

Hernieuwbare opwek op land

Mogelijke ontwikkelpaden richting
2040



Hernieuwbare opwek op land

Mogelijke ontwikkelpaden richting 2040

Dit rapport is geschreven door:

Joeri Vendrik, Ward van Santen en Heleen Groenewegen (CE Delft)

Eranda Janku, Jaap Witte en Taco Kuijers (Generation .Energy)

Delft, CE Delft, Februari 2026

Publicatienummer: 26.250375.033

Opdrachtgever: Ministerie van Klimaat en Groene Groei

Alle openbare publicaties van CE Delft zijn verkrijgbaar via www.ce.nl

Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de projectleider Joeri Vendrik (CE Delft)

© copyright, CE Delft, Delft

CE Delft – Committed to the Environment

CE Delft draagt met onafhankelijk onderzoek en advies bij aan een duurzame samenleving. Wij zijn toonaangevend op het gebied van energie, transport en grondstoffen. Met onze kennis van techniek, beleid en economie helpen we overheden, NGO's en bedrijven structurele veranderingen te realiseren. Al sinds 1978 werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	11
	1.1 Achtergrond en aanleiding	11
	1.2 Doel en onderzoeksvragen	12
	1.3 Afbakening	12
	1.4 Leeswijzer	13
2	Hoeveel hernieuwbare opwek op land in 2040?	14
	2.1 Bandbreedte mogelijke ontwikkeling hernieuwbare opwek op land richting 2040	14
	2.2 Hoe ziet de energiemix eruit in 2040 bij verschillende hoeveelheden hernieuwbare opwek op land?	18
	2.3 Wat zijn de maatschappelijke afwegingen rondom de hoeveelheid hernieuwbare opwek op land?	31
3	Archetypen	34
	3.1 Wat verstaan we onder een archetype?	34
	3.2 Wat zijn de eigenschappen voor archetypen?	34
	3.3 Totaaloverzicht archetypen	37
	3.4 Toelichting en visualisatie per archetype	39
4	Effecten van archetypen	43
	4.1 Ruimtelijke effecten	43
	4.2 Netinpassing archetypen	52
	4.3 Maatschappelijke kosten en baten	56
	4.4 Overige effecten	74
	4.5 Businesscases	74
5	Ontwikkelpaden	77
	5.1 Wat verstaan we onder ontwikkelpaden?	77
	5.2 Ontwikkelpaden	78
	5.3 Uitgewerkte ontwikkelpaden	80
	5.4 Conclusies uit de ontwikkelpaden	93
	5.5 Hoe ziet de verdeling van hernieuwbare opwek over provincies eruit bij de ontwikkelpaden?	102
	5.6 Tijdspad en haalbaarheid ontwikkelpaden	105

6	Conclusies en aanbevelingen	110
	Literatuur	129
A	Paspoorten en kaarten archetypen	131
B	Ruimtelijke potentieanalyse	189
C	Netinpassing archetypen	207
D	Maatschappelijke kosten en baten	231
E	Detailuitwerking ontwikkelpaden	250
F	Data figuren	253

| Samenvatting

De laatste jaren is de productie van hernieuwbare energie op land fors gestegen, waardoor zonne-energie en windenergie op land nu een significant aandeel van de energiemix invullen. De businesscase voor hernieuwbare opwek op land staat echter onder druk en op steeds meer plekken is sprake van netcongestie door teruglevering van hernieuwbare opwek op momenten dat het aanbod van elektriciteit niet aansluit op de vraag naar elektriciteit. Deze omstandigheden maken de voortzetting van de groei van hernieuwbare opwek op land onzeker. Er zal echter nog fors meer hernieuwbare opwek op land nodig zijn voor een klimaatneutraal energiesysteem en meer energieonafhankelijkheid.

In dit onderzoek hebben we potentiële ontwikkelpaden voor zonne-energie en windenergie op land richting 2040 geanalyseerd. Daarvoor hebben we afwegingen voor de opgave voor hernieuwbare opwek in 2040 in kaart gebracht en geschetst hoe deze opgave ingevuld kan worden.

Scenario's voor ontwikkeling energiesysteem richting 2040: forse doorgroei hernieuwbare opwek op land nodig

Richting 2040 is een forse groei van hernieuwbare elektriciteitsproductie nodig, waaronder ook opwek op land. Deze groei is nodig vanwege een toenemende elektriciteitsvraag als gevolg van elektrificatie en vanwege de noodzaak om de CO₂-uitstoot van de elektriciteitssector verder te verlagen. De vraag is hoeveel hernieuwbare opwek op land nodig is.

In dit onderzoek zijn verschillende scenario's voor de ontwikkeling van vraag en aanbod van energie richting 2040 onderzocht. Al deze scenario's voorzien een sterke groei van zonne-energie: het vermogen ligt in deze scenario's in 2040 tussen de twee en vierenhalf keer zo hoog als het huidige niveau. De groei van zonne-energie zet zich dus naar verwachting voort. Voor windenergie op land is het beeld wisselender. In sommige scenario's groeit het vermogen tot ongeveer het dubbele van het huidige niveau, terwijl andere scenario's uitgaan van beperkte groei of stagnatie. Dat betekent niet dat meer windenergie op land niet nuttig is, maar dat verdere groei in deze scenario's als minder zeker wordt gezien.

De grote spreiding tussen scenario's hangt samen met onzekerheden over de totale elektriciteitsvraag en over de ontwikkeling van windenergie op zee en kernenergie. Daarnaast is de keuze voor groei van hernieuwbare opwek op land ook een maatschappelijke afweging. Een sterkere groei van hernieuwbare opwek op land vergroot de zekerheid voor het behalen van klimaatdoelen, leidt tot minder importafhankelijkheid en een goedkoper energiesysteem, maar heeft ook gevolgen voor de leefomgeving en kan iets doen met maatschappelijk draagvlak. Een keuze voor een forse doorgroei van windenergie op land, naast de

verwachte doorgroei van zonne-energie, leidt naar verwachting tot de laagste systeemkosten.

Archetypen als hulpmiddel voor keuzes en afwegingen

Naast de afweging over de totale hoeveelheid hernieuwbare opwek op land in 2040 is ook de wijze waarop deze opgave wordt ingevuld van belang. Hiervoor zijn archetypen uitgewerkt om de verscheidenheid van mogelijke vormen van hernieuwbare opwek op land samen te brengen in een behapbaar aantal 'hoofdcategorieën'. Een archetype is een representatieve categorie van opwek op land met specifieke ruimtelijke en energietechnische kenmerken, zoals: windenergie bij bedrijventerreinen, zonne-energie op bedrijfsdaken en solar carports. In totaal zijn zeventien archetypen uitgewerkt, waarbij onderscheid is gemaakt naar decentrale oplossingen, losse windturbines en zonneparken, en het realiseren van hernieuwbare opwek bij bestaande wind- of zonneparken.

In deze studie is het **ruimtelijk potentieel** van de archetypen in kaart gebracht met behulp van GIS, voortbouwend op bestaande methodieken. Daarbij is onderscheid gemaakt tussen harde beperkingen (zoals veiligheid, geluid, luchtvaart en bestaand grondgebruik) en zachte beperkingen (zoals provinciaal beleid en radarbeperkingen). Hardere beperkingen komen voort uit juridische of technische redenen en zachtere belemmeringen komen met name voort uit het beleid. Dit resulteert in een bandbreedte van het ruimtelijk potentieel.

Voor zonne-energie is het totale ruimtelijke potentieel in theorie ruimschoots voldoende om in de nationale behoefte te voorzien. Zonne-energie op landbouwgrond (waaronder agri-pv), water, brownfields en restlandschappen hebben de grootste potentie. Ook zonne-energie op daken en gevels biedt nog een aanzienlijk potentieel. Voor windenergie op land ligt het grootste potentieel bij windparken op landbouwgrond en op verziltingsgronden en veenontginningsgebieden.

Netinpassing en maatschappelijke kosten

Vanwege de wijdverbreide problemen met netcongestie is een **gunstige netinpassing** essentieel voor verdere groei van hernieuwbare opwek op land. Dit wordt in de eerste plaats bereikt door maximaal gebruik te maken van bestaande aansluitingen en netcapaciteit, opwek te koppelen aan lokale en flexibele vraag, en het combineren van windenergie op land en zonne-energie. Flexibiliteit via opslag en afschakeling is daarbij essentieel. Ook na toekomstige netuitbreidingen blijft efficiënte inpassing noodzakelijk om verdere verzwaring van het elektriciteitsnet te beperken.

In algemene zin levert hernieuwbare opwek op land verschillende **maatschappelijke baten**, bijvoorbeeld door CO₂-reductie, een lagere importafhankelijkheid en lagere systeemkosten bij een groter aandeel hernieuwbare energie. Deze baten gelden in principe voor alle archetypen in gelijke mate per opgewekte kilowattuur. Het **maatschappelijk draagvlak** voor hernieuwbare opwek op land verschilt per archetype. Oplossingen met beperkte ruimtebeslag, geringe hinder en multifunctioneel gebruik – zoals zonne-energie

op daken, gevels en parkeerplaatsen – scoren het meest positief, gevolgd door onder meer agri-pv, repowering en opwek op onbenutte terreinen. Draagvlakcreatie – bijvoorbeeld via participatie en lokaal eigenaarschap – kan bijdragen aan het vergroten van het maatschappelijk draagvlak en het verzachten van negatieve effecten. Zeker bij vormen van opwek die doorgaans op meer weerstand in de omgeving stuiten, zoals windenergie op land, kan dit een belangrijke rol spelen in de acceptatie en zo bijdragen aan de realisatie van hernieuwbare opwek.

In een analyse hebben we daarnaast naar **maatschappelijke kosten** van de archetypen gekeken.¹ Daarin valt een aantal zaken op. Zo maken de investeringskosten in zonne-energie en windenergie het grootste deel uit van de maatschappelijke kosten (grofweg 60-65%), terwijl dit voor externe kosten – maatschappelijke kosten die niet of slechts gedeeltelijk onderdeel zijn van de businesscase van een investeerder – zo'n 25-35% is. Bij windturbines zorgt hinder voor omwonenden voor de voornaamste externe kosten, al kan de keuze voor een gunstige locatie in een dunbevolkt gebied dit beperken. Bij zonne-energie zijn ketenemissies juist dominant, terwijl hinder voor omwonenden beperkt is. Wanneer netverzwaring nodig is, betreffen de kosten hiervoor gemiddeld 5-15% van de maatschappelijke kosten. De netverzwarkosten nemen toe bij teruglevering op lage spanningsniveaus, met name bij kleinschalige, decentrale toepassingen. Dit is niet het geval wanneer opwek uitsluitend voor eigen verbruik wordt gerealiseerd. Zonvolgende zonneparken (in dit onderzoek: zon-volgende agri-pv) scoren relatief gunstig doordat hogere investeringskosten worden gecompenseerd door hogere vollasturen. Opportunity costs van grondgebruik zijn voor landbouwgrond beperkt (ten opzichte van de overige kosten), maar bij industrieclusters en bedrijventerreinen juist hoog, wat zonne-energie op land daar minder aantrekkelijk maakt.

Bij windenergie op land zorgen grote projecten in gebieden met een lage bevolkingsdichtheid voor relatief lage externe kosten van hinder voor omwonenden. Dit komt doordat de hinder beperkt toeneemt bij het realiseren van grotere projecten, waardoor de externe kosten per kWh geproduceerde elektriciteit dan lager zijn. Daarnaast zijn de kosten voor netuitbreidingen lager als projecten direct op het hoogspanningsnet aangesloten worden. Dit zorgt ervoor dat grootschalige projecten lagere maatschappelijke kosten hebben.

¹ De analyse van de **maatschappelijke kosten** hebben we per archetype uitgevoerd in de vorm van een 'mini-mkba' of 'quickscan'. Dit betekent dat we ons hebben gericht op de *belangrijkste effecten die onderscheidend zijn tussen de archetypes*. We hebben dus *niet alle mogelijke effecten* meegenomen.

Invulling opgave: koppelen opwek aan lokale vraag is no-regret, daarbovenop verschillende keuzes

In dit onderzoek zijn verschillende ontwikkelpaden uitgewerkt, waarin in kaart is gebracht hoe de ontwikkeling van hernieuwbare opwek op land eruit **kan** zien. In deze ontwikkelpaden is middels de archetypen invulling gegeven aan de opgave voor hernieuwbare opwek in 2040. Er zijn drie ontwikkelpaden opgesteld, vanuit verschillende perspectieven: optimale netinpassing, minimaliseren ruimtelijke impact en minimaliseren maatschappelijke kosten. De ontwikkelpaden zijn geen wensbeelden, maar dienen om inzicht te geven in no-regret-opties en de keuzes scherp te krijgen.

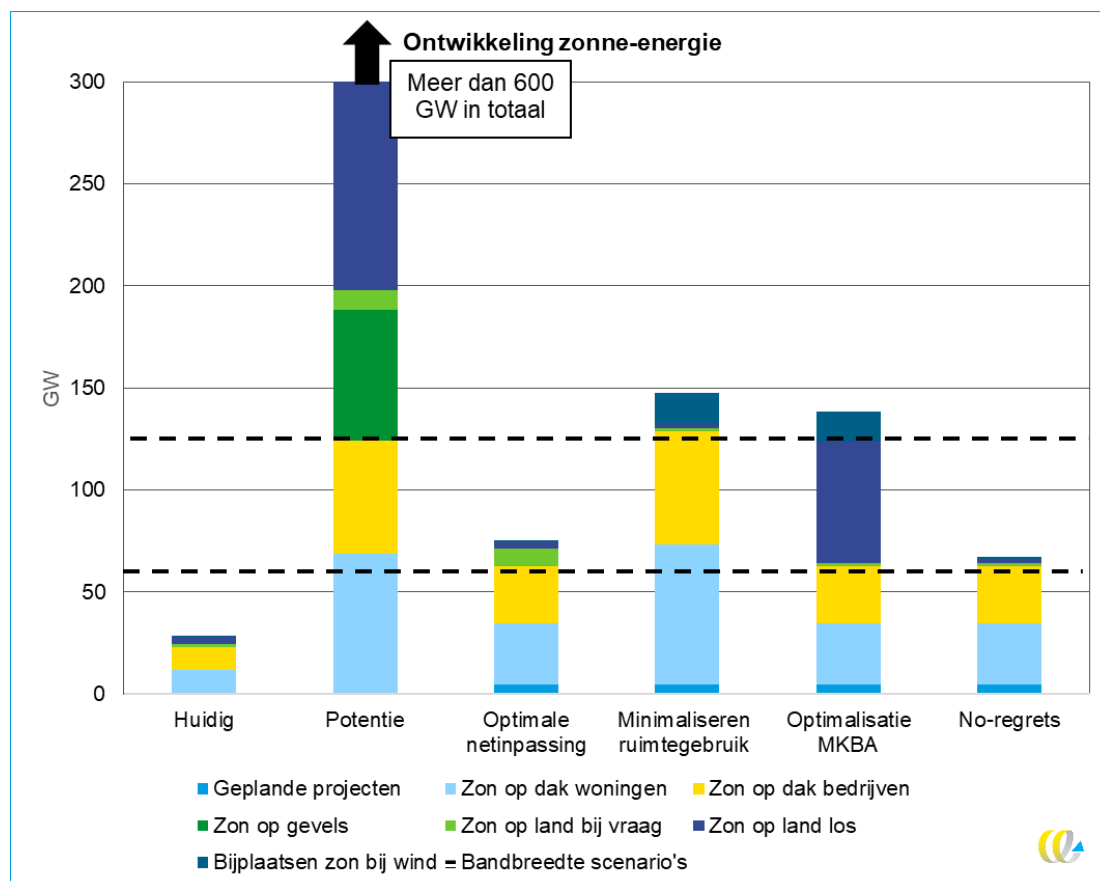
Uit de ontwikkelpaden voor hernieuwbare opwek op land komen verschillende no-regret-opties naar voren. Dit zijn maatregelen die in alle ontwikkelpaden terugkomen. De no-regrets zijn: realiseren van extra zonne-energie op daken voor eigen gebruik, windenergie op land bij bedrijventerreinen en het repoweren² van bestaande windparken.

Voor zowel zonne-energie als windenergie op land is de potentie van de no-regret-opties voldoende om de ondergrens van de onderzochte scenario's voor 2040 te halen. In de praktijk zal echter niet het volledige potentieel kunnen worden benut en zijn naar verwachting aanvullende opties nodig om de ondergrens van de scenario's voor 2040 te bereiken. Daarnaast is het bij windenergie op land van belang dat bij alle turbines die aan het einde van de levensduur zitten repowering plaatsvindt, maar het is geen zekerheid dat bij alle windparken aan het einde van de levensduur repowering plaatsvindt.

Voor het realiseren van meer zonne-energie zijn er verschillende opties. Zo kan een groter deel van het potentieel van zonne-energie op daken worden benut om meer te produceren dan de lokale vraag, waarbij afschakeling en opslag kunnen zorgen voor een inpassing zonder extra netuitbreidingen. Maar alsnog zullen netuitbreidingen nodig zijn als het grootste deel van het potentieel van zonne-energie op daken benut wordt. Een andere optie is het realiseren van meer zonne-energie op land. Dit heeft een zeer grote ruimtelijke potentie en relatief lage maatschappelijke kosten, vooral bij aansluiting op het hoogspanningsnet. Verziltingsgronden of veenontginningsgebieden of meervoudig ruimtegebruik bij zonne-energie op landbouwgrond (agri-pv) hebben dan de voorkeur.

