoretisch potentieel - Dit wordt bepaald door de totale instraling op Nederlands grondgebied en het theoretisch maximaal haalbare rendement van fotovoltaïsche panelen.

Technisch potentieel - In het technisch potentieel wordt rekening gehouden met het daadwerkelijke omzettingsrendement van zonnepanelen, met het feit dat een oppervlak meestal niet volledig bedekt kan worden met panelen en met de verliezen die optreden in zonnestroom systemen.

Ruimtelijk inpassingspotentieel - Hier wordt rekening gehouden met inpassingsafwegingen. Voor de verschillende types grondgebruik zal slechts een deel in aanmerking komen voor opwekking van zonnestroom. Deze toepassing dient afgewogen te worden tegenover de andere mogelijke functies zoals voedselproductie, recreatie, natuurwaarde, vervoer en wonen. In een aantal gevallen is dubbel ruimtegebruik mogelijk.

Energetisch inpassingspotentieel - Om de opgewekte energie nuttig te kunnen gebruiken dient deze ingepast te worden in het energiesysteem. Bijvoorbeeld door het invoeden op het elektriciteitsnet of door de opgewekte zonnestroom op te slaan of te converteren naar diverse andere energiedragers.

Economisch potentieel - Dit is het potentieel dat economisch rendabel benut kan worden. 'Rendabel' kan hier verschillende betekenissen hebben afhankelijk van welke interne en externe kosten en baten meegenomen worden.

Het technisch potentieel zal in het geval van zonnestroom altijd veel kleiner zijn dan het theoretisch potentieel. De inpassings- en economische potentiëlen zullen vervolgens weer kleiner zijn dan het technisch potentieel. Daarbij dient beseft te worden dat deze potentiëlen niet altijd overlappen. Zo is zonnestroom in principe rendabel op iedere akker, maar zal vanuit het oogpunt van ruimtelijke inpassing slechts een klein deel van het landbouwareaal voor zonnestroom gebruikt kunnen worden. De verschillende potentiëlen zijn schematisch weergegeven in **Figuur 2**.

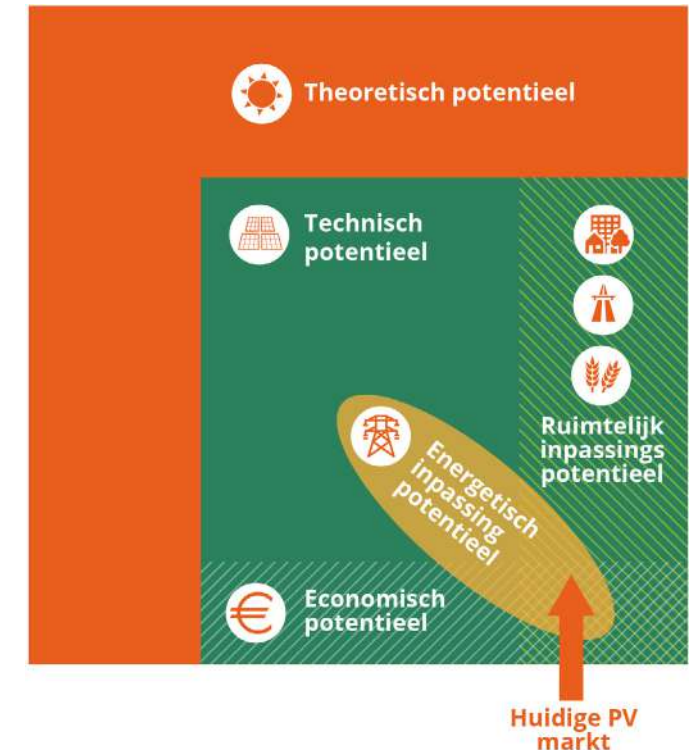
De focus van deze studie ligt op het technisch potentieel en het ruimtelijke inpassingspotentieel. De ontwikkeling van de techniek van zonnestroomopwekking is voor langere tijd te voorspellen binnen redelijke bandbreedtes. Ook de ruimtelijke inrichting van Nederland en de diverse gebruiksfuncties van deze ruimte veranderen slechts langzaam. Een schatting van dit potentieel is daardoor langere tijd houdbaar en kan dienen als ondersteuning voor keuzes rond de energietransitie.

Voor de realisatie van een geambieerde jaarlijkse opwek op een bepaalde termijn is echter niet alleen het ruimtelijk potentieel bepalend. Ook de snelheid waarmee opwek van zonnestroom op de betreffende oppervlakken daadwerkelijk kan worden gerealiseerd speelt een belangrijke rol. Die snelheid wordt bepaald door een scala aan factoren, zoals technische en financiële haalbaarheid,

eigendomsconstructies, eisen aan mede-ruimtegebruik en meer. Al deze factoren samen bepalen uiteindelijk de verdeling van zonnestroomsystemen over de verschillende mogelijke terreinen.

Er is bewust gekozen om niet in te gaan op het economische en energetische inpassingspotentieel. Ten eerste veranderen zowel de kosten van zonnestroom als de mogelijkheden om zonnestroom op het elektriciteitsnet aan te sluiten of te converteren op dit moment zeer snel.

Figuur 2. Soorten potentieel



Daarnaast zijn deze potentiëlen in grote mate afhankelijk van stimuleringsmaatregelen en wet- en regelgeving. Dit maakt dat een schatting van deze potentiëlen slecht zeer beperkte houdbaarheid heeft en niet de fundamentele begrenzings van de toepassing van zonnestroomtechnologie blootlegt.

In deze publicatie wordt getracht zo compleet mogelijk te zijn door alle typen grondgebruik te beschouwen. Daarnaast worden alle aannames toegelicht zodat het helder is waar de belangrijkste verschillen met eerder werk liggen. Daarbij wordt getracht om de feitelijke informatie over de verdeling van het oppervlak van Nederland in grondgebruikstypen en de technische parameters van zonnestroomsystemen zo helder en controleerbaar mogelijk weer te geven. Een discussie over deze informatie zou zich hoogstens moeten richten op onzekerheidsmarges in de gebruikte methodes. Hiermee leveren we de bouwstenen aan om de ruimtelijke discussie rond zonnestroom te kunnen richten op waar deze ons inziens over zou moeten gaan, namelijk de bereidheid om bepaalde typen grondgebruik (mede) in te zetten voor de opwek van zonnestroom. De kosten en baten van deze inzet dienen gewogen te worden in het licht van de urgentie van het reduceren van de Nederlandse CO₂ uitstoot en de beschikbare alternatieve technologieën. Deze studie zal geen pasklaar antwoord geven op deze afweging. In plaats daarvan zullen we in **hoofdstuk 6** ter illustratie een aantal vraagstukken aan bod laten komen die met behulp van deze studie beantwoord kunnen worden.

1.3 Relatie tot eerdere studies en NP RES

In eerder werk van diverse partijen zijn schattingen gemaakt van het potentieel van zonnestroom in Nederland^{23,24,25,18,26,27,28,29,30}. Deze studies betreffen doorgaans deelgebieden van Nederland en het onderscheid tussen technisch, ruimtelijk en economisch potentieel is niet altijd duidelijk. Ook zijn er diverse commerciële tools beschikbaar die de potentie van zonnestroom op bedrijfsdaken en op woningen geven³¹. De brondata van deze tools zijn over het algemeen niet openbaar beschikbaar. Daarmee blijven aannames onduidelijk en is het lastig het totale potentieel te schatten. De publicatie Roadmap PV-systemen en toepassingen van TNO, UU, TKI Urban Energy en RVO uit 2017 geeft wel een schatting van het potentieel van alle typen grondgebruik. In **Tabel 1** staat een overzicht van de potentiëlen uit de verschillende bronnen en de belangrijkste verschillen in reikwijdte en aannames. Inmiddels is de urgentie om klimaatverandering tegen te gaan snel toegenomen en heeft de zonnestroomtechnologie zich verder ontwikkeld. Wij zijn van mening dat een aantal eerdere aannames over grondgebruik en de technische haalbaarheid van zonnestroom aan een herziening toe zijn.

Relatie tot het Nationaal Programma RES

Één van de afspraken uit het klimaatakkoord is dat de 30 energieregio's in Nederland onderzoeken waar en hoe het best duurzame elektriciteit op land (wind en zon) opgewekt kan worden. Waar is ruimte en hoeveel? Zijn de plekken maatschappelijk gezien acceptabel en financieel haalbaar? In een Regionale Energiestrategie (RES) beschrijft elke energieregio zijn eigen keuzes. Het Nationaal Programma RES ondersteunt de regio's bij het maken van de RES³².

De opgave waar de RES'en van uitgaan is die van het klimaatakkoord. Dat wil zeggen 49% CO₂ reductie in 2030. Voor hernieuwbare opwek op land betekent dit een opwek van ten minste 35 TWh/jr uit grootschalige zonne- en windenergie installaties en een verwachte autonome groei van 7 TWh/jr uit zon op woningen in 2030³³. Dit is een ander doel dan waar deze studie zich op richt, namelijk het ruimtelijk potentieel voor zonnestroom in 2050 inzichtelijk te maken, zonder hier direct een opgave aan te koppelen. Zodoende zullen er grote verschillen zitten in de potenties voor zon die in de RES'en gehanteerd worden en deze studie. De RES'en rekenen met huidige, dus lagere omzettingsrendementen en een aantal toepassingen die naar verwachting pas rond 2030 commercieel beschikbaar komen worden niet meegenomen in de RES'en en wel in deze studie.

Daarmee is niet gezegd dat de ene schatting juister is dan de andere. Als er al een vergelijking gemaakt kan worden, dan kan deze studie worden gezien als een eerste aanzet om tot een energiestrategie te komen voor een klimaatneutraal 2050.

Tabel 1. Overzicht studies zonnestroom potentieel

Studie	Auteurs	Jaar v. publicatie	Type Grondgebruik	Potentiële Energieopbrengst & vermogen	Beschikbaar oppervlak	Totaal kansrijk	Belangrijkste methodiek en aannames
VESTA Ruimtelijk energie model voor de gebouwde omgeving data en methoden	PBL	2012	Gebouwen	~ 34 TWh/jr (schatting auteurs deze studie)	-	-	10 m ² zonnepaneel per grondgebonden woning. Voor gestapelde bouw gecorrigeerd met stapel factor
Het potentieel van PV in de gebouwde omgeving van Nederland	PBL en DNV-GL	2014	Gebouwen	50 TWh/jr, 66 GWp	600 km ²	400 km ²	Oppervlakken op basis van studie Vreugdenhil 2014 ³⁴ Rendement: 160 Wp/m ² Jaarlijkse opbrengt: 770 kWh/kWp/jr Geen correctie voor omliggende objecten
Ruimte voor zonnestroom in Nederland 2020-2050	Holland Solar	2015	Gebouwen Infrastructuur	57 TWh/jr, 65 GWp 50-172 TWh/jr	1.500 km ²	400 km ² 400 km ²	Dakoppervlak en energieopbrengst: studie PBL/DNV-GL 2014 Oppervlak Infra: studie ministerie V&W, 2000 Energieopbrengst infra: geen methode gegeven
Overig hernieuwbare energie in Nederland	Ecofys	2017	Gebouwen Infrastructuur Land	~ 58-65 TWh/jr 172 TWh/jr 1-44 TWh/jr	-	-	Daken: verwijzing naar PBL/DNV-GL 2014, Holland Solar 2015 en Ecofys/Shell (b) 2015b Infra: verwijzing naar Holland Solar 2015 Landbouw: verwijzing naar Ecofys/Shell (b) 2015, uitgaand van 0.1 tot 2% van het areaal
Energie & Ruimte	Dirk Sijmons et al.	2017	Gebouwen Infrastructuur Land Binnenwater Buitenwater	25 TWh/jr 10 TWh/jr 20 TWh/jr 1,5 TWh/jr Groot, niet bepaald	-	-	Gemiddelde opbrengst van 50 kWh/m ² /jaar. Beredeneerd vanuit opwek opgave van 200 PJ/jaar. Daken: 54% geschikt, daarvan weer iets minder dan 50% te bedekken, overige

vervolg tabel 1. Overzicht studies zonnestroom potentieel

Bron	Auteurs	Jaar v. publicatie	Type Grondgebruik	Potentiële Energieopbrengst & vermogen	Beschikbaar oppervlak	Totaal kansrijk	Belangrijkste methodiek en aannames
Roadmap PV systemen en toepassingen	TKI UE, RVO, SEAC en Universiteit Utrecht	2017	Woningen Utiliteitbouw Infrastructuur Land Binnenwater Buitenwater	29 TWh/jr, 39 GWp 38 TWh/jr, 51 GWp 28 TWh/jr, 33 GWp 38 TWh/jr, 24 GWp 23 TWh/jr, 39 GWp 43 TWh/jr, 45 GWp	1.000 km ² 1.500 km ² 1.880 km ² 28.000 km ² 3.700 km ² 66.000 km ²	212 km ² 304 km ² 184 km ² 325 km ² 133 km ² 250 km ²	Rendement: 224 Wp/m ² , jaarlijkse opbrengst specifiek per toepassing, 600-950 kWh/kWp/jr Woningen/utiliteit: oppervlakken incl. gevels, geen bron. Gaat uit van ~30% benutting daken, ~15% benutting gevels. Infra/landschap/water: oppervlakken uit BBG. Infra: bermen ~30% benutting, wegdek ~5% benutting. Landschap: 1.5% benutting agrarisch areaal, 0% natuur. Binnenwater: 4% benutting, Buitenwater: 0.4 % benutting
State-of-the-state onderzoek	Deloitte	2018	Gebouwen	60 TWh/jr, 73 GWp	-	892 km ²	Rendement: 17%, specifieke opbrengst: 820 kWh/kWp, bedekking van 48%
Energietransitiemodel	Quintell intelligence	-	Woningen Utiliteitbouw	21 TWh/jr, 25 GWp 11 TWh/jr 12 GWp	-	-	867 kWh/kWp. Ruimtelijk potentieel uit diverse bronnen zoals PBL/DNV-GL 2014, maar ook RES biedingen en regionale studies.
Perspectieven elektriciteit uit water	Witteveen en Bosch et al.	2019	Binnenwater buitenwater	~3 TWh/jr 2,5 TWh/jr, 2,5 GWp	3.090 km ²	14,6 km ²	Rendement: 17%. Binnenwater: alleen KWR wateren. Vaarwegen, Natura 2000 gebieden, wateren met recreatiefunctie en wateren kleiner dan 0,5 km ² worden uitgesloten. Van overblijvende water benutting van 3-5 %. Buitenwater: aanname: 1 MWp zonnepark per 10 MW Offshore windturbine

1.4 Methode

In deze studie richten we ons op het ruimtelijk potentieel van zonnestroom in Nederland.

Onder zonnestroom verstaan we de directe omzetting van zonlicht naar elektriciteit met behulp van fotonvoltaïsche materialen. Overal waar de zon op het oppervlak van de aarde schijnt kan dus zonnestroom worden opgewekt. Dit maakt de opwekking van zonnestroom in essentie een techniek die beslag legt op de ruimte op of boven het aardoppervlak.

Met Nederland bedoelen we alle ruimte binnen de landsgrenzen van Nederland en de aan Nederland toegekende Exclusieve Economische Zone op de Noordzee. Caribisch Nederland maakt geen onderdeel uit van deze studie.

Om de ruimtelijke potentie van zonnestroom in Nederland te bepalen is er niet alleen kennis nodig van de beschikbare ruimte en technische aspecten van zonnestroom, maar ook van de maatschappelijke bereidheid om ruimte (mede) te bestemmen voor de productie van zonnestroom. Deze bereidheid hangt samen met de waardering van het (stedelijk) landschap.

In eerdere versies van deze studie zijn pogingen gedaan om aan deze bereidheid om ruimte te bestemmen voor zon concrete getallen te verbinden in de vorm van maximaal haalbare fracties van verschillende typen grondgebruik. Al snel werd duidelijk dat een dergelijke aanpak tot bezwaren leidt. Het raadplegen van experts op het gebied van ruimtelijke ordening en zonnestroom³⁵ heeft tot het inzicht geleid dat deze bereidheid alleen betekenis heeft in relatie met de alternatieve oplossingen voor de uitdaging waar we voor staan: een snelle energietransitie

van fossiele brandstoffen naar hernieuwbare bronnen om ontwrichtende klimaatverandering tegen te gaan.

Willen we geen zonnepark? Dan kan een windmolen, stoken van biomassa, kerncentrale, verregaande energiebesparing of afhankelijkheid van schone brandstoffen uit het buitenland noodzakelijk zijn. En zijn die oplossingen voldoende voorhanden om het doel van een klimaatneutraal energiesysteem te bereiken?

Dit zijn moeilijke vraagstukken die de reikwijdte van deze studie ver overstijgen. Er heerst op dit moment onder goed geïnformeerden nog veel onzekerheid en onder de gemiddelde leek regelrechte verwarring over hoe de energietransitie eruit gaat zien. Door die onduidelijkheid is het huidige maatschappelijk sentiment waarschijnlijk een slechte raadgever voor de manier waarop de afweging rond energie en ruimte in de nabije toekomst gemaakt zal worden.

En juist deze maatschappelijke discussie is gebaat bij eenduidige informatie over de mogelijkheden van zonnestroom (en alle andere alternatieven). Om dit bereiken en daarmee toch tot een soort potentiële schatting te komen doorloopt deze studie de volgende stappen:

In hoofdstuk "2. Ruimte" worden de bestaande oppervlaktes per type bodemgebruik in Nederland beschreven. Dit bodemgebruik wordt ingedeeld naar categorieën die relevant zijn in het kader van het opwekken van zonnestroom.

In hoofdstuk "3. Typologieën" worden de ruimtelijke mogelijkheden voor zonnestroom inzichtelijk gemaakt aan de hand van systeemtypologieën.

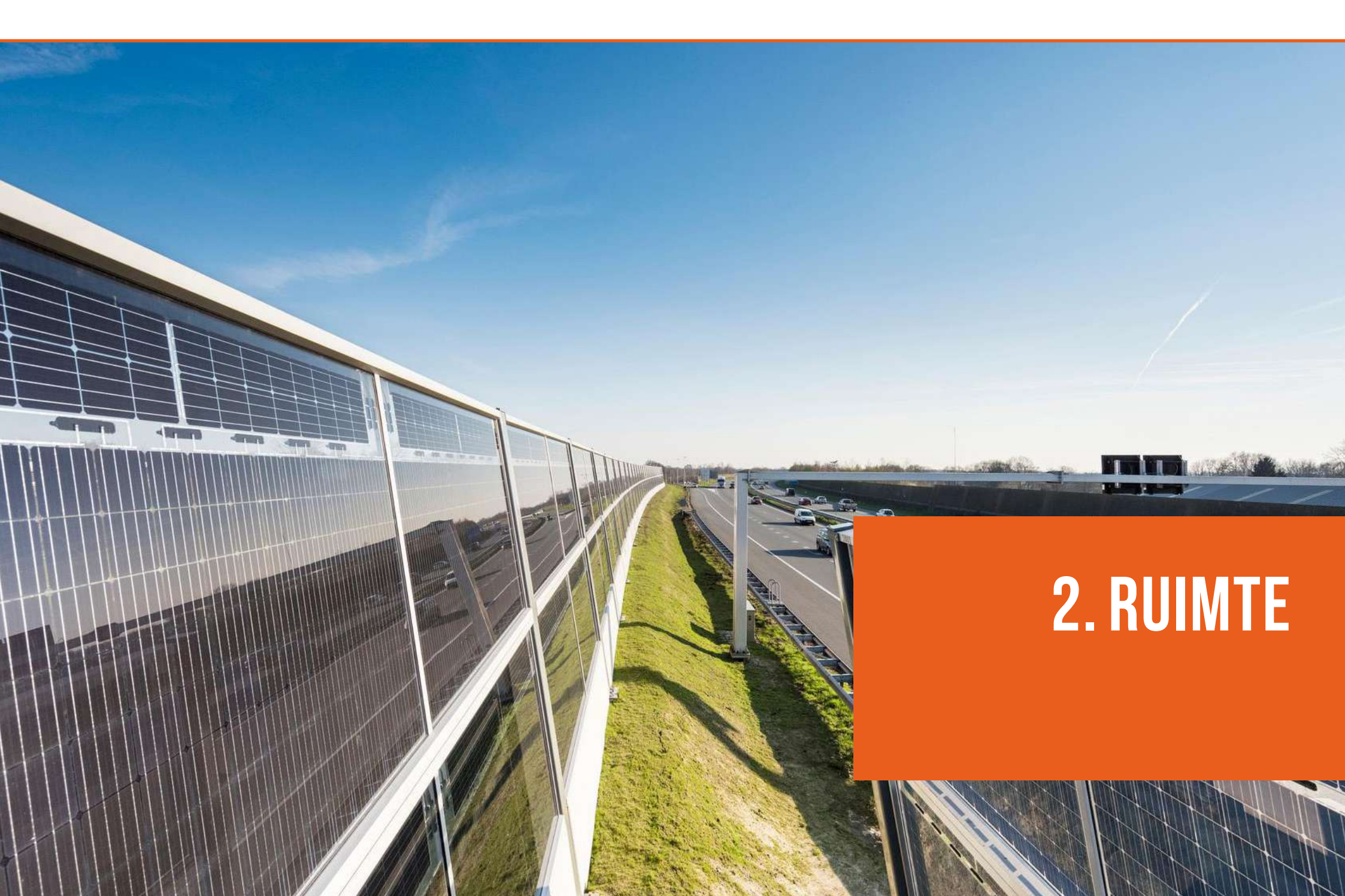
In hoofdstuk "4. Energieopbrengst" wordt de technisch mogelijke energieopbrengst per oppervlak voor de verschillende typen bodemgebruik, en de mogelijke variatie daarin, geschat door middel van realistische (toekomstige) zonnestroomsystemen.

In hoofdstuk "5. Synthese" wordt een methode en digitale tool toegelicht om met de in hoofdstuk 2, 3 en 4 verkregen informatie scenario's en varianten van het ruimtelijk potentieel van zonnestroom op te stellen.

In hoofdstuk "6. What ifs" worden een aantal 'wat als' vraagstukken verkend rond de rol van zonnestroom in het energiesysteem en de impact op de ruimte die met de verkregen informatie beantwoord kunnen worden.

Onzekerheidsmarges en bandbreedtes

Omdat deze studie zich richt op het jaar 2050 zullen we een aantal aannames moeten maken over verwachte ontwikkelingen tot die tijd. We doen dit aan de hand van uiteenlopende rapportages die meestal werken met een 'hoog' en 'laag' en soms een 'midden' scenario. We kiezen daarbij het midden van deze scenario's. Daarnaast zal er ook een onzekerheid zitten in onze schattingen van de huidige situatie zowel op het gebied van ruimte en energie. Bij het toelichten van de methodes en bij maken van de schattingen zal steeds verwezen worden naar deze bandbreedte en onzekerheid.



2. RUIMTE

2.1 Methode Ruimtelijke data

Bij het ruimtelijke inpassingspotentieel wordt gekeken vanuit het ruimtelijke perspectief welk oppervlak potentieel in aanmerking komt voor de opwekking van zonnestroom. In de bepaling van dit potentieel wordt rekening gehouden met een inpassingsafweging tegenover andere mogelijke functies zoals voedsel, recreatie, natuurwaarde, vervoer en wonen.

Om het ruimtelijk inpassingspotentieel te kunnen bepalen is het van belang om een goed beeld te hebben van de huidige indeling van de ruimte in Nederland. Deze informatie over de huidige situatie is te herleiden uit verschillende landsdekkende ruimtelijke datasets³⁶.

Dit zegt echter nog niet veel over de geschiktheid van de ruimte voor zonnestroom. Op basis van een expertise beoordeling hebben we deze ruimtelijke indeling daarom geïnclassificeerd en verdeeld naar categorieën die te relateren zijn naar een toepassing van zonnestroom systemen. Aan de hand van deze categorieën hebben we bepaald of de categorieën in aanmerking komen voor zonnestroom.

Landsdekkende datasets en ruimtelijke analyses

Nederland kent het stelsel van basisregistraties. Dit zijn officiële registraties die door de overheid worden uitgegeven en gebruikt. Binnen deze registraties is de huidige situatie van Nederland vastgelegd en deze registraties worden op enkele na openbaar beschikbaar gesteld.

De achterliggende afspraken van deze registraties kennen wettelijke basis, waardoor er sprake is van een betrouwbare kwaliteit en vanwege de regelmatige actualisatie van een zekere continuïteit.

In deze studie leiden we onze gegevens voor gebouwen, water en velden af van de Basisregistratie Adressen en Gebouwen (BAG) en de Basisregistratie Grootchalige Topografie (BGT) van februari 2020.

Beide basisregistraties zijn ruimtelijke datasets met informatie over het oppervlak en de fysieke inrichting van een terrein of het gebruikersdoel van het object. Wanneer de informatie binnen deze datasets onvoldoende is om het juiste functionele onderscheid te maken, kunnen deze data binnen een GIS-omgeving gecombineerd worden met andere landsdekkende data. In deze studie hebben we voor het maken van een betere onderverdeling van categorieën gebruik gemaakt van aanvullende data uit het Bestand Bodemgebruik (BBG) van het CBS uit 2015, de Basisregistratie Topografie (BRT of Top10), de Aquatische watertypenkaart op basis van Top10 van het PBL uit 2013, de Beschermde gebieden (Natura2000) en van Esri de woningtypekaart en BAG 3D.

Van basisregistraties naar categorieën voor zonnestroom

Voor de beschrijving van de analysemethodiek maken we een onderscheid tussen vier hoofdgroepen: gebouwen, Infra (incl. erven stedelijk gebied), landschap en water.

Tabel 2. Ruimtelijke categorieën

Ruimtelijke categorie	Horizontaal oppervlak (km ²)
Gebouwen	1.286
Woningen	543
Utiliteitsgebouwen en overig	742
Infra	4.190
Verkeersinfrastructuur	2.165
Erven en overig	2.026
Landschap	27.518
Landbouwgrond	19.152
Overig*	8.366
Water	8.668
Binnenwater	5.160
Buitenwater**	3.508
Totaal	41.662

* o.a. bos, natuur, boerenerven, recreatie

** Exclusief de Noordzee (ca. 58.000 km²)

2.2 Gebouwen

Voor het beschikbare oppervlak van gebouwen is de BAG het uitgangspunt. In de BAG is informatie opgenomen over gebouwen, waaronder de voetafdruk van het pand, de leeftijd van het pand, het gebruikersdoel en gebruiksoppervlak dat bij het betreffende adres hoort. In de BAG ontbreekt informatie over de hoogte van het pand, de oriëntatie van het pand en de dakvorm van het pand.

Typering van gebouwen

Daken en gevels van gebouwen hebben een grote potentie voor het opwekken van zonnestroom. Bij gebouwen is er een sterke afhankelijkheid tussen het type gebouw en de mogelijkheden voor het opwekken van zonnestroom. Door de gebouwen onder te verdelen in gebouwtypen kan er een beter beeld worden gegeven over het inpassingspotentieel.

De onderverdeling van gebouwen kan voor een groot deel op basis van het gebruikersdoel worden gemaakt. In de BAG zijn 11 classificaties gegeven. Deze functies zijn gemaakt door een ruimtelijke koppeling te maken tussen het pandvlak en het adrespunt met de gebruikersinformatie. In geval er meerdere functies aanwezig zijn op een adrespunt is de eerste functie als uitgangspunt genomen voor de analyse. De dataset die voor deze analyse is gemaakt is afkomstig van Esri die deze koppeling al gemaakt heeft³⁷.

Niet alle gebouwen hebben een eigen adrespunt. Dit zijn de gebouwen die doorgaans op hetzelfde terrein staan als het hoofdgebouw, maar geen ruimtelijke overlap is. Deze gebouwen hebben we in deze studie als bijgebouw geclassificeerd. Voor bijgebouwen is een onderscheid gemaakt tussen kleine bijgebouwen kleiner dan 20 m² en grote gebouwen vanaf 20 m². Binnen de bijgebouwen zijn

op basis van de Top10 kaart de kassen voorzien van een aparte classificatie omdat dit een afwijkend gebouwtype is vanwege constructie, materiaal- en functioneel gebruik.

Voor woningen geldt dat er een onderscheid gemaakt is tussen gestapelde bouw en grondgebonden bouw. Onder gestapelde bouw vallen alle appartementsgebouwen en onder grondgebonden woningen alle gebouwen waar alleen de functie wonen aanwezig is³⁸.

Met bovengenoemde uitgangspunten zijn de volgende gebouwtypen in kaart gebracht:

- woning grondgebonden
- woning gestapeld
- utiliteit commercieel
- utiliteit publiek
- industrie
- bijgebouw groot
- bijgebouw klein
- overig
- kas

Daken van gebouwen

Omdat in de BAG gedetailleerde informatie over oriëntatie en dakvorm ontbreekt doen we de aanname dat 20% van de grondgebonden woningen een plat dak heeft en dat oriëntaties van schuine daken van gebouwen en hun gevels evenredig verdeeld zijn over de windrichtingen. In **Tabel 3** is de aanname van deze verdeling weergegeven. Aangezien de meeste gebouwen niet precies dezelfde oriëntatie hebben als de vier windrichtingen is hiervoor in de **Typologieën** rekening gehouden met een gemiddelde oriëntatie t.o.v. zuid. Uitgangspunten hiervoor zijn terug te vinden in **Bijlage A** en **Bijlage B**.

Een andere verdeling tussen platte- en schuine daken of tussen de windrichtingen heeft slechts een beperkt effect op de ruimtelijke potentie. Met de in deze rapportage ontwikkelde typologieën kunnen we een bandbreedte aanhouden van ongeveer 10%. De opbrengst van oost-west daken en platte daken ligt redelijk dicht bij elkaar. Het verschil zit in de noord- en zuid daken³⁹.

Tabel 3. Verdeling platte- en schuine daken

Woningtype	Plat dak	Schuin dak		
		Zuid	Noord	Oost-West
Grondgebonden	20%	20%	20%	40%
Gestapeld	100%			

Gevels van gebouwen

Ook bij gevels is aangenomen dat oriëntaties evenredig verdeeld zijn over de windrichtingen. Hierbij geldt verder dat noordgevels als niet kansrijk worden gezien en daarmee dus 25% van het totale geveloppervlak afvalt.

Om het oppervlak van gevels van gebouwen te bepalen is gebruik gemaakt van vormfactoren van verschillende gebouwtypen⁴⁰. Met deze vormfactoren kan bepaald worden hoe het geveloppervlak zich verhoudt tot de pandafdruk. Op basis van het gebouwtypes waar gegevens over bekend zijn in de betreffende publicatie is een gewogen gemiddelde bepaald voor het gebouw zoals gehanteerd in deze potentieelstudie.

In **Tabel 4** is een overzicht getoond van de uitkomsten voor gebouwen en in **Figuur 3** wordt een voorbeelduitwerking van de ruimtelijke categorie 'gebouwen' in kaart vergeleken met een satellietfoto.

Figuur 3. Voorbeeld ruimtelijke categorie: gebouwen (Apeldoorn)



Landschap

- agrarisch terrein - akkerland
- agrarisch terrein - grasland
- agrarisch terrein - boom en fruitteelt
- overig begroeid terrein
- open natuur
- bos

Infrastructuur

- erven bij woningen
- erven bij bedrijven
- erven bij boerderijen
- erven overig
- overig onbegroeid terrein
- overig verhard terrein

- fietspad
- Parkeerterrein
- Rijbaan
- spoorbaan
- Voetgangerszone
- Berm en verkeerseilanden

Binnenwater

- sloot
- bassin
- kanaal
- waterloop
- watervlak

bebouwing

- woning grondgebonden
- woning gestapeld
- utiliteit publiek
- utiliteit commercieel
- industrie
- bijgebouw groot
- bijgebouw klein
- kas
- overig

Tabel 4. Oppervlak daken en gevels binnen ruimtelijke categorie gebouwen

	Dakoppervlak (km ²)	Geveloppervlak (km ²)	Verantwoording
Landgebruik	1.286	2.200	
Grondgebonden woningen (daken)	457	-	BAG Pand; (Pand in gebruik, Pand in gebruik(niet ingemeten), Bouw gestart); BAG Ligplaats; BAG Standplaats. [oppervlakte pandafdruk m ²] [Esri Download feb 2020] BAG Verblijfsobject (Verblijfsobject in gebruik, Verblijfsobject gevormd); Woonfunctie (1 woonfunctie per pand) [Esri Download feb 2020]
Grondgebonden woningen (gevels)	-	1.100*	schatting o.b.v. keuze voor de vormfactor van twee-onder-een-kap. Want hoekwoningen vergelijkbaar (3 muren), rijtjeshuizen 2 muren en vrijstaande woningen 4 muren. Qua voorkomen middelen rijtjeshuizen en vrijstaande woningen redelijk uit
Gestapelde bouw (daken)	87	-	BAG Pand; (Pand in gebruik, Pand in gebruik(niet ingemeten), Bouw gestart); [oppervlakte pandafdruk m ²] [Esri Download feb 2020] BAG Verblijfsobject (Verblijfsobject in gebruik, Verblijfsobject gevormd); Woonfunctie (meerdere woonfunctie per pand) [Esri Download feb 2020]
Gestapelde bouw (gevels)	-	300*	schatting: 30% hoogbouwflats, 30% galerijflats, 40% overige appartementen (vergelijkbaar met rijwoning)
Commerciële utiliteit (daken)	102	-	BAG Pand; (Pand in gebruik, Pand in gebruik(niet ingemeten), Bouw gestart); [oppervlakte pandafdruk m ²] [Esri Download feb 2020] BAG Verblijfsobject (Verblijfsobject in gebruik, Verblijfsobject gevormd); Bijeenkomstfunctie, Kantoorfunctie, Logiesfunctie of Winkelfunctie. (1 of meerdere functies per pand) (kassen uitgesloten dmv Top10VectorNL (Kas;Warenhuis)) [Esri Download feb 2020]
Publieke utiliteit (daken)	31	-	BAG Pand; (Pand in gebruik, Pand in gebruik(niet ingemeten), Bouw gestart); [oppervlakte pandafdruk m ²] [Esri Download feb 2020] BAG Verblijfsobject (Verblijfsobject in gebruik, Verblijfsobject gevormd); Celfunctie, Onderwijsfunctie, Gezondheidszorgfunctie, Sportfunctie. (1 of meerdere functies per pand) (kassen uitgesloten dmv Top10VectorNL (Kas;Warenhuis))[Esri Download feb 2020]
Industrie gebouwen (daken)	174	-	BAG Pand; (Pand in gebruik, Pand in gebruik(niet ingemeten), Bouw gestart); [oppervlakte pandafdruk m ²] [Esri Download feb 2020] BAG Verblijfsobject (Verblijfsobject in gebruik, Verblijfsobject gevormd); Industriefunctie (kassen uitgesloten dmv Top10VectorNL (Kas;Warenhuis) (1 functie per pand) [Esri Download feb 2020]

vervolg tabel 3: Oppervlak daken en gevels binnen ruimtelijke categorie gebouwen

	Dakoppervlak (km ²)	Geveloppervlak (km ²)	Verantwoording
Grote bijgebouwen (>20 m²; daken)	246	-	BAG Pand; (Pand in gebruik, Pand in gebruik(niet ingemeten), Bouw gestart); [oppervlakte pandafdruk ≥ 20 m ²] [Esri Download feb 2020] BAG Verblijfsobject (Verblijfsobject in gebruik, Verblijfsobject gevormd); geen functie toekenning (kassen uitgesloten dmv Top10VectorNL (Kas;Warenhuis) (1 functie per pand) [Esri Download feb 2020]
Kleine bijgebouwen (<20 m²; daken)	24	-	BAG Pand; (Pand in gebruik, Pand in gebruik(niet ingemeten), Bouw gestart); [oppervlakte pandafdruk < 20 m ²] [Esri Download feb 2020] BAG Verblijfsobject (Verblijfsobject in gebruik, Verblijfsobject gevormd); geen functie toekenning (kassen uitgesloten dmv Top10VectorNL (Kas;Warenhuis) (1 functie per pand) [Esri Download feb 2020]
Overige daken (daken)	29	-	BAG Pand; (Pand in gebruik, Pand in gebruik(niet ingemeten), Bouw gestart); [oppervlakte pandafdruk < 20 m ²] [Esri Download feb 2020] BAG Verblijfsobject (Verblijfsobject in gebruik, Verblijfsobject gevormd); overige functie en functies onbekend (kassen uitgesloten dmv Top10VectorNL (Kas;Warenhuis) (1 functie per pand) [Esri Download feb 2020]
Utiliteit en industrieel vastgoed (gevels)	-	800*	utiliteit commercieel: schatting: 40% kantoren, 40% retail, 15% bedrijfshallen, 5% datacentra bijgebouw groot: schatting: dit type gebouw komt het best overeen met een bedrijfshal bijgebouw klein: schatting: dit type gebouw komt qua vorm het best overeen met een bedrijfshal industrie: schatting: 50% bedrijfshallen, 50% op basis van de gegevens van een gezondheidscentrum (want 2 verdiepingen, ipv 1) utiliteit publiek: schatting: 50% op basis van ziekenhuizen (ook model voor bijv. universiteitsgebouwen), 50% op basis van gezondheidscentra (ook model voor bijv. scholen)
Kassen (daken)	135	-	BAG Pand; (Pand in gebruik, Pand in gebruik(niet ingemeten), Bouw gestart); [oppervlakte pandafdruk m ²] [Esri Download feb 2020] waarvan ruimtelijk overlap is met Top10VectorNL (Kas;Warenhuis) [Esri Download feb 2020]

* Op basis van vormfactoren van verschillende gebouwtypen³⁴, gecombineerd met de totaal beschikbare dakoppervlakken.