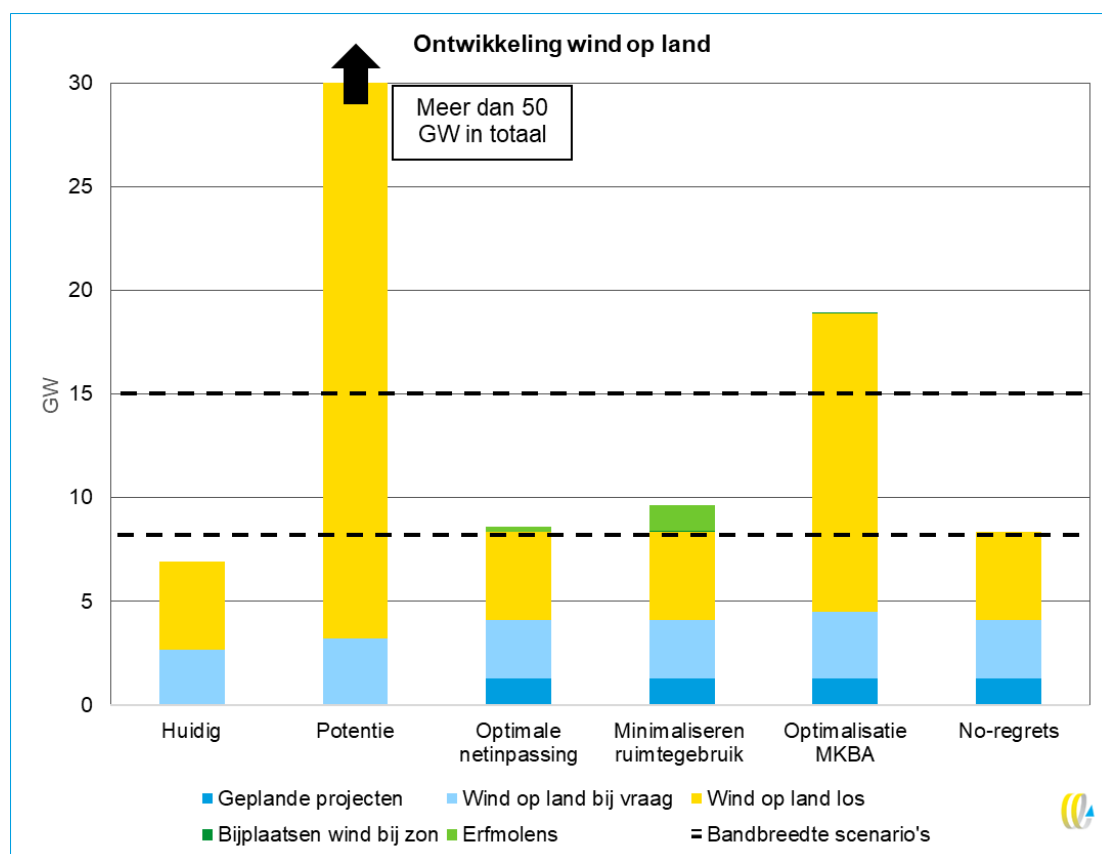
² Het plaatsen van nieuwe windturbines als deze aan het einde van de levensduur zijn.

Figuur 1 – Mogelijke ontwikkelingen van zonne-energie voor de verschillende ontwikkelpaden. De stippellijnen geven de onder- en bovengrens van onderzochte scenario's voor zonne-energie in 2040.



Voor windenergie op land is de belangrijkste keuze of er in gebieden zonder significante elektriciteitsvraag wel of niet meer windenergie op land gerealiseerd wordt. Grootschalige windparken in gebieden met weinig omwonenden en met aansluiting op het hoogspanningsnet hebben dan de laagste maatschappelijke kosten. Daarnaast kunnen extra projecten rond industrieclusters en het realiseren van meer vermogen bij repowering van bestaande parken bijdragen aan een verdere doorgroei van windenergie op land.

Figuur 2 – Mogelijke ontwikkelingen van windenergie op land voor de verschillende ontwikkelpaden. De stippellijnen geven de onder- en bovengrens van onderzochte scenario's voor windenergie op land in 2040.



Beleidsaanbevelingen

In deze studie komen we tot zes hoofdaanbevelingen.

1. **Zet hoog in op doorgroei hernieuwbare opwek op land.** Verdere groei van hernieuwbare opwek op land is nodig om de klimaatdoelen te halen en energie-onafhankelijkheid te vergroten. De omvang van de groei is een politieke keuze waarbij CO₂-uitstoot, kosten, importafhankelijkheid en maatschappelijk draagvlak centraal staan. Vanwege onzekerheid over de ontwikkeling van vraag en aanbod van elektriciteit zijn adaptieve doelen nodig, die regelmatig herijkt worden. Omdat er onzekerheid is over de ontwikkeling van windenergie op zee en kernenergie richting 2040, is het verstandig om hoog in te zetten op de doorgroei van hernieuwbare opwek op land. Daarbij raden we aan om niet alleen in te zetten op doorgroei van zonne-energie, maar ook op doorgroei van windenergie op land, aangezien dit maatschappelijke meerwaarde kan leveren en leidt tot een goedkoper energiesysteem.

2. **Zet in op no-regrets voor hernieuwbare opwek op land en maak tijdig keuzes over de andere opties.** No-regrets zijn extra zonne-energie op daken met dimensionering op eigen gebruik, windenergie op land op bedrijventerreinen en repowering van bestaande windparken. Deze opties zijn maatschappelijk wenselijk en in veel gevallen ook economisch aantrekkelijk. Ze vragen wel om gericht beleid om het potentieel volledig te benutten. Er zijn boven op de no-regrets nog verschillende grote keuzes die voorliggen, zoals volledige benutting van dakoppervlak of verdere ontwikkeling van grootschalige productieparks. Om de opgave voor hernieuwbare opwek in 2040 te kunnen realiseren, zijn snel keuzes nodig.
3. **Zet in op efficiënte netinpassing van hernieuwbare opwek op land** om verdere doorgroei mogelijk te maken ondanks netcongestie. Netcongestie zal de komende jaren nog blijven en daarom is het optimaal benutten van het net noodzakelijk om een forse doorgroei van hernieuwbare opwek op land (Aanbeveling 1) richting 2040 te kunnen realiseren.
4. **Verdere groei van hernieuwbare energie op land vereist een expliciete koppeling met ruimtelijke ontwikkelingsstrategieën op zowel nationaal als regionaal niveau.** Beslissingen over windenergie op land en zonne-energie moeten niet uitsluitend sector- of projectmatig worden genomen, maar moeten worden ingebed in bredere ruimtelijke overwegingen die samenhangen met stedelijke ontwikkeling, agrarische transitie, natuurherstel, waterbeheer en industrieel beleid. Vroege integratie van hernieuwbare energie in gebiedsprogramma's en ruimtelijke visies creëert mogelijkheden voor multifunctioneel ruimtegebruik en clustering nabij infrastructuur en energie-intensieve activiteiten. Dit versterkt de ruimtelijke kwaliteit, ondersteunt maatschappelijke acceptatie en faciliteert efficiëntere netintegratie. Een programmatische aanpak waarin energie- en ruimtelijke planning gezamenlijk worden ontwikkeld, is daarom nodig om samenhang in besluitvorming te versterken en bij te dragen aan een veerkrachtig en toekomstbestendig energiesysteem.
5. **De noodzaak voor subsidie** voor een rendabele businesscase en voor het verlagen van risico's blijft. Stuur hiermee op de ontwikkeling van het vormen van hernieuwbare opwek op land die wenselijk geacht worden.
6. **Voer een gedetailleerde regionale uitwerking uit van de ontwikkeling van hernieuwbare opwek op land.** Dit onderzoek heeft een nationale aanpak, maar een groot deel van de bevoegdheden ligt bij regionale overheden en de keuzes hebben een grote regionale impact. Daarnaast is meer inzicht nodig in welk deel van de potentie van archetypen daadwerkelijk (lokaal) gerealiseerd kan worden. Daarvoor is een gedetailleerdere regionale uitwerking van het onderzoek gewenst. Dit onderzoek kan input leveren voor verdere afstemming met de RES-regio's, provincies en gemeenten over doelstellingen/ambities en de keuzes die nog gemaakt moeten worden om de doelstellingen te halen.

1 Inleiding

Tekstkader 1 – Naamgeving windenergie en zonne-energie in rapport

Windenergie op land, zonne-energie, zonne-energie op dak, zonne-energie op land

Het onderzoek gaat over verschillende vormen van windenergie op land en zonne-energie op land. Onder 'windenergie op land' scharen we alle vormen van windenergie op land, dus ook erfmolens. Bij zonne-energie gebruiken de term 'zonne-energie' voor alle vormen van zonne-energie op land. Zonne-energie op zee valt hier dus niet onder. Daarnaast maken we onderscheid naar zonne-energie op daken en zonne-energie op land/grondgebonden zonne-energie. Onder 'zonne-energie op dak' vallen zowel kleinschalige als grootschalige 'zonne-energie op dak'. Onder 'zonne-energie op land' vallen alle vormen van grondgebonden zonne-energie, dus bijvoorbeeld ook agri-pv en zonne-energie op infrastructuur.

1.1 Achtergrond en aanleiding

De laatste jaren is de productie van hernieuwbare energie op land fors gestegen, waardoor zonne-energie en windenergie op land nu een significant aandeel van de energiemix invullen. De businesscase voor hernieuwbare opwek op land staat echter onder druk (KPMG, 2025) en op steeds meer plekken is sprake van netcongestie door teruglevering van hernieuwbare opwek (Netbeheer Nederland, 2025a), ook doordat de ontwikkeling van (flexibele) elektriciteitsvraag achterblijft. Deze omstandigheden maken de voortzetting van de groei van hernieuwbare opwek op land onzeker. Er zal echter nog steeds fors meer aanbod van hernieuwbare opwek op land nodig zijn richting 2050, voor een klimaatneutraal energiesysteem en een grotere mate van energieonafhankelijkheid.

In het Nationaal Plan Energiesysteem (NPE) uit 2023 zijn indicatieve cijfers opgenomen voor de ontwikkeling van hernieuwbare opwek op land, maar het is de vraag of dit maatschappelijk haalbaar en wenselijk is. Het ministerie van Klimaat en Groene Groei heeft aan CE Delft en Generation.Energy gevraagd om te onderzoeken hoeveel hernieuwbare opwek op land nodig is en in welke vorm. Dit onderzoek levert onder andere input voor de actualisatie van het NPE, dat in 2026 gepubliceerd wordt.

1.2 Doel en onderzoeksvragen

Het doel van dit onderzoek is om ontwikkelpaden voor zonne-energie en windenergie op land richting 2040 te schetsen. Daarvoor is in kaart gebracht hoeveel zonne-energie en windenergie op land nodig zijn in 2040 en hoe deze opgave ingevuld kan worden. Daarbij maken we inzichtelijk welke keuzes gemaakt kunnen worden en wat hierbij de afwegingen zijn. De ontwikkelpaden worden opgesteld aan de hand van verschillende archetypen, een techniektype opwek op land met ruimtelijke en energetische eigenschappen. De archetypen omvatten verschillende opties van zonne-energie en windenergie en per archetype is een analyse van de ruimtelijke effecten, netinpassing en maatschappelijke kosten en baten.

De resultaten van dit onderzoek vormen input voor verschillende beleidsinstrumenten en -producten, zoals de uitwerking van de visie op decentrale ontwikkelingen in het energiesysteem, de actualisatie van het NPE, de SDE++ en de overgang naar een tweezijdig Contracts for Difference, en het Nationaal Programma Energiesysteem in oprichting (NP ES i.o.).

1.3 Afbakening

De belangrijkste aspecten met betrekking tot de afbakening van het onderzoek zijn:

- Het onderzoek brengt de noodzaak, mogelijkheden en afwegingen voor hernieuwbare opwek op land op nationaal niveau in kaart. Het onderzoek gaat slechts beperkt in op de regionale uitwerking en regionale afwegingen.
- Het onderzoek gaat over zonne-energie en windenergie op land. Zowel kleinschalige als grootschalige projecten en zowel zonne-energie op land als zonne-energie op dak worden meegenomen in het onderzoek. Windenergie en zonne-energie op zee en kernenergie vallen buiten scope. De wisselwerking van hernieuwbare opwek op land met deze andere productiebronnen wordt wel besproken in de doorrekening van de nationale energiemix en de afwegingen op nationaal niveau.
- De focus ligt op de effecten van hernieuwbare opwek op land in de elektriciteitsketen. Integratie met andere ketens, zoals warmte of waterstof, en de wisselwerking met flexibiliteitsopties wordt wel beschouwd bij de energetische doorrekening en de analyses voor de netinpassing, maar is niet het hoofddoel van het onderzoek.
- De focus van het onderzoek ligt op de kwantitatieve en technische uitwerking.

1.4 Leeswijzer

Dit rapport bestaat uit zes hoofdstukken:

- Hoofdstuk 1 bevat de inleiding.
- Hoofdstuk 2 gaat in op de mogelijkheden en afwegingen rondom de totale hoeveelheid hernieuwbare opwek op land in 2040.
- In Hoofdstuk 3 wordt ingegaan op de archetypen voor hernieuwbare opwek die gebruikt worden in het onderzoek.
- Hoofdstuk 4 gaat in op de ruimtelijke, energetische en maatschappelijke effecten van deze archetypen.
- Hoofdstuk 5 beschrijft mogelijke ontwikkelpaden voor de ontwikkeling van hernieuwbare opwek op land richting 2040. Bij de ontwikkelpaden vullen we de opgave voor hernieuwbare opwek op land, die volgt uit de analyses in Hoofdstuk 2, in met de verschillende archetypen.
- In Hoofdstuk 6 volgen de conclusies en aanbevelingen van dit onderzoek.

Daarnaast zijn er nog verschillende bijlagen:

- Bijlage A: Paspoorten archetypen;
- Bijlage B: Ruimtelijke potentieanalyse;
- Bijlage C: Netinpassing archetypen;
- Bijlage D: Maatschappelijke kosten en baten;
- Bijlage E: Detailuitwerking ontwikkelpaden;
- Bijlage F: Data figuren.

2 Hoeveel hernieuwbare opwek op land in 2040?

In dit hoofdstuk gaan we in op de mogelijkheden en afwegingen rondom de hoeveelheid hernieuwbare opwek op land in 2040. Eerst geven we inzicht in de bandbreedte van mogelijke ontwikkeling van hernieuwbare opwek op land richting 2040. Vervolgens geven we inzicht in het effect op de nationale energiemix. Tot slot bespreken we de afwegingen rondom de hoeveelheid hernieuwbare opwek in 2040.

Later in het rapport gaan we in op de vormen van hernieuwbare opwek (archetypen) die gerealiseerd kunnen worden om deze hoeveelheid hernieuwbare opwek op land te behalen. In dit hoofdstuk gaan we in op de afwegingen rondom de totale hoeveelheid.

2.1 Bandbreedte mogelijke ontwikkeling hernieuwbare opwek op land richting 2040

In deze paragraaf bespreken we hoeveel hernieuwbare opwek op land in totaal in 2040 voorzien wordt in verschillende scenario-onderzoeken. Later in het rapport, in Hoofdstuk 5, bespreken we hoe deze opgave ingevuld kan worden en wat haalbaar is.

In Nederland is de afgelopen decennia het vermogen windenergie op land, zonne-energie op land en zonne-energie op dak sterk gegroeid. In 2024 stond er bijna 7 GW windenergie op land, 6 GW zonne-energie op land en was er ongeveer 23 GW aan zonne-energie op dak geïnstalleerd. Tabel 1 geeft een overzicht van de huidige opwek. Daarnaast is voor windenergie op land weergegeven welke groei nog mogelijk is vanuit projecten in de pijplijn (RVO, 2025a), waarbij de kanttekening moet worden geplaatst dat het geen zekerheid is dat alle projecten daadwerkelijk gerealiseerd worden. Bij zonne-energie is de verwachte groei tot en met 2027 weergegeven (RVO, 2025b). De tabel laat zien dat ervoor zowel windenergie op land, zonne-energie op dak als zonne-energie op land nog een kleine groei voorzien wordt vanuit lopende projecten.

Bij windenergie op land is de mate van repowering van bestaande windturbines die aan het einde van de levensduur zitten een belangrijke onzekerheid over de ontwikkeling in de komende jaren. Enerzijds kan dit tot verdere groei leiden, als bij repowering het productie-vermogen opgeschaald wordt, anderzijds zullen er naar verwachting ook projecten zijn

waar aan het einde van de levensduur geen nieuwe windturbines geplaatst zullen worden, bijvoorbeeld door landelijke milieunormen (RVO, 2025a).

Tabel 1 – Overzicht huidig opgesteld vermogen hernieuwbare opwek en bestaande plannen

	Huidig opgesteld vermogen (2024)	Huidige opgesteld vermogen + bestaande plannen/groei komende jaren
Windenergie op land	6,9 GW	8,2 GW
Zonne-energie op dak kleinschalig (<15 kWp)	12,4 GW	15,9 GW
Zonne-energie op dak grootschalig (>15 kWp)	10,3 GW	20,5 GW (alle grootschalig, geen onderscheid tussen grootschalig op dak en land in Monitor Zon-PV)
Zonne-energie op land	5,9 GW	

Bron: (RVO, 2025a, 2025b).

Er zijn de afgelopen jaren verschillende scenariostudies gedaan naar de ontwikkeling van het energiesysteem richting 2040. Deze scenario's geven een inschatting van de ontwikkeling van vraag en aanbod van energie, en daarbij ook een inschatting van de hoeveelheid hernieuwbare opwek op land. Scenario's kunnen op verschillende manieren vastgesteld worden: een scenario kan een inschatting geven van de verwachte ontwikkelingen, maar er kan ook onderzocht worden welke ontwikkelingen noodzakelijk zijn om de klimaatdoelen te halen. De energiescenario's die wij in dit onderzoek meenemen, vallen onder de tweede categorie; het zijn scenario's die uitgaan van het halen van de klimaatdoelen richting 2040 en verschillende mogelijke manieren in kaart brengen waarop deze doelen behaald kunnen worden.

Hoe die klimaatdoelen behaald worden, verschilt per scenario en wordt in verschillende onderzoeken op wisselende manieren bepaald. Zo zijn er scenario's waarin een kosten-optimalisatie gedaan wordt en bepaald wordt met welke energiemix de klimaatdoelen behaald kunnen worden tegen de laagste (maatschappelijke) kosten. Dit is bijvoorbeeld het geval bij de scenario's van TNO. Maar er zijn ook scenario's die opgesteld zijn op basis van input van stakeholders en hun verwachtingen over de mogelijke ontwikkelingen richting de toekomst.

In Tabel 2 staat een overzicht van welke studies we beschouwd hebben, met daarbij van welke klimaatdoelen de verschillende studies uitgaan en de vermogens van windenergie op land, zonne-energie op dak en zonne-energie op land die ze voorzien voor 2040.

Tabel 2 laat zien dat het Nationaal Plan Energiesysteem (NPE) uit 2023 uitgaat van de hoogste hoeveelheid hernieuwbare opwek op land in 2040. De andere scenariostudies gaan uit van lagere groei van hernieuwbare opwek op land. Dat komt doordat het NPE

van 2023 inzet op maximale groei van alle vormen van hernieuwbare opwek. Het NPE wordt in 2026 geactualiseerd.

Tabel 2 – Overzicht scenariostudies voor 2040

Studie	Uitgangspunt klimaatdoel	Wijze bepalen hoeveelheid hernieuwbaar op land	Windenergie op land	Zonne-energie (op dak en land) ³
Towards a sustainable energy system for the Netherlands in 2050 (TNO, 2024)	In 2030 55% emissiereductie t.o.v. 1990 en in 2050 klimaatneutraliteit.	Kostenoptimalisatie	8-10 GW	57-88 GW
Netbeheer Nederland Scenario's Editie 2025 (Netbeheer Nederland, 2025b)	In 2030 55% emissiereductie t.o.v. 1990, in 2035 indicatief 70% reductie, in 2040 richting 90% reductie en in 2050 klimaatneutraliteit.	Aannames op basis van markt- en vraagontwikkeling	9-14 GW	61-123 GW
Nationaal Plan Energiesysteem (Ministerie van EZK, 2023)	In 2030 55% emissiereductie t.o.v. 1990 en in 2050 klimaatneutraliteit.	Inschatting op basis van bestaande energiescenario's	15 GW	127 GW
Trajectverkenning Klimaatneutraal 2050 (PBL, 2024b)	In 2030 55% emissiereductie t.o.v. 1990, in 2050 klimaatneutraliteit en een lineair reductiepad daartussen.	Kostenoptimalisatie	9 GW (maximum)	78 GW (maximum)
Bandbreedte scenariostudies			8-15 GW	57-127 GW

De verschillende scenariostudies laten een forse variatie zien voor de aannames voor de ontwikkeling van windenergie op land, zonne-energie op land en zonne-energie op dak richting 2040. De volgende aspecten zijn hierbij van belang:

- **Doelen verduurzaming elektriciteit:** de doelstellingen voor verduurzaming van de elektriciteitssector bepalen welk deel van de elektriciteitsvraag ingevuld moet worden met hernieuwbare bronnen.
- **Elektriciteitsvraag (direct en indirect):** de elektriciteitsvraag, zowel directe elektriciteitsvraag als indirect (van bijvoorbeeld elektrolyzers), bepaalt hoeveel hernieuwbare elektriciteit nodig is om de doelen voor verduurzaming van de elektriciteitssector te halen.
- **Mate van zelfvoorzienendheid van energievoorziening:** de vraag naar elektriciteit, maar zeker ook naar waterstof, hoeft niet volledig ingevuld te worden met binnenlandse productie. Er is ook import mogelijk. Bij een hogere mate van

³ Niet alle scenario's maken onderscheid tussen zonne-energie op dak (kleinschalig en grootschalig) en zonne-energie op land. Daarom geven we hier alleen het totale vermogen van zonne-energie in de scenario's.

zelfvoorzienendheid voor elektriciteit en waterstof (als die met elektriciteit wordt gemaakt) is meer hernieuwbare elektriciteitsproductie nodig.

Het is ook mogelijk om in Nederland hernieuwbare elektriciteit te produceren voor export naar omliggende landen.

- **Productie van overige productiebronnen.** De productie van overige bronnen van elektriciteit, en dan met name met windenergie op zee en kernenergie, vult ook een significant deel van de elektriciteitsvraag in. Bij meer productie van windenergie op zee en kernenergie is minder hernieuwbare opwek op land nodig. Bij de energie-scenario's verschilt welk deel van de vraag door hernieuwbare opwek op land ingevuld wordt, en welk deel door de overige productiebronnen.
- Daarnaast is het van belang om te benoemen dat in elk van de scenario-onderzoeken een maximum wordt verondersteld voor hoeveel windenergie op land en zonne-energie inpasbaar of gewenst is. Dit betekent dat deze studies niet per definitie aangeven hoeveel hernieuwbare opwek op land optimaal zou zijn, dit kan potentieel nog hoger zijn.

Tabel 2 laat zien dat het Nationaal Plan Energiesysteem (NPE) uit 2023 uitgaat van de hoogste hoeveelheid hernieuwbare opwek op land in 2040. De andere scenariostudies gaan uit van lagere groei van hernieuwbare opwek op land. Dat komt doordat het NPE van 2023 inzet op maximale groei van alle vormen van hernieuwbare opwek. Het NPE wordt in 2026 geactualiseerd.

Tabel 3 toont de bandbreedte van het vermogen van hernieuwbare opwek op land in 2040, ten opzichte van het huidige vermogen en de bestaande plannen. Hieruit zijn de volgende conclusies te trekken:

In alle scenario's wordt een forse groei voorzien voor zonne-energie op dak en zonne-energie op land. Er is echter nog een grote bandbreedte in de mate van groei die voorzien wordt in de scenario's. De hoeveelheid zonne-energie ligt in de scenario's in 2040 twee tot vierenhalf keer hoger dan het huidig opgesteld vermogen.

Bij windenergie op land wordt in een deel van de scenario's uitgegaan van een forse groei, tot twee keer zoveel als de huidige situatie en bestaande plannen. Maar er zijn ook scenario's die uitgaan van stagnatie en (vrijwel) geen groei ten opzichte van de bestaande plannen. Dat bepaalde scenario's uitgaan van minder groei, komt niet doordat meer wind-energie op land niet nuttig is. Hierin is ook het dalende draagvlak voor windenergie op land meegenomen, waardoor een forse groei van windenergie op land als minder realistisch gezien kan worden.

Tabel 3 – Bandbreedte vermogen hernieuwbare opwek op land 2040 ⁴

	Huidig opgesteld vermogen (2024)	Huidige opgesteld vermogen + bestaande plannen	Ondergrens-scenario's 2040	Bovengrens-scenario's 2040
Windenergie op land	6,9 GW	8,2 GW	8 GW	15 GW
Zonne-energie op dak kleinschalig	12,4 GW	15,9 GW	57 GW	127 GW
Zonne-energie op dak grootschalig	10,3 GW	20,5 GW (alle grootschalig, geen onderscheid in monitor zon-pv)		
Zonne-energie op land	5,9 GW			

Tekstkader 2 – Doorkijk richting 2050

De bovenstaande analyses geven inzicht in de ontwikkeling van hernieuwbare opwek op land in verschillende scenario's voor 2040. De energietransitie is echter niet afgerond in 2040. Richting 2050 zal de vraag naar elektriciteit en ook de benodigde hoeveelheid hernieuwbare opwek nog verder toenemen. Voor windenergie op land wordt in de beschouwde scenario's voor 2050 8 tot 17 GW voorzien. Voor zonne-energie wordt in de beschouwde scenario's voor 2050 77 tot 175 GW voorzien.

2.2 Hoe ziet de energiemix eruit in 2040 bij verschillende hoeveelheden hernieuwbare opwek op land?

In deze paragraaf laten we zien hoe de energiemix van Nederland eruitziet in 2040, bij verschillende hoeveelheden hernieuwbare opwek op land. Hiervoor rekenen we drie scenario's door:

- 1. Bovengrens hernieuwbare opwek op land:** hierin gebruiken we de bovengrens van de ontwikkeling van windenergie op land, zonne-energie op dak en zonne-energie op land uit Tabel 3.
- 2. Ondergrens hernieuwbare opwek op land:** hierin gebruiken we de ondergrens van de ontwikkeling van windenergie op land, zonne-energie op dak en zonne-energie op land uit Tabel 3.
- 3. Bovengrens zonne-energie, ondergrens windenergie op land:** hierin gebruiken we de bovengrens van de ontwikkeling van zonne-energie op dak en zonne-energie op land en de ondergrens van de ontwikkeling van windenergie op land uit Tabel 3.

⁴ Niet alle scenario's maken onderscheid tussen zonne-energie op dak (kleinschalig en grootschalig) en zonne-energie op land. Daarom geven we hier alleen het totale vermogen van zonnepanelen in de scenario's. In de scenario's (waarbij onderscheid gemaakt tussen verschillende vormen van zonne-energie) is gemiddeld gezien ongeveer 70% van het totale vermogen zonne-energie op dak en 30% zonne-energie op land.

Dit scenario voegen we toe om de relatieve toegevoegde waarde van windenergie op land en zonne-energie los van elkaar te kunnen bepalen.⁵

Deze drie scenario's rekenen we door voor de situatie in 2040. Hieronder bespreken we de methodiek hiervoor. In Paragraaf 2.2.2 bespreken we de resultaten van de doorrekeningen. In Paragraaf 2.2.3 geven we kwalitatieve beschouwingen op enkele gevoeligheden en afhankelijkheden.

2.2.1 Methodiek

Om tot realistische scenario's te komen en een goede inschatting te maken van de effecten op de energiemix is een volledige doorrekening van energetische varianten met en zonder kernenergie gedaan. Hiervoor is het onafhankelijke integrale energiemodel genaamd 'Energy Transition Model' (ETM) van Quintel gebruikt. In het ETM kunnen aannames en plannen ingesteld worden over de ontwikkeling van energievraag, energieaanbod, flexibiliteit en energieprijzen in een regio. Het model rekent vervolgens op uurbasis door wat de impact van deze ontwikkelingen is op het energiesysteem.

De belangrijkste uitgangspunten waarvan uit is gegaan voor de modellering zijn:

- De analyses zijn uitgevoerd voor zichtjaar 2040.
- Om de effecten op de energiemix te bepalen, is een beeld nodig van een uitgangssituatie van de energievraag. Hiervoor is gebruikgemaakt van een recent gepubliceerde scenariostudie van Netbeheer Nederland, waarin een beeld geschetst is van hoe het energiesysteem van Nederland zich kan ontwikkelen (Netbeheer Nederland, 2025b). Er wordt uitgegaan van het scenario Koersvaste Middenweg, dat aansluit bij de huidige ontwikkelingen en beleidscontext en daarmee de beste inschatting geeft van de verwachte ontwikkelingen tot 2040.
- We gaan uit van 35 GW windenergie op zee in 2040, die volledig in de vorm van elektriciteit aan land gebracht wordt. 35 GW is de middenwaarde van de bandbreedte voor de ontwikkeling voor windenergie op zee (30-40 GW), zoals vastgelegd in het Windenergie Infrastructuurplan Noordzee (WIN) (Ministerie van KGG, 2025).
- We gaan uit van realisatie van twee nieuwe grote kerncentrales, boven op de bestaande kerncentrale in Borssele.
- De hoeveelheid hernieuwbare opwek is gevarieerd tussen de scenario's. De opwek van windenergie op zee en kernenergie en de (basis)vraag naar elektriciteit zijn gelijk gehouden. In de praktijk is het uiteraard ook een mogelijkheid dat minder windenergie op zee en kernenergie gerealiseerd wordt bij een grotere groei van de productie van hernieuwbare opwek op land.

⁵ De toegevoegde waarde van windenergie op land kan bepaald worden door dit scenario te vergelijken met het scenario *Bovengrens hernieuwbare opwek op land*. De toegevoegde waarde van zonne-energie kan bepaald worden door dit scenario te vergelijken met het scenario *Ondergrens hernieuwbare opwek op land*. We rekenen geen scenario met ondergrens zonne-energie en bovengrens windenergie op land door, aangezien we dit als minder realistisch zien.

- De inzet van bronnen van productie en flexibiliteit wordt bepaald door de markt, die ook gemodelleerd wordt. We sluiten aan bij de modellering van de markt en inzet van bronnen van het ETM.
- De hoeveelheid hernieuwbare opwek heeft ook impact op de benodigde hoeveelheid en inzet van bronnen van flexibiliteit, en op de import en export van elektriciteit. In Tekstkader 2 bespreken we welke aannames daarvoor gehanteerd zijn. De inzet van bronnen van productie en flexibiliteit wordt bepaald door de markt, die ook gemodelleerd wordt. We sluiten aan bij de modellering van de markt en inzet van bronnen van het ETM.

In Paragraaf 2.2.3 bespreken we (kwalitatief) de effecten als bovenstaande ontwikkelingen anders uitvallen.

Tekstkader 3 – Aannames flexibele bronnen

Aannames flexibele bronnen

Flexibele bronnen zijn noodzakelijk om vraag en aanbod van elektriciteit en waterstof elk moment van het jaar in balans te brengen. De hoeveelheid opgesteld vermogen van flexibele bronnen als regelbare centrales, opslag van elektriciteit, elektrolyzers, waterstofopslag en de inzet van deze installaties zien wij als gevolg van de inzet van bronnen van elektriciteit in combinatie met de vraag en de hoeveelheid import en export, en zijn op de volgende wijze bepaald:

- **Opslag elektriciteit:** opslag van elektriciteit is noodzakelijk om kortetermijnonbalans tussen vraag en aanbod op te vangen. De onbalans tussen vraag en aanbod bepaalt de inzet van opslag op uurbasis en welk vermogen aan opslag noodzakelijk is:
- **Elektrolyse:** elektrolyzers zetten langetermijnoverschotten van elektriciteit om in waterstof. Deze zijn niet geschikt voor de pieken aan overschotten (die een beperkt aantal uren per jaar voorkomen), aangezien het vanwege de hoge investeringskosten van elektrolyzers wenselijk is om veel draaiuren te maken. Het vermogen aan elektrolyzers wordt gebaseerd op het gemiddeld vermogen van de overschotten aan elektriciteit.
- **Vraagsturing en power-to-heat:** de vermogens voor vraagsturing en power-to-heat worden gelijk gehouden ten opzichte van het scenario Koersvaste Middenweg, aangezien dit vooral afhankelijk is van de vraag naar energie en niet van het aanbod (en alleen het aanbod wijzigt, niet de vraag).
- **Curtailement:** de inzet van curtailement (afschakelen van opwek) wordt bepaald door de marktmodellering in het model. Hier wordt geen aparte aanname voor gemaakt.
- **Import en export elektriciteit en waterstof:** de capaciteit voor import en export van elektriciteit en van waterstof wordt gelijk gehouden ten opzichte van het basisscenario. De uurlijkse import en export verandert wel en wordt bepaald met de marktmodellering van het ETM.

Vanuit de markt worden prikkels gegeven voor het realiseren van meer flexibele bronnen, zoals elektrolyzers, bij meer hernieuwbare opwek. Maar in de praktijk is het geen zekerheid dat dit ook gebeurt. Het is ook een mogelijkheid dat minder opwek van overige bronnen (windenergie op zee en kernenergie) gerealiseerd wordt of dat meer curtailement plaatsvindt.

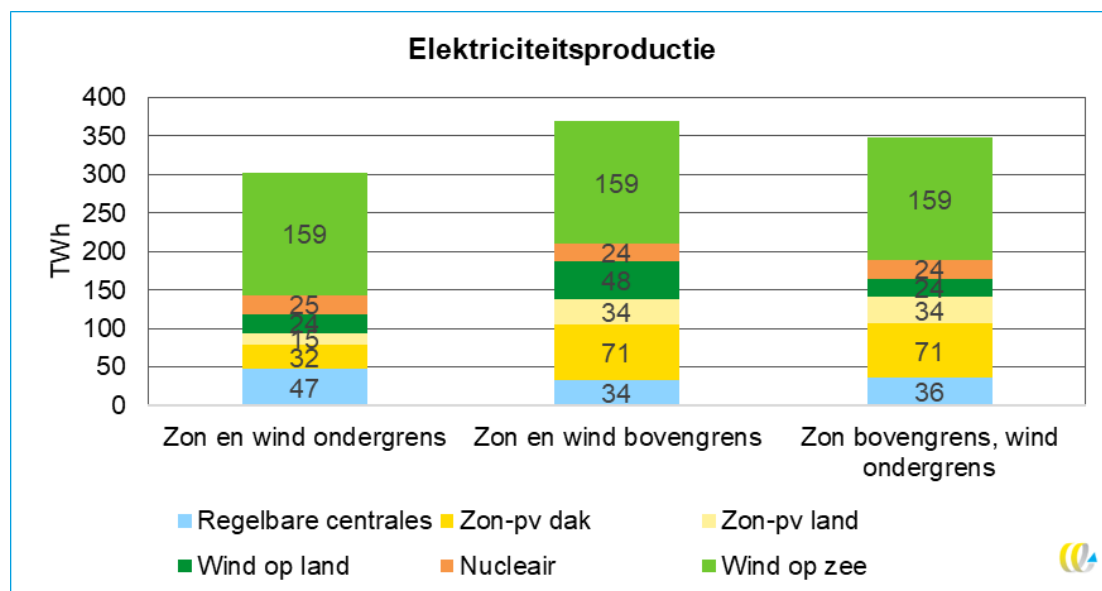
De uurlijkse inzet van flexibele bronnen wordt bepaald door de marktmodellering in het ETM. Met de marktmodellering wordt ook import en export van elektriciteit en waterstof bepaald.