2.3 Infra

Voor infrastructuur is de BGT⁴¹ de basis. Hierin is terrein de verzameling van alle gronden die geen gebouw of water zijn. In de BGT is dit onderverdeeld in de onderdelen wegdelen, ondersteunende wegdelen, begroeid terrein en onbegroeid terrein. De gronden zijn ingedeeld op basis van kenmerken die de fysieke inrichting of het type functie beschrijven van de grond. Voor wegdelen en ondersteunend wegdeel is dit een combinatie van het verhardingstype of type bodembedekking en de functie. Voor begroeid terrein is dit overig grasland en groenvoorzieningen gelegen binnen infrastructureel gebied en voor onbegroeid terrein geldt dat dit met name erven zijn.

Voor sommige categorieën geldt dat het wenselijk is een betere duiding te kunnen maken ten opzichte van de functionele beschrijving die in de BGT is vernoemd. Dit is gedaan door de data te combineren met de BBG. Als voorbeeld geldt de BGT-categorie van onbegroeid terrein 'erf'. Met deze categorie wordt het woonperceel in een woonwijk aangeduid, het private terrein op een bedrijventerrein of het erf op agrarisch terrein. Door deze informatie van de BGT te combineren met de BBG is het mogelijk het onderscheid te maken met de functionele ligging en wordt er een nuanciering aangebracht in het totale oppervlak binnen een categorie.

De categorieën uit de BGT zijn onderverdeeld naar nieuwe categorieën die gerelateerd zijn aan zonnestroom. Daarvan is ook bepaald tot welk landgebruiktype ze behoren en de relevantie van het type. Aan de ruimtelijke indeling in categorieën zijn verder nog geluidsschermen (verticaal) en voertuigen (geen vaste plaats) toegevoegd. In **Tabel 5** is een overzicht getoond van de uitkomsten voor infra en in **Figuur 4** wordt een voorbeelduitwerking vergeleken met een satellietfoto.

Figuur 4. Voorbeeld ruimtelijke categorie: infra (knooppunt Deil)



Tabel 5. Oppervlak binnen ruimtelijke categorie infra

	Totaal oppervlak NL (km ²)	Verantwoording
Landgebruik	4.190	
Rijbaan	992	BGT wegdelen; functies: Rijbaan (autosnelweg, autoweg, regionale weg, lokale weg), Inrit, OV-baan.
Parkeerterrein	114	BGT wegdelen; functies: Parkeervlak.
Fietspad	96	BGT wegdelen; functies: Fietspad.
Voetpad	298	BGT wegdelen; functies: Voetgangerszone, Voetpad, Voetpad op trap, Woonerf.
Berm en Verkeerseilanden	610	BGT ondersteunende wegdelen; functies: Berm, Verkeerseiland. BGT begroeid terrein; fysiek voorkomen: Grasland overig en Groenvoorziening gecombineerd met BBG: infrastructuur.
Spoorbaan	45	BGT wegdelen; functies: Spoorbaan, Overweg.
Landingsbaan	9	BGT wegdelen, functie: Baan voor vliegverkeer.
Overig verhard terrein	184	BGT wegdelen; functie: Transitie. BGT ondersteunende wegdelen; functie: Transitie. BGT onbegroeid terrein; fysieke voorkomens: Gesloten verharding, Half verhard, Open verharding.
Stortplaatsen	5	BGT begroeid terrein; fysiek voorkomen: Grasland- overig en Groenvoorziening gecombineerd met BBG: Stortplaats. BGT onbegroeid terrein: Zand, Onverhard gecombineerd met BBG: Stortplaatsen.
Erven woningen	1.003	BGT onbegroeid terrein; fysiek voorkomen: Erf gecombineerd met BBG: Woonterrein.
Erven bedrijven en Erven overig	833	BGT onbegroeid terrein; fysiek voorkomen: Erf gecombineerd met BBG: Bedrijventerreinen (393 [km ²]) en erven binnen BBG overige gebieden (440 [km ²])
Geluidschermen	5	informatie uit Solar Noise Barrier Project. RVO projectnummer: TEZG114009, uitvoerder: Heijmans B.V.
Voer- en vaartuigen	70	CBS: motorvoertuigenpark, geraadpleegd 11-2019. CBS: maatwerktabel binnenvaartschepen, geraadpleegd 11-2019. Waterrecreatieadvies, 2005, 'Aantal recreatievaartuigen in Nederland'

Tabel 6. Oppervlak binnen ruimtelijke categorie landschap

	Totaal oppervlak NL (km ²)	Verantwoording
Landgebruik	27.518	
agrarisch terrein - grasland	10.872	BGT begroeid terrein; fysiek voorkomen: Grasland agrarisch; BGT begroeid terrein; fysiek voorkomen: Grasland - overig gecombineerd met BBG agrarisch terrein.
agrarisch terrein - akkerland	7.905	BGT begroeid terrein; fysiek voorkomen: Bouwland.
agrarisch terrein - boom en fruitteelt	375	BGT begroeid terrein; fysiek voorkomen: Fruitteelt, Boomteelt.
bos	3.441	BGT begroeid terrein; fysiek voorkomen: Gemengd bos, Loofbos, Naaldbos, Duin (gesloten duinvegetatie), Groenvoorziening (bosplantsoen), groenvoorziening (heesters).
open natuur	1.139	BGT begroeid terrein; fysiek voorkomen: Duin, Duin (open duinvegetatie), Heide, Houtwal, Kwelder, Moeras, Rietland, Struiken; BGT begroeid terrein; fysiek voorkomen: Grasland - overig gecombineerd met BBG overig gebieden (niet zijnde: Bebouwd gebied, Recreatie, Stortplaats, Agrarisch terrein, Infrastructuur); BGT onbegroeid terrein, fysiek voorkomen: Zand (strand en strandwal)
Erven boerderijen	1.233	BGT onbegroeid terrein; fysiek voorkomen: Erf gecombineerd met BBG: Agrarisch terrein.
Erven natuur	87	BGT onbegroeid terrein; fysiek voorkomen: Erf gecombineerd met BBG: bos en open natuur.
recreatie en groenvoorziening	1.384	BGT begroeid terrein; fysiek voorkomen: Grasland overig gecombineerd met BBG: Bebouwd gebied en Recreatie; BGT begroeid terrein; fysiek voorkomen: Groenvoorziening gecombineerd met BBG Bebouwd gebied, Agrarisch, Recreatie en overige gebieden (<i>niet zijnde</i> : Stortplaats en Infrastructuur); BGT begroeid terrein; fysiek voorkomen: Groenvoorziening (gras- en kruidachtge).
overig (on)begroeid terrein	1.081	BGT onbegroeid terrein; fysiek voorkomen: Zand, Zand (zandverstuiving), Onverhard (zand, onverhard): boomschors, onverhard, transitie; BGT begroeid terrein, fysiek voorkomen: Struiken, Groenvoorziening (bodembedekkers, gras- en kruidachtige, planten, struikrozen) transitie; BGT wegdelen: ruitepad; BGT ondersteunend water; BGTplustype: oevers

2.5 Water

Bij water wordt een hoofdonderscheid gemaakt tussen het buitenwater en binnenwater. Formeel ligt de scheiding tussen binnenwater en buitenwater op de grens van de Noordzee met Nederland.

Het buitenwater bestaat uit het Nederlandse deel van de Noordzee. De Noordzee kent meerdere zones en voor deze studie is onderscheid in oppervlakte gemaakt tussen het Nederlandse deel van het continentaal plat en de zone (1km) van de gemeentegrenzen.

Binnenwater is onderdeel van de BGT en kent een onderverdeling in watertypes. Voor deze studie geldt dat deze verdeling niet nauwkeurig genoeg is gedefinieerd om deze direct te verdelen naar de categorieën voor zonnestroom. Om een betere verdeling te kunnen maken is er een ruimtelijke koppeling gemaakt met de Aquatische watertypenkaart van het PBL. Met name is het type waterloop hierin specifiek benoemd.

Verder hebben we een categorie bassins uit de BGT bouwwerken toegevoegd aan de watercategorie.

Voor zonnestroom-sytemen op water geldt de impact van de golfslag als een invloedrijke factor. In Nederland worden voor het binnenwater drie niveaus voor golfslag onderscheiden. Deze komen overeen met zonerings die in Europese richtlijnen is vastgelegd (zie ook [Tabel 7](#)). Binnen de richtlijnen van de EU staat beschreven welke wateren in Nederland tot de betreffende zones zijn benoemd. Deze wateren zijn aan de hand van de Aquatische watertypenkaart gecategoriseerd naar gebruikstype.

Tabel 7. Golfslagcategorie

Europese zonerings	Golfslagcategorie
Zone 0: golfhoogte > 2,0 m (buitenwater)	categorie 4 (Noordzee)
Zone 1: golfhoogte tussen 1,2 m en 2,0 m	Komt in NL niet voor
Zone 2: golfhoogte tussen 0,6 m en 1,2 m	categorie 3
Zone 3: golfhoogte tot 0,6m	categorie 2
Zone 4: geen golfhoogte gegeven	categorie 1

In de wet is vastgelegd dat er voor de aanleg van een zonneveld een omgevingsvergunning moet worden verleend of een bestemmingsplanwijziging gedaan moet worden. Binnen deze procedures vindt er een toets plaats op het effect op de beschermde natuur, waaronder Natura 2000-gebieden. Vanwege deze vergunbaarheidscriteria worden binnen het thema zon op water Natura 2000-gebieden onderscheiden van de andere gebieden^{42,43}.

In [Tabel 8](#) en [Tabel 9](#) is een overzicht gegeven van de uitkomsten voor buiten- en binnenwater.

Figuur 6. Binnenwater en buitenwater in Nederland



Tabel 8. Oppervlak water (buitenwater)

	Totaal oppervlak NL (km ²)	Verantwoording
Landgebruik	61.502	
Golfslagcategorie 3 (Waddenzee, Westerschelde, Eems, Dollard) natura2000	2.549	BGT watertype; bgtplustype: Watervlak, Waterloop. Onderverdeeld in golfslagcategoriën op basis van: PBL Watertypenkaart, nader gespecificeerd naar zone-indeling (2) binnenwater (Europese richtlijn) en overeenkomstig met Natura2000 gebied.
Gemeentelijk ingedeelde gedeelte van de Noordzee	959	Contintaal plat (binnen bestuurlijke grenzen (1km))
Exclusieve economische zone NL (Noordzee)	57.994	Contintaal plat (buiten bestuurlijke grenzen (1km))

Tabel 9. Oppervlak water (binnenwater)

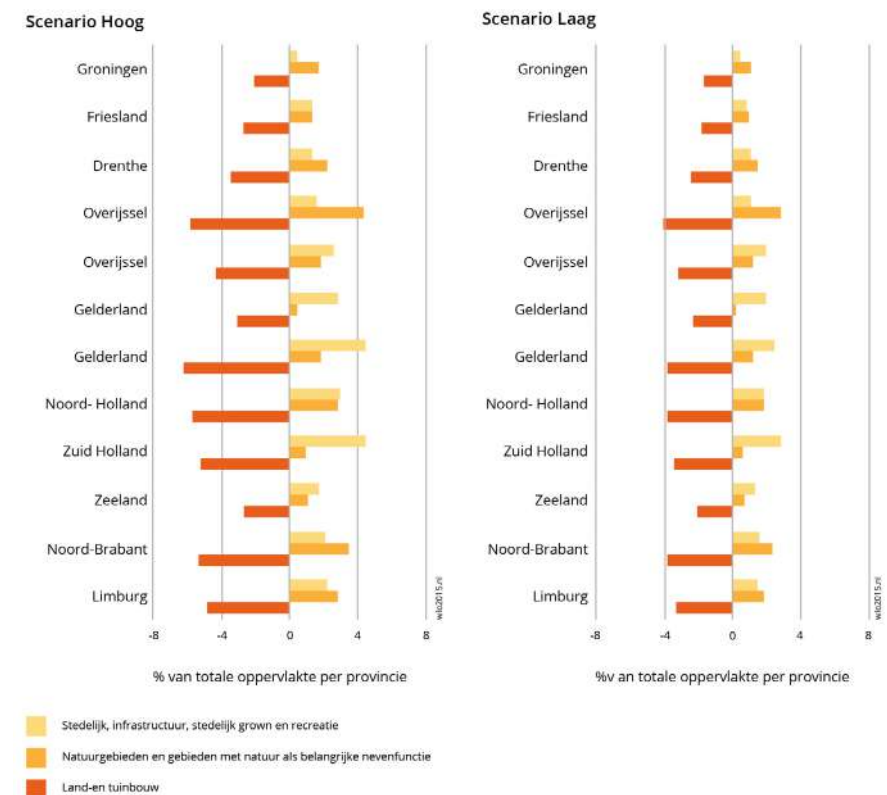
	Totaal oppervlak NL (km ²)	Verantwoording
Landgebruik	5.160	
waterdeel golf cat 3 natura 2000	2.532	BGT watertype; bgtplustype: Watervlak, Waterloop. Onderverdeeld in golfslagcategoriën op basis van: PBL Watertypenkaart, nader gespecificeerd naar zone-indeling (2) binnenwater (Europese richtlijn) en overeenkomstig met Natura2000 gebied.
waterdeel golf cat 1-2 natura 2000	545	BGT watertype; bgtplustype: Watervlak, Waterloop. Onderverdeeld in golfslagcategoriën op basis van: PBL Watertypenkaart, nader gespecificeerd naar zone-indeling (3 en 4) binnenwater (Europese richtlijn) en overeenkomstig met Natura2000 gebied.
waterdeel golf cat. 1-2 overig	868	BGT watertype; bgtplustype: Watervlak, Waterloop. Onderverdeeld in golfslagcategoriën op basis van: PBL Watertypenkaart, nader gespecificeerd naar zone-indeling (3 en 4) binnenwater (Europese richtlijn) en buiten Natura2000 gebied.
rivier, kanaal, sloot	1.192	BGT watertype; bgtplustype: Waterloop (Beek, Gracht, Haven, Kanaal, Rivier, Sloot), Greppel PBL Watertypenkaart: Watervlaktype in combinatie met Natura2000
bassin	10	BGT bouwwerken overig; bgtplustype: Bassins
overig water	14	BGT watertype; bgtplustype: Watervlak, Waterloop. Onderverdeeld in golfslagcategoriën op basis van: PBL Watertypenkaart, nader gespecificeerd naar zone-indeling (2) binnenwater (Europese richtlijn) en buiten Natura2000 gebied.

2.6 Verwachte ontwikkelingen in het ruimtegebruik in Nederland tot 2050

Het ruimtegebruik zoals tot nu toe bepaald in deze studie weerspiegelt de situatie zoals deze op dit moment is, in het jaar 2020. Dit is uiteraard een momentopname en dit ruimtegebruik is steeds aan verandering onderhevig. Radicale verschuivingen, zoals bijvoorbeeld bij grote landwinningsprojecten, liggen nu niet in de lijn der verwachtingen. Maar processen als verstedelijking en de omvorming van landbouwgrond naar natuur vinden continue plaats. Een goede projectie van de mogelijke verschuivingen in het ruimtegebruik tussen nu en 2050 kan gevonden worden in de WLO scenario's⁴⁴ (zie ook **Figuur 7**). In de scenario's neemt het landbouw areaal tussen nu en 2050 af met 5-8%, die ruimte wordt ongeveer voor helft ingenomen door nieuwe natuur en voor de helft door verstedelijking. Gegeven de verhouding van het huidige areaal landbouw (20.000 km²) en stedelijk gebied (~5000 km²) natuur (~5000 km²) betekent dat dus een toename van 10-15% in deze arealen. Er wordt geen verder onderscheid in het extra ruimtegebruik door verstedelijking gemaakt en het detailniveau beperkt zich tot een projectie per provincie. In hoeverre het toegenomen ruimtegebruik door verstedelijking een toename van gebouwen betreft of wegen of stedelijk groen wordt niet verder gespecificeerd. In eerste orde benadering zouden deze projecties dus leiden tot een 5-8% kleiner ruimtelijk potentieel voor zonnestroom op landbouwgrond en een 10-15% groter potentieel in stedelijk gebied. Deze verwachte verschuiving is in de verdere studie niet opgenomen.

De ontwikkelingen van de landbouw in Nederland worden mede bepaald door andere ruimteclaims, zoals de toekomstige ontwikkelingen rond wonen en werken, en de claims die een relatie hebben met ambities rond natuur en landschap. Er komt meer 'nieuwe' natuur (voor het Nationale Natuur Netwerk) en het ruimtebeslag door de gebouwde omgeving neemt toe. In het scenario Hoog neemt het areaal landbouwgrond in 2050 ten opzichte van nu af met 8 procent (1.500 km²), in het scenario Laag met 5 procent (1.000 km²). Het gebouwde areaal neemt het meest toe in de Randstad en in 'Intermediaire gebieden'; natuur neemt relatief het meest toe in 'Intermediaire gebieden' en in 'Overig Nederland'.

Figuur 7. Verandering van ruimtegebruik volgens WLO-scenario's 2010-2050



Bron: PBL (Ruimtescanner)



3. TYPOLOGIEËN

3.1 Systeemtypologieën

Het onderzoek naar hoeveel energie zonnestroomsystemen op kunnen wekken per oppervlakte eenheid bevat twee belangrijke vrijheidsgraden. Enerzijds kunnen verschillende typen grondgebruik leiden tot verschillende energieopbrengsten (bijvoorbeeld dak versus land). Anderzijds kunnen op hetzelfde type grondgebruik verschillende systemen geïnstalleerd worden die een verschillende opbrengst hebben (bijvoorbeeld een zuid versus een oost-west georiënteerd systeem). Deze verschillende zonnestroomsystemen worden in dit hoofdstuk nader uitgewerkt met systeemtypologieën.

Werken met typologieën

Om recht te doen aan de ruimtelijke mogelijkheden die zonnestroom met zich meebrengt maken we gebruik van systeemtypologieën. Een zonnestroom systeemtypologie wordt gedefinieerd op basis van de volgende kenmerken:

- Mogelijke ruimtelijke categorieën voor het systeem (gebouwen/infra/landschap/water)
- Paneeldichtheid: aspecten die hier een rol spelen zijn de bedekkingsratio bij dichtste pakking van panelen ($R_{\text{bedekking}}$, geen eenheid) en de rand- en obstakelfractie van een systeem ($F_{\text{rand-obst}}$, geen eenheid)
- De hellingshoek van de panelen (α , in graden)
- De oriëntatie van de panelen ten opzichte van het zuiden (θ , in graden t.o.v. het zuiden)

Van ruimtecategorie naar systeemtypologie

Door het opstellen van realistische zonnestroom systeem typologieën is er een goede link te maken van de beschikbare ruimte naar het opwek potentieel voor zonnestroom met die ruimte. Het gebruik van typologieën maakt de aannames en resultaten van de studie inzichtelijker. Om tot specifieke typologieën te komen is er eerst een hoofdverdeling gemaakt van systemen op basis van de ruimtecategorie:

- Zon op gebouwen
 - woningen
 - utiliteit
- Zon op infra
- Zon in landschap
- Zon op water

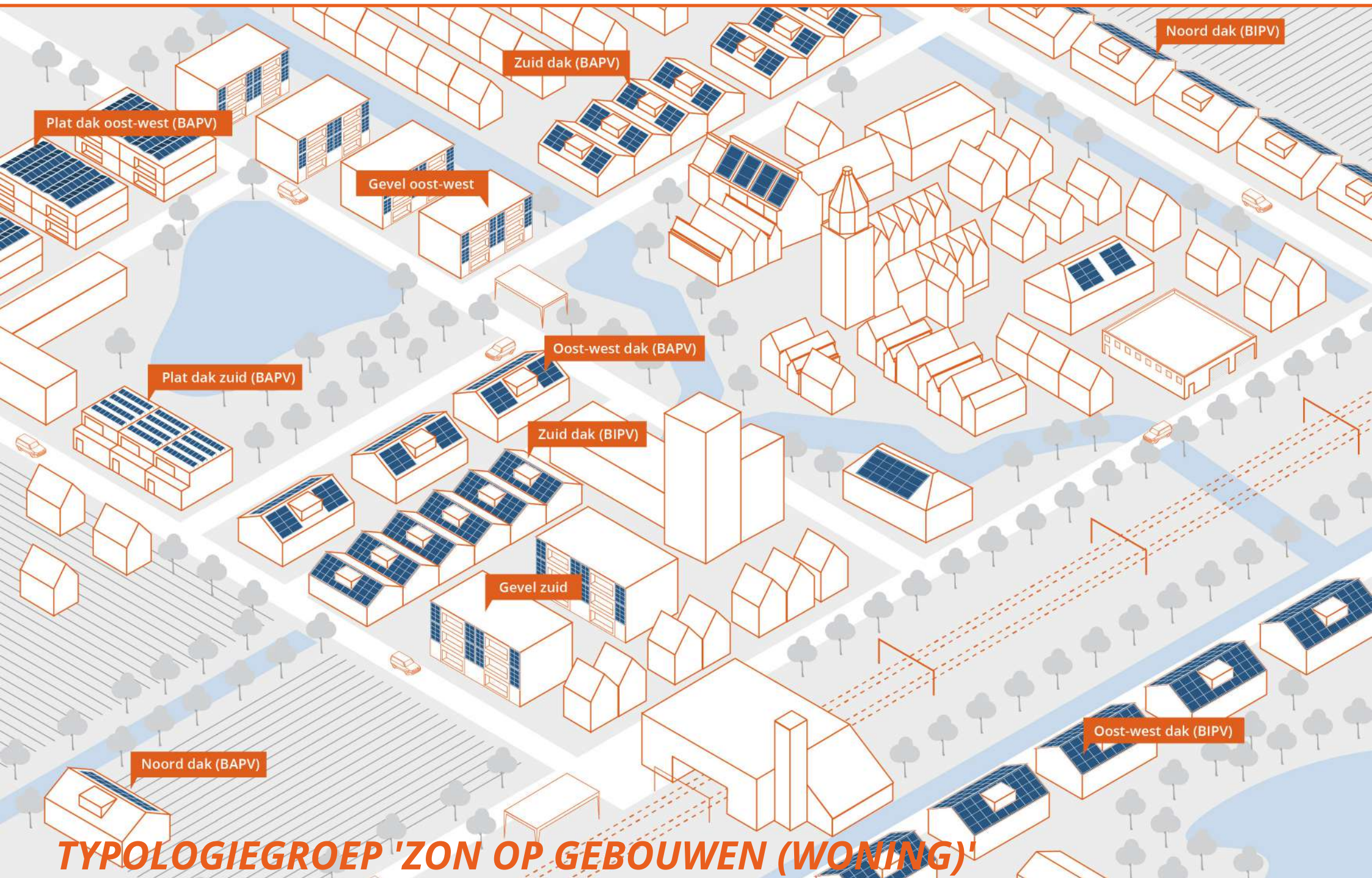
Dit onderscheid is eerder gemaakt in bijvoorbeeld het Meerjarig Missiegedreven Innovatie Programma (MMIP) dat zich richt op hernieuwbare elektriciteit op land⁴⁵. Dit programma is gericht op het sturen van innovatie die bijdraagt om de doelstellingen van het klimaatakkoord te bereiken. Het gemaakte onderscheid heeft o.a. geleid tot het ontstaan van nationale consortia van kennisinstellingen, bedrijven en maatschappelijke stakeholders op deze thema's⁴⁶.

Vervolgens is per typologiegroep een aantal typologieën opgesteld die recht doen aan de huidige mogelijkheden van zonnestroom. Variaties betreffen voornamelijk oriëntatie van de panelen en paneeldichtheden. Op advies van experts zijn daar een aantal systemen aan toegevoegd die nu nog in een prototype stadium zijn maar waarvan men verwacht dat ze in de toekomst een belangrijke rol kunnen gaan spelen in Nederland.

In totaal zijn 38 typologieën opgesteld, een volledig overzicht is gegeven in **Bijlage B**.

Een systeemtypologie is altijd een verzameling van subsystemen met kleine verschillen. De huidige lijst van typologieën geeft volgens de inzichten van de auteurs voldoende detail aan de studie. Indien voortschrijdend inzicht dit verlangt, kunnen de typologieën in een update van deze studie uitgebreid worden.

Op de typologiepagina's wordt steeds eerst de typologiegroep toegelicht, bijvoorbeeld zon op infra. Vervolgens wordt een overzicht getoond met de typologieën binnen die groep en als laatste worden enkele referenties van de typologieën getoond.



3.2 Zon op gebouwen (woning)

De typologieën binnen de groep 'zon op gebouwen (woning)' zijn onder te verdelen aan de hand van drie parameters.

1. BIPV- en BAPV-systemen
2. Schuine daken, platte daken en gevels
3. Oriëntatie

BIPV- en BAPV-systemen

Voor zon op woningen kan onderscheid worden gemaakt in twee groepen: Building-integrated photovoltaics (BIPV) en Building applied photovoltaics (BAPV).

- Bij BIPV is de opwekking van zonnestroom geïntegreerd in het gebouw. BIPV vervangt conventionele bouwmaterialen en is onderdeel van de bouwschil (daken, gevels, ramen etc.).
- Bij BAPV wordt het systeem voor de opwekking van zonnestroom toegevoegd aan het gebouw. De gebouwschil is gemaakt van conventionele materialen waar een zonnepaneel tegenaan wordt bevestigd.

Schuine daken, platte daken en gevels

Bij de schuine daken is voor de systeemtypologieën een gemiddelde hellingshoek van 40° gehanteerd en bij de platte daken 11,5°.

Gevels en daken worden momenteel vaak monofunctioneel ingezet. Er spelen echter nog meer opgaven in gebouwd gebied waar woningen een rol in kunnen spelen. Zo kunnen (platte) daken worden ingezet voor waterberging, voor openbare ruimte en als groeiplaats voor planten die zorgen voor koelte in de stad en een toename van groen en biodiversiteit. Deze functies kunnen ook op een gebouw worden gecombineerd met het opwekken van energie.

Oriëntatie

De typologieën met een schuin dak zijn onderverdeeld in 3 oriëntaties, te weten zuid, noord en oost-west. Voor de platte daken en de gevels is een onderverdeling gemaakt naar zuid en oost-west.

Paneeloppervlak per m²

Niet 100% van het oppervlak kan gebruikt worden voor het opwekken van zonnestroom door:

- De aanwezigheid van objecten op daken (zoals dakkappen en schoorstenen) en gevels (deuren, ramen). Zie ook **Figuur 13**
- Er afstand moet worden gehouden van dakranden
- Daken en gevels minder geschikt kunnen zijn door schaduw afkomstig van bomen en omliggende gebouwen.

Een overzicht van alle systeemtypologieën binnen de groep 'zon op gebouwen (woning)' is op de volgende pagina te vinden en referenties hiervan in **Figuur 8**.

OVERZICHT SYSTEEMTYPOLOGIEËN ZON OP GEBOUWEN (WONING)

Zuid dak (BAPV)

Oost-west dak (BAPV)

Noord dak (BAPV)

Zuid dak (BIPV)

Oost-west dak (BIPV)

Noord dak (BIPV)

Plat dak zuid (BAPV)

Plat dak oost-west (BAPV)

Gevel oost-west

Gevel zuid

Figuur 8. Referenties zon op gebouwen (woning)

OOST-WEST DAK (BIPV)



Blaricum renovatie Actua10LT grijs
Bron: Solinso

ZUID DAK (BAPV)



Stad van de zon, Heerhugowaard
Bron: Rob poelenjee; Rijksoverheid

GEVEL ZUID



TU Delft Bouwkunde
Bron: Solinso

ZUID DAK (BIPV)

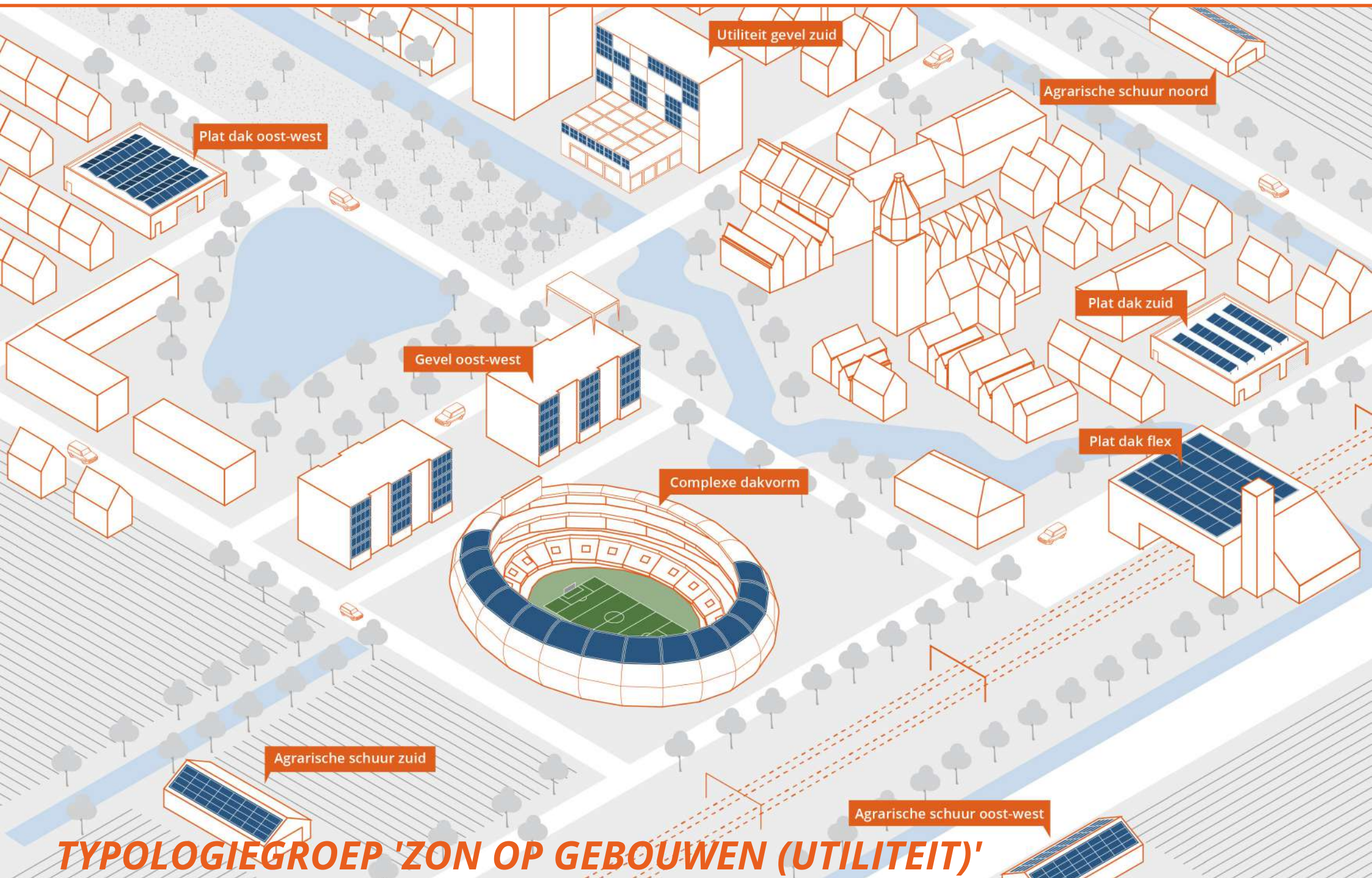


Green Village, Delft
Bron: Rob poelenjee; Rijksoverheid

OOST-WEST DAK (BIPV)



SchoemakerPlantage, Delft
Bron: Valerie Kuypers; www.valerieuypers.nl



3.3 Zon op gebouwen (utiliteit)

Utiliteitsgebouwen kennen veelal een groot dakoppervlak dat niet voor andere doeleinden wordt gebruikt. Hierdoor zijn daken en gevels van utiliteitsgebouwen vaak ideaal voor het opwekken van zonnestroom.

In dit onderzoek is utiliteit onderverdeeld aan de hand van de volgende parameters:

1. Schuine daken, platte daken, complexe dakvormen en gevels
2. Oriëntatie

Schuine daken, platte daken, complexe dakvormen en gevels

Bij de schuine daken is voor de agrarische schuren een gemiddelde hellingshoek van 30° gehanteerd, bij de complexe dakvormen zoals gebogen daken een hellingshoek van 20° en bij de platte daken wordt een gemiddelde hellingshoek van 11,5° aangehouden voor de panelen.

Gevels en daken worden op dit moment weinig voor meerdere doelen gebruikt. Er spelen echter nog meer opgaven in gebouwd gebied waar gebouwen een rol in kunnen spelen. Zo kunnen (platte) daken worden ingezet voor waterberging, als publiek ruimte of als groeiplaats voor planten die zorgen voor koelte in de stad en een toename van biodiversiteit. Deze functies kunnen ook op een gebouw worden gecombineerd met het opwekken van energie.

Gevels bepalen het straataanzicht en vallen meer op dan daken. Gevels kunnen ook geschikt zijn voor het opwekken van zonnestroom. Grote utiliteitspanden met meerdere verdiepingen hebben een relatief beperkt dakoppervlak ten opzichte van het totale vloeroppervlak.

Door deze gevels ook te benutten voor het opwekken van zonnestroom kunnen deze gebouwen (meer) voorzien in hun eigen elektriciteitsbehoefte.

Oriëntatie

De typologieën met een schuin dak zijn onderverdeeld in 3 oriëntaties, te weten zuid, noord en oost-west. Voor de platte daken en de gevels is een onderverdeling gemaakt naar zuid en oost-west. Oost- en westoriëntaties zijn voor platte- en schuine daken samengevoegd omdat een westdak nagenoeg dezelfde energieopbrengst heeft als een oostdak.

Paneeloppervlak per m²

Niet alle bestaande daken en gevels zijn geschikt om te worden gebruikt voor zonnestroom. Dit komt doordat:

- bij sommige utiliteitsgebouwen de draagkracht van de constructie niet sterk genoeg is. Daarom is er ook een typologie 'plat dak flex' toegevoegd die wel toepasbaar zijn op gebouwen met beperkte draagkracht.
- bij sommige utiliteitsgebouwen elementen aanwezig zijn op daken (zoals schoorstenen, daklichten, koelinstallaties etc.) en gevels (ramen, deuren).
- afstand wordt gehouden van dakranden. Zie ook **Figuur 13**.
- daken en gevels minder geschikt zijn voor zonnepanelen door schaduw veroorzaakt door bomen en omringende gebouwen.

Een overzicht van alle systeemtypologieën binnen de groep 'zon op gebouwen (utiliteit)' is op de volgende pagina te vinden en referenties zijn te zien in **Figuur 9**.

OVERZICHT SYSTEEMTYPOLOGIEËN ZON OP GEBOUWEN (UTILITEIT)

Plat dak oost west

Plat dak zuid

Plat dak flex

Gevel zuid

Gevel oost-west

Complexe dakvorm

Agrarische schuur oost-west

Agrarische schuur zuid

Agrarische schuur noord

Figuur 9. Referenties zon op gebouwen (utiliteit)

PLAT DAK ZUID



Patijnenburg in Naaldwijk

Bron: Patijnenburg ; <https://solarmagazine.nl/nieuws-zonne-energie/i16474/sociale-werkplaats-patijnenburg-stelt-1-389-zonnepanelen-in-werking>

AGRARISCHE SCHUUR ZUID



Zonnedak Van Erp, Solaris Industria

Bron: <https://blog.zonnepanelendelen.nl/2017/08/de-energietransitie-verder-versnellen-zonnedak-voor-zonnedak/zonnedak-van-erp-solaris-industria-2/>

COMPLEXE DAKVORM



Johan Cruijff Arena, Amsterdam

Bron: Anton de Zeeuw ; <https://www.werkaandemuur.nl/nl/werk/Luchtfoto-Amsterdam-Arena-Johan-Cruijff-Arena/154028>

GEVEL ZUID



Copenhagen International School

Bron: Niels J. Hoffmeyer ; <https://www.flickr.com/photos/niho1953/39094009310>

AGRARISCHE SCHUUR ZUID



Duurzame kippenboerderij

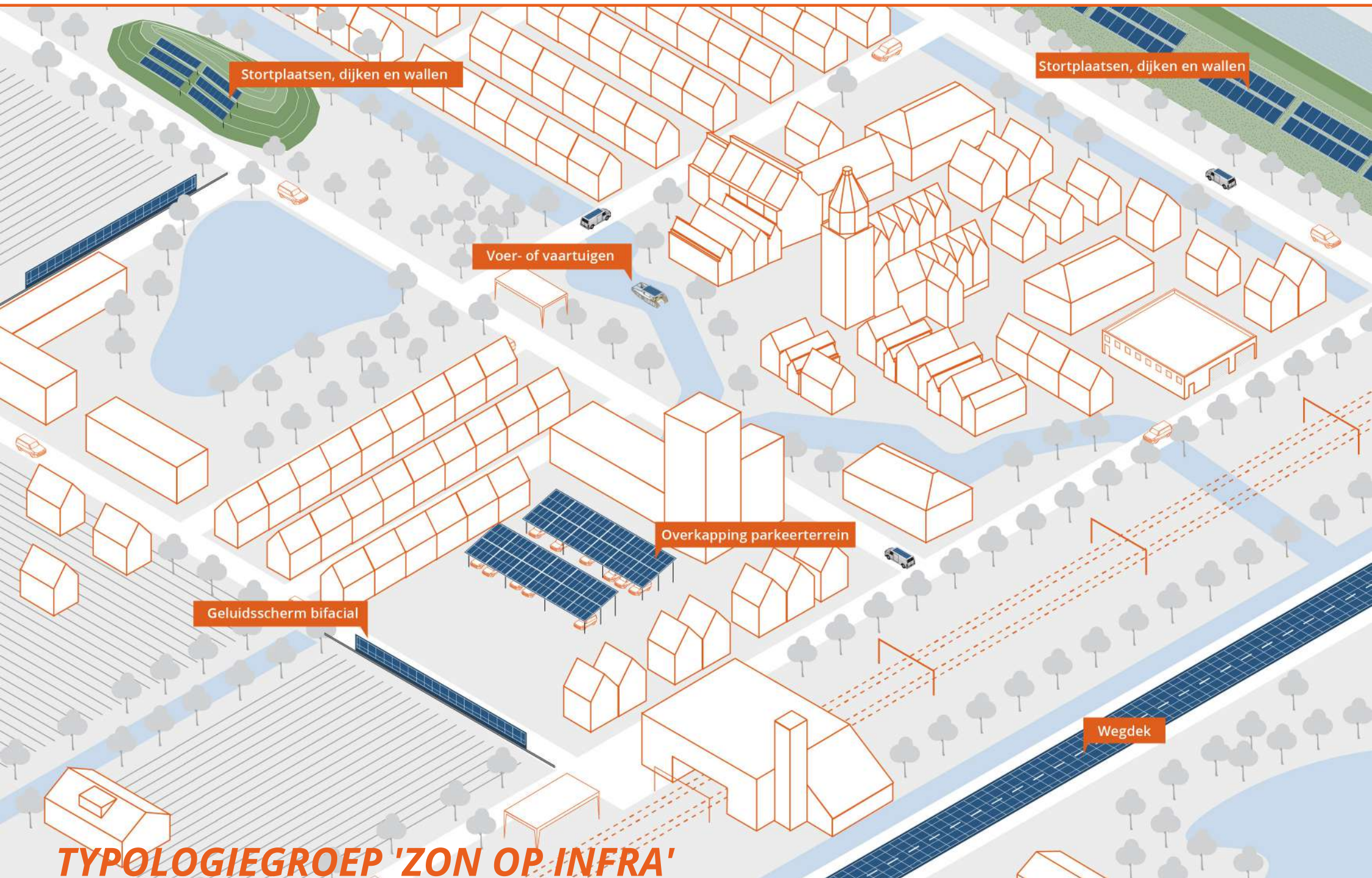
Bron: Valerie Kuypers; www.valerieuypers.nl

PLAT DAK OOST WEST



Distributiecentrum Schiphol

Bron: KiesZon



Stortplaatsen, dijken en wallen

Stortplaatsen, dijken en wallen

Voer- of vaartuigen

Overkapping parkeerterrein

Geluidsscherm bifacial

Wegdek

TYOLOGIEGROEP 'ZON OP INFRA'

3.4 Zon op infra

Rond en langs infrastructuur is ruimte te vinden voor het opwekken van zonnestroom.

De typologieën binnen de groep 'zon op infra' zijn onderverdeeld aan de hand van de volgende parameters:

- Lijnvormige infrastructuur
- Compacte infrastructuur
- Voer- en vaartuigen

Lijnvormige infrastructuur

Zonnestroom kan worden gerealiseerd in en langs lijnvormige infrastructuur, zoals bijvoorbeeld in het wegdek. Geluidsschermen kunnen worden gecombineerd met het opwekken van stroom en ook restruimtes rond dijken en wallen die vaak weinig worden benut voor andere doeleinden, kunnen worden ingezet om stroom op te wekken.

Compacte infrastructuur

Meer compacte vormen van infrastructuur zoals parkeerterreinen en stortplaatsen lenen zich goed om te overdekken of overkappen met zonnepanelen.

Voer- en vaartuigen

Ook op voer- en vaartuigen zelf kan zonnestroom worden opgewekt. Zie hiervoor bijvoorbeeld de zonne-auto van Lightyear.

Paneeloppervlak per m²

Niet alle bestaande infrastructuur is geschikt om te worden gebruikt voor zonnestroom. Dit komt o.a. doordat:

- In (wegdek)systemen met zwaar verkeer de slijtage hoog is.
- Lijnvormige infrastructuur minder geschikt kunnen zijn als gevolg van schaduw veroorzaakt door bomen
- Bij het overkappen van parkeerterreinen ook esthetische overweging kunnen meespelen.

Een overzicht van alle systeemtypologieën binnen de groep 'zon op infra' is op de volgende pagina te vinden. Referenties voor zon op infra zijn te zien in **Figuur 10**.

OVERZICHT SYSTEEMTYPOLOGIEËN ZON OP INFRA

Wegdek

Geluidsscherm bifacial

Voer- of vaartuigen

Overkapping parkeerterrein

Stortplaatsen, dijken en wallen

Figuur 10. Referenties zon op infra

WEGDEK



Fietsers rijden op een fietspad met zonnecellen

Bron: TNO Provincie Noord-Holland, Imtech Traffic&Infra en Ooms Civiel

GELUIDSSCHERM BIFACIAL



A50 Uden

Bron: Tineke Dijkstra, Mediatheek Rijksoverheid

VOER- OF VAARTUIGEN



Lightyear One

Bron: Solarmagazine

OVERKAPPING PARKEERTERREIN



Openbare parkeerplaats met zonnepanelen Bloemendaal aan Zee

Bron: Rooftop Energy

STORTPLAATSEN, DIJKEN EN WALLEN



De zonnehuid van de vuilstort, Alkmaar

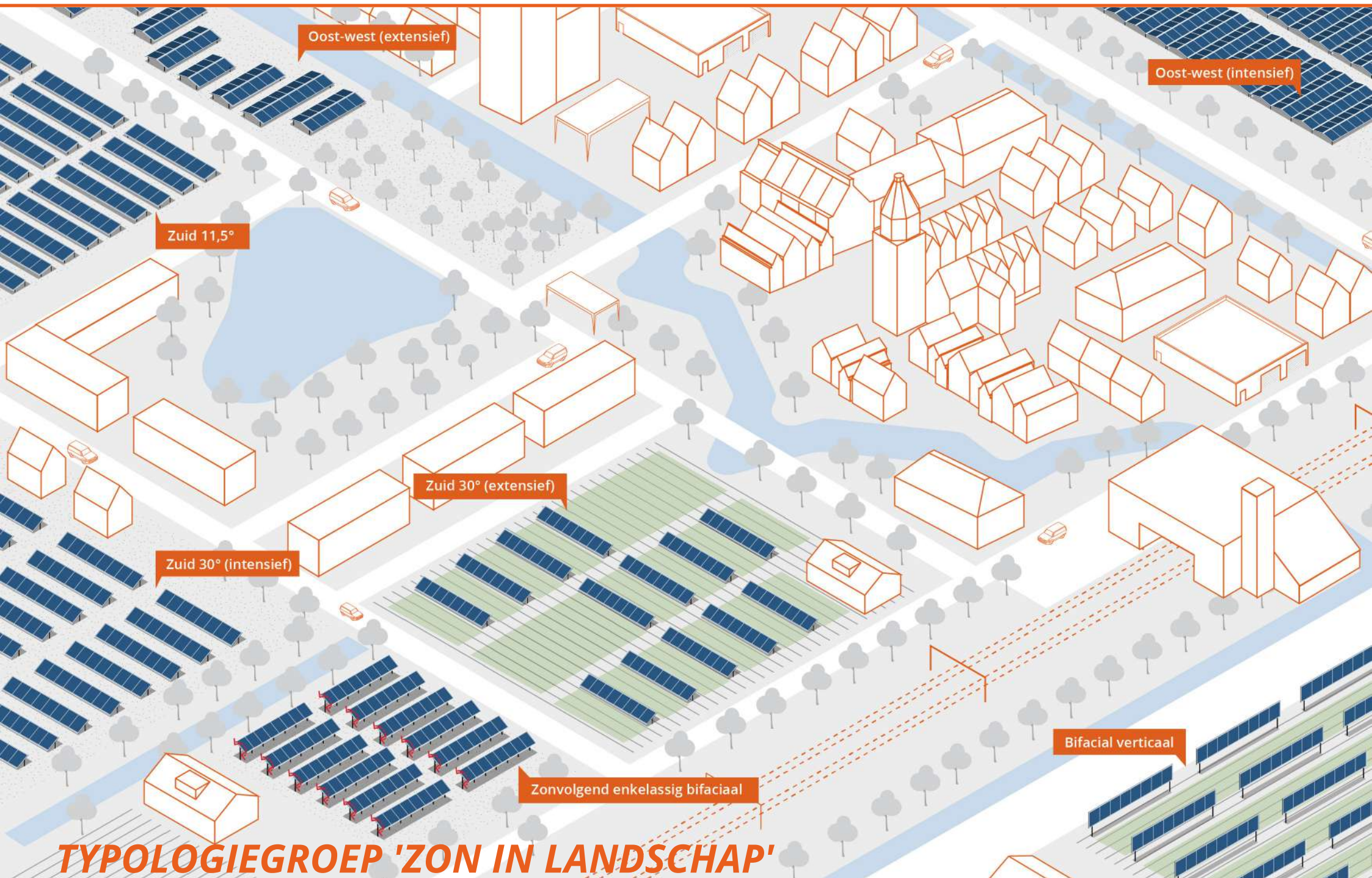
Bron: Daniel Nicolas ; <https://www.steunpunterfgoednh.nl/de-zonnehuid-van-de-vuilstort-alkmaar/>

VOER- OF VAARTUIGEN



Binnenvaartschip 'Oleander'

Bron: Wattlab



TYPLOGIEGROEP 'ZON IN LANDSCHAP'

3.5 Zon in landschap

Binnen grondgebonden zonnevelden zijn er vele typologieën mogelijke. Voor elk grondgebonden zonneveld gelden echter een aantal principes. Zo worden ze geplaatst binnen een bestaande landschappelijke context en bestaat een zonneveld uit verschillende technische elementen en wordt geplaatst binnen een bestaande landschappelijke context. Met het ontwerpen van een zonneveld kan hier rekening mee worden gehouden.

Relatie met het landschap

Het Nederlandse landschap heeft zich ontwikkeld door natuurlijke processen en invloed vanuit de mens. Dit heeft geleid tot het huidige landschap, maar deze ontwikkeling staat niet stil. Nieuwe functies en objecten, waaronder zonnevelden, gaan onderdeel uitmaken van het landschap. Een toevoeging van een zonneveld heeft invloed op de huidige landschapskarakteristieken en beleving van het landschap.

De landschapskarakteristieken die hier invloed op uitoefenen zijn:

- De kavel-vormen en structuur in het landschap; langgerekte of blokvormige kavels, regelmatige of onregelmatige vormen.
- De schaal en mate van openheid van het landschap; grootschalige open landschappen of kleinschalige besloten landschappen.
- Hoogteverschil: vlak of landschappen met hoogteverschil: zoals heuvels, dijken etc.
- Groen en water structuur; bijvoorbeeld: uitgebreid slotenstelsel, landschapselementen zoals (hout)wallen, laanstructuren etc.

Bij het vormgeven van een zonneveld kan rekening worden gehouden met een aantal principes⁴⁷:

- De afmetingen en vorm van het zonneveld. Deze kan worden afgestemd op de huidige kavelstructuur van het landschap. Bij langgerekte smalle kavels is de omtrek in verhouding tot het oppervlakte groter dan bij blokvormige kavels. Dit zorgt ervoor dat bij smalle langwerpige kavels relatief meer afrastering nodig is.
- De oriëntatie en kleur van de panelen en afstand tussen de panelen. Bij een grotere afstand tussen panelen is er onder andere een grotere kans op biodiversiteit tussen panelen.
- De afscherming, bereikbaarheid en zichtbaarheid van het zonneveld. Om vandalisme en diefstal te voorkomen kan deze worden afgeschermd. Dit kan een hek zijn en/of natuurlijkere afscheidingen zoals wallen, heggen of water. Wanneer een zonneveld in een landschap wordt geplaatst bepalen de huidige landschaps- karakteristieken mede de zichtbaarheid. In een open landschap is een zonneveld al van ver zichtbaar. Wanneer de randen van een zonneveld worden omzoomd met bomen en struiken dan zou dit meer nadruk leggen op het zonneveld. Doordat de openheid wordt verminderd en de zichtlijnen worden verbroken.
- Transitie van het (omringende) landschap. Zonnevelden kunnen een aanjager zijn om het omringende landschap te veranderen, zoals het aanleggen van houtwallen of natuurvriendelijke oevers. Deze hebben een toegevoegde natuurwaarde, maar zorgen er ook voor dat het zonneveld afgeschermd en minder zichtbaar is.

- Meervoudig ruimtegebruik. Zonnevelden kunnen worden gecombineerd met andere functies. Dit kan door zonnepanelen te plaatsen waarbij de huidige functie behouden blijft zoals zonnevelden in combinatie met landbouw. Ook kan de plaatsing van een zonneveld de aanjager zijn van nieuwe functie combinaties. Zoals zonnepanelen i.c.m. waterberging. Of de ruimte meervoudig kan worden gebruikt hangt af van de systeemtypologie.

Deze vormgevingsprincipes kunnen worden gebruikt om het zonneveld bij het huidige landschap te laten aansluiten.

In de typologieën wordt gebruik gemaakt van gemiddelde oriëntaties per windrichting. zie hiervoor ook [Bijlage A](#).

Een overzicht van alle systeemtypologieën binnen de groep zon in landschap is op de volgende pagina te vinden. Referenties voor 'zon in landschap' zijn te zien in [Figuur 11](#).

OVERZICHT SYSTEEMTYPOLOGIEËN ZON IN LANDSCHAP

Zuid 11,5°

Zuid 30° (intensief)

Zuid 30° (extensief)

Zonvolgend enkelassig bifaciaal

Oost-west (intensief)

Oost-west (extensief)

Bifacial verticaal

Figuur 11. Referenties zon in landschap

ZUID 11,5°



Zonnepark Apeldoorn

Bron: Google Maps

OOST-WEST (INTENSIEF)



Zonnepark waterschap Rivierenland

Bron: IBC Solar

ZUID 30° (INTENSIEF)



Zonnepark Ameland

Bron: Solarcentury

BIFACIAL VERTICAAL



Solar plant in Eppelborn Germany

Bron: Next2Sun GmbH

ZUID 30° (EXTENSIEF)



Zonnepark Laarberg

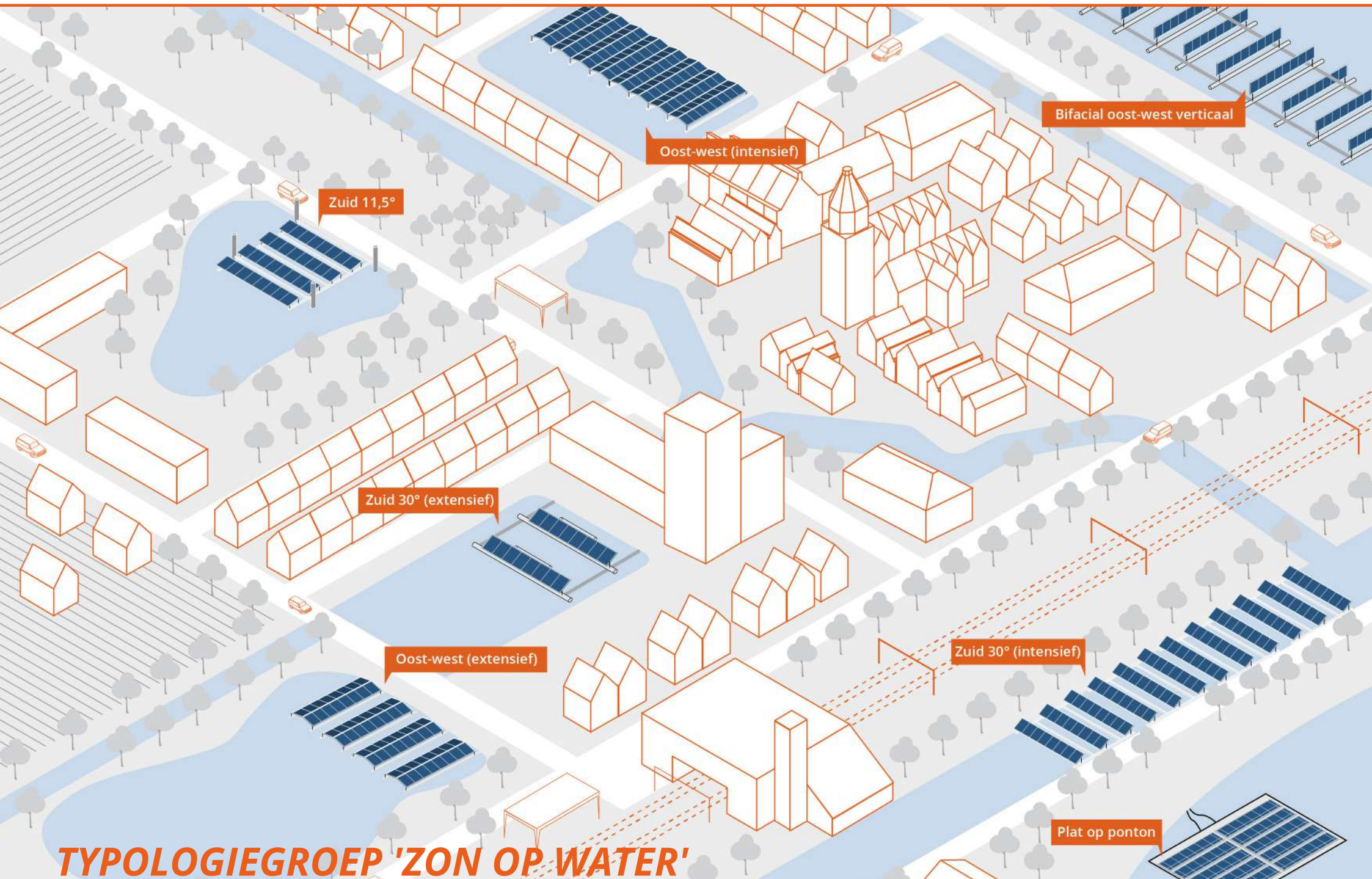
Bron: Greenspread

ZONVOLGENDE ENKELASSIG BIFACIAAL



Enkelassig zonvolgend systeem

Bron: NEXTracker



TYOLOGIEGROEP 'ZON OP WATER'

3.6 Zon op water

Grotere wateroppervlaktes zoals irrigatiebekkens, baggerdepots, zandwinplassen en bassins bij zuiveringsinstallaties kunnen worden ingezet voor opwekking van zonnestroom. Op de langere termijn zullen ook zonneparken op zee technisch en economisch haalbaar worden, bijvoorbeeld in combinatie met offshore windparken.

De typologieën binnen de groep 'zon op water' zijn onder te verdelen aan de hand van de volgende parameters.

1. Drijvers of pontons
2. Intensieve- of extensieve systemen
3. Hellingshoek van de systemen
4. Oriëntatie

Drijvers of pontons

Eén van de typologieën is een systeem op een ponton, alle overigen zijn op drijvers geïnstalleerd.

Intensieve of extensieve systemen

Ook op water is het mogelijk om voor extensievere systemen te kiezen om zo meer licht door te kunnen laten naar onder water.

Hellingshoek

De hellingshoeken in deze typologieën variëren van plat tot verticaal.

Oriëntatie

De typologieën op water zijn onderverdeeld in twee oriëntaties, te weten zuid en oost-west.

Paneeloppervlak per m²

De effecten van drijvende zonnepanelen zijn niet alleen afhankelijk van de opstelling, maar ook van de bedekkingsgraad van het wateroppervlak.

welke paneeldichtheden acceptabel zijn qua impact op de aquatische ecologie is op dit moment onderwerp van onderzoek^{48,49}. De verwachting is dat voor wateren in privaat eigendom met een industrieële gebruiksfunctie (bassins, zandwinplassen, drinkwaterbekkens) een hoge bedekkingsgraad acceptabel zal blijven. Dit betreft een klein deel van het totale binnenwateroppervlak. Voor wateren onder het beheer van Rijkswaterstaat en de waterschappen is de verwachting dat er slechts beperkt en extensieve systemen toegestaan zullen gaan worden.

Een overzicht van alle systeemtypologieën binnen de groep zon op water is op de volgende pagina te vinden. Referenties voor zon op water zijn te zien in **Figuur 12**.

OVERZICHT SYSTEEMTYPOLOGIEËN ZON OP WATER

Zuid 11,5°

Zuid 30° (intensief)

Zuid 30° (extensief)

Oost-west (intensief)

Oost-west (extensief)

Bifacial verticaal

Plat op ponton

Figuur 12. Referenties zon op water

PLAT OP PONTON



North Sea One

Bron: Oceans of Energy (<https://oceansofenergy.blue/north-sea-1-offshore-solar-project/>)

OOST-WEST INTENSIEF



The Sekdoom project

Bron: BayWa (<https://www.smart-energy.com/regional-news/europe-uk/largest-floating-solar-farm-in-the-netherlands-switched-on/>)

A large field of solar panels in the foreground, with a house and a tractor in the background.

4. ENERGIEOPBRENGST

Met de parameters van de typologieën uit **hoofdstuk 3** kan bepaald worden hoeveel panelen er op een oppervlak passen. Door ook het omzettingsrendement van de panelen en de jaarlijkse energieopbrengst van de panelen in hun systeemconfiguratie af te schatten kan de energieopbrengst (dat wil zeggen, de elektriciteitsopbrengst) per oppervlak bepaald worden. In dit hoofdstuk lichten we de gebruikte methode toe. We leggen stapsgewijs uit hoe de opbrengst van een systeem van zonnepanelen in het algemeen bepaald wordt en hoe dit gecombineerd met de typologieparameters tot een energieopbrengst per grondoppervlak leidt. Ook lichten we toe hoe we tot schattingen zijn gekomen van de relevante parameters voor elk van de systeemtypologieën.

4.1 Energieopbrengst per gebruiksoppervlak

Om het omzettingsrendement van zonnepanelen te bepalen wordt gebruikt gemaakt van een zonn simulator. Daarmee wordt de situatie nagebootst dat de panelen in de volle zon werken. Dit wordt gedaan bij een lichtintensiteit van 1000 watt/m², ofwel '1 zon' met een spectrum dat representatief is voor veel landen, Air Mass 1.5; oftewel zonlicht dat 1.5 aardatmosfeerdikte heeft doorlopen. Verder moet het paneel tijdens de meting op 25°C gehouden worden. Dit wordt het rendement onder standaard testcondities (STC) genoemd.

Meestal spreekt men bij zonnepanelen over het piekvermogen in plaats van het rendement. Dit is het vermogen dat een zonnepaneel levert onder STC:

Piekvermogen (W_{piek}) = oppervlak van het paneel (m²) x STC-belichtingsintensiteit (W/m²) x rendement (%)

In praktijkomstandigheden fluctueert de intensiteit en is meestal lager dan 1 zon, het spectrum wijkt af van AM1.5 en de temperatuur van het paneel is over het algemeen hoger dan 25°C (op een zonnige dag in Nederland kan een paneel wel 60-70°C worden). De opbrengst in de praktijk zal daarom afwijken van het STC-rendement vermenigvuldigd met de instraling in het vlak van de panelen. Om de opbrengst in de praktijk te kunnen bepalen wordt gebruik gemaakt van de 'opbrengstfactor' (in engels: performance ratio, PR). Dit is een dimensieloos getal en is een maat voor hoeveel de opbrengst afwijkt van een (denkbeeldige) situatie waarin het paneel of het systeem dezelfde totale jaarlijkse instraling ontvangt, maar altijd onder STC zou werken. Hierin worden alle opbrengstverlagende en -verhogende effecten ten opzichte van STC meegenomen. De elektriciteitsopbrengst van een paneel per tijdseenheid (per jaar is een gebruikelijk interval) kan dan weergegeven worden als:

Opbrengst (kWh_{el}/jr) = instraling (kWh_{licht}/m²·jr) x paneeloppervlak (m²) x rendement (%) x opbrengstfactor_{DC} (%)

Per oppervlak wordt dit:

Opbrengst (kWh_{el}/m²·jr) = instraling (kWh_{licht}/m²·jr) x rendement (%) x opbrengstfactor_{DC} (%)

Daarbij gaat het om het paneeloppervlak op basis waarvan het rendement is gegeven. In de praktijk is de opbrengstfactor altijd kleiner dan 100% omdat de opbrengstverlagende effecten op jaarbasis dominant zijn. De opbrengstfactor kan ook voor het complete systeem gegeven worden. In dat geval worden ook de weerstandsverliezen in de kabels, verliezen door 'mismatch' tussen panelen, beschaduwning en vervuiling

en verliezen in de omzetting van gelijkstroom naar wisselstroom (engels: Alternating Current, AC) in omvormer meegenomen. Men spreekt dan over de AC opbrengstfactor.

Een andere, veelgebruikte manier om de opbrengst van een systeem weer te geven is per kWp geïnstalleerd vermogen, ofwel de specifieke opbrengst:

Specifieke opbrengst (kWh_{el}/(kWp·jr)) = instraling (kWh_{licht}/m²·jr) x opbrengstfactor_{ac} (%) / STC intensiteit (1 kWh/m²)

De specifieke opbrengst geeft het aantal 'vollasturen' van het systeem en is een dimensieloos getal (NB: 1 kWh = 1 kW x 1 uur). Het CBS hanteert op dit moment het kengetal van 875 kWh/kWp/jr als gemiddelde voor alle systemen in Nederland. Uit het aantal vollasturen volgt direct de vollastfractie, ofwel de capaciteitsfactor CF van het systeem: CF = specifieke opbrengst/# uren in een jaar = specifieke opbrengst/8.760.

Een rekenvoorbeeld: een systeem bestaande uit 12 panelen van 350 Wp (0,35 kWp) ligt op het dak van een woonhuis in Nederland, waarop jaarlijks 1.100 kWh per m² aan zonlicht valt. Stel de opbrengstfactor van het systeem is 0,85.

De elektriciteitsproductie is dan: 12 x 0,35 kWp x 1.100 kWh/(m²·jr) x 0,85 = 3.927 kWh_{el} per jaar; dit is iets hoger dan het gemiddelde elektriciteitsgebruik van een huishouden in Nederland in 2020.

De specifieke opbrengst van dit daksysteem is: Specifieke opbrengst (kWh_{el}/(kWp·jr)) = 1.100 x 0,85 kWh/(kWp·jaar) = 935 kWh/(kWp·jaar).

Een jaar heeft 8.760 uren en een PV-systeem dat 935 kWh_{el}/(kWp·jaar) levert draait daarom 935/8.760 ≈ 11% van de tijd op vollast, een behoorlijk representatief getal voor PV in Nederland. We noemen dat de capaciteitsfactor van het PV-systeem.

Bovenstaande vergelijkingen bepalen de opbrengst per paneeloppervlak, gebruikmakend van de instraling in het vlak van de panelen. Voor deze studie zijn we geïnteresseerd in de energieopbrengst per gebruiksoppervlak⁵⁰.

Om de opbrengst per paneeloppervlak naar opbrengst per gebruiksoppervlak te vertalen maken we gebruik van de typologieparameters zoals in **hoofdstuk 3** gedefinieerd. We doorlopen daarbij twee stappen. Eerst bepalen we de paneeldichtheid in het horizontale vlak. Daarbij schatten we de ruimteverliezen aan de randen van een systeem en verliezen door obstakels af in een parameter, $F_{\text{rand-obstakel}}$, dit is uitgedrukt als fractie van het totale oppervlak. Daarnaast kijken wat de maximale bedekkingsgraad is voor de nuttig inzetbare ruimte, $R_{\text{bedekking}}$, dit is uitgedrukt als fractie van de nuttig inzetbare ruimte. De paneeldichtheid is dan:

$$\text{Paneeldichtheid} = (1 - F_{\text{rand-obstakel}}) \times R_{\text{bedekking}}$$

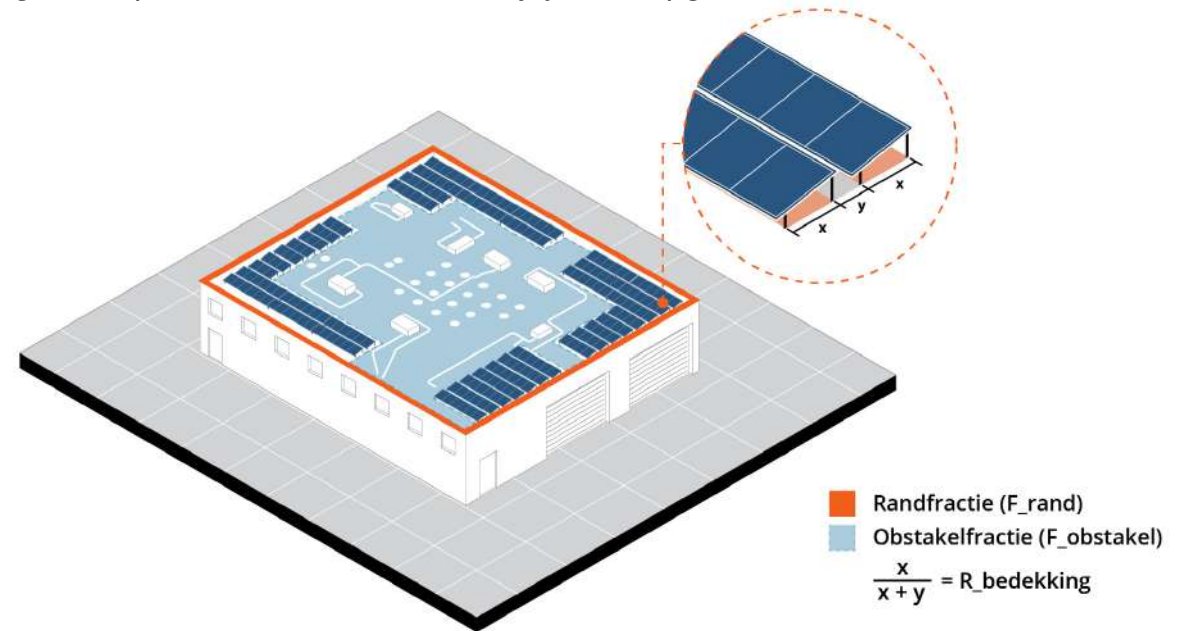
De paneeldichtheid is daarmee de netto ruimte die op een horizontaal gebruiksoppervlak benut kan worden voor panelen⁵¹. Nu zullen deze panelen over het algemeen een helling hebben ten opzichte van het horizontale vlak, dit geldt zowel voor schuine daken (waarbij het dakoppervlak schuin loopt) als voor platte daken en veldopstellingen (waarbij de panelen onder een hoek staan ten opzichte van het horizontale dak of veld). Door deze helling past er meer paneeloppervlak op de eerder bepaalde netto inzetbare horizontale ruimte. Deze factor kan bepaald worden met een goniometrische projectie:

$$\text{Projectie paneel op het gebruiksoppervlak} = \text{Cos}(\alpha)$$

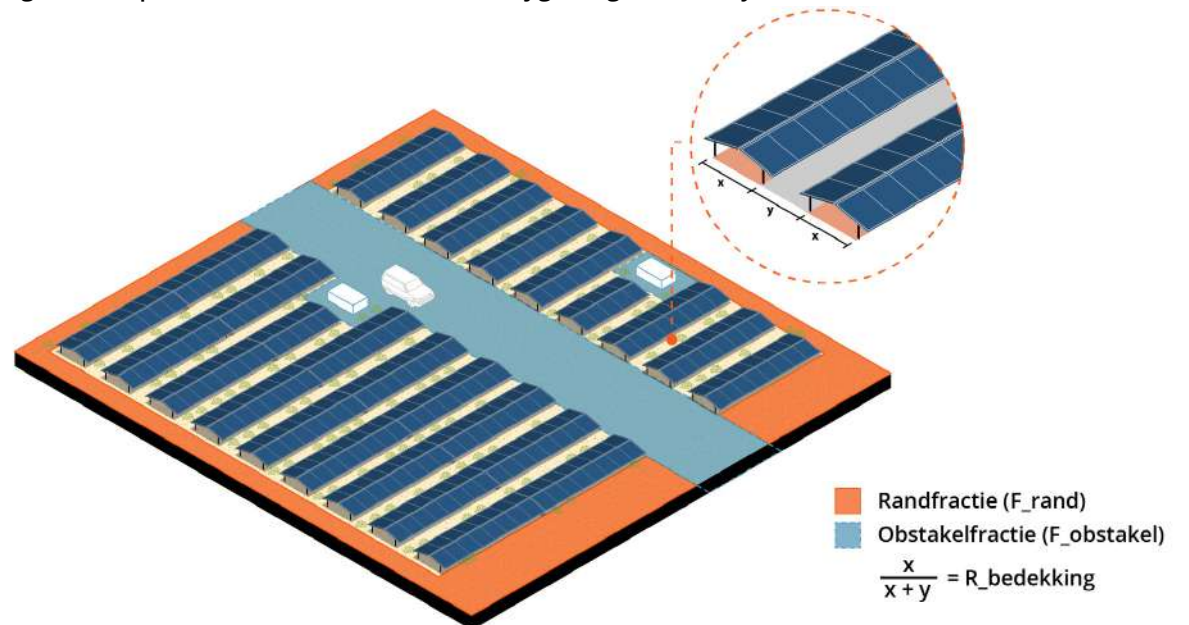
Met α de hellingshoek ten opzichte van het horizontale vlak.

In **Figuur 13** en **Figuur 14** wordt de paneeldichtheid en projectie geïllustreerd voor systemen op gebouwen en grondgebonden systemen.