2.2.2 Resultaten

Figuur 3 geeft een overzicht van de productie van elektriciteit in de drie doorerekende scenario's. De totale productie van elektriciteit varieert tussen de 300 en 370 TWh. Deze totale productie komt voort uit de aannames voor hernieuwbare opwek op land in de scenario's, gecombineerd met de aannames voor de ontwikkeling van windenergie op zee en kernenergie. De totale productie is niet gelijk in de scenario's, aangezien de hoeveelheid hernieuwbare opwek op land varieert en we aannemen dat de productie van windenergie op zee en kernenergie in de drie scenario's gelijk blijft.⁶

Dit betekent dat de aanvullende productie van hernieuwbare opwek op land (bovengrens-scenario ten opzichte van het ondergrensscenario) leidt tot 20% meer productie van elektriciteit. In alle gevallen wordt het grootste deel van de elektriciteit geproduceerd met windenergie op zee. De productie van regelbare centrales neemt iets af bij een grotere productie van hernieuwbare opwek op land, maar dit effect is beperkt ten opzichte van de toename van de productie van hernieuwbaar opwek op land. We bespreken hieronder hoe deze extra productie van elektriciteit benut wordt.

Figuur 3 – Productie elektriciteit

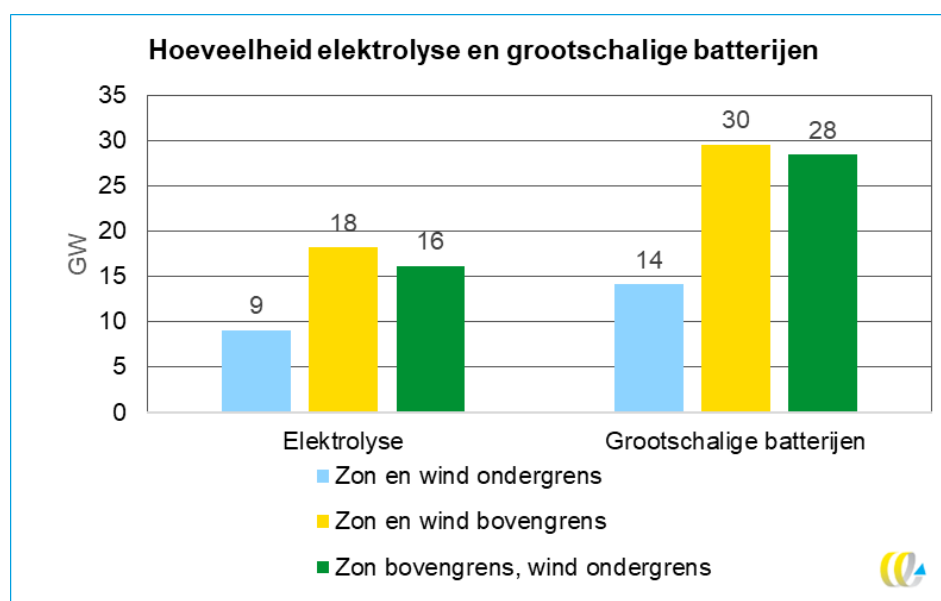


⁶ In de praktijk is het uiteraard ook een mogelijkheid dat minder windenergie op zee en kernenergie gerealiseerd wordt bij een grotere groei van de productie van hernieuwbare opwek op land. In dat geval zal de productie niet hoger uitvallen.

De basisvraag naar elektriciteit verandert niet tussen de scenario's en neemt niet toe door meer hernieuwbare opwek op land. Maar door de hogere productie van elektriciteit zijn er wel meer overschotten van elektriciteit, en we nemen in de modellering aan dat hiervoor extra flexibele afnemers van elektriciteit gerealiseerd worden. Figuur 4 geeft een overzicht van de hoeveelheid elektrolyse en grootschalige batterijen⁷ bij de drie scenario's, zoals bepaald met de methodiek die toegelicht is in Tekstkader 3. De figuur laat zien dat meer hernieuwbare opwek op land leidt tot een stuk meer elektrolyzers en grootschalige batterijen.⁸ Voor beide flexibele bronnen ligt het vermogen ongeveer twee keer zo hoog in het bovengrensscenario ten opzichte van het ondergrensscenario. De aanvullende batterijen zijn vooral nodig voor de extra zonne-energie. Het verschil in vermogen aan grote batterijen tussen het scenario Bovengrens en Bovengrens zonne-energie, ondergrens windenergie is beperkt, wat laat zien dat er relatief weinig nieuwe grootschalige batterijen nodig zijn als er meer windenergie op land wordt gerealiseerd.

Naast de hoeveelheid elektrolyse en grootschalige batterijen verandert ook de wijze van inzet van de flexibele bronnen. De elektrolyzers hebben meer draaiuren in de scenario's met meer hernieuwbare opwek op land en ook de elektrische boilers hebben een hoger aantal draaiuren in de scenario's met meer hernieuwbare opwek.

Figuur 4 – Hoeveelheid flexibele bronnen

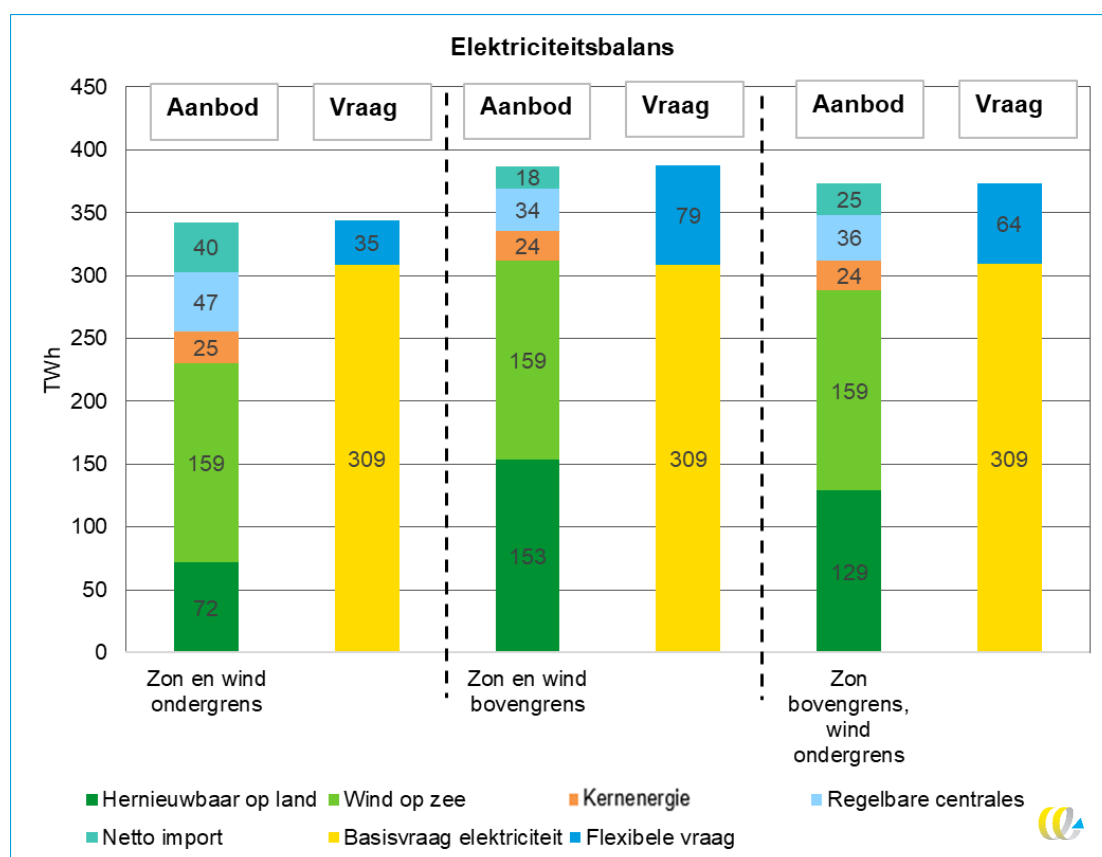


⁷ Naast grootschalige batterijen worden in de scenario's ook nog andere typen batterijen, zoals thuisbatterijen, meegenomen. Deze variëren we niet tussen de verschillende scenario's.

⁸ In de praktijk is het geen zekerheid dat er bij meer opwek ook meer flexibele bronnen gerealiseerd worden, zoals ook benoemd wordt in Tekstkader 3. Met name de hoeveelheid elektrolyse is behoorlijk ambitieus, zeker in het scenario met de bovengrens aan hernieuwbare opwek op land. In Paragraaf 2.2.3 bespreken we de effecten als een minder flexibele elektriciteitsvraag gerealiseerd wordt.

Figuur 5 toont de elektriciteitsbalans, dus vraag en aanbod van elektriciteit, voor de drie doorgerkende scenario's. De figuur laat zien dat de productie van windenergie op zee, hernieuwbare opwek op land en kernenergie in twee van de drie scenario's hoger ligt dan de basisvraag naar elektriciteit. Bij het ondergrensscenario voor hernieuwbare opwek is dit niet het geval; in dat scenario ligt de opwek van deze bronnen op ongeveer 85% van de basisvraag naar elektriciteit. Maar ook in de scenario's waar de opwek van hernieuwbare bronnen en kernenergie groter is dan de vraag, is inzet van regelbare centrales, voor de momenten met weinig windenergie en zon. In elk van de scenario's is er ook op momenten sprake van overschotten van productie, die met flexibele vraag (zoals elektrolyse) ingevuld wordt. Daarnaast laat de figuur zien dat in elk van de scenario's sprake is van netto-import van elektriciteit.

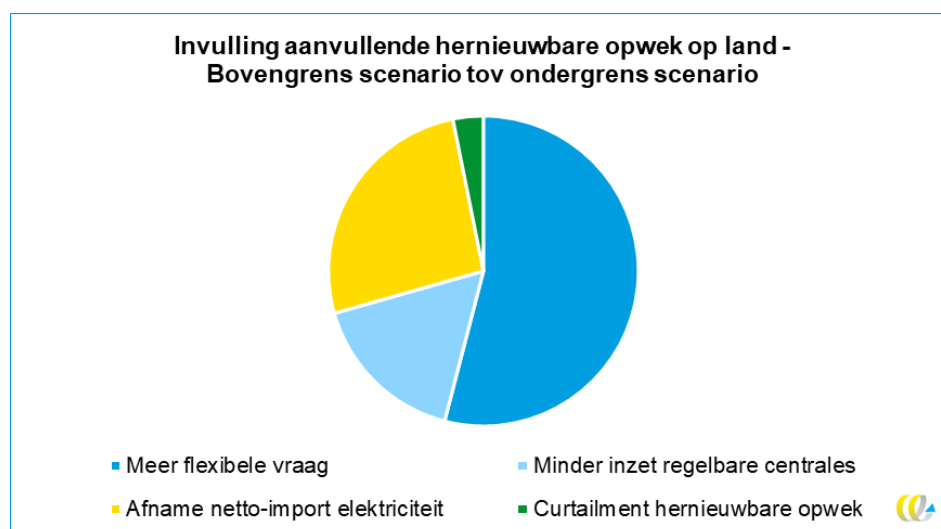
Figuur 5 – Elektriciteitsbalans in drie doorgerkende scenario's



De productie van hernieuwbare elektriciteit ligt in het bovengrensscenario ongeveer 80 TWh hoger dan in het ondergrensscenario. Dit wordt op verschillende manieren benut (zie ook Figuur 6):

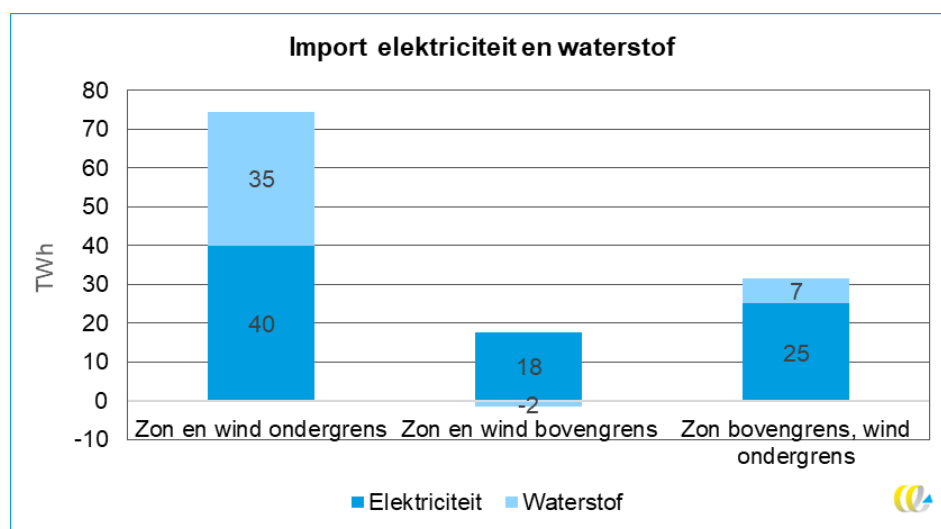
- Zoals eerder besproken, is bij meer productie van hernieuwbare opwek op land minder inzet van regelbare centrales nodig. Inzet van regelbare centrales is nodig op momenten dat de productie van wind-, zon- en kernenergie onvoldoende is voor het invullen van de basisvraag naar elektriciteit. Ongeveer 15% van de aanvullende hernieuwbare opwek op land bij het bovengrensscenario wordt hiervoor benut.
- Ongeveer een kwart van de extra productie wordt gebruikt voor het vergroten van de export en het verminderen van de import van elektriciteit. Dit leidt ertoe dat de netto-import van elektriciteit flink afneemt.
- Het grootste deel van de extra productie van hernieuwbare bronnen op land, ongeveer 55%, leidt tot extra overschotten van elektriciteit. In de modellering nemen we aan dat extra flexibele afnemers gerealiseerd worden bij een groter aanbod van hernieuwbare elektriciteit (zie Tekstkader 3). Met name de productie van waterstof met elektrolyse neemt toe. Hierdoor wordt meer groene waterstof in Nederland geproduceerd en is minder import nodig (meer hierover volgt).
- Een klein deel van de extra geproduceerde elektriciteit kan niet benut worden en moet worden gecurtailed. Het gaat om ongeveer 3% van de extra productie. Dit aandeel is relatief klein, omdat we aannemen dat bij meer hernieuwbare opwek op land ook meer flexibele bronnen (elektrolyzers, batterijen) gerealiseerd worden (zie Figuur 4). Als dit niet het geval is, dan zal een groter deel van de extra productie niet benut kunnen worden en zal er een grotere toename zijn van de hoeveelheid curtailment.

Figuur 6 – Invulling aanvullende hernieuwbare opwek op land



Zoals hiervoor besproken leidt extra hernieuwbare opwek op land in de modellering tot minder netto-import van elektriciteit en meer binnenlandse productie van (groene) waterstof. Dit verlaagt de import van elektriciteit en waterstof. Figuur 7 toont de importafhankelijkheid voor elektriciteit en waterstof in de drie scenario's. De benodigde import van elektriciteit en waterstof is bij de ondergrens van hernieuwbare opwek op land 70 TWh (20% van totale vraag elektriciteit en waterstof) en 15 TWh (5% van totale vraag elektriciteit en waterstof) bij de bovengrens van hernieuwbare opwek op land. Dit betekent dat meer productie van hernieuwbare opwek op land in de modellering zorgt dat minder import nodig is en een groter deel van de energievraag ingevuld kan worden met binnenlandse productie.⁹

Figuur 7 – Import elektriciteit en waterstof



2.2.3 Gevoeligheidsanalyses: andere ontwikkeling energievraag en overige productiebronnen

De bovenstaande berekeningen geven inzicht in de effecten van verschillende hoeveelheden hernieuwbare opwek op land op de energiemix in 2040. De berekeningen zijn echter uitgevoerd voor één scenario voor de ontwikkeling van de energievraag (Koersvaste Middenweg 2040) en de ontwikkeling van overige bronnen (kernenergie en windenergie op zee), om het aantal onzekerheden te beperken en om de varianten met meer en minder hernieuwbare opwek op land eerlijk met elkaar te kunnen vergelijken. Voor de vraag naar energie en de productie van overige bronnen wordt uitgegaan van het scenario Koersvaste Middenweg van de nieuwste Netbeheer Nederland-scenario's. Deze variant sluit aan bij de huidige ontwikkelingen en beleidscontext en geeft daarmee de beste inschatting van de verwachte energievraag in 2040, maar er zijn andere ontwikkelingen mogelijk.

⁹ In de praktijk hoeft minder hernieuwbare opwek niet per definitie te leiden tot meer import, het is ook mogelijk dat dan minder elektrificatie of processen op groene waterstof gerealiseerd worden. Dat heeft dan mogelijk wel impact op het halen van de klimaatdoelstellingen.

Voor de ontwikkeling van overige productiebronnen wordt uitgegaan van 35 GW aan windenergie op zee en realisatie van twee grote kerncentrales in 2040. 35 GW windenergie op zee is de middenwaarde van de bandbreedte (30-40 GW) van ontwikkeling zoals voorzien in het WIN. Het is echter ook mogelijk dat minder windenergie op zee gerealiseerd wordt voor 2040. Daarnaast blijkt uit recent onderzoek dat het aantal vollasturen van windparken op zee naar verwachting overschat wordt, en de productie per windpark daardoor naar verwachting lager uit zal vallen (zie Tekstkader 4). Ook bij kerncentrales is het onzeker of de aangenomen hoeveelheid in de scenario's in 2040 gerealiseerd wordt.¹⁰ Dit betekent dat het een reële kans is dat de productie van overige bronnen in 2040 lager uitvalt.

Tekstkader 4 – Lagere productie en vollasturen windparken op zee

Lagere productie en vollasturen windparken op zee

In het scenario Koersvaste Middenweg is aangenomen dat windparken op zee circa 4.500 vollasturen maken. Dit betekent dat 1 GW windenergie op zee per jaar circa 4,5 TWh elektriciteit produceert. Verschillende onderzoeken gaan echter uit van een lager aantal vollasturen. Onderzoek van Whiffle in opdracht van het ministerie van KGG geeft een inschatting van 3.700 vollasturen (Whiffle, 2025). Nieuw onderzoek van de TU Delft schat het aantal vollasturen voor windparken op zee nog lager in, op circa 3.000 vollasturen (Carlos Ferreira et al., 2025). Dit geeft aan dat er nog discussie speelt over wat een realistisch uitgangspunt is voor vollasturen van windparken op zee, maar dat het aannemelijk is dat deze lager zal liggen dan de aangenomen 4.500 vollasturen in de doorgerekende scenario's. In een kabinetsreactie is aangegeven dat het kabinet de inschatting van Whiffle (3.700 vollasturen) als het meest realistisch beschouwt en de inschatting van TU Delft als te pessimistisch.¹¹

Er zijn ook andere vraagscenario's mogelijk. Het scenario Koersvaste Middenweg gaat uit van een forse toename van de elektriciteitsvraag, zowel directe elektriciteitsvraag als indirecte elektriciteitsvraag voor de productie van waterstof en warmte. Het is ook mogelijk dat er minder elektriciteitsvraag komt, bijvoorbeeld door krimp van de industrie, minder elektrificatie of minder groei van het aantal datacenters. Het is ook mogelijk dat de elektriciteitsvraag hoger uitvalt, maar dit is naar onze verwachting minder reëel, aangezien het scenario Koersvaste Middenweg al uitgaat van een ambitieuze groei van de elektriciteitsvraag.

Daarnaast is de rol van waterstof en de ontwikkeling van de waterstofvraag een belangrijke onzekerheid. Het scenario Koersvaste Middenweg, dat gebruikt wordt voor de analyses, voorziet een belangrijke rol voor waterstof. Maar door hoge kosten blijven ontwikkelingen rondom groene waterstof achter en is er discussie of waterstof daadwerkelijk een belangrijke rol zal gaan spelen in het energiesysteem. Het scenario Koersvaste Middenweg gaat

¹⁰ In de [kamerbrief Voortgang nieuwbouw kernenergie uit mei 2025](#) werd geconcludeerd dat de realisatie van twee nieuwe kerncentrales op zijn vroegst eind jaren '30 haalbaar is, maar nog steeds onzeker is.

¹¹ [Kabinetsreactie op het onderzoek 'A theoretical upper limit for offshore windenergie energy extraction'](#).

uit van een forse vraag naar groene waterstof en een groot deel hiervan wordt geproduceerd door de overschotten van elektriciteit om te zetten naar waterstof.

Kortom, de kans is reëel dat de vraag naar energie en het aanbod van overige bronnen anders uitvalt. De totale balans tussen vraag en aanbod van elektriciteit bepaalt hoe de hernieuwbare opwek op land benut wordt. In de resultaten van Paragraaf 2.2.2 wordt minder dan de helft van de extra hernieuwbare opwek op land (bij het bovengrensscenario ten opzichte van het ondergrensscenario) direct benut voor het invullen van de basisvraag naar elektriciteit. Dit is de productie die leidt tot minder inzet van regelbare centrales en minder import. De overige productie leidt tot meer overschotten, die grotendeels omgezet worden naar waterstof. Een andere ontwikkeling van vraag en aanbod heeft de volgende effecten:

- Als de productie van kerncentrales en/of windenergie op zee in 2040 lager uitvalt (door vertraging of door een lager aantal vollasturen van windparken op zee), dan is de totale productie van elektriciteit lager. In onderstaande paragraaf doen we een doorrekening met pessimistischere aannames voor de ontwikkeling van kernenergie en windenergie op zee in 2040.
- Als de vraag naar elektriciteit minder snel toeneemt dan aangenomen, zal juist het tegenovergestelde gebeuren. Er is dan relatief meer opwek ten opzichte van de vraag, en een groter deel van de extra hernieuwbare opwek (bij het bovengrensscenario) zal leiden tot extra overschotten, meer productie van waterstof met elektrolyzers en deels ook meer export.
- Als de ontwikkeling van de waterstofeconomie achterblijft en er minder elektrolyzers gerealiseerd worden, dan is er minder flexibele vraag naar elektriciteit. In dat geval zijn er minder bronnen die gebruik kunnen maken van de overschotten van elektriciteit. De export van elektriciteit en inzet van andere flexibele bronnen (zoals elektrische boilers en batterijen) zal dan naar verwachting toenemen, maar in dat geval zal naar verwachting ook meer hernieuwbare opwek afgeschakeld worden (curtailment) als er overschotten zijn.

Gevoeligheidsanalyse minder kernenergie en windenergie op zee

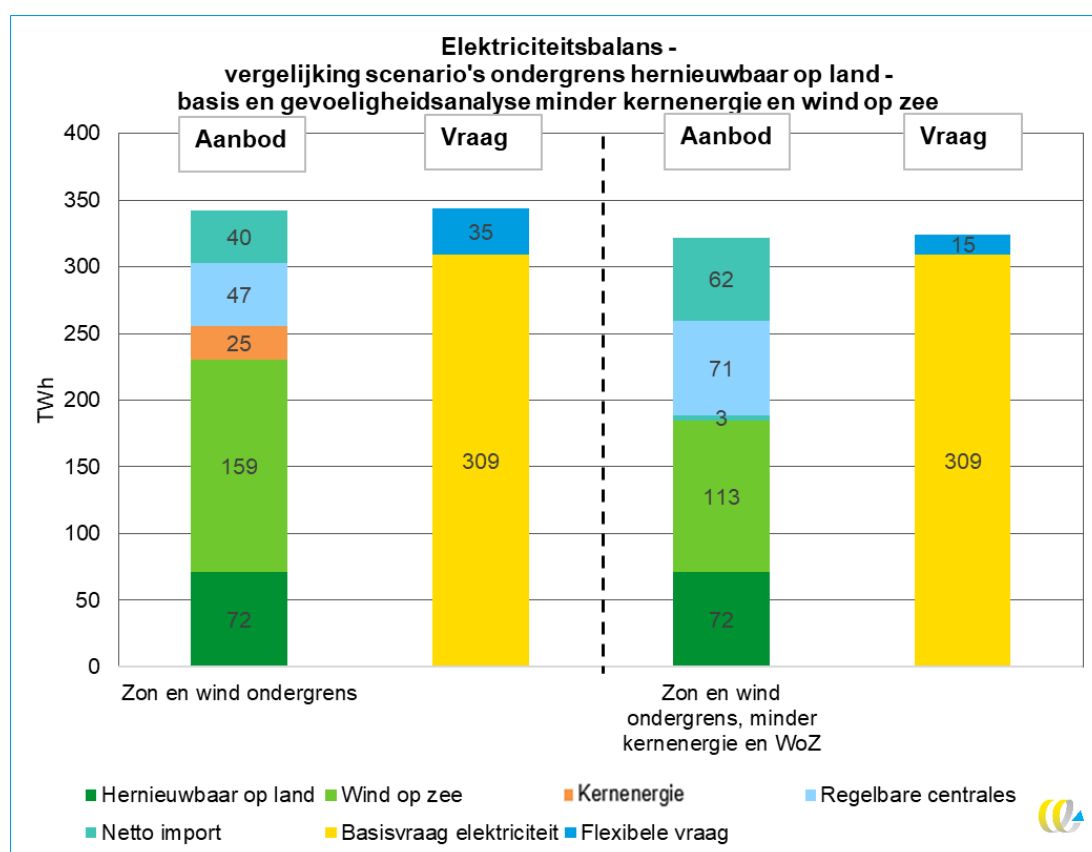
Gezien de onzekerheid rondom de ontwikkeling van kernenergie en windenergie op zee tot 2040 is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd met lagere aannames voor de ontwikkeling van deze bronnen. Hiervoor zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- In deze gevoeligheidsanalyse nemen we aan dat de nieuwe kerncentrales niet in 2040 operationeel zijn en alleen de bestaande kerncentrale in Borssele actief is.
- We gaan uit van de ondergrens van de bandbreedte voor de ontwikkeling van windenergie op zee richting 2040 vanuit het WIN, namelijk 30 GW. Daarnaast gaan we uit van een lager aantal vollasturen, namelijk 3.700 (Whiffle, 2025).

- Het vermogen aan flexibele bronnen wordt aangepast op basis van de aannames die beschreven zijn in Tekstkader 3.
- We houden de basisvraag naar elektriciteitsvraag gelijk. In de praktijk is het ook mogelijk dat dan minder elektrificatie of processen op groene waterstof gerealiseerd worden. Dat heeft dan mogelijk wel impact op het halen van de klimaatdoelstellingen.
- We rekenen het scenario met de ondergrens en bovengrens voor hernieuwbare opwek op land mee.

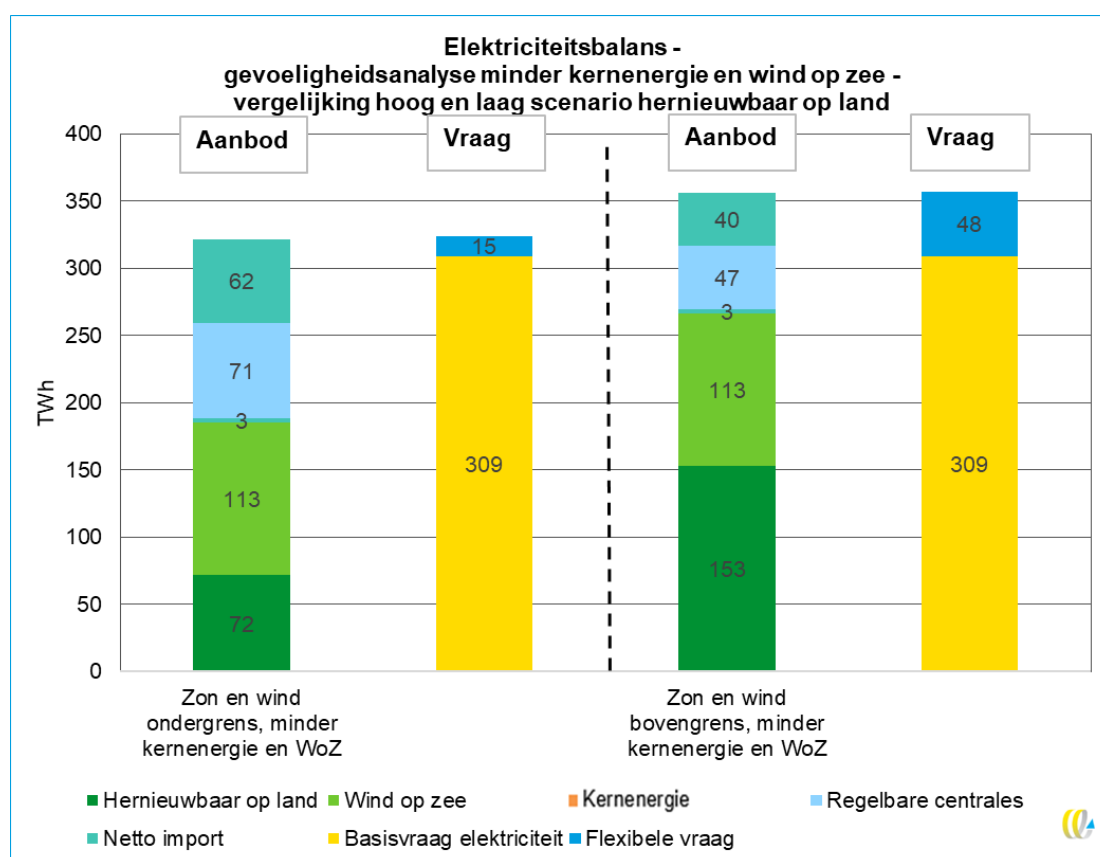
Figuur 8 toont een vergelijking tussen het basisscenario en de gevoeligheidsanalyse met minder kernenergie en windenergie op zee, voor het scenario met de ondergrens voor hernieuwbare opwek op land. De figuur laat zien dat door de lagere aannames van windenergie op zee en kernenergie de totale productie van kernenergie, windenergie op zee en hernieuwbare opwek op land ongeveer 65 TWh lager ligt. Hierdoor vullen deze bronnen gezamenlijk slechts 60% van de basisvraag naar elektriciteit in (tegenover 85% in het basisscenario met de ondergrens voor hernieuwbare opwek op land). Daardoor is een stuk meer productie van regelbare centrales en import van elektriciteit nodig. Daarnaast is er minder flexibele vraag naar elektriciteit, met name van elektrolyzers, waardoor een stuk minder groene waterstof wordt geproduceerd. Daardoor zal meer import van waterstof nodig zijn.

Figuur 8 – Elektriciteitsbalans, vergelijking ondergrens scenario's basis en gevoeligheidsanalyse minder kernenergie en windenergie op zee



Figuur 8 laat zien dat de noodzaak voor meer hernieuwbare opwek op land toeneemt als de ontwikkelingen van windenergie op zee en kernenergie tegenvallen. Dat is ook te zien in Figuur 9 en Figuur 10. Deze figuren laten de vergelijking zien tussen het ondergrens- en bovengrensscenario voor hernieuwbare opwek op land bij de lagere aannames voor kernenergie en windenergie op zee, en de benutting van de extra hernieuwbare opwek bij het bovengrensscenario.

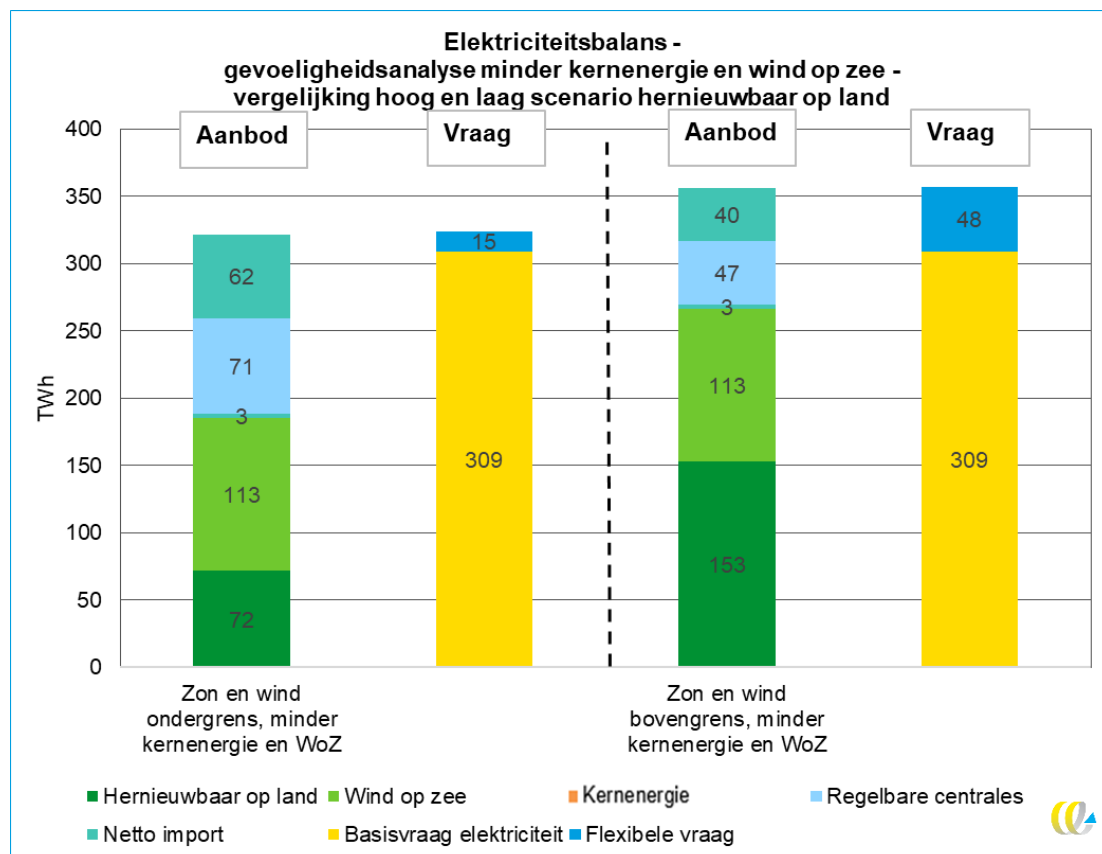
Figuur 9 – Elektricitetsbalans, vergelijking ondergrensscenario en bovengrensscenario hernieuwbare opwek op land - gevoeligheidsanalyse minder kernenergie en windenergie op zee.



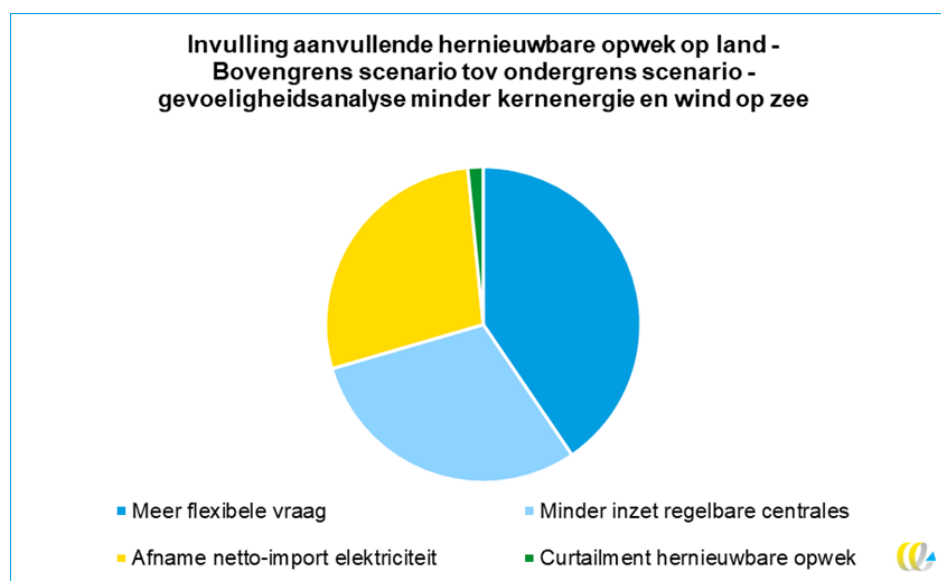
Figuur 9 laat zien dat de productie van windenergie op zee, kernenergie en hernieuwbare opwek op land een groter deel van de aangenomen basisvraag naar elektriciteit kan invullen, maar dat de productie van deze bronnen nog steeds lager ligt dan de vraag (ruim 85% van de vraag). Daarnaast laat Figuur 10 zien dat, net als bij de basisscenario's (zie Figuur 6), een groot deel van de extra opwek benut wordt door flexibele vraag.