Figuur 13. paneeldichtheid en randfractie bij systemen op gebouwen



Figuur 14. paneeldichtheid en randfractie bij grondgebonden systemen



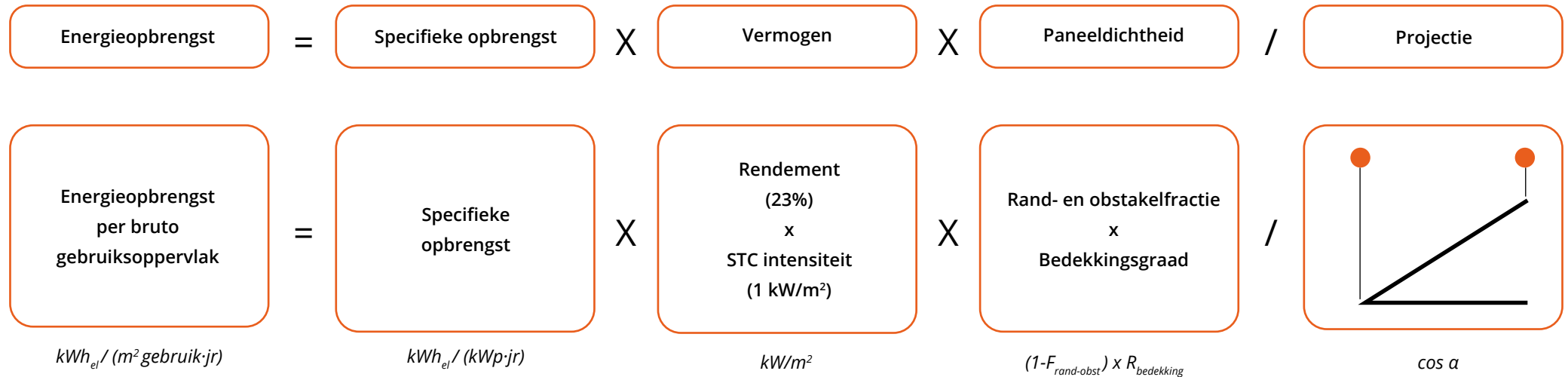
De opbrengst per gebruiksoppervlak* wordt nu:

$$\text{Opbrengst (kWh}_{e_l}\text{/m}^2\text{ gebruik}\cdot\text{jr)} = \text{instraling (kWh}_{\text{licht}}\text{/m}^2\text{ paneel}\cdot\text{jr)} \times \text{rendement (\%)} \times \text{opbrengstfactor (\%)} \times \text{Paneeldichtheid} \times 1/\cos(\alpha) =$$

$$\text{Specifieke opbrengst (kWh}_{e_l}\text{/(kWp}\cdot\text{jr)} \times \text{STC intensiteit (1 kW/m}^2\text{)} \times \text{rendement (\%)} \times \text{Paneeldichtheid} \times 1/\cos(\alpha)$$

Dit is schematisch weergegeven in **Figuur 15**

Figuur 15. Formule energie opbrengst



In **sectie 4.2** en **sectie 4.3** lichten we toe hoe het omzettingsrendement en de specifieke opbrengst zijn geschat voor de verschillende typologieën. De met deze gegevens berekende energieopbrengst per gebruiksoppervlak voor de verschillende typologieën is gegeven in **Bijlage A**.

* Voor systemen op verticale ondergronden zoals gevels is het gebruiksoppervlak gedefinieerd als het verticale geveloppervlak. Voor systemen waarbij de panelen verticaal geplaatst worden op een horizontaal oppervlak, zoals een veld met bifacial panelen, kan de projectiemethode niet gebruikt worden. Er wordt hierbij uitgegaan van een systeem van 2 panelen van 1 meter hoog en een rijafstand van 10 meter.

4.2 Projecties rendement tot 2050

Het gemiddelde rendement van verkochte zonnepanelen in 2018 bedroeg 17.3%⁵². Dit zijn cijfers van de internationale markt, er wordt aangenomen dat dit gemiddelde ook geldt voor de Nederlandse markt. Over 2019 of 2020 konden nog geen gegevens gevonden worden. Wel is bekend dat op dit moment panelen met een rendement van 20% tegen een kleine meerprijs verkrijgbaar zijn in de markt. Die meerprijs neemt toe tot ca. 100% voor de topmerken met een rendement van rond de 22%. We spreken hier en in de rest van dit document steeds over het Total Area rendement, dat wil zeggen het rendement van module inclusief de randen.

Tabel 10. Rendement verkochte PV modules

Jaar	(verwacht) Gemiddelde Rendement verkochte PV modules
2018	17,3%
2020	18%
2030	23%
2050	30%

Voorspellingen over hoe dit rendement zich zal ontwikkelen in de toekomst lopen flink uiteen. Wel zijn diverse partijen het erover eens dat dit rendement nog zal blijven stijgen. De schattingen van deze stijging komen uit op 22-25% in 2030 en 24% tot meer dan 30% in 2050^{53, 54, 55}. Op basis van bovenstaande bronnen worden kengetallen voor het rendement van zonnepanelen (in het vlak van het paneel) aangenomen zoals weergegeven in **Tabel 10**. Het betreft hier het Total Area rendement, waarbij het volledige moduleoppervlak inclusief de randen van de modules wordt meegenomen. Dat er in 2050 panelen verkocht worden met een gemiddeld rendement van 30% wil niet zeggen dat het gemiddelde rendement van geïnstalleerde systemen

in 2050 30% is. Het grootste deel van het geïnstalleerd vermogen in 2050 ligt er immers al veel eerder. Het rendement hiervan realistischer te schatten maken we gebruikt van een simpel vlootmodel. Daarbij doen we de volgende aannames:

- Het gemiddelde verkochte rendement ontwikkelt zich lineair in de tijd tussen bovengenoemde ijkpunten
- Het in Nederland geïnstalleerde vermogen ontwikkelt zich lineair in de tijd
- Een zonnestroomsysteem gaat gemiddeld 27 jaar mee (uitgaande van nominaal 30 jaar, met beperkte eerder uitval)
- Het systeemrendement degradeert 2% relatief in het eerste jaar en daarna 0.5% per jaar⁵⁶

Onder deze aannames wordt het gemiddelde rendement van alle in 2050 op het dak en in het veld aanwezige systemen samen in geschat op 23%. De meeropbrengst van bifaciale panelen kan worden beschreven als een effectief hoger rendement of een effectief hogere instraling. Beide beschrijvingen leiden tot een hogere jaarlijkse opbrengst. In **sectie 4.3** wordt beschreven hoe de meeropbrengst van bifaciale panelen is meegenomen.

Het kengetal van 23% wordt in deze studie gebruikt voor alle systeemtypologieën. Dit is een vereenvoudiging van de werkelijkheid. In de praktijk zien we een bandbreedte aan beschikbare rendementen in de huidige markt. Bij het gemiddelde verkochte rendement van 18% in 2020 loopt de bandbreedte van verkochte producten ongeveer van 15% tot 22%. Panelen met lagere rendementen zijn per Wp iets goedkoper dan gemiddelde, de panelen met de hoogste rendementen zijn veel duurder.

Het is te verwachten dat er ook in de toekomst een

dergelijke bandbreedte zal blijven bestaan. Vanuit het perspectief van deze studie is het interessant om de vraag te stellen hoe deze bandbreedte zal neerdalen op de mogelijke systeemtypologieën; zullen bepaalde systeemtypologieën vaak met een lager of hoger rendement dan gemiddeld worden uitgevoerd? Dat heeft natuurlijk invloed op het ruimtelijk potentieel van de toepassingsgebieden van deze systemen. Hoe zit dat nu en hoe ontwikkelt dit zich in de toekomst?

Op dit moment hebben een aantal van de innovatievere systeemtypologieën met uitdagende ruimtelijke inpassing, bijvoorbeeld in-wegdek systemen of gevelsystemen veelal iets lagere rendementen dan het marktgemiddelde. Dit heeft deels te maken met aanvullende eisen voor deze systeemtypologieën zoals een dikke bescherm laag die de transparantie vermindert of een kleurwens (niet zwart of blauw) die voor verlies zorgt. Anderzijds bevinden deze marktsegmenten zich op dit moment nog in een zeer pril stadium en is er nog veel ruimte voor optimalisaties. Het is te verwachten dat als deze marktsegmenten groeien, ook de gemiddelde rendementen toenemen. Juist voor deze geïntegreerde systemen geldt dat de toepassingsruimte (een autodak, een gevel) schaars is en dat de Balance of System costs (alle kosten voor een PV systeem behalve de modules) relatief hoog zijn. Beide eigenschappen zijn valide redenen om voor panelen met een hoog rendement te kiezen en het is dus goed mogelijk dat systemen in het stedelijk gebied in de toekomst met hogere rendementen aangelegd worden dan systemen in het buitengebied. Echter, vanwege de grote onzekerheden rond dergelijke toekomstige trends en het ontbreken van externe studies die deze voorspellingen ondersteunen is deze overweging niet meegenomen in deze potentieelstudie. Voor alle systeemtypologieën is dus hetzelfde rendement gekozen.

4.3 Projecties opbrengstfactor en specifieke opbrengst tot 2050

In **sectie 4.1** is de betekenis van de opbrengstfactor en de specifieke opbrengst toegelicht. In deze sectie zullen we toelichten hoe de specifieke opbrengst gemodelleerd kan worden en welke onderliggende parameters in een dergelijk opbrengstmodel een rol spelen. Ook lichten we toe hoe we tot schattingen van deze modelparameters komen. Laten we eerst nog eens kijken naar de eerder gepresenteerde vergelijking voor de specifieke opbrengst:

$$\text{Specifieke opbrengst (kWh}_{el}\text{/(kWp}\cdot\text{jr))} = \text{instraling (kWh}_{\text{licht}}\text{/ (m}^2\cdot\text{jr))} \times \text{opbrengstfactor}_{oc} \text{ (%) / STC-intensiteit (1 kW/m}^2\text{)}$$

De opbrengstfactor wordt, zoals toegelicht, bepaald door alle opbrengstverhogende en opbrengstverlagende effecten op module niveau mee te nemen. Daarnaast moet de opbrengstfactor uitgebreid worden met verliezen op systeemniveau. In deze studie zijn we geïnteresseerd in de opbrengst van systemen, dus we zullen de opbrengstfactor steeds op systeemniveau bepalen. Door het steeds nauwkeuriger meten en modelleren van de verliezen op moduleniveau en systeemniveau (zie bijvoorbeeld de testnorm IEC 61724⁵⁷) wordt een preciezere voorspelling van de specifieke opbrengst mogelijk.

Met de jaarlijkse instraling bedoelen we de instraling in het vlak van de panelen. Deze is ten eerste afhankelijk van de locatie van het systeem. In een land als Spanje is de instraling hoger dan in Noorwegen. Binnen Nederland zijn er ook variaties in de jaarlijkse instraling tussen regio's, maar deze zijn relatief klein. Over langere periodes in de orde van 10%⁵⁸. In de tijd, van jaar tot jaar, kunnen de variaties groter zijn. Een verschil van 20% tussen opeenvolgende jaren is geen uitzondering. Voor het bepalen van de gemiddelde jaarlijks energieopbrengst kan dan ook het best een langjarig gemiddelde instraling gekozen worden.

Hier worden meestal 30-jaar gemiddeldes voor gebruikt op basis van door het KNMI gehanteerde methodes. Dergelijke langjarige datasets met instralingsgegevens zijn voor veel locaties beschikbaar. Daarnaast zijn ook de hellingshoek en de oriëntatie van de panelen van invloed op de jaarlijkse instraling in het vlak van het paneel. De instraling kan nog preciezer gemodelleerd worden door omgevingsfactoren mee te nemen zoals de volgende rij panelen in een veldopstelling, objecten in de buurt die licht tegenhouden of bijvoorbeeld reflectie van de omliggende oppervlakken⁵⁹. Grotere precisie gaat echter gepaard met toenemende complexiteit in het opbrengstmodel.

Voor deze studie gebruiken we een relatief simpel opbrengst model zoals openbaar beschikbaar in PVGIS⁶⁰.

Dit model heeft de volgende inputs nodig om tot een voorspelling van de specifieke opbrengst te komen:

- Geografische Locatie
- Instralingsdatabase
- Zonnestroomtechnologie klasse
- Installatiegrootte
- Verliezen op systeemniveau (inclusief beschaduwings en vervuiling)
- Ondergrond (op gebouwen of in een veldopstelling)
- Hellingshoek
- Oriëntatie

Deze parameters maken het mogelijk om de jaarlijkse instraling in het paneelvlak en de opbrengstfactor op systeemniveau te bepalen. De locatie, instralingsdatabase, hellingshoek en oriëntatie bepalen gezamenlijk de instraling in het paneelvlak. De instraling, technologieklasse, ondergrond, hellingshoek en oriëntatie worden gebruikt om

de verliezen op moduleniveau te bepalen.

De aanvullende verliezen op systeemniveau worden afgeschat in één parameter en dus constant in de tijd veronderstelt. Het is in PVGIS dus niet mogelijk om de eerder genoemde omgevingsfactoren mee te nemen. De instraling waar het model van uit gaat kan dus gezien worden als een instraling onder ideale omstandigheden, zonder objecten die een deel van het invallende licht blokkeren. Om dergelijke effecten toch mee te nemen schatten we het gemiddelde verlies hierdoor af en brengen we dit onder in de parameter 'systeemverliezen'. Hieronder zullen we per parameter toelichten welke keuzes gemaakt zijn:

Geografische locatie

Voor de locatie kiezen we een vaste locatie in Nederland die representatief is voor de landelijk gemiddelde instraling: Utrecht. Daarmee houden we dus geen rekening met regionale verschillen. We maken daarbij de aanname dat zonnestroomsystemen relatief gelijkmatig over Nederland verdeeld zullen. Voor zonnestroomsystemen op zee wordt er wel een correctie op de instraling toegepast op basis van wetenschappelijke literatuur.

Instralingsdatabase

Voor de instralingsdata maken we gebruik van de in het model beschikbare datasets zonder reflectie uit de omliggende omgeving mee te nemen. We hebben gebruik gemaakt van de dataset PV-GIS ERA5. Een controle met de andere in het PV-GIS model aanwezige databases liet slechts zeer kleine verschillen zien. Door met deze historische database, met instralingsgegevens van 2005 t/m 2016, te werken houden we dus geen rekening met mogelijke veranderingen in de langjarige gemiddelde instraling tussen nu en 2050. Klimaatverandering zou hier mogelijk wel toe kunnen leiden⁶¹. Dit is niet meegenomen in de opbrengstschattingen.

Zonnestroomtechnologieklasse

Het PV-GIS model biedt de keuze tussen kristallijn silicium (c-Si), Cadmium Tellureen (CdTe), Copper Indium Gallium Selenide (CIGS) en overige technieken. Deze parameter heeft voornamelijk invloed op de temperatuur gerelateerde verliezen. De verschillende technologieën hebben ieder hun eigen temperatuurcoëfficiënt: de mate waarin de opbrengst afneemt bij hogere temperatuur⁶². Voor onze studie kiezen we voor c-Si. Enerzijds omdat het huidige marktaandeel ongeveer 95% bedraagt en anderzijds omdat het te verwachten is dat het temperatuurgedrag van tandemmodules⁶³ met c-Si zal lijken op dat van de huidige generatie c-Si modules. We hebben in deze studie geen rekening gehouden met toekomstige reducties in de temperatuurgerelateerde verliezen. De combinatie van stroomopwek en warmteopwek in een PVT paneel zou bijvoorbeeld tot lagere paneeltemperaturen kunnen leiden en dus hogere stroomopbrengst. Ook zijn er coatings in ontwikkeling die tot een lagere paneel temperatuur leiden en wordt er gekeken naar 'koelvinnen' aan de achterzijde van de panelen⁶⁴.

Dergelijke ontwikkelingen zijn dus niet in deze studie meegenomen.

Installatiegrootte

Hier is steeds een installatie van 1 kWp gekozen omdat we geïnteresseerd zijn in de specifieke opbrengst. De installatiegrootte zit lineair in het opbrengstmodel, het is dus niet zo dat bij een grotere installatie relatief meer of minder opbrengst voorspeld wordt. De verliezen aan de randen van daken, die wel afhangen van de installatiegrootte, zijn eerder afgeschat in de verschillende systeemtypologieën.

Verliezen op systeemniveau

In het PVGIS model worden de aanvullende systeemverliezen op systeemniveau, zoals omvormerverliezen, mismatch, verliezen in de kabels en vervuiling allemaal in één parameter samengevat. Deze parameter wordt door het model als een constante beschouwd. Hoewel omvormerverliezen over het algemeen hoger zijn bij een lage instraling neemt het model dit bijvoorbeeld niet mee. Deze parameter is daarom dus een jaargemiddelde van alle systeemverliezen.

Daarbij voegen we dus ook nog de jaargemiddelde verliezen door omgevingsfactoren zoals object en obstakelschaduw. Het zou correcter zijn om alleen het effect van inhomogene schaduw in de opbrengstfactor onder te brengen en de homogene vermindering door objecten in de instraling onder te brengen, maar zoals eerder toegelicht is dit niet mogelijk in PVGIS.

Om tot een schatting voor deze verliesfactor te komen voor 2050 kijken we eerst hoe groot dergelijke verliezen in het verleden en het heden zijn en welke trends daarin te zien zijn.

De afgelopen decennia is opbrengstfactor op systeemniveau gestaag toegenomen door het verkleinen van allerlei verliezen. In een publicatie van de Universiteit Utrecht en het Fraunhoferinstituut is op basis van een steekproef vastgesteld dat systemen uit eind jaren 1980 opbrengstfactoren hadden van 0.5-0.75, uit de jaren 1990 rond de 0.7-0.8 en >0.8 voor systemen uit de periode 2000-2010⁶⁵. De beste huidige systemen hebben opbrengstfactoren van rond de 0.9, verdere optimalisaties zouden tot opbrengstfactoren van 0.92 kunnen leiden⁶⁶. Ook is er altijd een grote spreiding te zien in de opbrengstfactoren van een verzameling systemen, niet elk systeem wordt optimaal aangelegd en soms leiden de omstandigheden tot extra verliezen.

De hier genoemde opbrengstfactoren omvatten dus zowel de effecten op moduleniveau (temperatuur, spectrum, instraling, invalshoek) als die op systeemniveau (omvormerverliezen, mismatch, verliezen in de kabels, verliezen door schaduw en vervuiling). Het gaat er nu om die systeemverliezen af te schatten. Uit de genoemde publicaties kan afgeleid worden dat voor een systeem met een opbrengstfactor van ca. 0.85, de verliezen op module niveau ca. 0.05 bijdragen en de verliezen op systeemniveau ongeveer 0.10. Dit geldt voor systemen met weinig beschaduwing.

In een toekomstprojectie moet niet alleen rekening gehouden worden met de trend van het minimaliseren van verliesfactoren. Er zal ook een trend gaan plaatsvinden dat er steeds ongunstiger locaties voor zonnestroomsystemen gekozen worden. Dit komt enerzijds doordat door kostendalingen het op deze ongunstiger locaties toch economisch uit kan om een systeem aan te leggen en anderzijds omdat de gunstige locaties al in gebruik zijn

voor zon-pv. Met name in de gebouwde omgeving is de verwachting dat er systemen aangelegd zullen worden op plekken met relatief veel schaduw. Ook hoeft het vanuit een perspectief van laagste systeemkosten niet noodzakelijkerwijs logisch te zijn om de opbrengst te optimaliseren. Zo kan het in een zonnepark gunstiger zijn om de afstand tussen rijen iets kleiner te kiezen zodat er meer panelen op hetzelfde oppervlak passen. Dit leidt wel tot een lagere opbrengst per kWp door extra verlies door rij-op-rij beschaduwing bij lage zonstanden.

Deze beide trends overwegende is onze verwachting dat systeemverliezen in de toekomst niet heel veel kleiner zullen worden dan bij de huidige systemen en in sommige gevallen zelfs groter. Daarom schatten we de systeemverliezen voor systeemtypologieën in de gebouwde omgeving (op gebouwen en in de infrastructuur) in op 15%, met een hoog aandeel schaduwverliezen, en voor typologieën in het buitengebied op 10%.

Tabel 11. PV-GIS modelparameters

Model parameter	Systemen bij gebouwen en infra	Systemen in het buitengebied
Locatie	Utrecht	Utrecht
Instralingsdatabase	PV-GIS ERA5	PV-GIS ERA5
Zonnestroomtechnologie klasse	Kristallijn Silicium	Kristallijn Silicium
Installatiegrootte	1 kWp	1 kWp
Aanvullende verliezen op systeemniveau (inclusief beschaduwing en vervuiling en onderprestatie)	15%	10%
Ondergrond (op gebouwen of in een veldopstelling)	(Gebouw) Geïntegreerd	vrijstaand
Hellingshoek	Uit typologie	Uit typologie
Oriëntatie	Uit typologie	Uit typologie

Ondergrond

Het PVGIS model biedt twee ondergrond keuzes: 'gebouw geïntegreerd' en 'vrijstaand'. Gebouw geïntegreerde systemen worden typisch iets warmer en hebben daarmee hogere temperatuurverliezen dan vrijstaande systemen. In de praktijk is er ook een verschil tussen BAPV en BIPV systemen. Bij BAPV liggen de panelen op de dakbedekking en bij BIPV maken de panelen integraal onderdeel uit van het dak. Alle systeemtypologieën op land en op water en enkele uit de infrastructuur zijn als vrijstaand meegenomen, alle systeemtypologieën die geïntegreerd worden op een ondergrond zijn meegenomen als gebouw geïntegreerd. Dit betreft alle systemen op gebouwen en de meeste systemen in de infrastructuur.

Hellingshoek en Oriëntatie

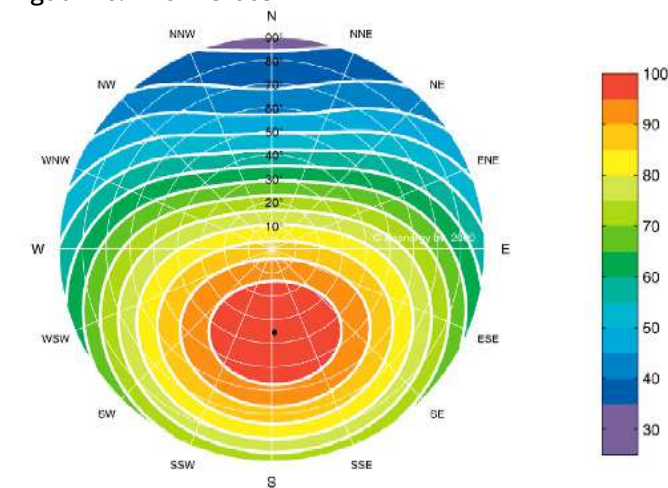
Deze parameters zijn voor iedere systeemtypologie gedefinieerd in [hoofdstuk 3](#). In [Tabel 11](#) is een overzicht gegeven van de gekozen PV-GIS modelparameters

Met bovenstaande parameters is voor ieder van de systeemtypologieën de verwachte specifieke opbrengst bepaald. Alleen het bifaciale systeem, systemen op vaaren voertuigen en de Noordzee-systemen konden niet op deze manier gemodelleerd worden, daarvoor is een andere bron gezocht^{67, 68, 69}.

De gemodelleerde specifieke opbrengst en opbrengst per gebruiksoppervlak per systeemtypologie is te vinden in [Bijlage A](#).

We benoemen hier de belangrijkste resultaten: De gemodelleerde opbrengstfactoren variëren tussen de 0.8 tot 0.85. Dit zijn realistische waarden voor huidige systemen⁷⁰. Dit is dus lager dan de eerder genoemde

Figuur 16. Zonneroos



'Zonnerozen' zoals in [Figuur 16](#) worden veel gebruikt om snel een idee te krijgen van de verwachte opbrengst van een systeem afhankelijk van de oriëntatie en de hellingshoek. Bij optimale zuidoriëntatie en hoek van 35° wekt een systeem in Nederland typisch 950 kWh/kWp op. Een nauwkeuriger manier om de opbrengst te voorspellen is met behulp van een model zoals [PVGIS](#) of [PVsyst](#)

0.9 voor de beste huidige systemen. We gaan er zoals hierboven toegelicht van uit dat effecten van toekomstige optimalisaties ongeveer even groot zullen zijn als aanvullende verliezen doordat er systemen op locaties met extra schaduwverliezen worden geïnstalleerd. Daarnaast zal er ook in de toekomst een spreiding blijven bestaan in de opbrengstfactor zal er altijd een deel van de systemen zal onderpresteren.

De specifieke opbrengst varieert van ca. 1.000 kWh/(kWp-jr) voor zuidgerichte veldopstellingen met optimale hellingshoek tot ca. 800 kWh/(kWp-jr) voor oost-west gerichte systemen op daken tot ca. 500 kWh/(kWp-jr) voor oost-west gevels en daken op het noorden.

De opbrengst per gebruiksooppervlak varieert van ca. 200 kWh/m²/jr voor hellende zuid daken, ca. 150 kWh/m²/jr voor zeer intensieve veldopstellingen en oost-west daken, ca. 100 kWh/m²/jr voor noord daken en extensievere veldopstellingen tot ca. 50 kWh/m²/jr voor gevelsystemen en zeer extensieve veldopstellingen. De hoge opbrengst van zuidgerichte daken ten opzichte van zuidgerichte veldopstellingen is te verklaren door de hogere paneeldichtheid. De 'slagschaduw' van een dak valt immers buiten het dakvlak, terwijl er bij een veldopstelling steeds ruimte tussen de rijen aangehouden moet worden.

De hierboven genoemde beperkingen en vereenvoudigingen in de parameters en het gebruikte opbrengstmodel leiden uiteraard tot extra onzekerheidsmarges op de resultaten. Deze onzekerheden in de specifieke opbrengst worden geschat op maximaal 10% t.o.v. de meest complexe opbrengst modellen. Gegeven de grote range in het zonnestroompotentieel door keuzes in andere parameters in deze potentieelstudie zijn we van mening dat hiermee voldoende nauwkeurigheid behaald wordt.

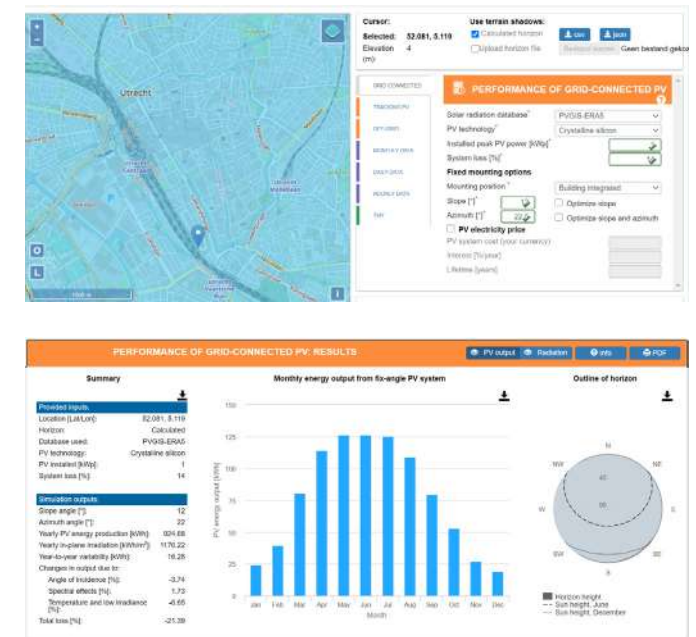
Een verliesfactor die niet is meegenomen in ons model zijn de verliezen die gepaard gaan met de inpassing in het energiesysteem. Hierbij kan gedacht worden aan conversieverliezen door opslag in batterijen of omzetting naar waterstof of 'warmte'. En daarnaast ook verliezen door het onderdimensioneren van de inverter en verliezen omdat een netbeheerder curtailment toepast. Deze verliezen zijn in hoge mate afhankelijk van het functioneren van het totale energiesysteem en hangen ook af van de fractie van zonnestroom in de elektriciteitsmix. Bij een hogere fractie zullen er meer verliezen optreden. Een belangrijke factor hierin is de ongelijke opbrengst van zonnestroomsystemen over de dag en in een gematigd

klimaat als het Nederlandse ook over het jaar. Het nauwkeurig schatten van deze verliezen is geen onderdeel van deze studie, maar we geven hier wel een orde van grootte mee om de implicaties te duiden:

- Verliezen door onderdimensionering van de inverters bedragen nu typisch enkele procenten van de jaarlijkse opbrengst bij een onderdimensionering van ~30%
- Bij verdergaande onderdimensionering en/ of curtailment op 50% van het geïnstalleerde systeemvermogen bedragen deze verliezen 10-15% van de jaarlijkse opbrengst
- De round-trip efficiëntie van batterijsystemen ligt nu typisch op hoger dan 90%⁷¹. Dit levert dus een verlies op van minder dan 10% voor het deel van de opbrengst die via de batterij loopt. Gebruik van een batterij zal de onderdimensionering en curtailment verliezen juist weer grotendeels opheffen
- De huidige round-trip efficiëntie van conversie naar waterstof en terug naar elektrische energie is nu ~ 35%⁷², dit levert dus een verlies van ca. twee derde van de opbrengst op. Overigens zal deze waterstof waarschijnlijk maar voor een klein deel gebruik worden voor elektriciteitsopwekking en grotendeels voor gebruik in de industrie of vervoerssector.

Er ontstaat het volgende beeld: als de grootste uitdaging voor de inpassing van zonnestroom zich beperkt tot het verdelen van de opbrengsten over de dag-nacht cyclus zullen deze niet veel hoger uitvallen dan ca. 15%. Dit is bijvoorbeeld het geval als een toekomstige opwekmix bestaat uit één derde zon en twee derde wind^{73,74}. Als de fractie zon in de mix veel hoger uitvalt en het compenseren voor de seizoenbalans mee gaat spelen dan lopen de conversie verliezen fors op.

Figuur 17. Screenshots uit het PVGIS programma



Bovenstaande overwegingen komen verder niet terug in deze studie. De gehanteerde energieopbrengst kan dus gezien worden als de opbrengst voordat deze in het energiesysteem ingepast wordt.



5. SYNTHESE

5.1 Synthese: hoe kan deze methode gebruikt worden?

Keuzes voor een bepaalde ruimtelijke invulling van opwek van zonnestroom krijgen alleen betekenis in de context van een achterliggende verhaallijn. Dit geldt zowel voor de totale omvang van de opwek als voor eventuele voorkeuren voor bepaalde soorten grondgebruik en voor voorkeuren op het gebied van systeemtypologieën.

Deze verhaallijnen kunnen beknopt zijn. We werken een voorbeeld uit dat in **hoofdstuk 6** terugkomt:

'Hoe zou de ruimtelijke impact van zonnestroom eruit kunnen zien als er gestuurd wordt op een totale opgave van 70 TWh/jr, waarbij het leidende ruimtelijke invullingprincipe "gebalanceerde ontwikkeling" is'

Invulling van deze verhaallijn:

De totale opgave betreft 70 TWh/jr, deze opwek dient dus verdeeld te worden over verschillende typen grondgebruik en systeemtypologieën

Er worden in deze studie geen grondgebruikstypen uitgesloten. Een verdeling van de opgave reflecteert de huidige verdeling van zonnestroomsystemen, waarbij er een aanzienlijk deel van de systemen in landelijk gebied en op binnenwater terecht zal komen vanwege de schaalvoordelen die dit ontwikkelaars biedt. Deze huidige verdeling wordt aangevuld met enkele toepassingen die we nu nog weinig zien maar die op het punt staan om commercieel aantrekkelijk te worden zoals overkappen parkeerterreinen (solar carports) en systemen in wegdek (fietspaden).

Ook bij de keuze voor de verhouding van de verschillende systeemtypologieën op één type grondgebruik worden geen systemen uitgesloten. Een verdeling wordt bepaald op basis van de huidige trends en verwachtingen over systemen die in de nabije toekomst beschikbaar zullen zijn. Voor systemen op land maken dicht op elkaar gepakte oost-west zonneparken bijvoorbeeld nog steeds deel uit van de mix, maar wordt een deel ook ingevuld met enkelassige zonvolgende systemen, die op dit moment in opkomst zijn.

De verhaallijn als hier geschetst kan dus richting geven aan de ruimtelijke invulling van de opwek van zonnestroom.

Uiteraard is een dergelijke verhaallijn slechts een leidraad en zullen er veel detailkeuzes moeten worden gemaakt bij de precieze invulling van het scenario. Daarbij is er niet één juiste invulling. De waarde van een scenario zit dan ook vooral in de discussie die ontstaat bij het opstellen en interpreteren ervan.

Hierboven gaven we een voorbeeld van een landelijk potentieel op basis van alle typen grond en systemen. De informatie uit hoofdstuk **2**, **3** en **4** kan uiteraard ook gebruikt worden om deelpotentiëlen te bepalen. Een voorbeeld:

'Hoeveel zonnestroom kan er potentieel opgewekt worden met behulp van het overkappen van parkeerterreinen op verharde terreinen?'

De totale opgave is in deze vraag niet gegeven. In dit geval zal deze afhangen van schattingen welk deel van de ruimte maximaal inzetbaar is.

Qua typen grondgebruik gaat het hier dus alleen om verharde terreinen waarbij het realistisch is dat ze overkapt kunnen worden. Openbare parkeerterreinen liggen voor de hand, maar bijvoorbeeld ook erven van bedrijven die als parkeerterrein gebruikt worden. Hoeveel van de verschillende terreinen maximaal ingezet kan worden is bijvoorbeeld afhankelijk van beschaduwing door omliggende gebouwen of bomen. Maar ook esthetische argumenten kunnen hier een rol spelen, zeker in stedelijk gebied. Meer dan een grove schatting is hierbij niet mogelijk zonder locatie specifieke gegevens. Omdat de vraag specifiek over het overkappen van parkeerterreinen gaat, is dit de enige typologie die wordt bekeken.

Met een scenario op hoofdlijnen kan er begonnen worden met een concrete invulling.

5.2 Koppelen grondgebruik en systeemtypologieën

Om tot een schatting van het ruimtelijk potentieel te komen dienen de systeemtypologieën aan de typen grondgebruik gekoppeld te worden. Per type grondgebruik wordt per scenario steeds gekeken welke typologieën ingezet kunnen worden. Dit is deels een kwestie van het naleven van de typologiedefinitie, bijvoorbeeld een daksysteem kan alleen ingezet worden op daken van gebouwen, niet op grasland. Daarnaast is er gebruik gemaakt van de expertise binnen de projectgroep over de toepasbaarheid van de verschillende typologieën.

Voor de meeste typen grondgebruik zijn er meerdere systeemtypologieën inzetbaar en voor enkele precies één. Daarnaast is voor enkele soorten grondgebruik de heersende opvatting dat er op dit moment en in de nabije toekomst geen enkele maatschappelijk geaccepteerde typologie met enige potentie is. Het is niet uit te sluiten dat er voor deze gebieden ooit geschikte systemen ontwikkeld zullen worden maar op dit moment valt dat nog buiten de horizon van deze studie. Grondgebruik types waar dit voor geldt zijn bijvoorbeeld bos, open natuur, erven bij woningen (tuinen), spoorwegen en landingsbanen.

Als er bij een type grondgebruik kan worden gekozen uit meerdere type systemen, dan zal de opwekpotentie afhangen van de onderlinge verhouding van de inzetbare typologieën en hun bijbehorende energieopbrengst. Deze verhoudingen vastleggen is dus een onderdeel van het bepalen van een potentieelscenario.

Tabel 12 laat zie hoe voor het hierboven gegeven voorbeeld '70 TWh/jr, gebalanceerde ontwikkeling' de typologiemix is ingevuld voor landschap.

Tabel 12. typologieën en grondgebruik (landschap)

Zie ook **Bijlage C** voor een totaal overzicht voor alle mogelijke combinaties.

Landschap	Zuid 11,5°	Zuid 30° (intensief)	Zuid 30° (extensief)	Oost-west (intensief)	Oost-west (extensief)	Bifacial verticaal (extensief)	Zonvolgend enkelassig bifaciaal
Agrarisch terrein- grasland	10%	20%	20%	10%	10%	10%	20%
Agrarisch terrein- akkerland	10%	20%	20%	10%	10%	10%	20%
Erven boerderijen			25%	25%		50%	
Recreatie en groenvoorziening			50%			25%	25%
Agrarisch terrein- boom en fruitteelt						100%	
Bos							
Open natuur							
Erven natuur							
Overig (on)begroeid terrein							

Voor de grondgebruikstypen in de infrastructuur, het landschap en de wateren kunnen de verhoudingen van de verschillende systeemtypologieën vrij gekozen worden naar inzicht van de opsteller van het scenario. Bij de gebouwen dient er rekening gehouden te worden met de oriëntatie. Het was binnen deze studie niet mogelijk om de verhoudingen van de verschillende oriëntaties van gebouwen empirisch of uit een basisregistratie te bepalen. Er hebben op dit gebied diverse studies plaatsgevonden^{75,76,77}, maar geen van deze studies levert openbare cijfers op een landelijk aggregatieniveau. Het kadaster werkt op dit moment aan een 3D model

van Nederland waar op termijn ook de oriëntaties en hellingen van dakvlakken uitgehaald kunnen worden⁷⁸. Dit model was bij uitbrengen van deze studie niet openbaar beschikbaar. Daarom doen we de aanname dat oriëntaties van gebouwen en hun gevels en daken evenredig verdeeld zijn over de windrichtingen en dat 20% van de woningen een plat dak heeft. Voor de typologieën op schuine daken van woningen moet er dus 20% per windrichting worden gekozen (**Tabel 3**).

Nu de verhoudingen van de typologieën vastgelegd zijn kan het bruto ruimtegebruik vastgelegd worden.

5.3 Bepalen bruto grondgebruik en opwekpotentieel

Met de informatie uit hoofdstukken 2, 3 en 4 en de typologieverhoudingen uit de vorige paragraaf is bekend hoeveel ruimte er is en is bepaald hoeveel energie op deze ruimte opgewekt kan worden.