Maar bij deze gevoeligheidsanalyse wordt een groter deel van de extra opwek benut voor het invullen van de basisvraag, waardoor minder inzet van regelbare centrales (50% van de extra productie) en import (30% van de extra productie) nodig is.

Figuur 9 – Elektriciteitsbalans, vergelijking ondergrensscenario en bovengrensscenario hernieuwbare opwek op land - gevoeligheidsanalyse minder kernenergie en windenergie op zee.



Figuur 10 – Invulling aanvullende hernieuwbare opwek op land – gevoeligheidsanalyse minder kernenergie en windenergie op zee



2.3 Wat zijn de maatschappelijke afwegingen rondom de hoeveelheid hernieuwbare opwek op land?

In de voorgaande paragrafen hebben we besproken wat de mogelijke bandbreedte is voor de ontwikkeling van hernieuwbare opwek op land en wat de impact van verschillende hoeveelheden hernieuwbare opwek op land op de energiemix is. In deze paragraaf gaan we in op de afwegingen rondom de hoeveelheid hernieuwbare opwek op land in Nederland. De belangrijkste afwegingen zijn:

- **Klimaatdoelstellingen:** hernieuwbare opwek op land kan op verschillende manieren bijdragen aan het reduceren van CO₂-uitstoot en daarmee aan het halen van de klimaatdoelstellingen:
 - Hernieuwbare opwek op land zorgt dat minder inzet van gascentrales (en op dit moment nog kolencentrales) nodig is. Uit de doorrekeningen uit Paragraaf 2.2 volgt dat de inzet van regelbare centrales bij de bovengrens van hernieuwbare opwek op land 13 TWh lager ligt dan bij het ondergrensscenario (34 TWh bij bovengrens, 47 TWh bij ondergrens). Het is nog onzeker welke brandstof regelbare centrales gebruiken in 2040. Als deze centrales nog gebruikmaken van aardgas zonder CCS, dan wordt de CO₂-uitstoot van de elektriciteitssector¹² in Nederland van 18 Mton naar 13 Mton door extra hernieuwbare opwek. Als deze centrales gebruikmaken van (groene of blauwe) waterstof of als CCS toegepast wordt bij aardgascentrales, dan zal de (besparing van) CO₂-uitstoot lager liggen.
 - Meer hernieuwbare opwek op land zorgt voor minder import en meer export van elektriciteit. Op die manier kan hernieuwbare opwek in Nederland zorgen voor minder CO₂-uitstoot door elektriciteitsproductie in omliggende landen.
 - Meer hernieuwbare opwek op land leidt in de modellering¹³ tot meer binnenlandse groene waterstofproductie en minder import van waterstof, waardoor mogelijk CO₂-uitstoot in het buitenland uitgespaard wordt. In de praktijk is het ook mogelijk dat de extra binnenlandse groenewaterstofproductie de binnenlandse productie van grijze (of blauwe) waterstof vervangt. In dat geval zal het ook binnen Nederland tot CO₂-reductie leiden.
 - Bij de afweging rondom de ontwikkeling van hernieuwbare opwek op land is ook de zekerheid voor het halen van de klimaatdoelstelling een afweging. Er is onzekerheid over de ontwikkeling van windenergie op zee (onzekere

¹² Het gaat hier om de directe emissies, aangezien dit de emissies zijn die meegeteld worden in de nationale klimaatdoelstellingen. Ketenemissies zijn niet meegenomen. Als deze wel meegenomen worden dan wordt de netto CO₂-winst groter, aangezien de ketenemissies van aardgas hoger liggen dan die van hernieuwbare opwek op land. We rekenen met een kental van 380g CO₂/kWh directe emissies voor aardgascentrales (CBS, 2023).

¹³ Zoals eerder besproken, is het geen zekerheid dat bij meer hernieuwbare opwek op land meer elektrolyse en groenewaterstofproductie in Nederland gerealiseerd wordt.

uitroolsnelheid en mogelijk lager aantal vollasturen) en kernenergie (haalbaarheid in 2040), wat een overweging kan zijn om in te zetten op een sterkere doorgroei van hernieuwbare opwek op land. De gevoeligheidsanalyse met minder windenergie op zee en kernenergie laat zien dat er meer noodzaak is voor een verdere doorgroei van hernieuwbare opwek op land als de ontwikkelingen van deze andere bronnen tegenvalt.

- Hernieuwbare opwek op land kan naar verwachting sneller opgeschaald worden dan windenergie op zee en kernenergie. Daardoor kan de uitstoot van broeikasgassen sneller teruggebracht worden, waardoor de totale uitstoot van broeikasgassen (wat bepalend is voor het beperken van klimaatverandering) tot aan 2040 lager ligt.
- **Totale systeemkosten:** de hoeveelheid hernieuwbare opwek heeft impact op de totale kosten van het energiesysteem. Uit eerder onderzoek blijkt dat een kostenoptimaal CO₂-vrij elektriciteitssysteem een flinke doorgroei van windenergie op land en zonne-energie heeft (CE Delft & Witteveen+Bos, 2024), en ook bij de scenario's die we voor dit onderzoek doorgerekend hebben, liggen de maatschappelijke kosten het laagst bij het scenario met maximale doorgroei van zowel zonne-energie als windenergie op land. Voor zonne-energie geldt dat de kostenoptimale hoeveelheid net iets lager ligt dan de richtwaarde uit het NPE (bovengrens van de bandbreedte).¹⁴ Voor windenergie op land geldt dat het kostenoptimaal is om zelfs meer windenergie op land te realiseren dan de richtwaarde uit het NPE, en om minder windenergie op zee en/of kernenergie te realiseren. Dit is het geval omdat windenergie op land goedkoper is dan windenergie op zee door de hoge kosten voor elektriciteitsinfrastructuur op zee. Vanuit het perspectief van het minimaliseren van de totale kosten van het energiesysteem is het dus wenselijk om in te zetten op forse groei van zowel zonne-energie als windenergie op land.
- **Importafhankelijkheid en strategische autonomie:** bij meer hernieuwbare opwek op land is de totale binnenlandse productie van elektriciteit groter. Dit zorgt ervoor dat minder import van zowel elektriciteit als waterstof nodig is, zoals te zien in Figuur 7 in Paragraaf 2.2.2. De totale import van elektriciteit en waterstof neemt in de doorgerekende scenario's af van 20% van de totale vraag van elektriciteit en waterstof naar 5% door meer hernieuwbare opwek op land. Het is onzeker of de benodigde import, met name voor elektriciteit, altijd mogelijk is. Daarnaast kent dit mogelijk hoge kosten.
- **Lagere elektriciteitsprijzen:** hogere productie van hernieuwbare opwek op land leidt tot lagere gemiddelde elektriciteitsprijzen (CE Delft & Witteveen+Bos, 2024). Dit kan de businesscase voor elektrificatie en het verdienvermogen van Nederlandse bedrijven verbeteren.
- **Totale impact op de leefomgeving en het draagvlak:** bij de afweging rondom hernieuwbare opwek op land zijn ook de impact op de leefomgeving en zowel

¹⁴ De analyses in het onderzoek van CE Delft en Witteveen+Bos zijn uitgevoerd voor zichtjaar 2035. Maar voor 2040 zullen de conclusies vergelijkbaar zijn.

maatschappelijk als politiek draagvlak van belang. Daarbij is van belang om te benoemen dat ook andere productiebronnen, zoals windenergie op zee en kern-energie, ook een impact hebben op de leefomgeving.

- **Impact op het elektriciteitsnet:** er zijn uitbreidingen aan het elektriciteitsnet nodig voor de realisatie van meer hernieuwbare opwek op land. De benodigde uitbreidingen aan het elektriciteitsnet kunnen verminderd worden door koppeling van vraag en aanbod, opslag, curtailment en alternatieve contractvormen. Daarnaast kan hernieuwbare opwek in sommige gevallen ook zorgen dat minder uitbreidingen nodig zijn voor de toename in afname van elektriciteit (meer hierover in Paragraaf 4.2). Als meer hernieuwbare opwek op land gerealiseerd wordt, kan dit er ook toe leiden dat minder windparken op zee noodzakelijk zijn, waardoor minder uitbreidingen aan elektriciteitsnetten op zee (en land) nodig zijn. Daarmee kan meer hernieuwbare opwek op land er ook toe leiden dat in totaal minder netuitbreidingen noodzakelijk zijn.
- **Leveringszekerheid elektriciteit:** leveringszekerheid houdt in dat op elk moment van het jaar in de vraag naar energie voorzien kan worden. In het toekomstige energiesysteem wordt leveringszekerheid een belangrijk aandachtspunt, met name voor elektriciteit, aangezien het niet kunnen leveren van elektriciteit hoge maatschappelijke kosten oplevert (Ecorys, 2025). Een evenwichtige mix van zonne-energie, windenergie op land en flexibiliteit kan bijdragen aan meer leveringszekerheid. Maar voor de leveringszekerheid is ook het leveren van voldoende stroom op momenten met weinig windenergie en zonne-energie een uitdaging. Meer hernieuwbare opwek op land draagt beperkt bij aan de leveringszekerheid op deze momenten, aangezien deze bronnen op dat moment weinig produceren. Op die momenten is regelbaar vermogen, zoals gascentrales, noodzakelijk.

Naast bovenstaande afwegingen is uiteraard ook van belang welke opties er zijn voor het invullen van de opgave en wat de afwegingen hiervan zijn. Hier gaan we in de volgende hoofdstukken verder op in.

| 3 Archetypen

In Hoofdstuk 2 zijn we ingegaan op de ontwikkeling van de totale hoeveelheid hernieuwbare opwek op land tot 2040. In dit hoofdstuk bespreken we met welke archetypen die opgave ingevuld kan worden.

3.1 Wat verstaan we onder een archetype?

In dit onderzoek brengen we verschillende archetypen voor mogelijke vormen van hernieuwbare opwek op land in kaart. Een archetype is een techniektype opwek op land met ruimtelijke en energetische eigenschappen, zoals: windenergie bij bedrijventerrein, zonne-energie op bedrijfsdaken en solar carports. We maken gebruik van archetypen om de verscheidenheid aan mogelijke vormen van hernieuwbare opwek op land samen te brengen in een behapbaar aantal 'hoofdcategorieën'. Het vaststellen van de archetypen is dus een middel om de effecten van de verschillende vormen van hernieuwbare opwek op land goed te kunnen onderzoeken en om hier ook uitspraken over te kunnen doen.

Binnen een archetype is nog wel variatie, een verdere onderverdeling, mogelijk. Zo is er bij zonne-energie op bedrijfsdaken tussen de individuele projecten verschil in het type afnemer, het aantal zonnepanelen en maakt het ook uit of dit project wel of niet in congestiegebied gerealiseerd wordt. Maar de belangrijkste energetische en ruimtelijke eigenschappen zijn voor alle projecten binnen een archetype gelijk, zodat de effecten en de afweging rondom al deze projecten ook (vrijwel) gelijk zijn.

Voor de archetypen wordt bepaald hoeveel ruimtelijk potentieel er is. Daarnaast brengen we voor de archetypen de ruimtelijke effecten, de netinpassing en maatschappelijke kosten en baten in kaart. In de volgende paragraaf bespreken we de eigenschappen waarop archetypen kunnen variëren en geven we een overzicht en beschrijving van de archetypen die we in dit onderzoek uitwerken.

3.2 Wat zijn de eigenschappen voor archetypen?

Zoals hiervoor besproken, zijn de archetypen een techniektype opwek op land met ruimtelijke en energetische eigenschappen. Daarnaast kunnen de financiële modellen en governance modellen verschillen tussen verschillende projecten van hernieuwbare opwek op land. In deze paragraaf geven we een overzicht van de mogelijke technische, ruimtelijke en energetische eigenschappen, evenals de mogelijke financiële en governance modellen. In Figuur 12 worden de mogelijke eigenschappen van de archetypen geïllustreerd.

The diagram illustrates the four dimensions of an energy landscape archetype, centered around 'Archetype Eigenschappen' (Archetype Characteristics). The dimensions are represented by colored circles, each with associated sub-points:

- Energetisch** (Energy):
 - Energiesysteem en infrastructuur
- Techniek & Schaal** (Technology & Scale):
 - Omvang van het project
 - Eigendom en organisatorische schaal
- Ruimtelijk** (Spatial):
 - Ruimtelijke beperkingen en uitsluitzones
 - Landgebruik en landschapstypologieën
- Financiële / Governance Modellen** (Financial / Governance Models):
 - Financiële profiel
 - Beleidsinstrumenten

The central 'Archetype Eigenschappen' are represented by a diamond shape containing four colored dots (green, blue, purple, yellow) corresponding to the dimensions.

Bron: Generation.Energy.

Figuur 12 – Mogelijke eigenschappen archetypen

Archetype Eigenschappen

Ruimtelijk

LANDGEBRUIK EN LANDSCHAPSTYPOLOGIEËN

- **Stedelijke gebieden:** woningen, voorzieningen
- **Industriële gebieden:** industrieterreinen, havens, porten
- **Bedrijventerreinen**
- **Kassen**
- **Landbouw:** grote open landbouwgebieden
- **Infrastructuur:** corridors, dijken, carports, parkeerterreinen
- **Open water:** meren, reservoirs
- **Poldergebieden:** vlakke open gebieden

RUIMTELIJKE BEPERKINGEN EN UITSCHLUITSZONES

- **Beschermde gebieden**
- **Bufferzones:** rond woningen, bebouwing en infrastructuur
- **Cultureel erfgoedlandschap**
- **Militaire zones / luchthavens**
- **Waterwegen & dijken**
- **Zichtbaarheidszones / zones met visuele impact**

Energetisch

ENERGIESYSTEEM EN INFRASTRUCTUUR

- **Productiebron:** wind, zon of beiden
- **Combinatie met elektriciteitsvraag:** dichtbij of ver van (grote) elektriciteitsvraag. Keuzes daarbinnen zijn wel/geen netto-invoeding, dimensionering opwek tov vraag en match profiel vraag en aanbod.
- **Elektriciteitsaansluiting:** hoogspanningsnet (groter dan 80-100 MW) of regionaal elektriciteitsnet (kleinere projecten)
- **Netcongestie:** wel of niet in congestiegebied
- **Wel of geen integratie met batterij en/of elektrolyser**

Techniek & Schaal

OMVANG VAN HET PROJECT

- **Capaciteitsschaal:** klein (*kW*), middelgroot (*MW*), groot (*100+ MW*)
- **Fysieke omvang:** een dak, enkele hectares, of een hele polder

EIGENDOM & ORGANISATORISCHE SCHAAL

- **Individueel huishouden**
- **Gemeenschap**
- **Nationale infrastructuur**

Financiële / Governance Modellen

FINANCIËEL PROFIEL

- **Eigendommodellen:** privé, coöperatief of publiek-private samenwerking (PPS/PPP)
- **Businessmodellen:** productie voornamelijk voor eigen gebruik of voor verkoop, PPA (Power Purchase Agreement) met afnemer of niet

BELEIDSINSTRUMENTEN

- **Subsidies:** SDE++, regionale stimuleringsmaatregelen, EU-fondsen
- **Fiscaal voordeel:** verlaagd btw-tarief, salderingsregelingen
- **Garanties of risicodelingsmechanismen:** leningen, verzekeringen, enz.

Bron: Generation.Energy.

3.3 Totaaloverzicht archetypen

Op basis van de mogelijke eigenschappen uit Figuur 12 is een lijst opgesteld met de archetypen die verder onderzocht worden. In theorie is er een bijna oneindig aantal combinaties tussen verschillende eigenschappen mogelijk, en heeft elk project weer net andere eigenschappen. Om praktische redenen en om op beleidsniveau uitspraken te kunnen doen, is het echter wenselijk om een overzichtelijk aantal archetypen op te stellen en te onderzoeken.

Bij het vaststellen van de archetypen zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- De lijst met archetypen omvat gezamenlijk het grootste deel van de totale potentie voor hernieuwbare opwek op land.
- De archetypen overlappen zo min mogelijk. Bij het bepalen van de ruimtelijke potentie van archetypen (Paragraaf 4.1.1) worden geen dubbeltellingen meegenomen.
- De archetypen verschillen in ruimtelijke, technische of energetische eigenschappen. De archetypen moeten voldoende onderscheidend zijn qua eigenschappen om ze als losse archetypen op te nemen.
- Binnen de archetypen zijn er nog verschillende smaken mogelijk. Zo vallen er bijvoorbeeld binnen bepaalde archetypen zowel zonne-energie als windenergie, en zijn verschillende schaalniveaus mogelijk. Bij de verdere uitwerking maken we concreet welke verdere onderverdeling er is, en maken we daartussen ook onderscheid bij het bepalen van de effecten (ruimtelijke potentie en effecten, netinpassing en maatschappelijke kosten en baten).
- Vanuit energetisch perspectief zijn zowel archetypen opgenomen die kansrijk zijn in congestiegebieden (decentrale oplossingen bij vraag, extra opwek bij bestaand) en archetypen die uitdagend zijn in congestiegebieden, maar wel in gebieden zonder congestie of na oplossen netcongestie mogelijk zijn.
- De ruimtelijke variatie (verschillende typen gebieden) is meegenomen bij de losstaande zon- en windparken. Bij de overige archetypen (bij vraag en bij bestaande projecten) is de vraag of de locatie van de bestaande opwek leidend is voor de locatie, niet het type gebied.
- Er wordt bij de archetypen onderscheid gemaakt naar drie categorieën: zonne-energie of windenergie bij vraag/decentrale oplossingen, losstaande wind- en/of zonneparken en extra hernieuwbare opwek bij bestaande opwek.
- Het governancemodel en het financiële model nemen we niet als onderscheidende eigenschap bij het vaststellen van de archetypen. Bij elk van de archetypen zijn verschillende governance- en financiële modellen mogelijk.
- We nemen integratie met flexibele bronnen ook niet als onderscheidende eigenschap van archetypen. We geven wel een beschouwing op de integratie met flexibele bronnen voor de archetypen in Paragraaf 4.2.