Om nu een opwekpotentieel te bepalen moeten we het bruto ruimtegebruik gaan kiezen. We doen dit steeds als percentage van de totaal beschikbare ruimte. Hierbij kan zowel vanuit de ruimtelijke als vanuit de energie kant geredeneerd worden. Bijvoorbeeld: stel dat we maximaal 1% van de landbouwgrond willen gebruiken, hoeveel energie wordt er opgewekt? Maar ook: stel we willen 10 TWh/jr opwekken op woningen, hoeveel procent van de beschikbare ruimte is dan nodig?

Tabel 13. Opwekpotentieel per systeemtypologie en type grondgebruik (landschap)

De eerste kolom geeft alle grondbruikstypen weer die onder landschap vallen. De tweede kolom geeft de totale oppervlakken. In derde kolom kan voor ieder type grondgebruik een percentage worden gekozen. In kolommen 5 t/m 11 staan alle typologieën met hun energieopbrengst en fractie in de mix voor ieder type grondgebruik. Met deze gegevens berekenen we hoeveel oppervlak er per type grondgebruik wordt ingezet en hoeveel energie er hiermee wordt opgewekt. Dit is te zien in kolommen 12 en 13. Tevens wordt per systeemtypologie het ruimtebeslag en de energieopbrengst gegeven in de onderste rijen.

	oppv. [km ²]	energie opbrengst [kWh/m ² /jr]									km ²	TWh/jr
			Zuid 11,5°	Zuid 30° (intensief)	Zuid 30° (extensief)	Oost-west (intensief)	Oost-west (extensief)	Bifacial verticaal (extensief)	Zonvolgend enkelassig bifaciaal			
Landschap	27.518	0.7%	142	115	68	159	93	44	86		192	17
Agrarisch terrein- grasland	10.872	0.8%	10%	20%	20%	10%	10%	10%	20%		87	8
Agrarisch terrein- akkerland	7.909	0.8%	10%	20%	20%	10%	10%	10%	20%		63	6
Erven boerderijen	1.233	5%			25%	25%		50%			42	3
Recreatie en groenvoorziening	1.384	0%			50%			25%	25%		0	0
Agrarisch terrein- boom en fruitteelt	375	0%						100%			0	0
Bos	3.441	0%									0	0
Open natuur	1.139	0%									0	0
Erven natuur	87	0%									0	0
Overig (on)begroeid terrein	1.081	0%									0	0
		km²	15	30	41	26	15	36	30			
		TWh/jr	1	3	4	2	1	3	3			

Tabel 13 laat zien hoe voor het hierboven gegeven voorbeeld '70 TWh/jr, gebalanceerde ontwikkeling' alle informatie samenkomt en tot een energieopbrengst leidt voor het landschap

De werkwijze voor gebouwen, infrastructuur en water is hetzelfde als in bovenstaand voorbeeld voor landschap.

Om snel en reproduceerbaar potentiescenario's te kunnen doorrekenen zijn alle gegevens samengebracht in een digitale tool. Hiermee kunnen de verhoudingen van inzet van systeemtypologieën per type grondgebruik eenvoudig gevarieerd worden. Daarnaast kan de fractie van een bepaald type grondgebruik dat bestemd wordt voor zonnestroom gevarieerd worden. De tool maakt snel inzichtelijk hoeveel oppervlak wordt bestemd voor zonnestroom, hoeveel energie hiermee jaarlijks wordt opgewekt en hoeveel vermogen er hiervoor geïnstalleerd dient te worden. In totaal kunnen er ca. 150 parameters gevarieerd worden. Dit betreft dus niet de bron data over de beschikbare ruimte en de parameters van de systeemtypologieën zelf. Door middel van printouts (**Bijlage D**) kunnen deze parameters eenvoudig bewaard worden om de potentie te kunnen herleiden naar de gemaakte modelkeuzes.

De in dit hoofdstuk beschreven methode en tool zetten we in het volgende hoofdstuk in om een aantal vraagstukken rond de ruimtelijke potentie en impact van zonnestroom te beantwoorden.



6. WHAT IF'S

What if-vragen: verkenning vraagstukken rond de ruimtelijke impact van zonnestroom

In het voorgaande hebben we in hoofdstuk **"2. Ruimte"** laten zien hoe Nederland kan worden ingedeeld in verschillende landgebruikstypen met verschillende potentiële geschiktheid voor het opwekken van zonnestroom. Er is bepaald hoeveel oppervlak er per landgebruikstype is. Vervolgens hebben we in hoofdstuk **"3. Typologieën"** systeemtypologieën opgesteld en in hoofdstuk **"4. Energieopbrengst"** de opbrengst per oppervlakte eenheid bepaald. In hoofdstuk **"5. Synthese"** hebben we laten zien hoe de informatie over ruimte en energie gecombineerd kan worden en hoe daar de ruimtelijke mogelijkheden en impact van een gewenste energieopbrengst mee kunnen worden verkend.

In dit hoofdstuk stellen we een aantal vragen die opspelen rond de rol en ruimtelijke impact van zonnestroom in de Nederlandse energievoorziening van de toekomst. Met behulp van de informatie en methode uit deze studie beantwoorden we de vragen en geven een beeld van de ruimtelijke impact.

1. Hoe verhouden de ambities voor zonnestroom zich tot het ruimtelijk potentieel in Nederland?

Zoals in de inleiding besproken startte deze studie met de vraag wat hét ruimtelijk potentieel voor zonnestroom Nederland is. Gedurende de studie en naar aanleiding van diverse gesprekken met experts op het gebied van zonnestroom en ruimtelijke ordening hebben we geconcludeerd dat deze vraag niet eenduidig te beantwoorden is. De maatschappelijke bereidheid om bepaalde typen grondgebruik (mede) in te zetten voor de opwek van zonnestroom zal afhangen van de kosten en baten van deze inzet. Deze dienen gewogen te worden in het licht van de urgentie van het reduceren van de Nederlandse CO₂ uitstoot en de beschikbaarheid van alternatieve technologieën en de kosten en baten daarvan. Maar ook aanvullende opgaven zoals de overgang naar een kringlooplandbouw, meer ruimte voor natuur in Nederland en waterbergingsopgaven in het kader van klimaatadaptatie spelen een rol.

Een vraag die wel beantwoord kan worden is hoe de ambities voor zonnestroom zich verhouden tot het ruimtelijk potentieel van zonnestroom. We splitsen deze vraag op in meerdere delen. Eerst kijken we naar de ruimtelijke impact van het op dit moment geïnstalleerde zonnestroom vermogen en de projecties voor 2030, daarna kijken we vooruit naar 2050. Voor de realisatie van een geambieerde jaarlijkse opwek op een bepaalde termijn is echter niet alleen het ruimtelijk potentieel bepalend. Ook de snelheid waarmee opwek van zonnestroom op de betreffende oppervlakken daadwerkelijk kan worden gerealiseerd speelt een belangrijke rol. Die snelheid wordt bepaald door een scala aan factoren, zoals technische en financiële haalbaarheid, eigendomsconstructies, eisen aan mede-ruimtegebruik en meer. Deze factoren samen bepalen uiteindelijk de verdeling van zonnestroomssystemen over de verschillende mogelijke terreinen.

De eerste twee vragen die we beantwoorden zijn:

» ***Wat is de ruimtelijke impact van het huidige zonnestroom vermogen en wat zou de ruimtelijke impact zijn van het in 2030 geïnstalleerde zonnestroom vermogen?***

Om deze vraag via ons model te kunnen beantwoorden zijn er een aantal aanvullende gegevens nodig. Zoals we eerder het vlootgemiddelde rendement voor 2050 is bepaald, zullen we dit ook voor de huidige systemen en die van 2030 moeten doen. We hebben daarbij dezelfde methode gehanteerd als beschreven in **sectie 4.2** en tevens gebruikt gemaakt van de historische gegevens van geïnstalleerde zonnepanelen. Daarmee komen we tot een gemiddeld rendement van 16.8% in 2020 en 18.6% in 2030. Voor 2020 is het totaal geïnstalleerde vermogen vrij nauwkeurig bekend en bedraagt ca. 10 GWp⁷⁹. Voor 2030 dient het vermogen afgeschat te worden. Het klimaatakkoord geeft duidelijke ambities: 7 TWh/jr aan zonnestroom opgewekt door kleinverbruikers en 35 TWh/jr opgewekt door windenergie en zonnestroom door grootverbruikers. Er wordt op dit moment echter stevig gediscussieerd over deze doelen. De zon- en windsector geeft signalen af dat de doelen voor grootschalige opwek eerder een beperking worden dan een uitdaging⁸⁰. En in de Klimaat- en Energieverkenning van 2020 wordt geraamd dat er in 2030 10 TWh/jr aan opwek bij kleinverbruikers zal zijn⁸¹. Tegelijkertijd wordt er gekeken naar manieren om de verhoogde CO₂ reductie ambitie voor 2030 invulling te geven. Om niet vooruit te lopen op de uitkomsten van deze discussie beperken we ons tot de gegevens tot nu toe bekend over de productie van zonnestroom in 2030, daarbij baseren we ons op de Klimaat- en Energieverkenning 2020⁸² die uitgaat van 23,6 TWh/jr zonnestroom waarvan 10 TWh/jr bij kleinverbruikers⁸³.

Vervolgens is informatie verzameld over de grondgebruik categorieën van de tot nu toe geïnstalleerde systemen en de tot 2030 verwachte systemen. Deze is onder andere te vinden bij het CBS⁸⁴ en RVO⁸⁵. Een uitsplitsing in ruimtecategorieën op het detailniveau van deze studie is op basis van deze gegevens niet mogelijk, maar een verdeling over de hoofdcategorieën kan wel gemaakt worden. **Tabel 14** geeft een overzicht van de resultaten:

Om een beeld te krijgen van het mogelijke zonnestroom vermogen in 2050 maken we gebruik van energiescenario's die door andere partijen zijn opgesteld. In een aantal bekendere energiescenario's voor de toekomst met

een groot aandeel zonnestroom wordt gesproken over een geïnstalleerd vermogen van 76-88 GWp. Dit betreft de Integrale Infrastructuur verkenning 2030-2050⁸⁶, de Transform and Adapt scenario's van TNO⁸⁷ en het 100% Renewable Europe scenario⁸⁸. De rapporten specificeren niet altijd een bijbehorende jaarlijkse energieopbrengst. We schatten deze op circa 70 TWh/jr. Dit leidt tot de volgende twee vragen:

» *Is er ruimte voor een zonnestroom opwek van 70 TWh/jr in Nederland en wat zouden de ruimtelijke implicaties zijn?*

De rol van zonnestroom in energiescenario's kan beperkt worden door een aantal factoren, waaronder beschikbare ruimte, integratie in het energiesysteem en kosten. Scenariostudies zijn vaak niet heel transparant over de exacte overwegingen die de bijdrage van de verschillende opwekmogelijkheden bepalen. Het is mogelijk dat de bijdrage van zonnestroom wordt bepaald door conservatieve schattingen over de beschikbare ruimte. Daarom verkennen we ook of er ruimte is voor een significante hogere ambitie dan de genoemde 70 TWh/jr:

» *In hoeverre is er ruimte voor hogere ambities? Stel dat we uitgaan van een ambitie van 200 TWh/jr, wat zijn dan de ruimtelijke implicaties?*

Om deze getallen in perspectief te zetten: in de genoemde scenario's bedraagt de energievraag van Nederland in 2050 tussen de 400 en 600 TWh/jr. In deze scenario's draagt zonnestroom dus circa 15% bij aan de vraag en in onze variant met verhoogde ambitie circa 40%.

Om deze vragen te beantwoorden gebruiken we de tool die in **hoofdstuk 5** is toegelicht. Voor ieder type landgebruik waar verschillende typologieën mogelijk zijn maken een schatting van de toekomstige verhouding van deze typologieën. De opgaves van 70 TWh/jr en 200 TWh jaar kunnen met verschillende combinaties van landgebruik worden ingevuld. We verkennen twee varianten: een variant die focust op daken waarbij de capaciteit op andere typen landgebruik gelimiteerd wordt op de niveaus die in augustus 2020 gecommitteerd en/of gerealiseerd zijn. En een variant waarin een gebalanceerde

Tabel 14. Ruimtelijke impact zonnestroom huidige situatie en projectie 2030

Landgebruik type	Total area (km ²)	Situatie 2020		scenario voor 2030 'KEV'	
		Deel van potentieel benut	Opwek (TWh/jr)	Deel van potentieel benut	Opwek (TWh/jr)
Daken woningen	543	6,4%	3,5	13%	8,5
Daken utiliteit (-kassen)	607	4,6%	2,8	13%	9,5
Infra+erven stedelijk	4.190	0%	0	0,2%	1,3
Landschap	27.518	0,07%	1,8	0,14%	3,7
binnenwater	5.160	0,04%	0,1	0,14%	0,6
buitenwater	61.502	0%	0	0,0%	0
Totaal NL			8,3		23,6

mix wordt gezocht over de verschillende landgebruik types (met uitzondering van het buitenwater). Deze tweede variant kan waarschijnlijk sneller gerealiseerd worden dan als de focus vooral op daken ligt. Uiteraard zijn er vele andere varianten mogelijk.

Voor ieder van deze varianten zijn de dezelfde verhoudingen van systeemtypologieën gebruikt en de systeemtypologieën hebben de eigenschappen zoals in dit rapport gepresenteerd. **Tabel 15** vat de resultaten samen, de volledige gegevens per variant zijn beschikbaar in **Bijlage D**.

Deze voorbeelden laten zien dat een opgave van 70 TWh/jr gehaald kan worden met relatief beperkte ruimtelijke

impact. Er is voldoende ruimte op de daken, waar slechts een derde van hoeft worden te bedekt, aangevuld met een aantal kansrijke typologieën in de infrastructuur met een hoge acceptatie graad zoals het overkappen van verharde parkeerterreinen. Het inzetten van andere typen landgebruik in een gebalanceerde variant reduceert het benodigde dakoppervlak aanzienlijk.

Ook een opgave van 200 TWh/jr kan op diverse manieren worden verdeeld over de verschillende typen bodemgebruik. Indien er geen sectoren worden uitgesloten en/of zon op zee een mogelijke route blijkt, dan kan de opgave ingevuld worden zonder de grenzen van bepaalde type ruimte gebruik op te zoeken.

In een variant waarin zon op land en water niet verder uitbreidt dan wat er op dit moment aan projecten gepland is wordt het uitdagender om een opgave van 200 TWh/jr te realiseren. Daken dienen dan maximaal benut te worden van ruimte op daken en ook kansrijke mogelijkheden in de infrastructuur worden grotendeels benut.

Tabel 15. Ambities, varianten en potentieel

		Ambitie 70 TWh/jr				Ambitie : 200 TWh/jr			
		Variant 'focus op daken'		Variant 'gebalanceerde ontwikkeling'		Variant 'focus op daken'		Variant 'gebalanceerde ontwikkeling'	
Landgebruik type	totaal oppervlak [km ²]	Deel van potentieel benut	Opwek (TWh/jr)	Deel van potentieel benut	Opwek (TWh/jr)	Deel van potentieel benut	Opwek (TWh/jr)	Deel van potentieel benut	Opwek (TWh/jr)
zon op gebouw (woningen)	543	30%	24	15%	12	80%	65	40%	32
zon op gebouw (utiliteit (-kassen))	607	30%	28	15%	14	80%	78	40%	39
zon op infra	4.190	1,4%	10	2,4%	16	7,7%	49	6,5%	41
zon in landschap	27.518	0,1%	4	0,7%	16	0,1%	4	1,6%	42
zon op water (binnenwater)	5.160	0,7%	4	2,3%	12	0,7%	4	4,8%	24
zon op water (buitenwater)	61.502	0%	0	0	0	0,0%	0	0,4%	22
Totaal NL			70		70		200		200

2. Welke nieuwe combinaties van grondgebruik en systeemtypologieën bieden substantieel extra potentieel?

De uitgewerkte 70 TWh/jr varianten maken alleen gebruik van combinaties van grondgebruikstypen en systeemtypologieën die vandaag de dag al technisch volwassen en economisch haalbaar zijn. Dat wil zeggen dat deze systemen (op daken, op land en op binnenwateren) over het algemeen binnen de kaders van de huidige stimuleringsmaatregelen voor zonnestroom gerealiseerd kunnen worden. Dat betreft de SDE(+), salderingsregeling en postcoderoosregeling.

De 200 TWh/jr varianten laten zien dat nieuwe combinaties van landgebruik en systeemtypologieën tot significant extra potentieel kunnen leiden. Dit betreft met name Zon op zee, overkappingen van parkeerterreinen en in-wegdek systemen. **Tabel 16** geeft een overzicht van deze combinaties en een schatting van het kansrijke ruimtelijk potentieel.

Het meest in het oog springend is het potentieel voor zon op zee. Deze schatting is tot stand gekomen door gebruik te maken van het verwachte ruimtebeslag van windparken op zee. Onder vele betrokkenen bij de huidige ontwikkelingen voor wind op zee en zon op zee heerst de overtuiging dat in deze gebieden mogelijkheden zijn voor zon op zee. Buiten deze windparken zal het ruimtelijk potentieel klein zijn gegeven het concurrerende ruimtebeslag van andere gebruiksfuncties op de drukke Noordzee. In een scenariostudie naar de toekomst van de Noordzee door het PBL⁸⁹ wordt uitgegaan van een geïnstalleerd vermogen wind op zee in 2050 dat varieert tussen 12 en 60 GW. Het bijbehorende ruimtebeslag varieert van 1.600 km² tot 6.600 km². We nemen het midden van deze uitersten en maken de aanname dat 50% van de bruto ruimte in de windparken gebruikt kan worden voor zonneparken. Hierbij is er meer dan voldoende ruimte om aan alle eisen met betrekking tot veilige afstanden en doorvoermogelijkheden te voldoen. Daarnaast is er rekening gehouden met een netto bedekkingsgraad van 50% van de bruto ruimte om aan eisen te voldoen op het gebied van ecologische inpassing. Deze waarde komt uit verkennend onderzoek voor binnenwateren⁹⁰. Voor offshore toepassingen is hier nog geen uitgebreid onderzoek naar gedaan. Onder deze aannames wordt het ruimtelijk potentieel voor zon op zee geschat op ~200 TWh/jr. De technische en economische haalbaarheid van zon op zee wordt op dit moment intensief onderzocht en bediscussieerd, met Nederland als een van de mondiale koplopers⁹¹. Hoewel onderhevig aan grote onzekerheden is de inschatting van diverse geraadpleegde experts dat deze techniek ruim voor 2050 haalbaar wordt.

Tabel 16. Nieuwe combinaties en potentieel

	Totaal oppervlak (km ²)	Deel van oppervlak gebruikt	Energieopbrengst (TWh/jr)	Capaciteit (GWp)
Zon op zee	61.502	3.5%	201	229
Overkappingen publieke parkeerplaatsen	114	50%	8	9
Erven bij bedrijven, waaronder parkeerplaatsen	833	15%	18	21
Totaal parkeerterreinen			26	30
Wegen autoverkeer	992	33%	39	49
Fietspaden	96	33%	5	6
Verharde voetpaden	298	33%	4	5
Totaal in-wegdek systemen			48	60
Gevels grondgebonden woningen	1.100	20%	7	12
Gevels gestapelde woningen	300	40%	5	10
Gevels utiliteit	800	40%	20	36
Totaal gevels			32	58
Residentiele daken BAPV totaal		80%	57	75
Residentiele daken BIPV totaal		80%	66	89

Overkappingen van parkeerterreinen, die in onze analyse toepast kunnen worden op publieke en private parkeerterreinen, worden ook gezien als een relevante additionele optie met ruimte voor zonnestroomsystemen. Publiek parkeerterreinen zijn direct zichtbaar in de BGT. Private parkeerterreinen maken in de BGT onderdeel uit van de private erven. We schatten dat 30% van deze erven in gebruik zijn als parkeerterrein. Vervolgens schatten we dat de helft van deze parkeerterreinen kansrijk is om voorzien te worden van een solar carport. Daarmee wordt het ruimtelijk potentieel geschat op 26 TWh/jr. Op dit moment worden er binnen de SDE+(+) al zonnestroomprojecten met het overkappen van parkeerterreinen gerealiseerd, al zorgt de noodzakelijke onderconstructie nog voor meerkosten.

Daarnaast wordt er al geruime tijd gewerkt aan in-wegdek systemen^{92,93,94}. Gegeven het grote oppervlak aan verharde weg in Nederland biedt deze systeemtypologie zicht op significant potentieel. We maken de grove aanname dat minstens een derde van dit oppervlak kansrijk is voor zonnestroom opwek, rekening houdend met onder andere schaduwwerking van aanliggende gebouwen en natuur. Onder deze aanname vertegenwoordigen in-wegdek systemen een ruimtelijk potentieel van 48 TWh/jr. De afgelopen jaren zijn er diverse demonstratieprojecten met in-wegdek systemen geweest met tegenvallende resultaten^{95,96}. Toch blijven er partijen bezig met de ontwikkeling en de kans is reëel dat ook deze toepassing ruim voor 2050 tot het standaardrepertoire van zonnestroomsystemen behoort.

Ook gevels kunnen een aanzienlijk additioneel potentieel bieden. In onze analyse kunnen gevels ca. 20% extra potentieel bieden ten opzichte van daken van gebouwen.

Deze uitkomst verdient enige toelichting. Een groot deel van de gevels is minder geschikt voor PV. Zo beschouwen we noordgevels als ongeschikt vanwege de zeer lage instraling, maar ook gevels richting het oosten en westen ontvangen slechts de helft van de instraling van een dak richting het zuiden. Daarnaast wordt ca. 30-40% van het oppervlak van gevels ingenomen door ramen⁹⁷. Ook schaduwwerking van naastgelegen begroeiing en gebouwen zorgt ervoor dat een aanzienlijk deel van de gevels beperkt geschikt zal zijn voor zonnestroom, bij gevels speelt dit een aanzienlijk grotere rol dan bij daken. Echter, het totale geveloppervlak is erg groot. Dus zelfs met alle bovenstaande kanttekeningen blijft een aanzienlijk potentieel over. Daarnaast geldt voor hoogbouw dat stroomopwekking via de gevel een cruciale bijdrage leveren aan het voldoen aan bouwnormen zoals BENG, NOM of BREEAM. De interesse voor het ontwikkelen van gevelsystemen is hiermee goed te plaatsen.

De keuze voor building-integrated zonnestroom systemen (BIPV) of standaard op-dak systemen (BAPV) heeft merkbare invloed op het potentieel. Deze studie schat in dat bij BIPV ca. 15% meer van het dak gebruikt kan worden door verwachte grotere vrijheid in productmaatvoering en meer aandacht voor het systeemontwerp. Omdat er geen significant verschil in het rendement van BIPV versus BAPV systemen verwacht wordt valt het potentieel dus hoger uit indien er vaker gekozen wordt voor BIPV systemen. In alle varianten van what-if 1 is een marktaandeel van 25% BIPV veronderstelt voor de schuine daken in de residentiële sector.

3. Hoeveel extra opwek zou er gerealiseerd kunnen worden als er in de residentiële sector op maximale opwek gestuurd zou worden in plaats van het precies opwekken van het eigen verbruik?

Het elektriciteitsgebruik van alle huishoudens in Nederland bedraagt op dit moment ca. 23 TWh/jr⁹⁸. Door elektrificatie van personenvervoer en woningverwarming is de verwachting dat dit elektriciteitsverbruik flink zal toenemen in de toekomst. Een schatting voor het residentiële elektriciteitsgebruik in 2050 kan gevonden worden in de scenario's van Berenschot/Kalavasta⁹⁹(dd april 2020). Dit wordt in deze studie geschat op 35-40 TWh/jr. Ook om dit hogere verbruik te dekken is er dus meer dan genoeg opwekpotentie op de daken.

In de huidige beleidsrealiteit loont het voor particulieren nauwelijks om meer op te wekken dan het eigen verbruik¹⁰⁰. Tot het eigen verbruik kan er tegen een gunstig tarief gesaldeerd worden, daarboven heeft de particulier slechts recht op een 'redelijke terugleververgoeding'.

Bij een dergelijk terugleververgoeding lopen terugverdientijden voor additionele capaciteit snel op tot 15-20 jaar. Met de afbouw van de salderingsregeling en de doorlopende kostendaling van zonnestroomsystemen wordt dit vraagstuk complexer. Ter ondersteuning van de afbouw van de salderingsregeling is een rekenmodel ontwikkeld door TNO waarmee ook een aantal gevoeligheidsanalyses zijn uitgevoerd¹⁰¹. Daaruit blijkt dat de terugverdientijd van additionele capaciteit steeds lager zal worden onder de nieuwe regeling. Dit is een potentieel gunstig effect van deze afbouw, maar veel is nog wel afhankelijk van de aannames rond kostprijsontwikkelingen van zonnestroomsystemen en op de elektriciteitsmarkt. Mocht additionele opwek ook in de toekomst niet blijven lonen, dan laat **Tabel 17** zien dat daarmee bijna de helft van het totale ruimtelijk opwekpotentieel van woningen onbenut zal blijven.

Concluderend kan de residentiële sector door middel van zonnestroomsystemen gemakkelijk in haar eigen gemiddelde jaarlijkse elektriciteitsbehoefte voldoen en meer. In het huidige beleid wordt deze aanvullende opwek niet gestimuleerd.

Tabel 17. Opwek versus eigen gebruik huishoudens

Bodemgebruik type	Totaal oppervlak [km ²]	Fractie PV bestemming		Ruimte beslag PV [km ²]	Energie opbrengst/verbruik [TWh/jr]	Geïnstalleerd vermogen [GWp]
Grondgebonden woningen (daken)	457	80	%	366	52	69
Gestapelde bouw (daken)	87	80	%	70	7	9
Grondgebonden woningen gevels	1.100	20	%	220	7	12
Gestapelde bouw gevels	300	40	%	120	6	10
Totaal residentiële bouw					72	100
Verbruik huishoudens					35 - 40	-

4. Platte daken in stedelijk gebied worden genoemd in diverse transitieopgaven. Niet alleen opwek van energie, maar ook vergroening en waterberging. In hoeverre beïnvloedt deze concurrentie het potentieel voor zonnestroom?

Er bevindt zich naar onze schatting 265 km² plat dak binnen de bebouwde kom¹⁰². Dit vertegenwoordigt een zonnestroom potentieel van ca 50 GWp geïnstalleerd vermogen en 40 TWh/jr elektriciteitsopwekking. Groene daken zijn in principe te combineren met het opwekken van zonnestroom, maar alleen met extensieve systeemconfiguraties¹⁰³. Men spreekt dan over Biosolar Roofs. Een dergelijke combinatie zal mogelijk niet altijd in

lijn zijn met het doel van de daktuin, bijvoorbeeld als deze voor recreatie gebruikt wordt. Daarnaast zal de maximale draagkracht van het dak een combinatie van groen- en zonedak mogelijk niet altijd toestaan. Concurrentie op platte daken in stedelijk gebied kan daarmee tot een hogere druk op andere typen grondgebruik leiden. Het lijkt niet waarschijnlijk dat de druk voor zon op land groter wordt, gegeven de mogelijkheden voor vergroening en

natuurontwikkeling daar. De infrastructuur is een meer voor de hand liggende kandidaat om extra opwek te realiseren.

5. Wat is qua ruimtelijk potentieel de impact van kiezen voor intensieve zonneparken op land (met weinig nevenfuncties) ten opzichte van een extensiever type zonneparken met meer ruimte voor natuur en/of landbouw tussen en rond de panelen?

In het huidige beleidsdebat is zon op land een fel bediscussieerd onderwerp. In deze context is er een wezenlijk verschil tussen intensieve, monocultuurachtige zonnevelden en minder intensieve ontwerpen met meerdere gebruiksfuncties naast het opwekken van energie zoals landbouw, recreatie en natuur. In **Tabel 18** laten we het zonnestroom potentieel zien indien 1.6% van het beschikbare landschap oppervlak ingezet wordt. We

doen dit voor een mix van hele intensieve typologieën en een mix van hele extensieve typologieën (consistent met de gebalanceerde mix in **Tabel 13**). De extensieve variant halveert ruwweg het zonnestroompotentieel per vierkante km, wat betekent dat er twee keer de hoeveelheid land nodig is om de dezelfde hoeveelheid energie op te wekken. Of om een dergelijke opwek extra op dak te realiseren dient er 20% extra dak van alle gebouwen gemobiliseerd

te worden. Daarbij moet toegevoegd worden dat er binnen het gebruikte areaal in de extensieve variant in bepaalde mate dus nog wel landbouw, recreatie en natuurontwikkeling mogelijk zijn.

Tabel 18. Intensieve of extensieve zonneparken

Typologieën	Zuid 11,5°	Zuid 30° (intensief)	Zuid 30° (extensief)	Oost-west (intensief)	Bifacial verticaal	Zonvolgend enkelassig bifaciaal	Energieopbrengst (TWh/jr)	Geïnstalleerd vermogen (GWp)
Intensieve variant	30%	30%	10%	30%	-	-	58	63
Extensieve variant	-	10%	30%	-	30%	30%	31	34

6. Wat is de impact op de ruimtelijke druk wanneer er een extra focus is op hoge efficiëntie in plaats van op laagste kosten?

Uiteraard heeft het rendement van zonnestroomsystemen een impact op de ruimtelijke potentiëlen. Hier verkennen we twee aspecten die een impact kunnen hebben op onze aannames over omzettingsrendementen

Wereldwijde RD&D inspanningen leiden nog steeds tot een toename in rendementen van zonnestroomsystemen. Zelfs voor gekwalificeerde experts is het lastig om deze ontwikkelingen te extrapoleren tot 2050. We schatten dat een onzekerheid van -2 tot +5 absolute procentpunten in onze schatting van 23% het gemiddelde geïnstalleerde zonnestroomsysteem in 2050 realistisch is. De asymmetrie in deze onzekerheidsschatting heeft ermee te maken dat doorontwikkeling van de huidige c-Si technologie vrij goed te voorspellen is, maar de opkomst van tandemtechnologie grotere onzekerheden bevat.

Juist in een dichtbevolkt land als Nederland zouden projectontwikkelaars kunnen focussen op een zo hoog mogelijke opbrengt per oppervlak in plaats van de laagste kosten per kWh. Dat wil zeggen, kiezen voor de meeste efficiënte systemen op de markt. In de huidige markt hebben panelen typisch rendementen van 18-20%, waarbij de meerprijs voor de panelen met de hogere rendementen meestal zodanig is dat deze ook tot hogere opwekkosten op systeemniveau leiden. Hier doen we de aanname dat een dergelijke range van 2% ook in de toekomst behouden blijft

De impact van deze ranges in het rendement op de ruimtelijke impact van zonnestroom is substantieel. Een gemiddeld 2% hoger rendement bijvoorbeeld reduceert het benodigde oppervlak met ongeveer 40 km² in de 70 TWh/jr gebalanceerde variant. Een 5% range heeft uiteraard een 2,5 keer sterkere impact.

6.1 Conclusies en aanbevelingen

Op dit moment staat er iets meer dan 10 GWp aan zonnestroomvermogen opgesteld in Nederland waarmee jaarlijks ca. 9 TWh wordt opgewekt. Voor het jaar 2030 gaan de ambities uit het klimaatakkoord en de ramingen uit de meest recente Klimaat- en Energieverkenning uit van een opgesteld vermogen van ca. 26 GWp en een jaarlijkse opwek van ca. 23 TWh. En in alle scenario's voor de energietransitie in Nederland die vooruit kijken naar het jaar 2050 is er een substantiële rol voor zonnestroom weggelegd. Deze ambities en snelle groei leiden tot een levendig en soms verhit debat over de ruimtelijke gevolgen van dergelijke hoeveelheden zonnestroom.

In dat licht is het relevant om over goede informatie te beschikken over de ruimtelijke mogelijkheden en implicaties van zonnestroom in Nederland. Eerdere studies op dit onderwerp onderzochten meestal slechts een deelgebied van Nederland. Ook zijn de aannames uit deze studies door de snelle ontwikkelingen van de techniek veelal aan een herziening toe. Deze studie levert een landsdekkende schatting van het ruimtelijke potentieel op basis van recente gegevens en projecties.

Voor de realisatie van een geambieerde jaarlijkse opwek op een bepaalde termijn is echter niet alleen het ruimtelijk potentieel bepalend. Ook de snelheid waarmee opwek van zonnestroom op de betreffende oppervlakken daadwerkelijk kan worden gerealiseerd speelt een belangrijke rol. Die snelheid wordt bepaald door een scala aan factoren, zoals technische en financiële haalbaarheid, eigendomsconstructies, eisen aan mede-ruimtegebruik en meer. Al deze factoren samen bepalen uiteindelijk de verdeling van zonnestroomsystemen over de verschillende mogelijke terreinen.

Met de resultaten van deze studie kan de discussie over de toekomstige omvang van het zonnestroom vermogen en de plaatsing van dit vermogen in verschillende gebieden in Nederland op basis van feiten gevoerd worden.

Voor het bepalen van het ruimtelijk potentieel van zonnestroom is Nederland onderverdeeld in vier ruimtelijke categorieën:

- Gebouwen (woningen en utiliteitsgebouwen)
- Infrastructuur (verkeersinfra en erven/ overige)
- Landschap (landbouwgronden, overig buitengebied)
- Water (binnenwater, buitenwater, EEZ van den Noordzee)

Elk van deze ruimtelijke categorieën is vervolgens op basis van verschillen in toepassingsmogelijkheden van zonnestroom onderverdeeld in typen landgebruik waarvan de grootte van de oppervlakken is bepaald door gebruik te maken van gemeentelijke basisregistraties zoals de BAG en BGT en aanvullende bronnen.

Vervolgens zijn in deze studie 38 systeemtypologieën geïdentificeerd die gebruikt kunnen worden om op deze typen landgebruik zonnestroom te produceren. Per systeemtypologie is bepaald wat de gemiddelde stroomproductie per oppervlakte-eenheid per jaar is (dus de horizontale projectie van het zonnestroomsysteem waarbij rekening is gehouden met hellingshoek en pakkingsgraad van de panelen, en typische obstakel- en randfracties), op basis van een schatting van de gemiddelde opbrengst van PV-opwekcapaciteit die in 2050 in Nederland geïnstalleerd zou kunnen zijn. Op basis van deze gegevens kan onderzocht worden wat de ruimtelijke impact zou zijn wanneer een bepaalde jaarlijkse hoeveelheid zonnestroom in Nederland gevraagd wordt.

De schattingen over de energieopbrengst en het deel van het oppervlak dat te benutten is in 2050 vallen veelal hoger uit dan in eerdere studies op dit gebied. Dit is grotendeels te verklaren doordat we in deze studie met een hoger gemiddeld rendement rekenen (23%), een lagere ondergrens hanteren voor minimaal benodigde instraling (~500 kWh/(kWp·jr)), met hogere maximale bedekkingsgraden rekenen voor daken (65-80%) en doordat we enkele innovatieve systeemtypologieën, zoals lichtgewicht panelen, hebben opgenomen die het mogelijk maken additioneel oppervlak te benutten.

Er zijn vervolgens een aantal varianten verkend waarbij de gevraagde opwek en onderlinge verhouding van de typologieën op elk van de vier functionele hoofdgebieden is gevarieerd.

Uit deze studie blijkt dat de ruimtelijke potentiëlen voor zonnestroom groot zijn in verhouding tot het huidige geïnstalleerde vermogen, de ambities voor 2030 en de voorspellingen over het geïnstalleerde zonnestroom vermogen in 2050. Een opgave van 70 TWh/jr in 2050 en ook een grotere opgave van 200 TWh/jr kan grotendeels met opwekking op daken en verharde terreinen. We hebben ook varianten geschetst voor beide opgaves met een meer gebalanceerde verdeling over alle mogelijke terreinen. **Figuur 18** laat het totale bruto ruimtebeslag en de onderlinge verhouding tussen de deelgebieden zien voor iedere variant.

Dit betekent dat er veel keuzeruimte is om invulling te geven aan de zonnestroom opgave in 2050. Met het oog op ruimtelijke kwaliteit zouden daken de voorkeur kunnen krijgen, maar voor de gewenste snelheid van implementatie kan gekozen worden om ook op andere

oppervlakken in Nederland systemen te installeren. Door de grote schaal en hoge implementatiesnelheid van grootschalige projecten in de infrastructuur, op land en op water kunnen dergelijke projecten een belangrijke bijdrage leveren aan het tijdig behalen van de klimaatdoelstellingen.

Daarnaast concludeert deze studie dat zonneparken op de Noordzee bij windparken een erg groot additioneel potentieel kunnen bieden. Dit geldt ook voor systemen in wegdelen en op parkeerplaatsen en systemen op gevels. Deze toepassingsgebieden hebben elk hun eigen ontwikkelingsuitdagingen en aanvullende R&D is noodzakelijk. In dat licht is het zinvol om dergelijke toepassingen op te nemen in innovatieprogramma's.

Ook laat deze studie zien dat als woningeigenaren niet gestimuleerd worden om meer zonnestroom om te wekken dan hun eigen elektriciteitsgebruik, zoals bij het huidige (salderings)beleid, er een deel van het dakoppervlak van woningen onbenut zal blijven. Als het de wens is deze daken maximaal in te zetten om de benodigde systemen in het buitengebied beperkt te houden, zal er gewijzigd beleid gevoerd moeten worden op dit vlak.

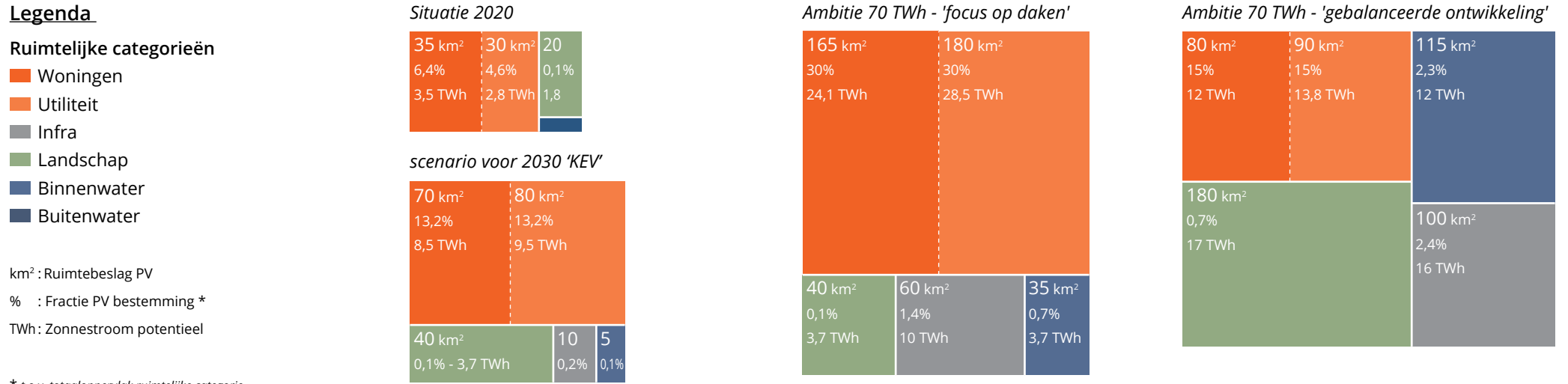
Verder is bekeken wat de ruimtelijke implicaties zijn van de keuze voor intensieve of extensieve zonneparken. Maatschappelijk is er een voorkeur minder intensieve parken met ruimte voor natuur of landbouw. Door de lagere paneeldichtheid neemt het bruto ruimtegebruik echter toe bij dergelijke parken. Dit aspect moet meegenomen worden in de discussie over parkontwerp.

Daarnaast kan uit deze studie ook worden geconcludeerd dat het gebruik van zonnepanelen met een zo hoog mogelijk rendement aanzienlijke voordelen heeft voor wat betreft de ruimtelijke implicaties per opgewekte hoeveelheid duurzame stroom. Om die reden zouden beleidsmakers, bij het ontwikkelen van toekomstige stimuleringsregelingen, tevens rekening moeten houden met ruimtelijke implicaties en niet alleen sturen op kosten of vermeden CO₂-uitstoot.

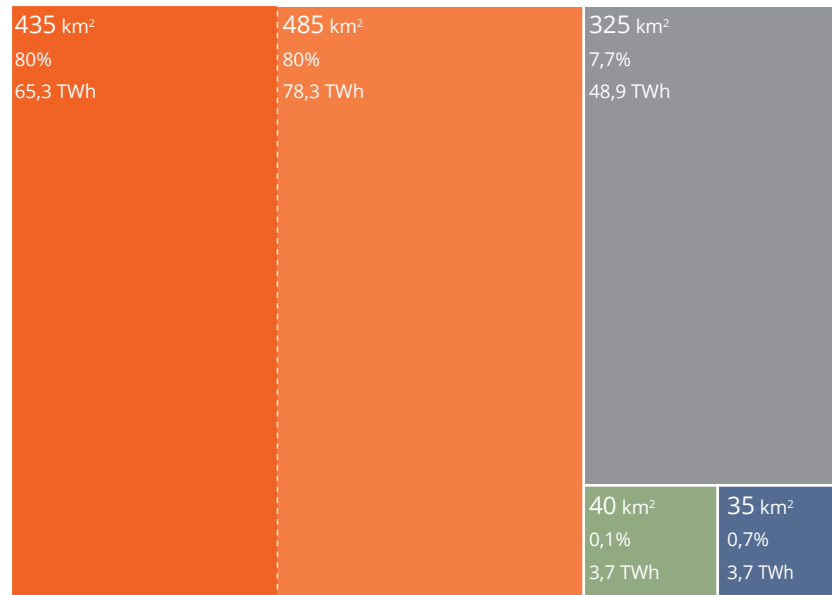
In dit onderzoek is het ruimtelijk potentieel in detail onderzocht. Andere facetten die een rol spelen in de kansen en belemmeringen voor het opwekken van zonnestroom in Nederland zijn bewust buiten beschouwing gelaten. Deze facetten spelen evengoed een belangrijke rol in de keuze of en waar er nieuwe zonnestroomsystemen worden aangelegd. Dit gaat bijvoorbeeld om de netimpact en mogelijkheden tot inpassing van zonnestroom in het energiesysteem, de economische haalbaarheid van de verschillende systemen en de maatschappelijk bereidheid tot het zelf aanschaffen of het accepteren van zonnestroomsystemen in de omgeving. Op de korte termijn zullen deze andere facetten zelfs vaak doorslaggevend zijn in de beslissing of een zonnestroomsysteem er wel of niet komt. Deze studie is dan ook geen pleidooi voor één bepaalde ruimtelijke invulling en kan de discussie over hoeveel zonnestroomsystemen op welke plek geplaatst moeten worden niet beslechten. Wel hopen we met de resultaten van deze studie het debat te voeden met heldere feiten over de ruimtelijke mogelijkheden voor het opwekken van zonnestroom.

Resultaten die ook gebruikt kunnen worden om verder te kijken dan het jaar 2030, waar nu veel aandacht naar uit gaat en de ruimte om te sturen nog maar beperkt is. Juist na 2030 moeten nog hele grote stappen gezet worden naar een CO₂-emissieloos energiesysteem in 2050 en er is nog veel onbekend over de invulling van deze opgave. Om het momentum in de energietransitie ook na 2030 vast te houden moet daar nu al over gesproken worden.

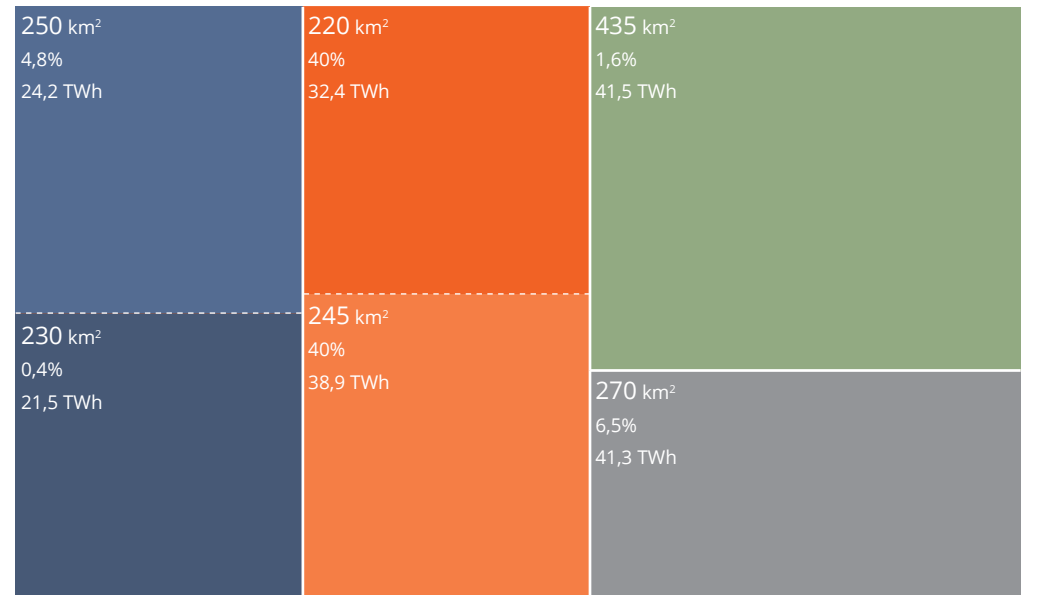
Figuur 18. Bruto ruimtebeslag zonnestroom in 2020, in 2030 en bij verschillende varianten voor 2050



Ambitie 200 TWh - 'focus op daken'



Ambitie 200 TWh - 'gebalanceerde ontwikkeling'



7. BIJLAGEN

A. TYPOLOGIE PARAMETERS

B. TYPOLOGIEOVERZICHT

C. RUIMTE EN TYPOLOGIE

D. UITWERKING "WHAT IF" 1

BIJLAGE A. PARAMETERS SYSTEEMTPOLOGIEËN

Type toepassing	Omschrijving systeemtype	Gemiddelde hellingshoek paneel (graden)	verantwoording #	Gemiddelde orientatie paneel in graden (0 =zuid, 180 =noord)	verantwoording #	cover ratio panelen bij dichtste pakking	verantwoording #	rand en obstakel fractie	verantwoording #	projectie van paneel op grond	verantwoording #	paneel oppervlak per km ² (voor gevelsystemen: verticaal oppervlak) **	Specifieke opbrengst in berekeningen	verantwoording #	rendement relevant voor RES 2030	vlootgemiddelde rendement 2050	verantwoording #	Geïnstalleerd Vermogen per gebruiksoppervlak in 2050 (MWp/km ²)	Jaarlijkse opbrengst per gebruiksoppervlak 2050 (GWh/ km ² /jr)
Zon op gebouw	Woning zuid dak (BAPV)	40	1	22,5	14	0,99	22	0,35	31	0,77	40	0,84	942	44	21,5%	23,0%	47	193	182
Zon op gebouw	Woning zuid dak (BIPV)	40	1	22,5	14	0,99	22	0,2	32	0,77	40	1,03	942	44	21,5%	23,0%	47	238	224
Zon op gebouw	Woning noord dak (BAPV)	40	1	157,5	14	0,99	22	0,35	31	0,77	40	0,84	501	44	21,5%	23,0%	47	193	97
Zon op gebouw	Woning noord dak (BIPV)	40	1	157,5	14	0,99	22	0,2	32	0,77	40	1,03	501	44	21,5%	23,0%	47	238	119
Zon op gebouw	Woning oost-west dak (BAPV)	40	1	90	14	0,99	22	0,35	31	0,77	40	0,84	749	44	21,5%	23,0%	47	193	145
Zon op gebouw	Woning oost-west dak (BIPV)	40	1	90	14	0,99	22	0,2	32	0,77	40	1,03	749	44	21,5%	23,0%	47	238	178
Zon op gebouw	Woning plat dak zuid (BAPV)	11,5	2	22,5	15	0,75	23	0,35	31	0,98	40	0,50	875	44	21,5%	23,0%	47	114	100
Zon op gebouw	Woning plat dak oost-west (BAPV)	11,5	2	90	15	0,92	24	0,35	31	0,98	40	0,61	799	44	21,5%	23,0%	47	140	112
Zon op gebouw	Woning gevel zuid	90	3	22,5	14	0,99	22	0,75	33	nvt	42	0,25	677	44	21,5%	23,0%	47	57	39
Zon op gebouw	Woning gevel oost-west	90	3	90	14	0,99	22	0,75	33	nvt	42	0,25	485	44	21,5%	23,0%	47	57	28
Zon op gebouw	Utiliteit plat dak flex	3	4	nvt	16	0,95	26	0,2	34	1,00	40	0,76	827	44	21,5%	23,0%	47	175	145
Zon op gebouw	Utiliteit plat dak oost-west	11,5	2	90	14	0,92	24	0,3	31	0,98	40	0,66	799	44	21,5%	23,0%	47	151	121
Zon op gebouw	Utiliteit plat dak zuid	11,5	2	22,5	14	0,75	23	0,3	31	0,98	40	0,54	875	44	21,5%	23,0%	47	123	108
Zon op gebouw	Utiliteit complexe dakvorm	20	5	45	17	0,8	25	0,5	35	0,94	40	0,43	883	44	21,5%	23,0%	47	98	86
Zon op gebouw	Utiliteit gevel zuid	90	3	22,5	14	0,99	22	0,5	33	nvt	42	0,50	677	44	21,5%	23,0%	47	114	77
Zon op gebouw	Utiliteit gevel oost-west	90	3	90	14	0,99	22	0,5	33	nvt	42	0,50	485	44	21,5%	23,0%	47	114	55
Zon op gebouw	Agrarische schuur oost-west	30	6	90	14	0,99	22	0,1	31	0,87	40	1,03	818	44	21,5%	23,0%	47	237	194
Zon op gebouw	Agrarische schuur zuid	30	6	22,5	14	0,99	22	0,1	31	0,87	40	1,03	991	44	21,5%	23,0%	47	237	235
Zon op gebouw	Agrarische schuur noord	30	6	157,5	14	0,99	22	0,1	31	0,87	40	1,03	609	44	21,5%	23,0%	47	237	144

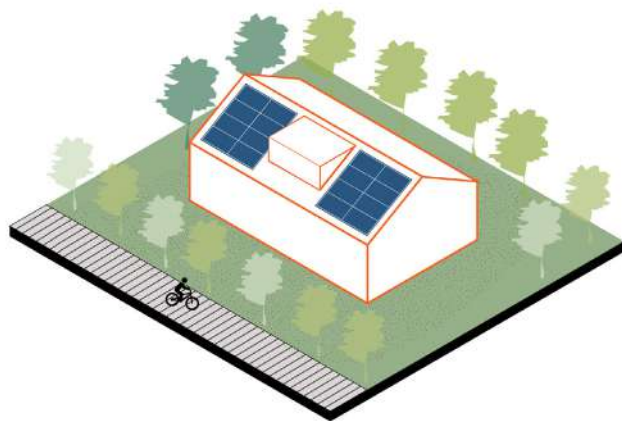
*(niet te bepalen); ** Toelichting berekening: #43

Type toepassing	Omschrijving systeemtype	Gemiddelde hellingshoek paneel (graden)	verantwoording #	Gemiddelde orientatie paneel in graden (0 =zuid, 180 =noord)	verantwoording #	cover ratio panelen bij dichtste pakking	verantwoording #	rand en obstakel fractie	verantwoording #	projectie van paneel op grond	verantwoording #	paneel oppervlak per km ² (voor gevelsystemen: verticaal oppervlak) **	Specifieke opbrengst in berekeningen	verantwoording #	rendement relevant voor RES 2030	vlootgemiddelde rendement 2050	verantwoording #	Geïnstalleerd Vermogen per gebruiksoppervlak in 2050 (MWp/km ²)	Jaarlijkse opbrengst per gebruiksoppervlak 2050 (GWh/ km ² /jr)
Zon op infra	Wegdek	0	7	nvt	16	0,9	27	0,1	27	1,00	40	0,81	805	44	21,5%	23,0%	47	186	150
Zon op infra	Geluidsscherm bifacial	80	8	90	18	0,9	8	0,05	8	0,98	40	0,87	1123	45	21,5%	23,0%	47	200	224
Zon op infra	Voer- of vaartuigen	0	9	variabel		0,99	22	0,7	5	1,00	40	0,30	564	46	21,5%	23,0%	47	68	38
Zon op infra	Overkapping parkeerterrein	11	10	45	19	0,75	23	0,05	36	0,98	40	0,73	879	44	21,5%	23,0%	47	167	147
Zon op infra	Stortplaatsen, dijken en wallen	20	5	45	19	0,9	5	0,5	5	0,94	40	0,48	962	44	21,5%	23,0%	47	110	106
Zon op land	Zuid 11,5°	11,5	11	22,5	20	0,75	23	0,15	28	0,98	40	0,65	950	44	21,5%	23,0%	47	150	142
Zon op land	Zuid 30° (intensief)	30	12	22,5	20	0,5	28	0,15	28	0,87	40	0,49	1021	44	21,5%	23,0%	47	113	115
Zon op land	Zuid 30° (extensief)	30	12	22,5	20	0,5	28	0,5	37	0,87	40	0,29	1021	44	21,5%	23,0%	47	66	68
Zon op land	Oost-west (intensief)	11,5	11	90	20	0,92	28	0,15	28	0,98	40	0,80	868	44	21,5%	23,0%	47	184	159
Zon op land	Oost-west (extensief)	11,5	11	90	20	0,92	5	0,5	28	0,98	40	0,47	868	44	21,5%	23,0%	47	108	93
Zon op land	Bifacial verticaal	90	3	90	21	n.t.b.*	21	0,15	21	n.t.b.*	41	0,17	1123	45	21,5%	23,0%	47	39	44
Zon op land	Zonvolgend enkelassig bifacial	variabel		variabel		0,35	29	0,15	38	1,00	nvt	0,30	1254	44	21,5%	23,0%	47	68	86
Zon op water	Plat op ponton	10	13	variabel		0,5	30	0,02	39	0,98	40	0,50	875	44	21,5%	23,0%	47	114	100
Zon op water	Zuid 30° (intensief)	30	12	22,5	20	0,5	5	0,1	54	0,87	40	0,52	1021		21,5%	23,0%	47	120	122
Zon op water	Zuid 30° (extensief)	30	12	22,5	20	0,3	5	0,1	54	0,87	40	0,31	1021		21,5%	23,0%	47	72	73
Zon op water	Oost-west (intensief)	11,5	11	90	20	0,92	24	0,1	54	0,98	40	0,84	868		21,5%	23,0%	47	194	169
Zon op water	Oost-west (extensief)	11,5	11	90	20	0,5	5	0,1	54	0,98	40	0,46	868		21,5%	23,0%	47	106	92
Zon op water	Zuid 11°	11,5	11	22,5	20	0,75	23	0,1	54	0,98	40	0,69	950	44	21,5%	23,0%	47	158	151
Zon op water	Bifacial verticaal	90	3	90	21	n.t.b.*	21	0,1	54	n.t.b.*	41	0,18	1123	45	21,5%	23,0%	47	41	46

*(niet te bepalen); ** Toelichting berekening: #43

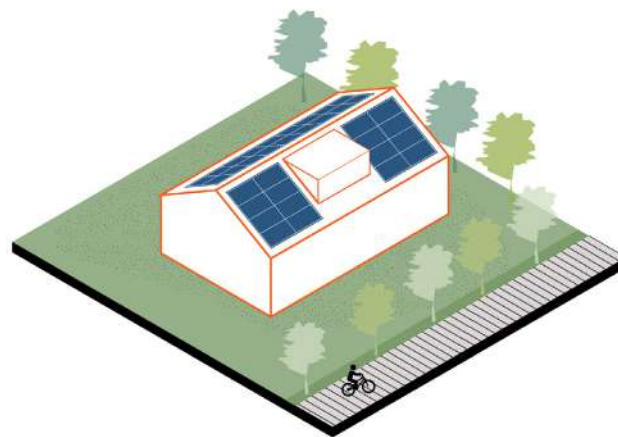
#	Verantwoording		
1	we hebben geen uitgebreide data kunnen vinden over gemiddelde dakhellingen, op basis van een kleine steekproef schatten we deze op gemiddeld 40 gr	28	op basis van inspectie van ca. 5 typische systemen in deze typologie
2	op basis van gangbare onderconstructies van bijvoorbeeld Solarstell connect, Van der Valk solar etc.	29	op basis van NREL paper over deze systemen
3	bij definitie	30	aanname maximaal 50% van het water bedekken
4	3 graden is een typisch afschot voor een plat dak	31	op basis van inspectie van ca. 20 typische systemen in deze typologie
5	dit is een aanname	32	aanname dat BIPV iets hogere bedekking heeft dan BAPV omdat er meer moeite wordt gedaan door klant+installateur om tot hoge bedekking te komen (BIPV klanten gaan per definitie niet voor laagste prijs oplossing)
6	we hebben geen uitgebreide data kunnen vinden over gemiddelde dakhellingen van agrarisch schuren, op basis van een kleine steekproef schatten we deze op gemiddeld 30 gr	33	gevels van woningen bestaan veel uit raam, dan is er niet veel ruimte voor panelen. Voor hoogbouw en bedrijfsgebouwen zal deze raamfractie iets lager zijn, maar nog steeds significant
7	de gemiddelde weg in Nederland is vlak of met een verwaarloosbare helling	34	Met flex panelen iets meer mogelijkheden om volledig dak te bedekken en geen randzone ivm fixatie
8	Op basis van het Solar Highways concept	35	waarschijnlijk vallen relatief veel oppervlakken af door complexe vorm
9	aanname dat vooral de vlakke delen van deze voertuigen gebruikt zullen worden voor PV	36	op parkeerplaatsen zijn weinig obstakels en de carports worden speciaal voor PV aangelegd
10	op basis van afbeeldingen van een aantal van deze overkappingen en het vergelijk met systemen voor platte daken	37	op basis van zonnepark Laarberg
11	dit is een veelgebruikte hellingshoek door projectontwikkelaars momenteel, maximaal rendement per grondoppervlak	38	op basis van vergelijkbare systemen zonder tracking
12	dit is een veelgebruikte hellingshoek als men maximale opbrengst per paneel wil halen (en niet per grondoppervlak)	39	geen obstakels en randen op water
13	op basis van gemiddelde golvingen systeem (paper S. Golroodbari, Simulation of performance differences between offshore and land-based photovoltaic systems)	40	Goniometrische projectie op het horizontaal vlak
14	aanname dat orientaties van daken en gevels in NL normaal verdeeld zijn over de windrichtingen, zuid is dan dus de verzameling van zuidoost tot zuidwest, dus van 45 graden west tot 45 graden oost, gemiddelde orientatie is dan dus 22.5 graden tov zuid, noord is dan dus de verzameling van noordoost tot noordwest, dus van 135 graden west tot 135 graden oost, gemiddelde orientatie is dan dus 157.5 graden tov zuid, oost-west is dan dus de verzameling van 45 graden west tot 135 graden west en 45 graden oost en 135 graden oost, gemiddelde orientatie is dan dus 90 graden tov zuid	41	Voor verticaal geplaatste systemen kan men eigenlijk niet op een zinvolle manier over de projectie en de maximale bedekkingsgraad spreken. De panelen staan verticaal, en recht van boven gezien bedekken de panelen dus eigenlijk nauwelijks oppervlak. Ook hangen de rijafstand en het aantal panelen dat boven elkaar geplaatst kan worden samen. We baseren deze typologie op het voorbeeld systeem van Next2Sun in Dirmingen (DLD). Daar bestaan de rijen uit twee panelen in landscape richting die boven elkaar worden plaatst en de rijafstand bedraagt 10 meter. Met deze twee parameters is het paneeloppervlak per grondoppervlak te bepalen.
15	bij plat dak kan gemikt worden op exact zuid opstelling, maar zal vaak toch lichte afwijking hebben, ook kan er bij plat dak kan gemikt worden op exact oost-west opstelling, afwijkingen heffen elkaar op	42	panelen staan verticaal en de hoogte is onbekend, niet relevant om hier een horizontaal ruimtebeslag aan toe te kennen
16	bij en dergelijk kleine hellingshoek doet orientatie er nauwelijks toe	43	vermenigvuldiging van cover ratio opeengepakte rijen,totaal-randfractie en 1/projectie van paneel geeft paneel oppervlak per systeemoppervlak
17	aanname dat bij complexe vormen exacte zuid orientatie lang niet altijd kan, maar dat noord wel vaak vermeden kan worden.	44	middels modellering in PVGIS
18	aanname normale verdeling over de windrichtingen	45	Op basis van een optelling van de opbrengst van een verticaal oost en een verticaal west systeem. Bifacialiteit dus 100% verondersteld
19	aanname dat de orientatie van deze structuren normaal is verdeeld en er wordt of voor oost-west of voor zuid gekozen. Noordsystemen liggen niet voor de hand.	46	op basis van gegevens van Lightyear dat een wegvoertuig zich gemiddeld 30% van de tijd in de schaduw bevindt
20	op basis van inspectie van een aantal systemen middels Google Maps. Het valt op dat systemen niet exact richting het zuiden of in oost-west richting staan, maar meestal de orientatie van het kavel volgen. Daarmee komen we op deze gemiddelde orientatie	47	op basis van een interpolatie van huidige en voorspelde rendementen in roadmaps van IRTPV, Fraunhofer, ECN met ijkjaren 2027 (voor de RES'en) en 2036 (voor het vlootgemiddelde van 2050). Degradatie is hierin meegenomen
21	Voor verticaal geplaatste systemen kan men eigenlijk niet op een zinvolle manier over de projectie en de maximale bedekkingsgraad spreken. De panelen staan verticaal, en recht van boven gezien bedekken de panelen dus eigenlijk nauwelijks oppervlak. Ook hangen de rijafstand en het aantal panelen dat boven elkaar geplaatst kan worden samen. We baseren deze typologie op het voorbeeld systeem van Next2Sun in Dirmingen (DLD). Daar bestaan de rijen uit twee panelen in landscape richting die boven elkaar worden plaatst en de rijafstand bedraagt 10 meter. Met deze twee parameters is het paneeloppervlak per grondoppervlak te bepalen.	48	op basis van expert judgement (o.a. roadmap pv systemen en toepassingen van TKI Urban Energy)
22	ca. 1cm tussen panelen van 1 meter	49	op basis van de producten van kameleon solar
23	dit is een gangbare cover ratio bij 11.5 graden zuid (dichter bij elkaar geeft schaduw problemen)	50	op basis van product info sheets van Mia sole en global solar, maar ook bv apollosolar
24	dit is typisch maximaal haalbaar gegeven de behoefte aan looppaden tussen de panelen	51	op basis van product info sheets van Saint gobain
25	aanname dat bij complexe systemen een minder dichte pakking mogelijk is	52	op basis van gegevens van het Sola road systeem
26	aanname gem. 5 cm tussenruimte tussen panelen van 1 meter op basis van bestaande flex systemen	53	op basis van light-year gegevens
27	op basis van systemen zoals SolaRoad, Wattway, easypath	54	Voor systemen op water wordt de rand- en obstakelfractie anders bepaald. In tegenstelling tot systemen op land is het bij drijvende parken ongebruikelijk dat een wateroppervlak geheel bedekt wordt. Meestal betreft het slechts een klein deel van het gehele waterlichaam. Er is daarmee in feite geen sprake van een duidelijke parkrand. Toch zal het direct aangrenzende waterdeel beïnvloed worden qua gebruiksmogelijkheden. Er zal in veel gevallen bijvoorbeeld een vaarvrije zone aangelegd moeten worden. Wij gaan er van uit dat er zo goed als geen obstakels zijn en dat er een vaarvrije zone van 2,5 meter wordt aanhouden bij een parkgrootte van 1 hectare. Daarmee komen we op een randfractie van 0.1.

BIJLAGE B. TYPOLOGIEOVERZICHT ZON OP GEBOUWEN (WONING)



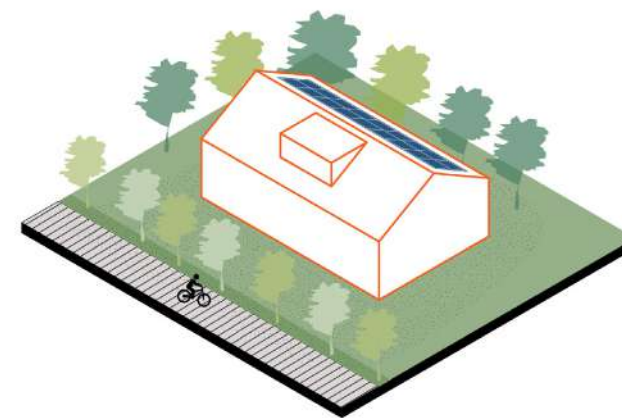
ZUID DAK (BAPV)

Gemiddelde hellingshoek	40°
Gemiddelde oriëntatie t.o.v zuid	22,5°
Cover ratio dichtste pakking	0,99
Gemiddelde rand- en obstakelfractie	0,35
Projectie paneel op horizontaal vlak	0,77
Paneeloppervlak per grondoppervlak	0,84
Energieopbrengst per gebruiksoppervlak	182 GWh/km ² /jr



OOST-WEST DAK (BAPV)

Gemiddelde hellingshoek	40°
Gemiddelde oriëntatie t.o.v zuid	90°
Cover ratio dichtste pakking	0,99
Gemiddelde rand- en obstakelfractie	0,35
Projectie paneel op horizontaal vlak	0,77
Paneeloppervlak per grondoppervlak	0,84
Energieopbrengst per gebruiksoppervlak	145 GWh/km ² /jr

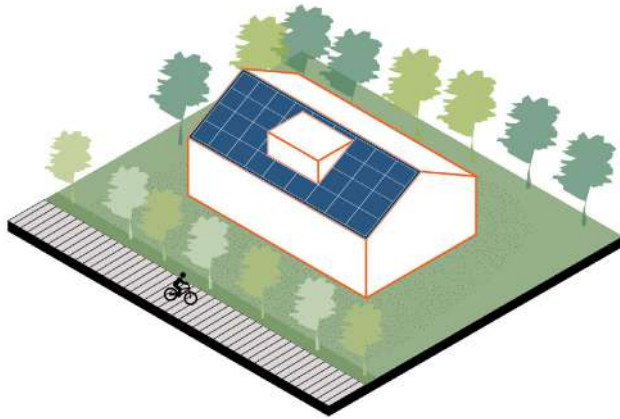


NOORD DAK (BAPV)

Gemiddelde hellingshoek	40°
Gemiddelde oriëntatie t.o.v zuid	157,5°
Cover ratio dichtste pakking	0,99
Gemiddelde rand- en obstakelfractie	0,35
Projectie paneel op horizontaal vlak	0,77
Paneeloppervlak per grondoppervlak	0,84
Energieopbrengst per gebruiksoppervlak	97 GWh/km ² /jr

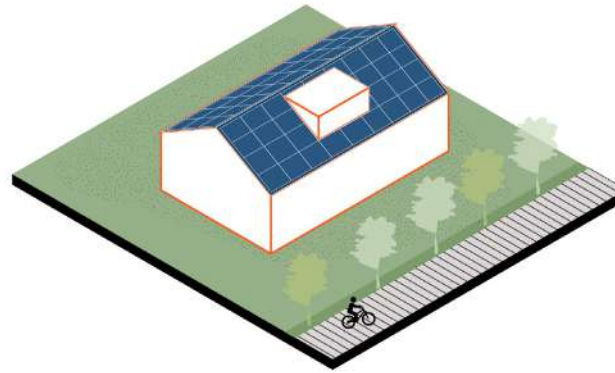


ZON OP GEBOUWEN (WONING)



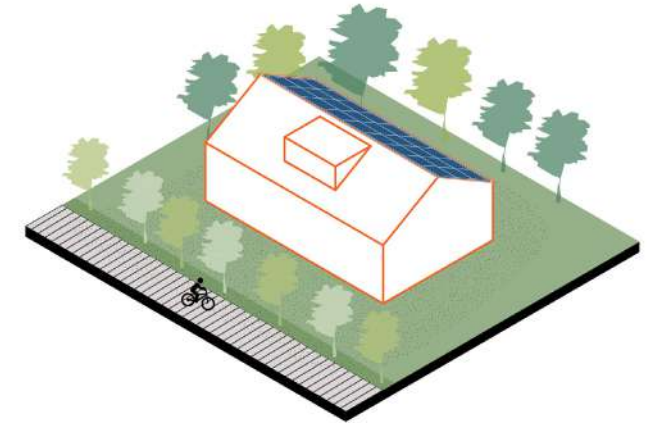
ZUID DAK (BIPV)

Gemiddelde hellingshoek	40°
Gemiddelde oriëntatie t.o.v zuid	22,5°
Cover ratio dichtste pakking	0,99
Gemiddelde rand- en obstakelfractie	0,20
Projectie paneel op horizontaal vlak	0,77
Paneeloppervlak per grondoppervlak	1,03
Energieopbrengst per gebruiksoppervlak	224 GWh/km ² /jr



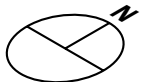
OOST-WEST DAK (BIPV)

Gemiddelde hellingshoek	40°
Gemiddelde oriëntatie t.o.v zuid	90°
Cover ratio dichtste pakking	0,99
Gemiddelde rand- en obstakelfractie	0,20
Projectie paneel op horizontaal vlak	0,77
Paneeloppervlak per grondoppervlak	1,03
Energieopbrengst per gebruiksoppervlak	178 GWh/km ² /jr

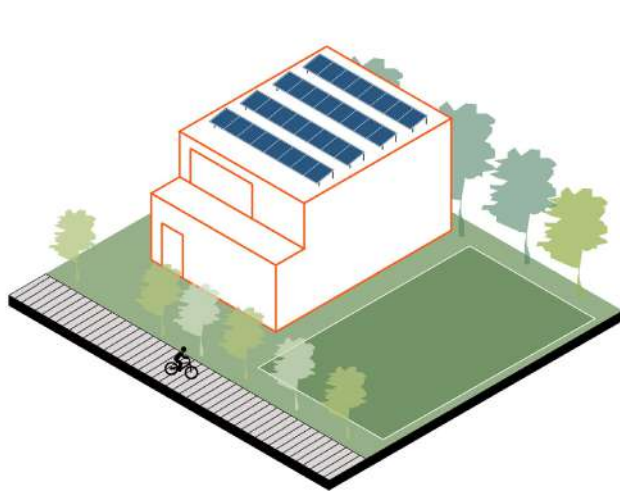


NOORD DAK (BIPV)

Gemiddelde hellingshoek	40°
Gemiddelde oriëntatie t.o.v zuid	157,5°
Cover ratio dichtste pakking	0,99
Gemiddelde rand- en obstakelfractie	0,20
Projectie paneel op horizontaal vlak	0,77
Paneeloppervlak per grondoppervlak	1,03
Energieopbrengst per gebruiksoppervlak	119 GWh/km ² /jr

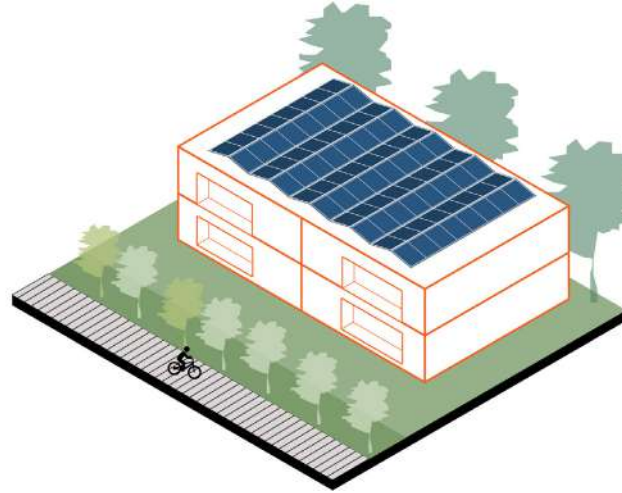


ZON OP GEBOUWEN (WONING)



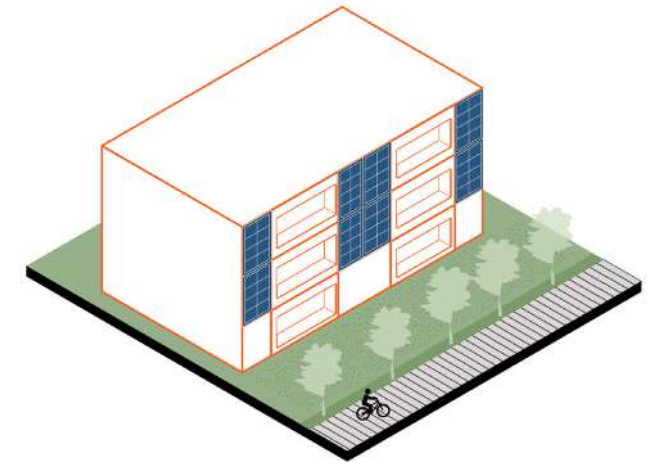
PLAT DAK ZUID (BAPV)

Gemiddelde hellingshoek	11,5°
Gemiddelde oriëntatie t.o.v zuid	22,5°
Cover ratio dichtste pakking	0,75
Gemiddelde rand- en obstakelfractie	0,35
Projectie paneel op horizontaal vlak	0,98
Paneeloppervlak per grondoppervlak	0,50
Energieopbrengst per gebruiksoppervlak	100 GWh/km ² /jr