- Tabel 4 geeft het overzicht van de archetypen voor hernieuwbare opwek op land en de belangrijkste eigenschappen. Een uitgebreide omschrijving van de archetypen en de eigenschappen staat in Paragraaf 3.4 en Bijlage A.

Tabel 4 – Overzicht archetypen

	Productietechniek	Combi met afname (en welke?)	Type locatie of gebied	Typische schaalgrootte
Zonne-energie of windenergie bij vraag/decentrale oplossingen				
Hernieuwbaar in grote industriecusters	Windenergie en/of zonne-energie (beiden mogelijk)	Ja, industrie in grote clusters	Industrieel gebied	Grootschalig (HS/MS niveau)
Hernieuwbaar bij cluster 6-industrie	Windenergie en/of zonne-energie (beiden mogelijk)	Ja, industrie	Deels industrieel	Grootschalig (HS/MS-niveau)
Hernieuwbaar bij mobiliteitshubs	Windenergie en/of zonne-energie (beiden mogelijk)	Ja, laadvraag mobiliteit	Wisselend	Middelgroot (MS-niveau)
Zonne-energie op daken van mkb en maatschappe- lijk vastgoed (individueel)	Zonne-energie	Ja, elektriciteits- vraag bedrijven	Bedrijventerrein en omgeving	Kleinschalig (achter de meter)
Windturbines (evt. + zonne-energie) bij bedrijventerreinen (collectief)	Windenergie, eventueel met zonne-energie	Ja, elektriciteits- vraag bedrijven	Bedrijventerrein en omgeving	Middelgroot (MS-niveau)
Zonne-energie op dak woningen	Zonne-energie	Ja, vraag van woningen	Woonwijken	Kleinschalig (achter de meter, kleinverbruikers)
Zonne-energie op gevels	Zonne-energie	Ja, vraag van woningen en bedrijven	Woonwijken en bedrijventerreinen	Kleinschalig (achter de meter, kleinverbruikers)
Erfmolens	Kleinschalig windenergie	Ja, vraag landbouw	Landbouwgebied	Kleinschalig of middelgroot (vaak achter de meter)
Zonne-energie bij parkeerplaatsen (solar carports)	Zonne-energie	Ja, laadvraag	Zonne-energie bij parkeerplaatsen (solar carports)	Kleinschalig (LS) of middelgroot (MS)
Losse wind- of zonneparken				
Verticale & zonvolgende agri-pv	Zonne-energie (verticaal & zonvolgend)	Mogelijk	Landbouwgebied	Middelgroot (MS-niveau)
Zonneparken als functie voor ecologie en natuurherstel	Zonne-energie	Mogelijk	Natuurgebied	Middelgroot of groot (MS/HS-niveau)

	Productietechniek	Combi met afname (en welke?)	Type locatie of gebied	Typische schaalgrootte
Zonne-energie op water	Zonne-energie	Mogelijk	Binnenwater	Middelgroot of groot (MS/HS-niveau)
Windenergie op verziltingsgronden of veenontginningsgebieden.	Windenergie, eventueel met zonne-energie	Mogelijk	Verziltingsgronden of veenontginnings- gebieden	Grootschalig (HS-niveau)
Zonne-energie of windenergie op brown- fields of restlandschappen (zoals infrastructuur)	Zonne-energie of windenergie	Mogelijk	Brownfields of restlandschappen	Middelgroot of groot (MS/HS-niveau)
Zonneweide en/of wind- turbines op landbouw- grond (exclusief agri-pv)	Zonne-energie of windenergie	Mogelijk	Landbouwgebied	Middelgroot of groot (MS/HS-niveau)
Extra hernieuwbare opwek bij bestaande opwek				
Repowering	Zonne-energie of windenergie	Mogelijk	Bestaande productielocaties	Middelgroot of groot (MS/HS-niveau)
Bijplaatsen opwek bij bestaand project op dezelfde aansluiting	Zonne-energie of windenergie	Mogelijk	Bestaande productielocaties	Middelgroot of groot (MS/HS-niveau)

3.4 Toelichting en visualisatie per archetype

Voor elk archetype is één afzonderlijk paspoort opgesteld, te vinden in Bijlage A, waarin de belangrijkste gegevens van dat archetype zijn samengebracht. Het paspoort geeft inzicht in de belangrijkste ruimtelijke en energetische kenmerken van het archetype, waaronder:

- het type gebied waarin het archetype wordt gerealiseerd;
- de schaal vanuit energiesysteemperspectief;
- de productietechniek(en) die de verschillende uitvoeringsvarianten binnen hetzelfde archetype beschrijven; in sommige gevallen gaat het om een combinatie van windenergie en zonenergie;
- het huidige geïnstalleerde vermogen van het archetype (in MW);
- het ruimtelijk potentieel van de archetypen (meer hierover in Paragraaf 4.1.1 en Bijlage B).

Daarnaast bevat elk paspoort een conceptuele illustratie die de ruimtelijke configuratie van het archetype verbeeldt. Deze wordt aangevuld met een kaart op nationale schaal (zoals in Figuur 14) die inzicht geeft in het ruimtelijke potentieel van het archetype nadat alle relevante beperkingen zijn toegepast. Samen bieden deze elementen een realistisch beeld van wat voor elk archetype haalbaar is.

Tot slot kan elk archetype specifieke ruimtelijke kenmerken hebben die afhankelijk zijn van de lokale inpassingscondities. Hoewel deze aspecten niet volledig kunnen worden gedocumenteerd of in kaart gebracht binnen de scope van dit onderzoek, worden op provinciale schaal nadere inzichten gegeven in Hoofdstuk 5.5.

Hieronder een voorbeeld van een paspoort en de bijbehorende kaart voor één van de archetypen. De overige zijn opgenomen in Bijlage A.

Figuur 13 – Paspoort voor het archetype ‘Zonne-energie of windenergie in grote industrieclusters’

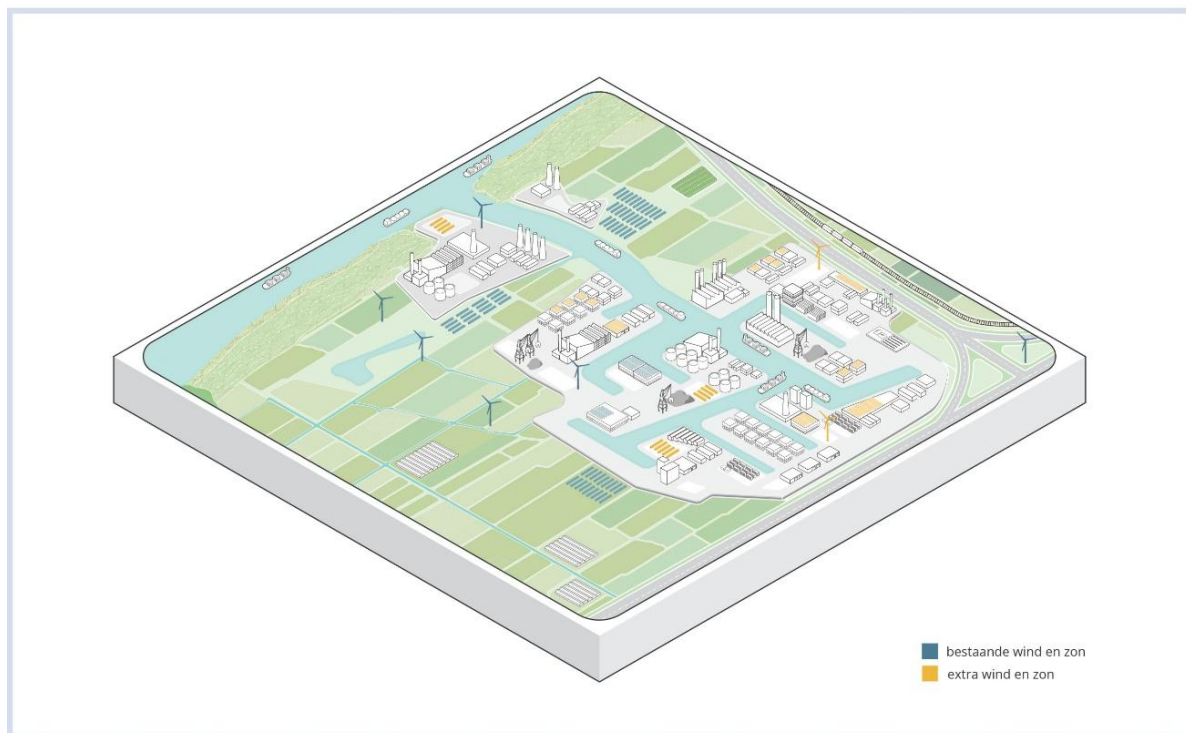
Zon of wind bij vraag Decentraal	
1a.	<i>Zonne-energie of windenergie in grote industrieclusters</i>
<i>Dit archetype richt zich op grootschalige zonne- en/of windopwekking binnen grote industriële clusters, waar al een aanzienlijke en relatief stabiele vraag naar elektriciteit aanwezig is.</i> <i>Installaties zijn doorgaans aangesloten op het middenspannings- of hoogspanningsniveau en kunnen bestaan uit zonne-energie, windenergie, of een combinatie van beide, afgestemd op de lokale omstandigheden. Door de opwekking direct naast de vraag te situeren, kan een groot deel van de elektriciteit ter plaatse worden gebruikt, waardoor de export naar het bredere netwerk beperkt blijft.</i> <i>Ruimtelijk bouwt het archetype voort op bestaande industriële terreinen en infrastructuur, wat resulteert in een beperkte extra grondinname en weinig conflicten met omliggende functies.</i> <i>Vanuit een energiesysteem perspectief vermindert deze nauwe koppeling van vraag en aanbod de belasting van het netwerk en de behoefte aan versterking, wat bijdraagt aan een efficiënte en kosteneffectieve energietransitie.</i>	
Combinatie met afname (en welke?)	
Ja, industrie in grote clusters	
Type locatie of gebied	
Industrieel gebied	
Typische Schaalgrootte	
Grootschalig (HS/MS niveau)	

Zon of wind bij vraag | Decentraal

1a. Zonne-energie of windenergie in grote industrieclusters

Productietechniek	Bestaand (MW)	Theoretisch maximale potentieel (MW)	Potentieel na aftrek mogelijke beperking (beleid, radar of economisch) (MW)	Ondergrens maximaal potentieel (zon > 20MW, wind 16.8MW) (MW)	Potentieel na aftrek mogelijke beperking (beleid, radar of economisch) (MW)
Bestaand wind	758				
Bestaand zon	250				
Bestaand zon op dak	463				
Potentieel wind turbine 5.6 MW		622	610	118	118
Zon op veld intensief		5.858	1.313	3.693	367
Zon op veld extensief		246	83	63	0
Zon op gebouwen dak		4.173		3.102	

Zonne-energie of windenergie in grote industrieclusters - Conceptueel Archetype



Bron: Generation.Energy.

Figuur 14 – Kaart op nationale schaal voor het archetype 'Zonne-energie of windenergie in grote industriecusters'



Bron: Generation.Energy.

4 Effecten van archetypen

4.1 Ruimtelijke effecten

In de paragraaf wordt verder ingegaan op de aanpak voor het berekenen van de potenties voor zonne-energie en windenergie op land, hoe deze potenties toegerekend worden aan de archetypen en wat de afwegingen zijn voor deze archetypen. In de Bijlage E is een uitgebreidere uitleg van de ruimtelijke potentieanalyse, de gebruikte modellen met de uitgangspunten en de bestaande rekenmethodieken beschreven.

4.1.1 Ruimtelijke potentie

Methodiek

In deze studie wordt het ruimtelijk potentieel voor wind- en zonne-energie in Nederland onderzocht op basis van bestaande methodieken uit de eerdere onderzoeken: Analysekaarten NP RES (NPRES, 2020) en Ruimtelijk potentieel voor zonnestroom (Generation.Energy, 2021). In deze methodieken wordt gebruikgemaakt van GIS-modellen, die voor deze studie ook zijn ingezet. (Voor het gebruik van deze modellen gelden een aantal beperkingen; deze zijn in Tekstkader 5 toegelicht). Een uitgebreid overzicht van de uitgangspunten van de analyses is te vinden in Bijlage B.

Ruimtelijk geldt voor windenergie dat dit vaak gecombineerd wordt met andere landfuncties, maar deze zijn gebonden aan milieu- en veiligheidsnormen. Voor zonne-energie op land geldt in veel gevallen dat deze de bestaande functie verdringen, mits het om extensieve opstellingen gaat waarbij het wordt gecombineerd met bestaande. In de ruimtelijke afweging (Paragraaf 4.1.2) is hier rekening mee gehouden. Voor zonne-energie op gebouwen en carports en erfmolens geldt dat zij standaard een vorm van meervoudig ruimtegebruik zijn.

Voor de potentieberekening voor windenergie op land worden eerst de beperkingen in beeld gebracht en daarna wordt de theoretische potentie bepaald binnen het overgebleven gebied. Hiervoor gebruiken we een GIS-rekenmodel. Voor de beperkingen wordt een onderscheid gemaakt in hardere en zachtere beperkingen. Hardere beperkingen geven aan wat ruimtelijk-technisch maximaal mogelijk is en zachtere beperkingen geven aan welke invloed ruimtelijk beleid hierop heeft.

De hardere beperkingen zijn bepaald op basis van een juridische of technische redenen. Deze komen voort uit geluidsnormen ten opzichte van woningen, gebieden met hoogtebeperking rondom vliegvelden, invloed van bestaande windturbines en veiligheidsafstanden ten opzichte van objecten om risico's op ongevallen te verkleinen of schade op kritieke

infrastructuur te beperken. Vanuit het technische en juridische aspect is het dus onwaarschijnlijk dat windenergie op land in deze gebieden kan worden gerealiseerd. In de praktijk zou kunnen worden onderzocht of er met maatregelen toch meer mogelijk is, maar voor een potentieberekening is dat niet het uitgangspunt.

Voor het bepalen van de hardere beperkingen die betrekking hebben op veiligheidsafstanden worden in het GIS-model de richtlijnen uit het Handboek Risicozonering Windturbines (Faasen et al., 2014) gevolgd. Dit zijn afstanden die met name betrekking hebben op de veiligheid ten opzichte van gebouwen of infrastructuur. Deze afstanden zijn gebaseerd op de afmetingen van de turbines. Aanvullend op de richtlijnen zijn er in het model lagen toegevoegd waar sprake is van hoogtebeperkingen rondom luchthavens en laagvliegroutes (RVO, lopend) en een afstand voor geluid ten opzichte van woningen op basis van een vuistregel. In Tabel 5 is een uitgebreid overzicht van de uitgangspunten weergegeven.

Voor zonne-energie op land en zonne-energie op water geldt dat er geen redenen vanuit veiligheid, geluid of hoogte zijn die beperkingen opleggen zoals dat bij windenergie het geval is. De technische beperkingen voor zonne-energie baseren we op de mate waarin het bestaande functionele gebruik van de grond geschikt wordt geacht voor een combinatie met zonne-energie op land. Een paar voorbeelden van gronden die niet geschikt worden geacht, zijn rijwegen, bosgebieden of woonerven.

Zachtere beperkingen komen voort uit provinciaal beleid. In de ruimtelijke verordeningen van provincies staan regels beschreven die bepalen welke toepassingen wel of niet zijn toegestaan in een specifiek gebied. Vanuit het ruimtelijk-technisch oogpunt zou er binnen deze gebieden geen beperking gelden, maar het beleid staat de ontwikkeling van windenergie op land en zonne-energie hier niet toe. Wij beschouwen dit als zachtere beperkingen omdat het huidige beleid een grens trekt in de mogelijkheden voor windenergie of zonne-energie. Wanneer de beleidsregels in de toekomst meer ruimte bieden voor windenergie of zonne-energie dan ontstaat in de gebieden met zachtere beperkingen meer potentiële ruimte voor deze technieken. Tabel 6 geeft een overzicht van de gebieden die als zachtere beperking meegenomen zijn in de analyse.

Naast het provinciaal beleid zijn er nog meer redenen die ervoor zorgen dat de kans voor windenergie op land of zonne-energie op land worden verkleind. Voor windenergie op land zijn dit de strenge radarzones. Binnen deze gebieden kunnen windturbines het zicht van de radar beperken en geldt dat dit getoetst moet worden. Voor de mogelijkheden voor zonne-energie op land is er naast de provinciale regels rekening gehouden met de gronden die al bestemd zijn als uitgeefbare grond voor bedrijven op bedrijventerreinen. Deze gebieden zijn nog in ontwikkeling en aangezien de ruimte voor nieuwe bedrijvigheid schaars is, hebben we het uitgangspunt genomen dat de gronden die voor deze bedrijvigheid gereserveerd zijn in eerste instantie niet in aanmerking komen voor zonne-energie.

De zachtere beperkingen verkleinen het theoretische potentieel, omdat deze gronden om beleidsmatige, veiligheids- of economische redenen in mindere mate kansrijk zijn voor energieopwekking. Zowel het ruimtelijk theoretische potentieel mét als zonder deze zachte beperkingen is in kaart gebracht.

Tabel 5 – Overzicht beperkingen voor windenergie op land: hardere beperkingen

Bronobject	Specificatie bronobject	Impact	Juridische status ¹⁵	Berekende afstand 5,6 MW	Berekende afstand 4,2 MW	Berekende afstand 3,6 MW
Kwetsbare bebouwing	Kwetsbare objecten	Veiligheidsnorm	Activiteitenbesluit	241 m vanaf gevel	194 m vanaf gevel	150 m vanaf gevel
Beperkt kwetsbare bebouwing	Beperkt kwetsbare objecten	Veiligheidsnorm	Activiteitenbesluit	75 m vanaf gevel	65 m vanaf gevel	59 m vanaf gevel
Wegen	Rijkswegen (A), Spoorwegen(N), Stadsroutes (S)	Veiligheidsnorm	Noodzakelijk voor vergunning (RWS)	75 m vanaf rand weg	65 m vanaf rand weg	59 m vanaf rand weg
Spoorwegen	Spoorwegen voor personen of goederenvervoer en lightrailverbindingen	Veiligheidsnorm	Noodzakelijk voor vergunning (ProRail)	83 m vanaf hart spoorbaan	73 m vanaf hart spoorbaan	67 m vanaf hart spoorbaan
Waterwegen	Vaarwegen	Radarverstoring	Noodzakelijk voor vergunning (RWS)	50 m vanaf rand vaarweg	50 m vanaf rand vaarweg	50 m vanaf rand vaarweg
Risico-inrichting (industrie)	Objecten met een hinderzone (10 ⁻⁶)	Veiligheidsnorm	Bij ruimtelijke besluitvorming windturbines	Vastgestelde hinderzone	Vastgestelde hinderzone	Vastgestelde hinderzone
Buisleidingen	Buisleidingen met gevaarlijke stoffen	Veiligheidsnorm	Advies	241 m vanaf hartlijn	194 m vanaf hartlijn	150 m vanaf hartlijn
Hoogspanningsleidingen	Onder- en bovengrondse hoogspanningsinfrastructuur en geplande hoogspannings- trajecten	Veiligheidsnorm	Advies	241 m vanaf buitenste lijn	194 m vanaf buitenste lijn	150 m vanaf buitenste lijn
Primaire waterkering	Kernzone primaire water- kering (excl. voorliggende waterkering)	Veiligheidsnorm	Afhankelijk van beheerder	Kernzone 50 m vanaf hartlijn	Kernzone 50 m vanaf hartlijn	Kernzone 50 m vanaf hartlijn
Laagvlieggebieden	Laagvlieggebied 10	Hoogte- beperking	Regeling minimum vlieghoogten	Vastgestelde hinderzone	Vastgestelde hinderzone	Vastgestelde hinderzone

¹⁵ Handboek Risicozonering Windturbines, (Faasen et al., 2014)

Bronobject	Specificatie bronobject	Impact	Juridische status ¹⁵	Berekende afstand 5,6 MW	Berekende afstand 4,2 MW	Berekende afstand 3,6 MW
Luchthaven	Civiele en militaire luchthavens	Hoogte- beperking	Bij ruimtelijke besluitvorming windturbines	Vastgestelde hinderzone	Vastgestelde hinderzone	Vastgestelde hinderzone
Losse woonbebouwing	Woningen buiten woonkernen	Geluidsnorm	Bij ruimtelijke besluitvorming windturbines	300 m vanaf gevel	300 m vanaf gevel	300 m vanaf gevel
Woonkernen	Aaneengesloten woningen binnen een woonkern	Geluidsnorm	Bij ruimtelijke besluitvorming windturbines	500 m vanaf gevel	500 m vanaf gevel	500 m vanaf gevel

Tabel 6 – Overzicht beperkingen voor windenergie op land en zonne-energie op land: zachtere beperkingen

Restrictie	Bevoegd	Categorie	Analyse
Natuurnetwerk Nederland	Provincie	Natuur en ecologie	Zonne-energie op land en windenergie
Natura 2000	Rijk	Natuur en ecologie	Zonne-energie op land/water en windenergie
Werelderfgoed (UNESCO)	Rijk	Cultuurhistorie	Zonne-energie en windenergie
Stiltegebied	Provincie	Geluidsbelasting	Windenergie
Radarverstoringsgebieden 300 ft en 500 ft	Rijk	Hoogte waarboven een toets dient te worden gedaan	Windenergie
Boringsvrije zone en waterwingebieden.	Provincie	Bouwbeperking	Windenergie
Weidevogelgebieden	Provincie	Natuur en ecologie	Zonne-energie
Kavels boven transportleidingen		Bouwbeperking	Zonne-energie
Uitgeefbare grond (economische grond) op bedrijfsfunctie. In theorie kan hier zonne-energie geplaatst worden, maar het uitgangspunt is dat andere bedrijvigheid voorrang krijgt in deze schaarse ruimte.	Gemeente	Bestemmingsplan	Zonne-energie

Na het bepalen van de resterende ruimte wordt dit omgerekend naar energieproductie. Voor zonne-energie gebeurt dit met kentallen voor een opstelling van gangbare systemen. Voor windenergie wordt een GIS-model (plaatsingsmodel) gebruikt dat een maximum-aantal windturbines binnen beschikbare zones optimaal positioneert, rekening houdend met een onderlinge afstand tussen windturbines en verschillende turbinetypes.

De resultaten zijn landelijk doorgerekend en er is daarmee een beeld van waar en hoeveel windenergie er zou kunnen worden gerealiseerd op basis van hardere beperkingen en wat de invloed is van de zachtere beperkingen hierop. Uit deze landelijke datalagen worden vervolgens de potenties geselecteerd die binnen de ruimtelijke contouren van de archetypes vallen. Om dubbeltellingen te voorkomen, wordt daarbij gewerkt met een vaste volgorde voor de toekenning aan archetypes.

De ruimtelijke uitwerking van archetypen is ook tot stand gekomen op basis van een GIS-analyse. Voor de ‘decentrale’ archetypen waarbij het wenselijk is om vraag en aanbod zo dicht mogelijk bij elkaar te brengen, zijn de gebieden van de archetypen zo exact als mogelijk uit verschillende databronnen geselecteerd. Voor archetypen waar het gaat om ‘losse projecten’ zijn het grotere gebieden, die minder afgebakend zijn en meer verspreid liggen over het land. Bij ‘repowering’ en ‘aansluitend bij bestaande opwek’ gaan we uit van de bestaande locaties waar wind- en zonne-energie is gerealiseerd. Bij enkele archetypen is ook in een zone rondom deze exacte afbakening gekeken. Het gaat om de gebieden met grotere vraag (industrie en mobiliteit) en rondom infrastructuur. Dit sluit aan bij het

huidige beeld waar reeds hernieuwbare opstellingen zijn gerealiseerd. Door ze in beeld te brengen, ontstaan er meer keuzemogelijkheden om vraag en aanbod bij elkaar te brengen.

Per archetype wordt zowel een theoretische boven- en ondergrens bepaald van het potentieel. De bovengrens vertegenwoordigt het theoretische maximum dat ruimtelijk technisch als potentieel kan worden beschouwd. Hierbij wordt ook inzichtelijk gemaakt wat het effect is van zachtere beperkingen. Bij de bovengrens wordt geen toets gedaan waar deze potentie is gelegen ten opzichte van de ruimte binnen een archetype.

De ondergrens geeft het theoretische potentieel weer wanneer binnen een archetype rekening wordt gehouden met een minimale projectomvang (uitgedrukt in MW) voor wind-energie op land of zonne-energie op land. Hiervoor is een ruimtelijke toets uitgevoerd: op elke locatie binnen het archetype is beoordeeld of projecten van voldoende schaal realiseerbaar zijn. Denk hierbij bijvoorbeeld aan of het mogelijk is om minstens drie wind-turbines op één locatie te plaatsen. Voor de ondergrens is net als bij de bovengrens het effect van de zachtere beperkingen los in beeld gebracht

Het potentieel van alle archetypes is vervolgens op landelijk niveau bij elkaar opgeteld. Voor zonne-energie op gebouwen is bij het bepalen van het potentieel geen minimale projectomvang gehanteerd.

Bestaande opwek wordt van het potentieel afgetrokken, zodat inzicht gegeven wordt in welke opwek nog aanvullend op bestaande projecten mogelijk is. Voor zonne-energie op land gebeurt dit via het reeds gebruikte oppervlak en voor windenergie door het hanteren van een minimale afstand tot bestaande turbines.

Tekstkader 5 – Beperkingen ruimtelijke analyse

Bij de ruimtelijke analyses gelden de volgende kanttekeningen:

- Een kanttekening bij de ruimtelijke potentieanalyse is dat deze een theoretisch beeld weergeeft. In de praktijk geldt dat er richting realisatie van projecten nog meer beperkingen kunnen optreden om verschillende redenen. Hierbij kan o.a. worden gedacht aan regelgeving, draagvlak, bouwtechnisch of ruimtelijk beleid.
- De analyse van de ruimtelijke potentie is gemaakt op basis van de bestaande situatie en op basis van de beschikbare datasets in het model. Dit houdt in dat de toekomstige plannen voor bijvoorbeeld woningbouw of nieuwe bedrijvigheid niet zijn meegerekend in de beperkingen. Het kan zijn dat sommige minder actuele data afwijken van de bestaande situatie.

Concreet worden voor elk van de archetypen dus de volgende potenties in kaart gebracht:

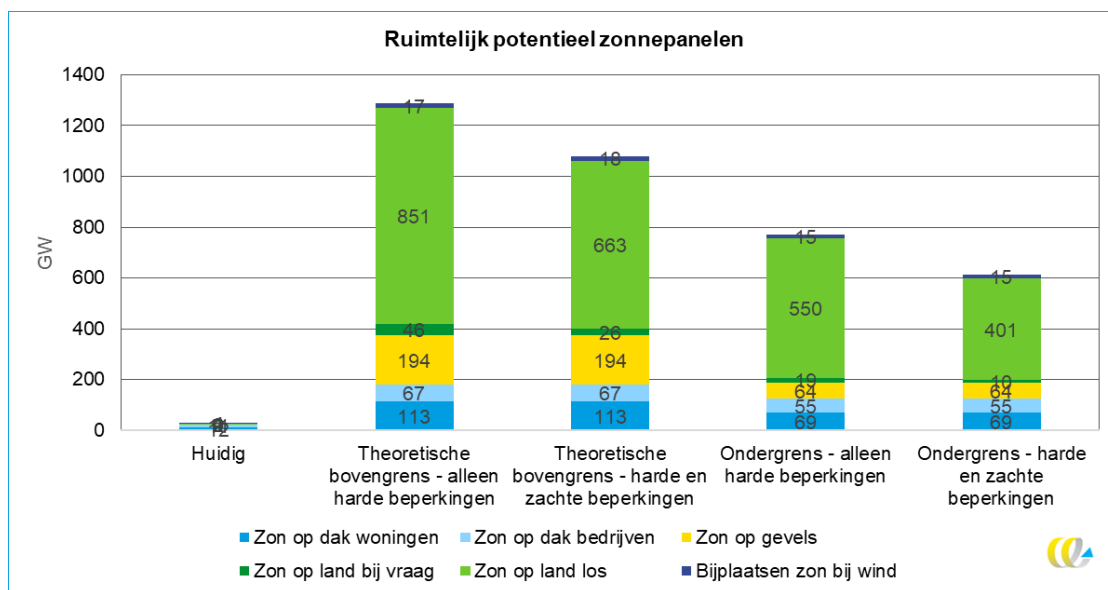
- theoretische bovengrens potentieel met alleen harde beperkingen;
- theoretische bovengrens potentieel met harde en zachte beperkingen;
- theoretische ondergrens potentieel met alleen harde beperkingen;
- theoretische ondergrens potentieel met harde en zachte beperkingen.

Uitkomsten potentieanalyse

Figuur 15 geeft een overzicht van het ruimtelijk potentieel voor zonne-energie. De figuur laat de volgende dingen zien:

- Het totale ruimtelijke potentieel ligt tussen de 600 en 1.300 GW. Dit is vele malen groter dan de hoeveelheid zonne-energie in de scenario's voor 2040 (57-127 GW; zie Hoofdstuk 2).
- Er is 180-370 GW potentie voor zonne-energie op daken en gevels.
- De potentie voor zonne-energie op land nabij vraag (10-45 GW) is slechts een beperkt deel van de totale potentie voor zonne-energie op land.
- Het grootste deel van de potentie is van losse zonneparken (400-850 GW), met name voor zonne-energie op landbouwgrond.¹⁶ Ook voor zonne-energie op water, zonneparken met een functie voor ecologie en natuurherstel en zonne-energie op brownfields en restland-schappen is er aanzienlijk ruimtelijk potentieel.

Figuur 15 – Ruimtelijk potentieel zonne-energie



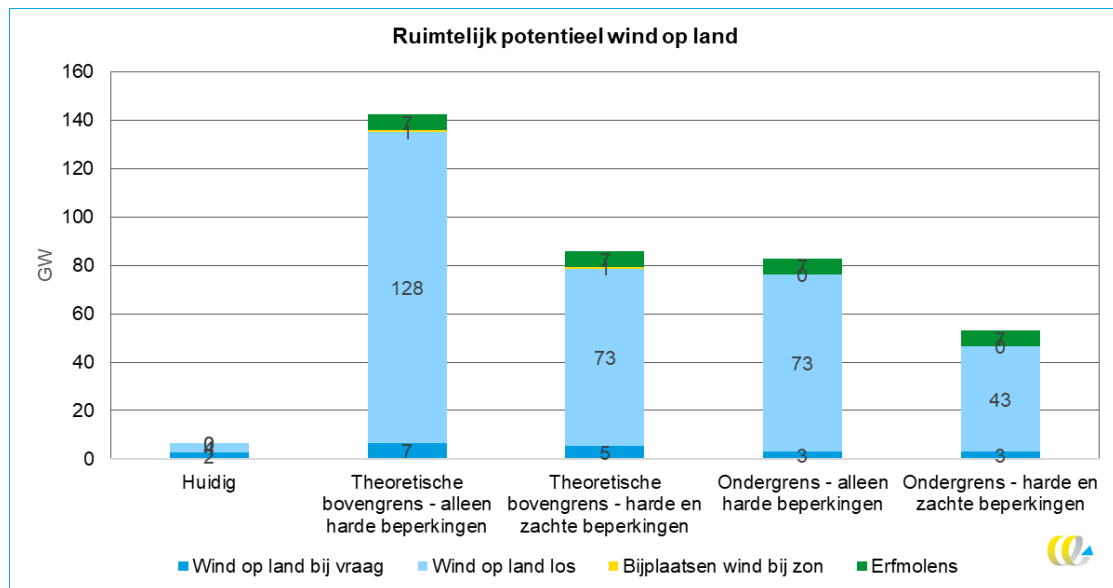
Figuur 16 geeft een overzicht van het ruimtelijk potentieel voor windenergie op land. De figuur laat de volgende dingen zien:

- Het totale ruimtelijke potentieel ligt tussen de 50 GW en 140 GW. Dat is veel groter dan de hoeveelheid windenergie op land in de scenario's voor 2040 (8–15 GW, zie Hoofdstuk 2).
- Door het meenemen van zachte beperkingen neemt de potentie voor windenergie op land met ongeveer 40% af (zowel bij de theoretische bovengrens als de ondergrens).

¹⁶ Hier gaan we uit van de potentie bij extensief/multifunctioneel landgebruik, zoals agri-pv. Bij monofunctionele zonneparken ligt de potentie nog hoger.

- Het grootste deel van de potentie is van losse windparken, met name voor windenergie op landbouwgrond. Ook voor windenergie op verziltingsgronden of veenontginningsgebieden is er aanzienlijke ruimtelijke potentie.
- De potentie voor windenergie op land nabij vraag (3-7 GW) is slechts een beperkt deel van de totale potentie voor zonne-energie op land (50-140 GW).

Figuur 16 – Ruimtelijk potentieel windenergie op land



De potentie van elk van de archetypen is te vinden in de paspoorten in Bijlage A.

4.1.2 Ruimtelijke effecten en afwegingen

De ruimtelijke effecten en afwegingen liggen in lijn met het gedachtengoed dat in de Ontwerp-Nota Ruimte (Rijksoverheid, 2025) is opgenomen en met in ons achterhoofd ruimtelijke regels voor plaatsing van windenergie op land uit de provinciale omgevingsvisie. In de Ontwerp-Nota Ruimte legt de Rijksoverheid haar keuzes en plannen vast voor de inrichting van de ruimte, gericht op de toekomst (Rijksoverheid, 2025). Op provinciaal niveau is in de omgevingsvisie vastgelegd hoe de provincie voor de lange termijn de fysieke leefomgeving wil ontwikkelen, beheren en beschermen.

In de Ontwerp-Nota Ruimte zijn een aantal ruimtelijk sturende bouwstenen benoemd die aansluiten bij de afwegingen die gemaakt zijn voor het definiëren van de archetypen. In de Ontwerp-Nota wordt gesproken over het versterken, verduurzamen en beschermen van de vijf energie-intensieve industrieclusters, het versterken van de regionale ecosystemen en het toekomstbestendig maken van de bedrijventerreinen. Binnen de archetypen die gericht zijn op bedrijventerreinen houdt dit in dat opwek van zonne-energie en windenergie dicht bij de vraag wenselijk is als een decentrale oplossing. Dit hoeft niet alleen voor opwekken van eigen gebruik te gelden, maar bedrijventerreinen kunnen ook leveren voor de omgeving.

Tekstkader 6 – Ruimtedruk binnen industrieclusters

Binnen bedrijventerreinen en met name de terreinen van de grote industrieclusters is de ruimte schaars en geldt dat hier een druk op de ruimte ligt voor juist de toekomstige verduurzamingsopgave in combinatie met de bijkomstige aanleg van infrastructuur. Hier hebben we in de analyse getracht rekening mee te houden door het potentieel voor zonne-energie voor gronden mee te nemen met een lage functionele waarde. Uit te geven gronden voor toekomstige bedrijvigheid zijn uitgesloten en dit geldt ook voor de stroken waar nu buisleidingen zijn gelegen onder de grond. In Bijlage B wordt