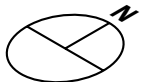
PLAT DAK OOST-WEST (BAPV)

Gemiddelde hellingshoek	11,5°
Gemiddelde oriëntatie t.o.v zuid	90°
Cover ratio dichtste pakking	0,92
Gemiddelde rand- en obstakelfractie	0,35
Projectie paneel op horizontaal vlak	0,98
Paneeloppervlak per grondoppervlak	0,61
Energieopbrengst per gebruiksoppervlak	112 GWh/km ² /jr

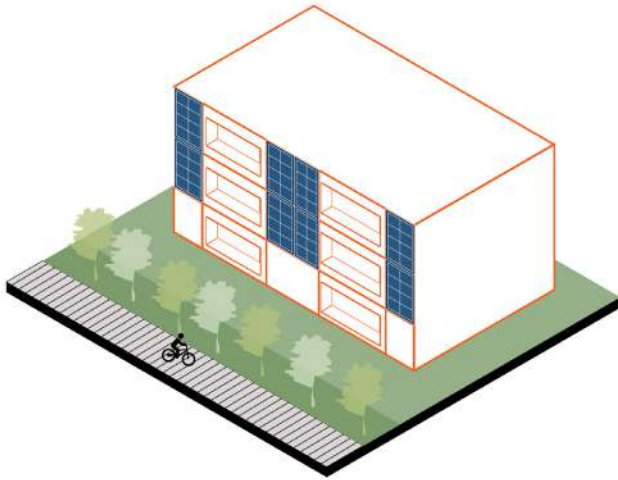


GEVEL OOST-WEST

Gemiddelde hellingshoek	90°
Gemiddelde oriëntatie t.o.v zuid	90°
Cover ratio dichtste pakking	0,99
Gemiddelde rand- en obstakelfractie	0,75
Projectie paneel op horizontaal vlak	nvt
Paneeloppervlak per geveloppervlak	0,25
Energieopbrengst per gebruiksoppervlak	28 GWh/km ² /jr

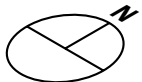


ZON OP GEBOUWEN (WONING)

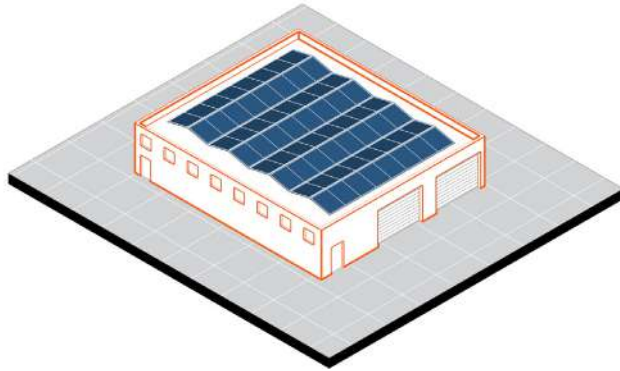


GEVEL ZUID

Gemiddelde hellingshoek	90°
Gemiddelde oriëntatie t.o.v zuid	22,5°
Cover ratio dichtste pakking	0,99
Gemiddelde rand- en obstakelfractie	0,75
Projectie paneel op horizontaal vlak	nvt
Paneeloppervlak per geveloppervlak	0,25
Energieopbrengst per gebruiksoppervlak	39 GWh/km²/jr

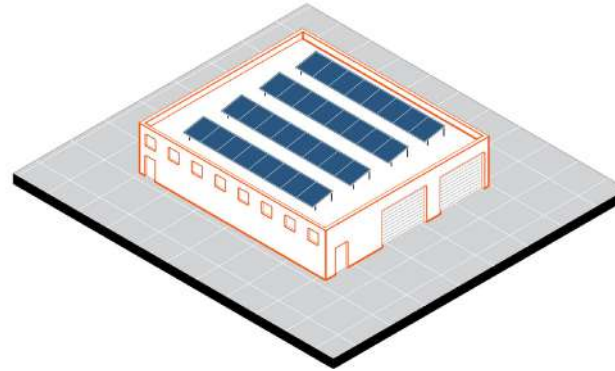


ZON OP GEBOUWEN (UTILITEIT)



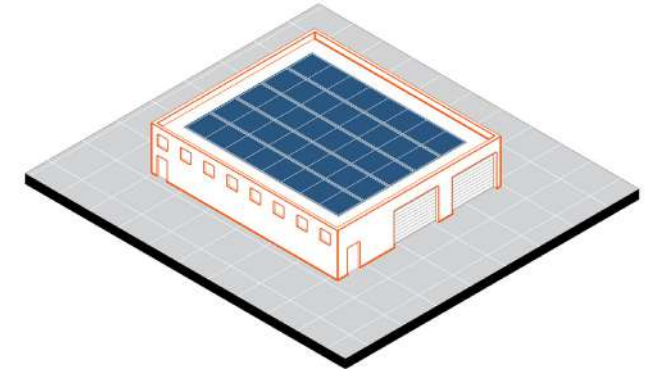
PLAT DAK OOST-WEST

Gemiddelde hellingshoek	11,5°
Gemiddelde oriëntatie t.o.v zuid	90°
Cover ratio dichtste pakking	0,92
Gemiddelde rand- en obstakelfractie	0,30
Projectie paneel op horizontaal vlak	0,98
Paneeloppervlak per grondoppervlak	0,66
Energieopbrengst per gebruiksoppervlak	121 GWh/km ² /jr



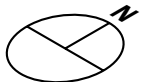
PLAT DAK ZUID

Gemiddelde hellingshoek	11,5°
Gemiddelde oriëntatie t.o.v zuid	22,5°
Cover ratio dichtste pakking	0,75
Gemiddelde rand- en obstakelfractie	0,30
Projectie paneel op horizontaal vlak	0,98
Paneeloppervlak per grondoppervlak	0,54
Energieopbrengst per gebruiksoppervlak	108 GWh/km ² /jr

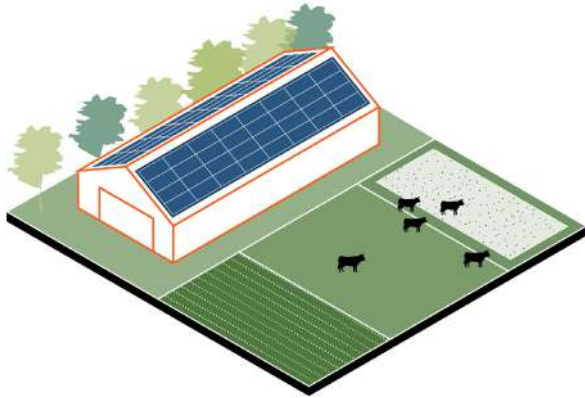


PLAT DAK FLEX

Gemiddelde hellingshoek	3°
Gemiddelde oriëntatie t.o.v zuid	nvt
Cover ratio dichtste pakking	0,95
Gemiddelde rand- en obstakelfractie	0,20
Projectie paneel op horizontaal vlak	1,00
Paneeloppervlak per grondoppervlak	0,76
Energieopbrengst per gebruiksoppervlak	116 GWh/km ² /jr

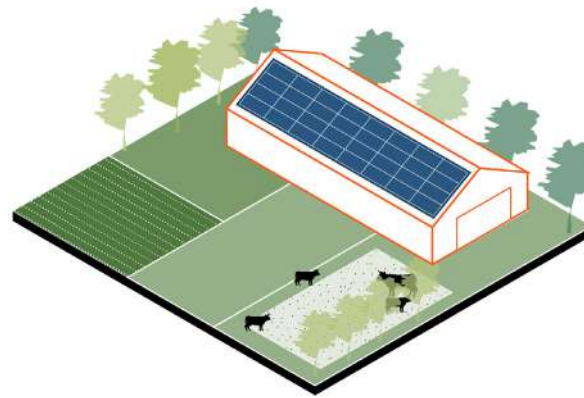


ZON OP GEBOUWEN (UTILITEIT)



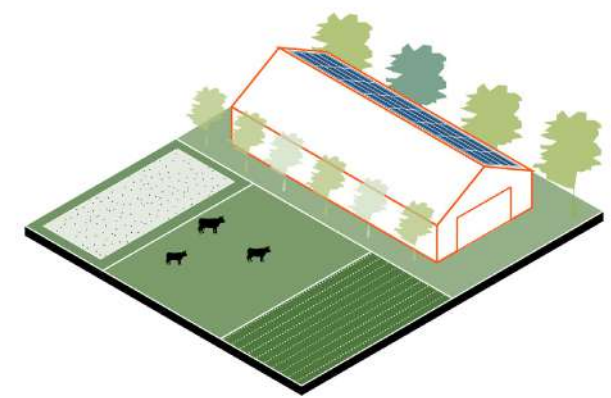
AGRARISCHE SCHUUR OOST-WEST

Gemiddelde hellingshoek	30°
Gemiddelde oriëntatie t.o.v zuid	90°
Cover ratio dichtste pakking	0,99
Gemiddelde rand- en obstakelfractie	0,10
Projectie paneel op horizontaal vlak	0,87
Paneeloppervlak per grondoppervlak	1,03
Energieopbrengst per gebruiksoppervlak	194 GWh/km ² /jr



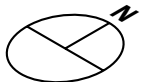
AGRARISCHE SCHUUR ZUID

Gemiddelde hellingshoek	30°
Gemiddelde oriëntatie t.o.v zuid	22,5°
Cover ratio dichtste pakking	0,99
Gemiddelde rand- en obstakelfractie	0,10
Projectie paneel op horizontaal vlak	0,87
Paneeloppervlak per grondoppervlak	1,03
Energieopbrengst per gebruiksoppervlak	235 GWh/km ² /jr

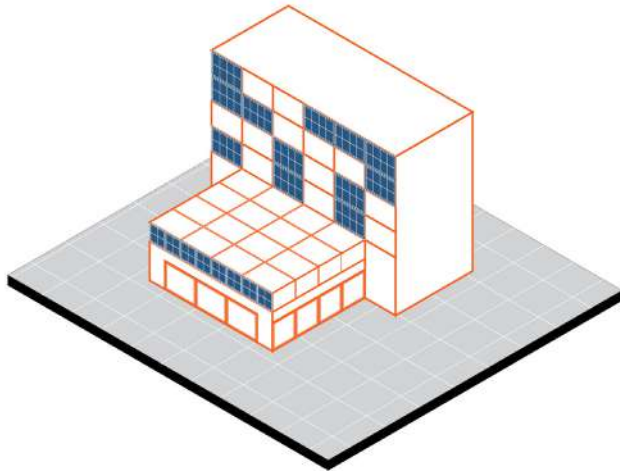


AGRARISCHE SCHUUR NOORD

Gemiddelde hellingshoek	30°
Gemiddelde oriëntatie t.o.v zuid	157,5°
Cover ratio dichtste pakking	0,99
Gemiddelde rand- en obstakelfractie	0,10
Projectie paneel op horizontaal vlak	0,87
Paneeloppervlak per grondoppervlak	1,03
Energieopbrengst per gebruiksoppervlak	144 GWh/km ² /jr

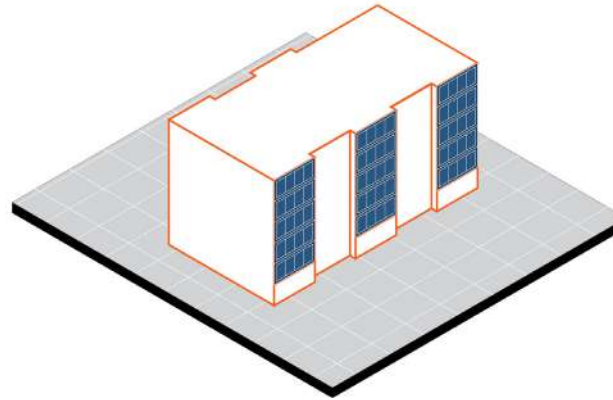


ZON OP GEBOUWEN (UTILITEIT)



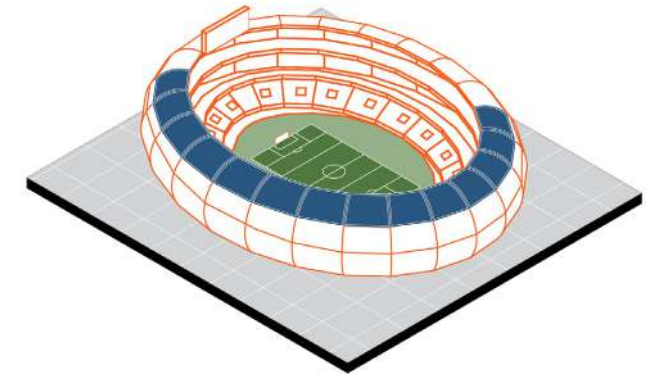
GEVEL ZUID

Gemiddelde hellingshoek	90°
Gemiddelde oriëntatie t.o.v zuid	22,5°
Cover ratio dichtste pakking	0,99
Gemiddelde rand- en obstakelfractie	0,50
Projectie paneel op horizontaal vlak	nvt
Paneeloppervlak per geveloppervlak	0,50
Energieopbrengst per gebruiksoppervlak	77 GWh/km ² /jr



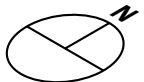
GEVEL OOST-WEST

Gemiddelde hellingshoek	90°
Gemiddelde oriëntatie t.o.v zuid	90°
Cover ratio dichtste pakking	0,99
Gemiddelde rand- en obstakelfractie	0,50
Projectie paneel op horizontaal vlak	nvt
Paneeloppervlak per geveloppervlak	0,50
Energieopbrengst per gebruiksoppervlak	55 GWh/km ² /jr

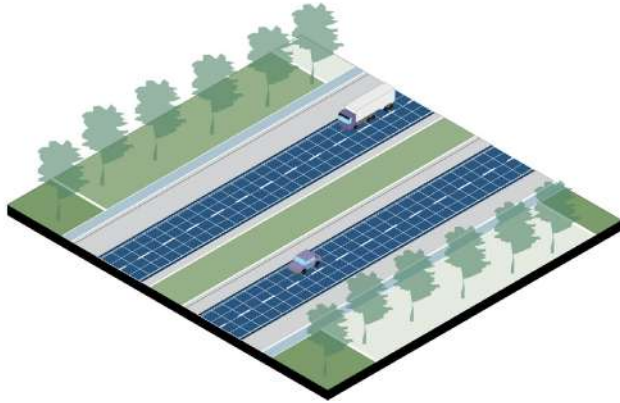


COMPLEXE DAKVORM

Gemiddelde hellingshoek	20°
Gemiddelde oriëntatie t.o.v zuid	45°
Cover ratio dichtste pakking	0,80
Gemiddelde rand- en obstakelfractie	0,50
Projectie paneel op horizontaal vlak	0,94
Paneeloppervlak per grondoppervlak	0,43
Energieopbrengst per gebruiksoppervlak	86 GWh/km ² /jr

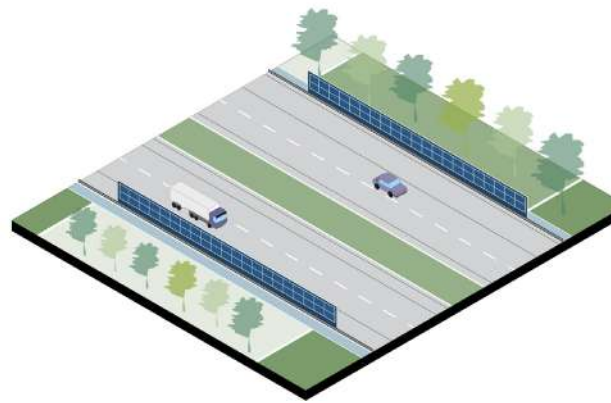


ZON OP INFRASTRUCTUUR



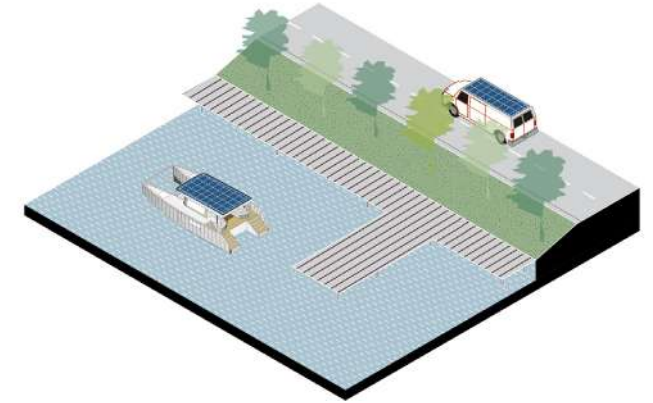
WEGDEK

Gemiddelde hellingshoek	0
Gemiddelde oriëntatie t.o.v zuid	nvt
Cover ratio dichtste pakking	0,90
Gemiddelde rand- en obstakelfractie	0,10
Projectie paneel op horizontaal vlak	1,00
Paneeloppervlak per grondoppervlak	0,81
Energieopbrengst per gebruiksoppervlak	150 GWh/km ² /jr



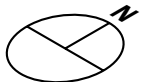
GELUIDSSCHERM (BIFACIAL)

Gemiddelde hellingshoek	80°
Gemiddelde oriëntatie t.o.v zuid	90°
Cover ratio dichtste pakking	0,90
Gemiddelde rand- en obstakelfractie	0,05
Projectie paneel op horizontaal vlak	0,98
Paneeloppervlak per grondoppervlak	0,87
Energieopbrengst per gebruiksoppervlak	224 GWh/km ² /jr



VOER- OF VAARTUIGEN

Gemiddelde hellingshoek	0
Gemiddelde oriëntatie t.o.v zuid	variabel
Cover ratio dichtste pakking	0,99
Gemiddelde rand- en obstakelfractie	0,7
Projectie paneel op horizontaal vlak	1,00
Paneeloppervlak per grondoppervlak	0,30
Energieopbrengst per gebruiksoppervlak	38 GWh/km ² /jr

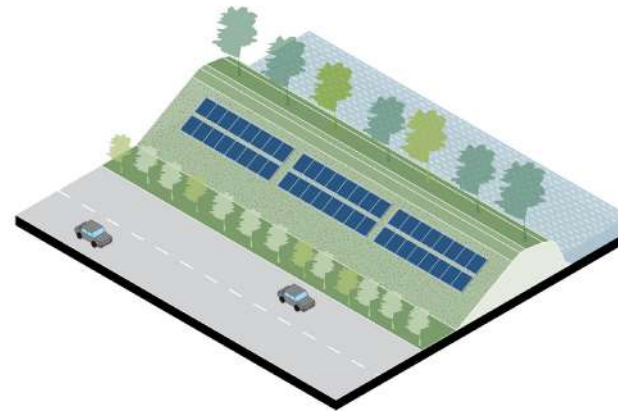


ZON OP INFRASTRUCTUUR



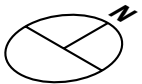
OVERKAPPING PARKEERTERREIN

Gemiddelde hellingshoek	11°
Gemiddelde oriëntatie t.o.v zuid	45°
Cover ratio dichtste pakking	0,75
Gemiddelde rand- en obstakelfractie	0,05
Projectie paneel op horizontaal vlak	0,98
Paneeloppervlak per grondoppervlak	0,73
Energieopbrengst per gebruiksoppervlak	147 GWh/km ² /jr

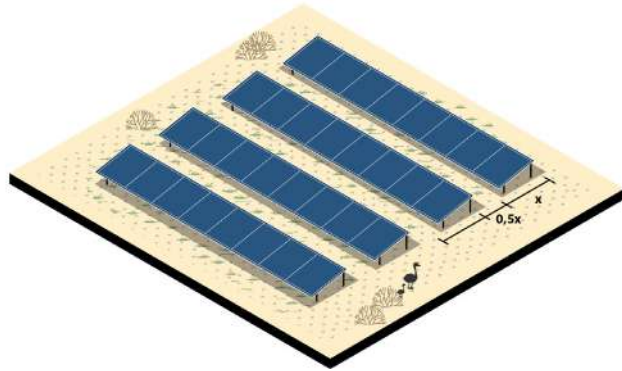


STORTPLAATSEN, DIJKEN EN WALLEN

Gemiddelde hellingshoek	20°
Gemiddelde oriëntatie t.o.v zuid	45°
Cover ratio dichtste pakking	0,9
Gemiddelde rand- en obstakelfractie	0,5
Projectie paneel op horizontaal vlak	0,94
Paneeloppervlak per grondoppervlak	0,48
Energieopbrengst per gebruiksoppervlak	106 GWh/km ² /jr

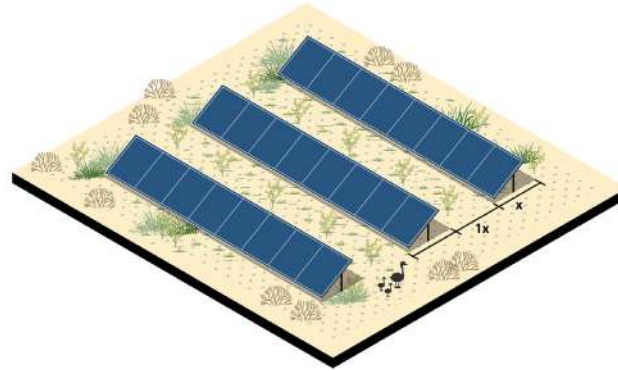


ZON IN LANDSCHAP



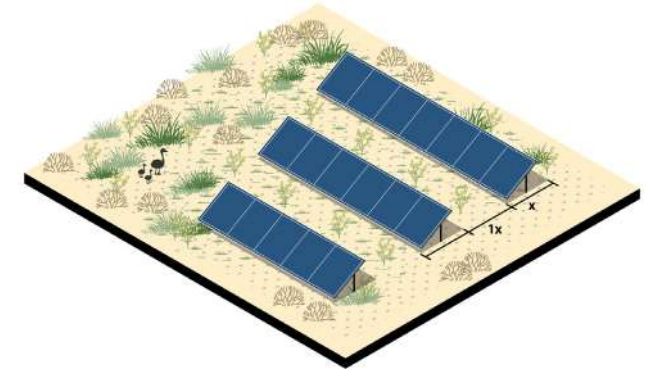
ZUID 11,5°

Gemiddelde hellingshoek	11,5°
Gemiddelde oriëntatie t.o.v zuid	22,5°
Cover ratio dichtste pakking	0,75
Gemiddelde rand- en obstakelfractie	0,15
Projectie paneel op horizontaal vlak	0,98
Paneeloppervlak per grondoppervlak	0,65
Energieopbrengst per gebruiksooppervlak	142 GWh/km ² /jr



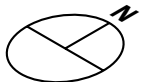
ZUID 30° (INTENSIEF)

Gemiddelde hellingshoek	30°
Gemiddelde oriëntatie t.o.v zuid	22,5°
Cover ratio dichtste pakking	0,50
Gemiddelde rand- en obstakelfractie	0,15
Projectie paneel op horizontaal vlak	0,87
Paneeloppervlak per grondoppervlak	0,49
Energieopbrengst per gebruiksooppervlak	115 GWh/km ² /jr

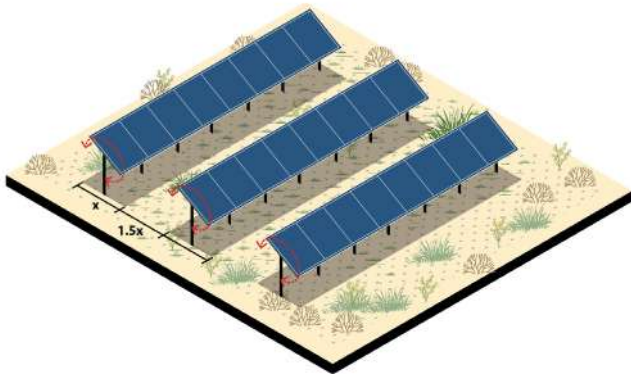


ZUID 30° (EXTENSIEF)

Gemiddelde hellingshoek	30°
Gemiddelde oriëntatie t.o.v zuid	22,5°
Cover ratio dichtste pakking	0,50
Gemiddelde rand- en obstakelfractie	0,50
Projectie paneel op horizontaal vlak	0,87
Paneeloppervlak per grondoppervlak	0,29
Energieopbrengst per gebruiksooppervlak	68 GWh/km ² /jr



ZON IN LANDSCHAP



ZONVOLGEND ENKELASSIG BIFACIAAL

Gemiddelde hellingshoek	variabel
Gemiddelde oriëntatie t.o.v zuid	variabel
Cover ratio dichtste pakking	0,35
Gemiddelde rand- en obstakelfractie	0,15
Projectie paneel op horizontaal vlak	1,00
Paneeloppervlak per grondoppervlak	0,30
Energieopbrengst per gebruiksoppervlak	86 GWh/km ² /jr



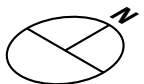
OOST-WEST (INTENSIEF)

Gemiddelde hellingshoek	11,5°
Gemiddelde oriëntatie t.o.v zuid	90°
Cover ratio dichtste pakking	0,92
Gemiddelde rand- en obstakelfractie	0,15
Projectie paneel op horizontaal vlak	0,98
Paneeloppervlak per grondoppervlak	0,80
Energieopbrengst per gebruiksoppervlak	159 GWh/km ² /jr

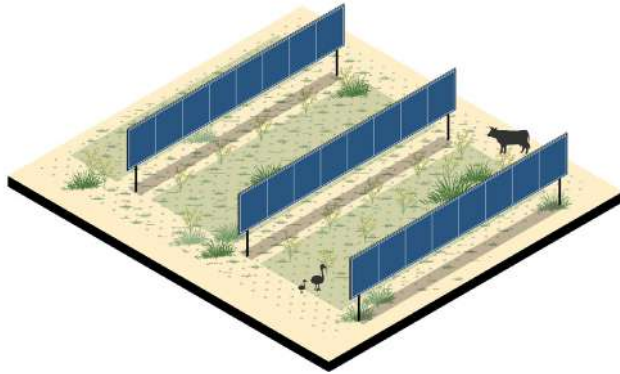


OOST-WEST (EXTENSIEF)

Gemiddelde hellingshoek	11,5°
Gemiddelde oriëntatie t.o.v zuid	90°
Cover ratio dichtste pakking	0,92
Gemiddelde rand- en obstakelfractie	0,50
Projectie paneel op horizontaal vlak	0,98
Paneeloppervlak per grondoppervlak	0,47
Energieopbrengst per gebruiksoppervlak	93 GWh/km ² /jr

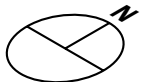


ZON IN LANDSCHAP

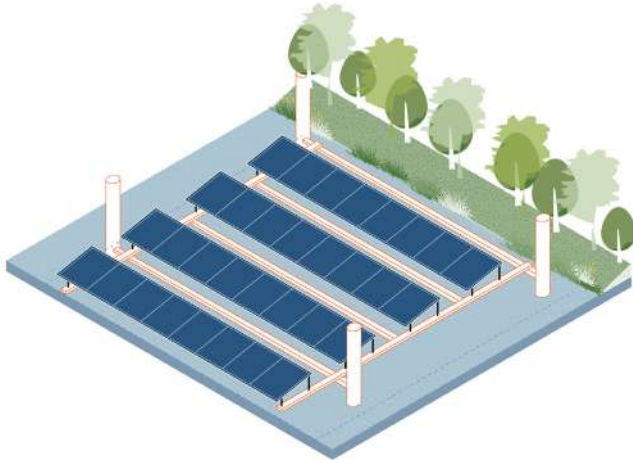


BIFACIAL VERTICAAL

Gemiddelde hellingshoek	90°
Gemiddelde oriëntatie t.o.v zuid	90°
Cover ratio dichtste pakking	niet te bepalen
Gemiddelde rand- en obstakelfractie	0,15
Projectie paneel op horizontaal vlak	niet te bepalen
Paneeloppervlak per grondoppervlak	0,17
Energieopbrengst per gebruiksoppervlak	44 GWh/km ² /jr



ZON OP WATER



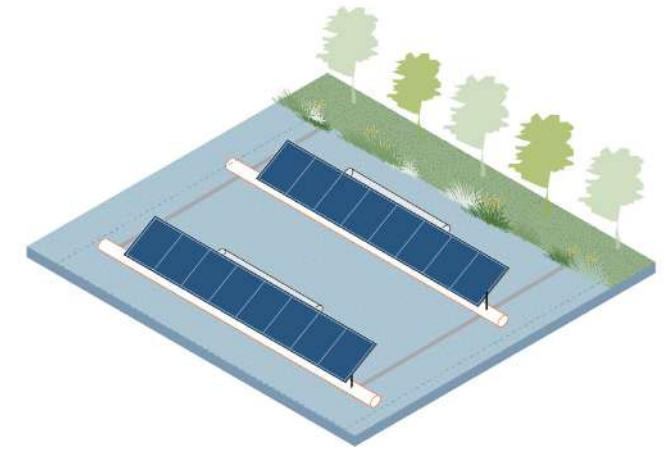
ZUID 11°

Gemiddelde hellingshoek	11,5°
Gemiddelde oriëntatie t.o.v zuid	22,5°
Cover ratio dichtste pakking	0,75
Gemiddelde rand- en obstakelfractie	0,10
Projectie paneel op horizontaal vlak	0,98
Paneeloppervlak per grondoppervlak	0,69
Energieopbrengst per gebruiksoppervlak	151 GWh/km ² /jr



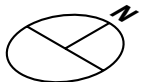
ZUID 30° (INTENSIEF)

Gemiddelde hellingshoek	30°
Gemiddelde oriëntatie t.o.v zuid	22,5°
Cover ratio dichtste pakking	0,50
Gemiddelde rand- en obstakelfractie	0,10
Projectie paneel op horizontaal vlak	0,87
Paneeloppervlak per grondoppervlak	0,52
Energieopbrengst per gebruiksoppervlak	122 GWh/km ² /jr

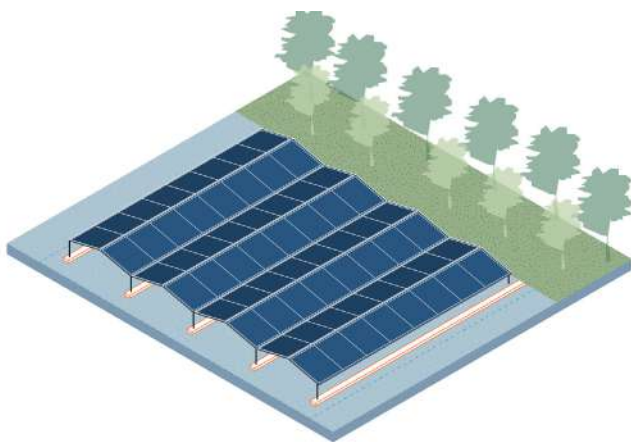


ZUID 30° (EXTENSIEF)

Gemiddelde hellingshoek	30°
Gemiddelde oriëntatie t.o.v zuid	22,5°
Cover ratio dichtste pakking	0,30
Gemiddelde rand- en obstakelfractie	0,10
Projectie paneel op horizontaal vlak	0,87
Paneeloppervlak per grondoppervlak	0,31
Energieopbrengst per gebruiksoppervlak	73 GWh/km ² /jr

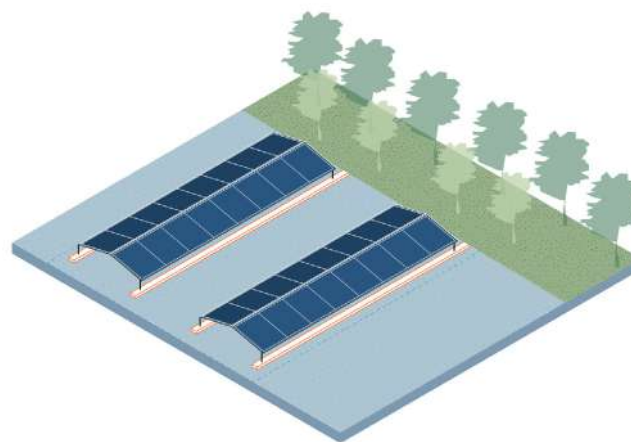


ZON OP WATER



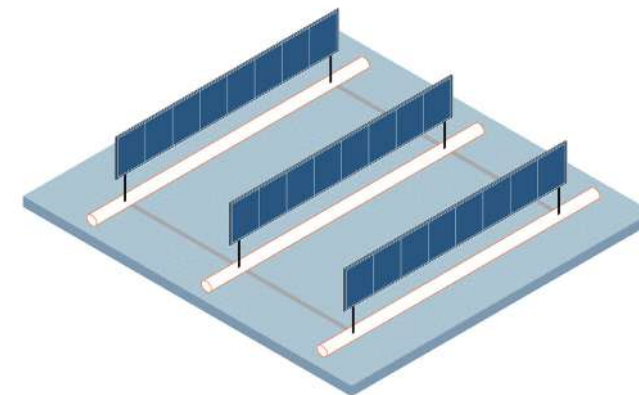
OOST-WEST (INTENSIEF)

Gemiddelde hellingshoek	11,5°
Gemiddelde oriëntatie t.o.v zuid	90°
Cover ratio dichtste pakking	0,92
Gemiddelde rand- en obstakelfractie	0,10
Projectie paneel op horizontaal vlak	0,98
Paneeloppervlak per grondoppervlak	0,84
Energieopbrengst per gebruiksoppervlak	169 GWh/km ² /jr



OOST-WEST (EXTENSIEF)

Gemiddelde hellingshoek	11,5°
Gemiddelde oriëntatie t.o.v zuid	90°
Cover ratio dichtste pakking	0,50
Gemiddelde rand- en obstakelfractie	0,10
Projectie paneel op horizontaal vlak	0,98
Paneeloppervlak per grondoppervlak	0,46
Energieopbrengst per gebruiksoppervlak	92 GWh/km ² /jr

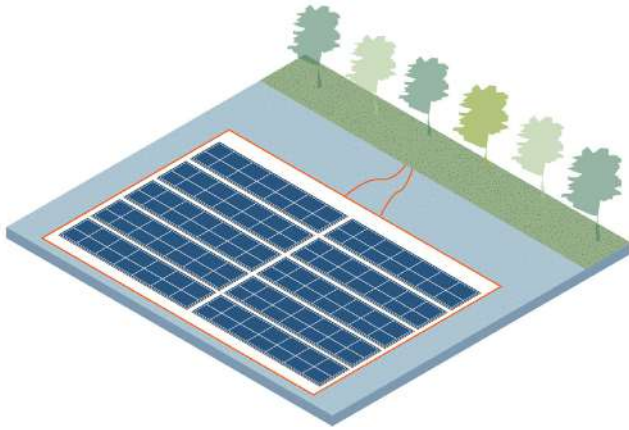


BIFACIAL VERTICAAL

Gemiddelde hellingshoek	90°
Gemiddelde oriëntatie t.o.v zuid	90°
Cover ratio dichtste pakking	niet te bepalen
Gemiddelde rand- en obstakelfractie	0,10
Projectie paneel op horizontaal vlak	niet te bepalen
Paneeloppervlak per grondoppervlak	0,18
Energieopbrengst per gebruiksoppervlak	46 GWh/km ² /jr

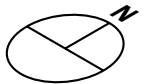


ZON OP WATER



PLAT OP PONTON

Gemiddelde hellingshoek	10°
Gemiddelde oriëntatie t.o.v zuid	variabel
Cover ratio dichtste pakking	0,50
Gemiddelde rand- en obstakelfractie	0,02
Projectie paneel op horizontaal vlak	0,98
Paneeloppervlak per grondoppervlak	0,5
Energieopbrengst per gebruiksoppervlak	100 GWh/km ² /jr



BIJLAGE C. KRUISTABEL RUIMTELIJKE CATEGORIEËN EN SYSTEEMTYPOLOGIEËN (70 EN 200 TWH SCENARIO'S) GEBOUWEN

	Typologisch gemiddelde opbrengst (GWh/km ² /jr)	Geïnstalleerd vermogen (MWp/km ²)	Woning zuid dak (BAPV)	Woning zuid dak (BIPV)	Woning noord dak (BAPV)	Woning noord dak (BIPV)	Woning oost-west dak (BAPV)	Woning oost-west dak (BIPV)	Woning plat dak zuid	Woning plat dak oost-west	Woning gevel zuid	Woning gevel oost-west	Utiliteit plat dak flex	Utiliteit plat dak oost-west	Utiliteit plat dak zuid	Utiliteit complexe dakvorm	Utiliteit gevel zuid	Utiliteit gevel oost-west	Agrarische schuur oost-west	Agrarische schuur zuid	Agrarische schuur noord
Daken van gebouwen																					
Grondgebonden woningen (daken)	141	189	15%	5%	15%	5%	30%	10%	10%	10%											
Gestapelde bouw (daken)	106	127							50%	50%											
Commerciële utiliteit	123	149											20%	50%	20%	10%					
Publieke utiliteit	123	149											20%	50%	20%	10%					
Industrie gebouwen	113	137											10%	50%	10%	30%					
Grote bijgebouwen (>20 m ²)	178	220											10%	10%	0%				40%	20%	20%
Kleine bijgebouwen (<20 m ²)	106	127							50%	50%											
Overige daken	149	194						50%						50%							
Gevels van gebouwen																					
Grondgebonden woningen gevels	31	56									33%	67%									
Gestapelde bouw gevels	46	85									17%	33%					17%	33%			
Utiliteit en industrie vastgoed gevels	62	113															33%	67%			

Deze tabel bevat de typologiemix voor de varianten voor 2050. Om het ruimtebeslag van de in 2020 en in 2030 geplaatste systemen te bepalen zijn een aantal wijzigingen gedaan ten opzichte van deze mix. Zo zijn de innovatievere typologieën die naar verwachting pas na 2030 goed beschikbaar zijn niet gebruikt, is er voor een groter aandeel intensieve parken op land gekozen en zijn er voornamelijk zuid en oost-west daken ingezet en slechts een klein deel noord daken. Deze aannames berusten op een eigen inschatting van de auteurs en zijn niet uitgebreid onderzocht.

BIJLAGE C. VERVOLG

INFRA EN LANDSCHAP

	Typologisch gemiddelde opbrengst (GWh/km ² /jr)	Geïnstalleerd vermogen (MWp/km ²)	Wegdek	Geluidsscherm bifacial	Voer- of vaartuigen	Overkapping parkeerterrein	Stortplaatsen, dijken en wallen	Zuid 11,5°	Zuid 30° (intensief)	Zuid 30° (extensief)	Oost-west (intensief)	Veld oost-west (extensief)	Bifacial verticaal (extensief)	Zonvolgend enkelassig bifaciaal
Infrastructuur														
Rijbaan	150	186	100%											
Parkeerterrein	147	169	10%			90%								
Fietspad	149	182	80%			20%								
Voetpad	150	186	100%											
Berm en verkeerseilanden	150	186	100%											
Spoorbaan	0	0												
Landingsbaan	0	0												
Overige verhard terrein	147	169	10%			90%								
Stortplaatsen	106	110					100%							
Erven woningen	0	0												
Erven bedrijven en overig	140	163	30%			50%			5%	10%			5%	
Geluidschermen	208	200		100%										
Voer- en vaartuigen	38	68			100%									
Landschap														
Agrarisch terrein - grasland	98	98						10%	20%	20%	10%	10%	10%	20%
Agrarisch terrein - akkerland	98	98						10%	20%	20%	10%	10%	10%	20%
Agrarisch terrein - boom en fruitteelt	44	39											100%	
Erven boerderijen	79	82						0%	0%	25%	25%	0%	50%	0%
Bos	0	0												
Open natuur	0	0												
Erven natuur	0	0												
Recreatie en groenvoorziening	66	60								50%			25%	25%
overig (on)begroeid terrein	0	0												

BIJLAGE C. VERVOLG

WATER

	Typologisch gemiddelde opbrengst (GWh/km ² /jr)	Geïnstalleerd vermogen (MWp/km ²)	Plat op ponton	Zuid 30° (intensief)	Zuid 30° (extensief)	Oost-west (intensief)	Oost-west (extensief)	Zuid 11,5°	Bifacial verticaal
Binnenwater	0	0							
Waterdeel golf cat 3 natura 2000	95	100	25%	25%	25%	0%	25%	0%	0%
Waterdeel golf cat 1-2 natura 2000	90	92		25%	50%	0%	25%	0%	0%
Waterdeel golf cat. 1-2 overig	98	101		25%	50%	10%	15%	0%	0%
Rivier, kanaal, sloot	0	0							
Bassin	154	177		0%	0%	80%	20%	0%	0%
Buitenwater (excl. EEZ)	0	0							
Golf cat 3 (Waddenzee Ooster- en Westerschelde, Eems, Dollard)	92	105	50%				50%		
Gemeentelijk ingedeelde gedeelte van de Noordzee	92	105	50%				50%		
Exclusieve economische zone NL (Noordzee)	92	105	50%				50%		

BIJLAGE D. UITWERKING WHAT IF 1

70 TWH FOCUS OP DAKEN EN INFRA

Bodemgebruikstyp	totaal oppervlak [km ²]	Fractie PV bestemming	Ruimtebeslag PV [km ²]	Jaarlijkse energie opbrengst als functie van typologie mix en module rendement [kWh/m ² /jr]	Zonnestroom potentieel [TWh/jr]	Geïnstalleerd vermogen [GWp]
Totaal NL			476		70.0	85.2
Daken (en gevels) woningen	544	30%	165		24.3	29.6
Daken (en gevels) overige gebouwen (niet kassen)	606	30%	180		28.3	35.9
infra (+erven)	4,191	1.4%	60		10.0	12.1
landschap	27,517	0.14%	38		3.7	3.7
binnenwater	5,160	0.65%	34		3.7	4.0
buitenwater	61,502	0.00%	0		0.0	0.0
Bodemgebruikstyp	totaal oppervlak [km ²]	Fractie PV bestemming	Ruimtebeslag PV [km ²]	Jaarlijkse energie opbrengst als functie van typologie mix en module rendement [kWh/m ² /jr]	Zonnestroom potentieel [TWh/jr]	Geïnstalleerd vermogen [GWp]
Daken van gebouwen (niet kassen)	1,151		345		48.7	61.9
Grondgebonden woningen (daken)	457	30 %	139	141	19.6	26.3
Gestapelde bouw (daken)	87	30 %	26	106	2.8	3.3
Commerciële utiliteit	102	35 %	36	123	4.4	5.3
Publieke utiliteit	31	35 %	11	123	1.3	1.6
Industrie gebouwen	174	20 %	35	113	3.9	4.8
Grote bijgebouwen (>20 m2)	246	33 %	80	178	14.2	17.6
Kleine bijgebouwen (<20 m2)	24	35 %	8	106	0.9	1.1
Overige daken	29	35 %	10	149	1.5	2.0
Kassen	135	0.0 %	0	0	0.0	0.0
Gevels van gebouwen	2,200		88		3.9	7.1
Grondgebonden woningen gevels	1,100	4 %	44	31	1.4	2.5
Gestapelde bouw gevels	300	4 %	12	46	0.6	1.0
Utiliteit en industrie vastgoed gevels	800	4 %	32	62	2.0	3.6
Infrastructuur	4,191		60		8.8	10.4
Rijbaan	992	0 %	0	150	0.0	0.0
Parkeerterrein	114	20 %	23	147	3.4	3.9
Fietspad	96	20 %	19	149	2.9	3.5
Voetpad	298	0 %	0	150	0.0	0.0
Berm en verkeerseilanden	610	1 %	6	150	0.9	1.1
Spoorbaan	45	0 %	0	0	0.0	0.0
Landingsbaan	9	0 %	0	0	0.0	0.0
Overige verhard terrein	184	5 %	9	147	1.4	1.6
Stortplaatsen	5	50 %	3	106	0.3	0.3
Erven woningen	1,003	0 %	0	0	0.0	0.0
Erven bedrijven en overig	833	0 %	0	140	0.0	0.0
Geluidschermen	5	50 %	3		208	0.5
Voer- en vaartuigen	70	25 %	18		38	0.7
Landschap	27,517		38		3.7	3.7
Agrarisch terrein - grasland	10,872	0.2 %	22	98	2.1	2.1
Agrarisch terrein - akkerland	7,905	0.2 %	16	98	1.5	1.5
Agrarisch terrein - boom en fruitteelt	375	0.0 %	0	44	0.0	0.0
Erven boerderijen	1,233	0.0 %	0	79	0.0	0.0
Bos	3,441	0.0 %	0	0	0.0	0.0
Open natuur	1,139	0.0 %	0	0	0.0	0.0
Erven natuur	87	0.0 %	0	0	0.0	0.0
Recreatie en groenvoorziening	1,384	0.0 %	0	66	0.0	0.0
overig onbegroeid natuurlijk terrein	1,081	0.0 %	0	0	0.0	0.0
Binnenwater	5,160		34		3.7	4.0
Waterdeel golf cat 3 natura 2000	2,532	0.0 %	0	95	0.0	0.0
Waterdeel golf cat 1-2 natura 2000	545	0.0 %	0	90	0.0	0.0
Waterdeel golf cat. 1-2 overig	868	3.0 %	26	98	2.5	2.6
Rivier, kanaal, sloot	1,192	0.0 %	0	0	0.0	0.0
Bassin	10	80.0 %	8	154	1.2	1.4
overig water	14	0.0 %	0	0	0.0	0.0
Buitenwater	61,502		0		0.0	0.0
Golf cat 3 (Waddenzee Ooster- en Westerschelde, Ee	2,549	0.0 %	0	92	0.0	0.0
Gemeentelijk ingedeelde gedeelte van de Noordzee	959	0.0 %	0	92	0.0	0.0
Exclusieve economische zone NL (Noordzee)	57,994	0.0 %	0	92	0.0	0.0

70 TWH GEBALANCEERDE MIX

Bodemgebruikstyp	totaal oppervlak [km ²]	Fractie PV bestemming	Ruimtebeslag PV [km ²]	Jaarlijkse energie opbrengst als functie van typologie mix en module rendement [kWh/m ² /jr]	Zonnestroom potentieel [TWh/jr]	Geïnstalleerd vermogen [GWp]
Totaal NL			570		70.0	84.3
Daken (en gevels) woningen	544	15%	82		12.0	14.6
Daken (en gevels) overige gebouwen (niet kassen)	606	15%	90		13.8	17.6
infra (+erven)	4,191	2.4%	100		15.7	18.8
landschap	27,517	0.66%	181		16.7	20.9
binnenwater	5,160	2.28%	117		11.8	12.4
buitenwater	61,502	0.00%	0		0.0	0.0
Bodemgebruikstyp	totaal oppervlak [km ²]	Fractie PV bestemming	Ruimtebeslag PV [km ²]	Jaarlijkse energie opbrengst als functie van typologie mix en module rendement [kWh/m ² /jr]	Zonnestroom potentieel [TWh/jr]	Geïnstalleerd vermogen [GWp]
Daken van gebouwen (niet kassen)	1,151		171		23.9	30.4
Grondgebonden woningen (daken)	457	15 %	69	141	9.7	13.0
Gestapelde bouw (daken)	87	15 %	13	106	1.4	1.7
Commerciële utiliteit	102	15 %	15	123	1.9	2.2
Publieke utiliteit	31	15 %	5	123	0.6	0.7
Industrie gebouwen	174	15 %	26	113	2.9	3.5
Grote bijgebouwen (>20 m2)	246	15 %	36	178	6.5	8.0
Kleine bijgebouwen (<20 m2)	24	15 %	4	106	0.4	0.5
Overige daken	29	15 %	4	149	0.7	0.8
Kassen	135	0.0 %	0	0	0.0	0.0
Gevels van gebouwen	2,200		44		1.9	3.5
Grondgebonden woningen gevels	1,100	2 %	22	31	0.7	1.2
Gestapelde bouw gevels	300	2 %	6	46	0.3	0.5
Utiliteit en industrie vastgoed gevels	800	2 %	16	62	1.0	1.8
Infrastructuur	4,191		100		14.5	17.1
Rijbaan	992	0 %	0	150	0.0	0.0
Parkeerterrein	114	20 %	23	147	3.4	3.9
Fietspad	96	20 %	19	149	2.9	3.5
Voetpad	298	0 %	0	150	0.0	0.0
Berm en verkeerseilanden	610	3 %	18	150	2.7	3.4
Spoorbaan	45	0 %	0	0	0.0	0.0
Landingsbaan	9	0 %	0	0	0.0	0.0
Overige verhard terrein	184	2 %	4	147	0.5	0.6
Stortplaatsen	5	50 %	3	106	0.3	0.3
Erven woningen	1,003	0 %	0	0	0.0	0.0
Erven bedrijven en overig	833	4 %	33	140	4.7	5.4
Geluidschermen	5	50 %	3		208	0.5
Voer- en vaartuigen	70	25 %	18		38	0.7
Landschap	27,517		181		16.7	20.9
Agrarisch terrein - grasland	10,872	0.7 %	76	98	7.4	7.4
Agrarisch terrein - akkerland	7,905	0.7 %	55	98	5.4	5.4
Agrarisch terrein - boom en fruitteelt	375	0.0 %	0	44	0.0	0.0
Erven boerderijen	1,233	4.0 %	49	79	3.9	8.0
Bos	3,441	0.0 %	0	0	0.0	0.0
Open natuur	1,139	0.0 %	0	0	0.0	0.0
Erven natuur	87	0.0 %	0	0	0.0	0.0
Recreatie en groenvoorziening	1,384	0.0 %	0	66	0.0	0.0
overig onbegroeid natuurlijk terrein	1,081	0.0 %	0	0	0.0	0.0
Binnenwater	5,160		117		11.8	12.4
Waterdeel golf cat 3 natura 2000	2,532	2.0 %	51	95	4.8	5.1
Waterdeel golf cat 1-2 natura 2000	545	0.0 %	0	90	0.0	0.0
Waterdeel golf cat. 1-2 overig	868	6.8 %	59	98	5.8	6.0
Rivier, kanaal, sloot	1,192	0.0 %	0	0	0.0	0.0
Bassin	10	80.0 %	8	154	1.2	1.4
overig water	14	0.0 %	0	0	0.0	0.0
Buitenwater	61,502		0		0.0	0.0
Golf cat 3 (Waddenzee Ooster- en Westerschelde, Ee	2,549	0.0 %	0	92	0.0	0.0
Gemeentelijk ingedeelde gedeelte van de Noordzee	959	0.0 %	0	92	0.0	0.0
Exclusieve economische zone NL (Noordzee)	57,994	0.0 %	0	92	0.0	0.0

200 TWH FOCUS OP DAKEN EN INFRA

Bodemgebruikstyp	totaal oppervlak [km ²]	Fractie PV bestemming	Ruimtebeslag PV [km ²]	Jaarlijkse energie opbrengst als functie van typologie mix en module rendement [kWh/m ² /jr]	Zonnestroom potentieel [TWh/jr]	Geïnstalleerd vermogen [GWp]
Totaal NL			1314		200.0	246.1
Daken (en gevels) woningen	544	80%	435		65.3	78.0
Daken (en gevels) overige gebouwen (niet kassen)	606	80%	483		78.3	102.0
infra (+erven)	4,191	7.7%	324		49.0	58.5
landschap	27,517	0.14%	38		3.7	3.7
binnenwater	5,160	0.65%	34		3.7	4.0
buitenwater	61,502	0.00%	0		0.0	0.0
Bodemgebruikstyp	totaal oppervlak [km ²]	Fractie PV bestemming	Ruimtebeslag PV [km ²]	Jaarlijkse energie opbrengst als functie van typologie mix en module rendement [kWh/m ² /jr]	Zonnestroom potentieel [TWh/jr]	Geïnstalleerd vermogen [GWp]
Daken van gebouwen (niet kassen)	1,151		919		127.5	161.9
Grondgebonden woningen (daken)	457	80 %	366	141	51.7	69.1
Gestapelde bouw (daken)	87	80 %	70	106	7.4	8.9
Commerciële utiliteit	102	83 %	85	123	10.4	12.6
Publieke utiliteit	31	83 %	26	123	3.2	3.8
Industrie gebouwen	174	83 %	144	113	16.3	19.7
Grote bijgebouwen (>20 m2)	246	75 %	185	178	32.9	40.6
Kleine bijgebouwen (<20 m2)	24	83 %	20	106	2.1	2.5
Overige daken	29	83 %	24	149	3.6	4.7
Kassen	135	0.0 %	0	0	0.0	0.0
Gevels van gebouwen	2,200		330		16.1	29.3
Grondgebonden woningen gevels	1,100	10 %	110	31	3.4	6.2
Gestapelde bouw gevels	300	20 %	60	46	2.8	5.1
Utiliteit en industrie vastgoed gevels	800	20 %	160	62	9.9	18.0
Infrastructuur	4,191		324		47.1	55.6
Rijbaan	992	0 %	0	150	0.0	0.0
Parkeerterrein	114	80 %	92	147	13.5	15.5
Fietspad	96	30 %	29	149	4.3	5.3
Voetpad	298	0 %	0	150	0.0	0.0
Berm en verkeerseilanden	610	12 %	73	150	11.0	13.6
Spoorbaan	45	0 %	0	0	0.0	0.0
Landingsbaan	9	0 %	0	0	0.0	0.0
Overige verhard terrein	184	15 %	28	147	4.1	4.7
Stortplaatsen	5	50 %	3	106	0.3	0.3
Erven woningen	1,003	0 %	0	0	0.0	0.0
Erven bedrijven en overig	833	12 %	100	140	14.0	16.3
Geluidschermen	5	50 %	3	208	0.5	0.5
Voer- en vaartuigen	70	50 %	35	38	1.3	2.4
Landschap	27,517		38		3.7	3.7
Agrarisch terrein - grasland	10,872	0.2 %	22	98	2.1	2.1
Agrarisch terrein - akkerland	7,905	0.2 %	16	98	1.5	1.5
Agrarisch terrein - boom en fruitteelt	375	0.0 %	0	44	0.0	0.0
Erven boerderijen	1,233	0.0 %	0	79	0.0	0.0
Bos	3,441	0.0 %	0	0	0.0	0.0
Open natuur	1,139	0.0 %	0	0	0.0	0.0
Erven natuur	87	0.0 %	0	0	0.0	0.0
Recreatie en groenvoorziening	1,384	0.0 %	0	66	0.0	0.0
overig onbegroeid natuurlijk terrein	1,081	0.0 %	0	0	0.0	0.0
Binnenwater	5,160		34		3.7	4.0
Waterdeel golf cat 3 natura 2000	2,532	0.0 %	0	95	0.0	0.0
Waterdeel golf cat 1-2 natura 2000	545	0.0 %	0	90	0.0	0.0
Waterdeel golf cat. 1-2 overig	868	3.0 %	26	98	2.5	2.6
Rivier, kanaal, sloot	1,192	0.0 %	0	0	0.0	0.0
Bassin	10	80.0 %	8	154	1.2	1.4
overig water	14	0.0 %	0	0	0.0	0.0
Buitenwater	61,502		0		0.0	0.0
Golf cat 3 (Waddenzee Ooster- en Westerschelde, Ee	2,549	0.0 %	0	92	0.0	0.0
Gemeentelijk ingedeelde gedeelte van de Noordzee	959	0.0 %	0	92	0.0	0.0
Exclusieve economische zone NL (Noordzee)	57,994	0.0 %	0	92	0.0	0.0

200 TWH GEBALANCEERDE MIX

Bodemgebruikstyp	totaal oppervlak [km ²]	Fractie PV bestemming	Ruimtebeslag PV [km ²]	Jaarlijkse energie opbrengst als functie van typologie mix en module rendement [kWh/m ² /jr]	Zonnestroom potentieel [TWh/jr]	Geïnstalleerd vermogen [GWp]
Totaal NL			1650		200.0	234.8
Daken (en gevels) woningen	544	40%	218		32.4	39.0
Daken (en gevels) overige gebouwen (niet kassen)	606	40%	243		39.1	49.8
infra (+erven)	4,191	6.5%	271		41.4	49.5
landschap	27,517	1.59%	437		41.5	46.7
binnenwater	5,160	4.81%	248		24.2	25.4
buitenwater	61,502	0.38%	232		21.5	24.4
Bodemgebruikstyp	totaal oppervlak [km ²]	Fractie PV bestemming	Ruimtebeslag PV [km ²]	Jaarlijkse energie opbrengst als functie van typologie mix en module rendement [kWh/m ² /jr]	Zonnestroom potentieel [TWh/jr]	Geïnstalleerd vermogen [GWp]
Daken van gebouwen (niet kassen)	1,151		461		65.7	83.4
Grondgebonden woningen (daken)	457	40 %	183	141	25.9	34.5
Gestapelde bouw (daken)	87	40 %	35	106	3.7	4.4
Commerciële utiliteit	102	50 %	51	123	6.3	7.6
Publieke utiliteit	31	50 %	16	123	1.9	2.3
Industrie gebouwen	174	20 %	35	113	3.9	4.8
Grote bijgebouwen (>20 m2)	246	47 %	116	178	20.6	25.4
Kleine bijgebouwen (<20 m2)	24	50 %	12	106	1.3	1.5
Overige daken	29	50 %	15	149	2.2	2.8
Kassen	135	0.0 %	0	0	0.0	0.0
Gevels van gebouwen	2,200		132		5.8	10.6
Grondgebonden woningen gevels	1,100	6 %	66	31	2.0	3.7
Gestapelde bouw gevels	300	6 %	18	46	0.8	1.5
Utiliteit en industrie vastgoed gevels	800	6 %	48	62	3.0	5.4
Infrastructuur	4,191		271		39.5	46.6
Rijbaan	992	0 %	0	150	0.0	0.0
Parkeerterrein	114	80 %	92	147	13.5	15.5
Fietspad	96	30 %	29	149	4.3	5.3
Voetpad	298	0 %	0	150	0.0	0.0
Berm en verkeerseilanden	610	9 %	55	150	8.2	10.2
Spoorbaan	45	0 %	0	0	0.0	0.0
Landingsbaan	9	0 %	0	0	0.0	0.0
Overige verhard terrein	184	10 %	18	147	2.7	3.1
Stortplaatsen	5	50 %	3	106	0.3	0.3
Erven woningen	1,003	0 %	0	0	0.0	0.0
Erven bedrijven en overig	833	9 %	75	140	10.5	12.2
Geluidschermen	5	50 %	3	208	0.5	0.5
Voer- en vaartuigen	70	50 %	35	38	1.3	2.4
Landschap	27,517		437		41.5	46.7
Agrarisch terrein - grasland	10,872	2.0 %	217	98	21.2	21.2
Agrarisch terrein - akkerland	7,905	2.0 %	158	98	15.4	15.4
Agrarisch terrein - boom en fruitteelt	375	0.0 %	0	44	0.0	0.0
Erven boerderijen	1,233	5.0 %	62	79	4.9	10.0
Bos	3,441	0.0 %	0	0	0.0	0.0
Open natuur	1,139	0.0 %	0	0	0.0	0.0
Erven natuur	87	0.0 %	0	0	0.0	0.0
Recreatie en groenvoorziening	1,384	0.0 %	0	66	0.0	0.0
overig onbegroeid natuurlijk terrein	1,081	0.0 %	0	0	0.0	0.0
Binnenwater	5,160		248		24.2	25.4
Waterdeel golf cat 3 natura 2000	2,532	5.0 %	127	95	12.0	12.7
Waterdeel golf cat 1-2 natura 2000	545	5.0 %	27	90	2.5	2.5
Waterdeel golf cat. 1-2 overig	868	10.0 %	87	98	8.5	8.8
Rivier, kanaal, sloot	1,192	0.0 %	0	0	0.0	0.0
Bassin	10	80.0 %	8	154	1.2	1.4
overig water	14	0.0 %	0	0	0.0	0.0
Buitenwater	61,502		232		21.5	24.4
Golf cat 3 (Waddenzee Ooster- en Westerschelde, Ee	2,549	0.0 %	0	92	0.0	0.0
Gemeentelijk ingedeelde gedeelte van de Noordzee	959	0.0 %	0	92	0.0	0.0
Exclusieve economische zone NL (Noordzee)	57,994	0.4 %	232	92	21.5	24.4

EINDNOTEN

1. Intergovernmental Panel on Climate Change, 1990;1996;2001;2007;2014. Assessment reports 1-5
2. United Nations, 2016. Paris Agreement. Paris: United Nations, pp.1-27
3. European Commission, 2015. 2030 Climate & Energy Framework
4. European Commission, 2020. 2030 Climate Target Plan
5. European Commission, 2018. The Commission calls for a climate neutral Europe by 2050
6. Klimaatakkoord, 2019
7. CBS, 2019. Elektriciteitsbalans; aanbod en verbruik. <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/84575NED/table?ts=1595512536876> (geraadpleegd op 23-07-2020).
8. PBL, 2011. Verkenning van routes naar een schone economie in 2050
9. TNO, 2020, P10338, Towards a sustainable energy system for the Netherlands in 2050
10. Berenschot en Kalavasta, 2020. Klimaatneutrale Energiescenario's 2050. Scenariostudie ten behoeve van de Integrale Infrastructuurverkenning 2030-2050
11. EWA & DIMEC, 2019. Energie uit water, concept positioning paper
12. SER, 2008. Kernenergie en een duurzame energievoorziening
13. <https://www.klimaatakkoord.nl/elektriciteit/vraag-en-antwoord/wat-zijn-de-mogelijkheden-voor-kernenergie-als-optie-in-de-energietransitie>
14. Berenschot en Kalavasta, 2020. Nuclear Energy in a Climate Neutral Energy System
15. ENCO, 2020. Possible role of nuclear in the dutch energy mix in the future
16. Kalavasta, 2020. Vergelijking van twee rapporten over de kosten van nucleaire en zon- & windstroom in het Nederlandse energiesysteem
17. SER, 2020. Biomassa in balans. Een duurzaamheidskader voor hoogwaardige inzet van biogrondstoffen
18. De Gemeynt en MSG Sustainable strategies, 2020. Biomassa in perspectief. Joint fact-finding biomassa – een zoektocht naar feiten in een verhit debat
19. CE Delft, 2018. Waterstofroutes Nederland
20. Energiea, 2019. Is de Sahara als groene superdynamo relevant voor de energietransitie in Nederland?
21. CE Delft, 2018. Nationaal potentieel van aquathermie
22. Ecofys, 2017. Overige hernieuwbare energie in Nederland, een potentieelstudie
23. PBL, 2012, VESTA Ruimtelijk energie model voor de gebouwde omgeving data en methoden
24. PBL en DNV-GL, 2014, Het potentieel van PV in de gebouwde omgeving van Nederland
25. Holland Solar, 2015, Ruimte voor zonnestroom in Nederland 2020-2050
26. D. Sijmons et al. , 2017, Energie en Ruimte
27. SEAC, Universiteit Utrecht, TKI UE en RVO, 2017, Roadmap PV-systemen en toepassingen
28. Deloitte, 2018, State-of-the-state onderzoek
29. Quintell intelligence, Energietransitiemodel
30. Witteveen en Bosch et al., 2019, Perspectieven elektriciteit uit water
31. www.zonatlas.nl; www.zonnekaart.nl; regionaal bijv. www.zonnescanbrabant.nl
32. <https://www.regionale-energiestrategie.nl>, geraadpleegd op 31-10-2020
33. <https://www.klimaatakkoord.nl/documenten/publicaties/2019/06/28/klimaatakkoord>
34. Vreugdenhil C., (2014), Een studie naar het potentieel van PV in Nederland, Wageningen: WUR
35. Conclusies van kennissessie georganiseerd door auteurs op 11 maart 2020 met genodigden: Londo, M. (NVDE), Matthijsen, J. (PBL), Van Sark, W. (UU), Sinke, W. (TNO)
36. o.a. Basisregistratie Adressen en Gebouwen (BAG), Basisregistratie Grootschalige Topografie (BGT), Bestand Bodemgebruik (BBG), Basisregistratie Topografie (BRT of Top10)
37. Esri, februari 2020, Arcgisonline – datasets: BAG
38. Esri, januari 2020, Classificatie van woningtypes op basis van de BAG.
39. We hebben hier twee extremen gecheckt: stel er zouden geen noorddaken zijn, dan wordt de opbrengt per m² 7% hoger. In het geval van geen zuiddaken 7% lager.
40. Arcadis, 2017, VORMFACTOREN&KOSTEN Assets KENGETALLEN
41. Esri, februari 2020, Arcgisonline – datasets: BGT
42. <https://www.infomil.nl/onderwerpen/ruimte/functies/zonneweide/>, geraadpleegd 31-10-2020
43. <https://aandeslagmetdeomgevingswet.nl/praktijksituaties/zonnepanelen/toelaten/natuur/>, geraadpleegd 31-10-2020
44. CPB/PBL 2015, Nederland in 2030 en 2050, Twee referentie scenario's, toekomstverkenning welvaart en leefomgeving
45. <https://www.topsectorenergie.nl/urban-energy/innovatieprogramma/mmips-voor-de-gebouwde-omgeving/mmip2>

46. Solar Magazine, 2019, <https://solarmagazine.nl/nieuws-zonne-energie/i19653/nationale-consortia-zon-op-sunday-2019-van-niche-naar-mainstream-leidt-tot-andere-verantwoordelijkheden>, geraadpleegd 31-10-2020
47. Stremke en Schöbel, 2019
48. <https://www.topsectorenergie.nl/ecologisch-meetadvies-zon-op-water>
49. <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/kamerstukken/2021/02/02/kamerbrief-over-routekaart-zon-op-water>
50. Het gaat hier dus in principe over horizontaal ruimtebeslag. Alleen voor verticale oppervlakken zoals gevels zijn we geïnteresseerd in de opbrengst per verticaal oppervlak
51. Merk op dat voor hellende oppervlakken zoals daken de paneeldichtheid betrekking heeft op de horizontale projectie van het oppervlak. De rand- en obstakelfractie en bedekkingsgraad zijn empirisch bepaald met behulp van satellietfoto's van een aantal systemen. Een dergelijke foto is in feite een projectie in het horizontaal vlak.
52. IHS Markit, 2019, Predictions for the PV industry
53. xSi PV technologies roadmap, TKI and ECN, 2016
54. ITRPV, 2019
55. Fraunhofer ISE (2015): Current and Future Cost of Photovoltaics. Long-term Scenarios for Market Development, System Prices and LCOE of Utility-Scale PV Systems. Study on behalf of Agora Energiewende
56. Fraunhofer ISE (2015): Current and Future Cost of Photovoltaics. Long-term Scenarios for Market Development, System Prices and LCOE of Utility-Scale PV Systems. Study on behalf of Agora Energiewende
57. IEC61724
58. Van Sark, Opbrengst van Zonnestroomsystemen in Nederland, 2014
59. F. Sonmez et al. Fast and accurate ray-casting-based view factor estimation method for complex geometries, Solar energy and materials, 2019
60. PVGIS, https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#PVP, geraadpleegd op 31-10-2020
61. KNMI, <https://www.knmi.nl/over-het-knmi/nieuws/vier-uur-zon-per-dag-op-vakantie-naar-het-zuiden-of-toch-in-nederland-blijven#:~:text=Klimaatverandering%20kan%20invloed%20hebben%20op,aarde%20niet%20veel%20zal%20veranderen.&text=De%20gemiddelde%20instraling%20van%20de,zon%20dan%20in%20het%20binnenland>, geraadpleegd op 23-01-2021
62. T. Huldt, Estimating Solar Radiation and PV System Performance, the PVGIS Approach, EC - JRC
63. Module bestaand tandemcellen, twee op elkaar gestapelde zonnecellen
64. www.coolback.com
65. Van Sark en Reich, 2012, review of pv performance ratio development
66. Reich et al., 2012, Performance ratio revisited, is PR>90% realistic?
67. S. Golroodbari en W. van Sark, Prog Photovolt Res Appl. 2020;28:873–886, Simulation of performance differences between offshore and land-based photovoltaic systems
68. A. van der Ham, Lightyear, PV in mobility, presentatie Sunday 2019
69. I. Romijn, ECN, Bifacial PV now and in the future, presentatie Sunday
70. Operational Performance of Grid-Connected PV-systems.
71. NREL, 2019, Energy Storage, Days of Service sensitivity analysis
72. NREL, 2019, Energy Storage, Days of Service sensitivity analysis
73. Berenschot en Kalavasta, 2020. Klimaatneutrale Energiescenario's 2050. Scenariostudie ten behoeve van de Integrale Infrastructuurverkenning 2030-2050
74. LUT university en SolarPower Europe, 2020, 100% renewable Europe
75. André Slump, Zonne-energie potentieel op daken in Assen, 2010
76. zonatlas.nl
77. Potentie van zonne-energie op daken Flevoland, Iris Reimerink en Martin Tilleman, 2020
78. <https://solarmagazine.nl/nieuws-zonne-energie/i21951/kadaster-stelt-3d-basisbestand-nederland-beschikbaar-potentie-zonne-energie-in-beeld>
79. DNE Research, Nationaal Solar Trendrapport 2021
80. A. Kaat, Energieia 26-10-2020, 'Wat voegen de RES'en eigenlijk nog toe?'
81. Persoonlijke communicatie met Jan Matthijsen
82. PBL, Klimaat en Energieverkenning 2020
83. Monitor Concept RES
84. CBS, Zonnestroom, vermogen bedrijven en woningen
85. RVO, SDE-projecten in beheer
86. Netbeheer Nederland, 2020, Integrale Infrastructuurverkenning 2030-2050
87. TNO, 2020, P10338, Towards a sustainable energy system for the Netherlands in 2050
88. <https://www.solarpowereurope.org/100-renewable-europe/>
89. PBL, 2018, De toekomst van de Noordzee, De Noordzee in 2030 en 2050: een scenariostudie

90. STOWA, 2018, Handreiking vergunningsverlening voor drijvende zonneparken op water
91. <https://solarmagazine.nl/nieuws-zonne-energie/i20125/oceans-of-energy-levert-op-noordzee-eerste-drijvende-zonnepark-op-zee-op>, geraadpleegd op 2020-10-28
92. Zie bijvoorbeeld het innovatieproject PV SolaRoad infrastructuur, <https://projecten.topsectorenergie.nl/projecten/pv-solaroad-infrastructuur-00016551>, geraadpleegd op 01-11-2020
93. <https://www.easypath.nl/product/solarpath/>, geraadpleegd op 01-11-2020
94. <https://www.wattwaybycolas.com/en/homepage.html>, geraadpleegd op 01-11-2020
95. <https://solarmagazine.nl/nieuws-zonne-energie/i18969/reparatie-solaroad-niet-mogelijk-provincie-zuid-holland-beeindigt-pilot>, geraadpleegd op 01-11-2020
96. <https://solarmagazine.nl/nieuws-zonne-energie/i18509/bam-infra-stopt-proef-met-zonnewegdek-potentie-aanwezig-maar-verdere-ontwikkeling-nodig>, geraadpleegd op 01-11-2020
97. Ook voor ramen worden zonnestroom systemen ontwikkeld. Zie bijvoorbeeld <https://physee.eu/> (geraadpleegd op 01-11-2020). Rendementen zijn hier doorgaans echter onder de 5% en er treed altijd absorptie van zichtbaar licht op, wat de ramen minder geschikt maakt voor toepassing in woningen. Toepassingen zijn er vooral in de kantoorbouw. Gegeven het kleine potentieel is dit niet apart opgenomen.
98. <https://www.cbs.nl/nl-nl/achtergrond/2018/14/energieverbruik-van-particuliere-huishoudens>, geraadpleegd augustus 2020.
99. Berenschot en Kalavasta, 2020. Klimaatneutrale Energiescenario's 2050. Scenariostudie ten behoeve van de Integrale Infrastructuurverkenning 2030-2050
100. Londo, M., 2019, Alternatives for current net metering policy for solar PV in the Netherlands: A comparison of impacts on business case and purchasing behaviour of private homeowners, and on governmental costs
101. TNO 2019 P11928 Effect afbouw salderingsregeling op de terugverdientijd van investeringen in zonnepanelen
102. Dit is een combinatie van platte daken van woningen en platte daken van utiliteitsgebouwen die binnen de BBG categorie woongerrein liggen.
103. Catalano, Chiara & Baumann, Nathalie. (2017). Biosolar Roofs: A Symbiosis between Biodiverse Green Roofs and Renewable Energy. City Green. 42-49.

COLOFON

Publicatiedatum

Maart 2021

Auteurs

Wijnand van Hooff, *TKI Urban Energy*

Taco Kuijers, *Generation.Energy*

Robin Quax, *TKI Urban Energy*

Jaap Witte, *Generation.Energy*

Expertteam

Marc Londo, *Nederlandse Vereniging Duurzame Energie*

Jan Matthijsen, *Planbureau voor de Leefomgeving*

Wilfried van Sark, *Universiteit Utrecht*

Wim Sinke, *TNO*

Opmaak en illustraties

Anubhuti Chandna, *Generation.Energy*

“Ruimtelijk potentieel van zonnestroom in Nederland” is opgesteld door Generation.Energy in opdracht van TKI Urban Energy. TKI Urban Energy juicht verdere verspreiding van deze publicatie van harte toe. Voor vragen over de publicatie kunt u contact opnemen met TKI Urban Energy, 030-747 00 27 of info@tki-urbanenergy.nl.

Een uitgave van:



Opgesteld door:

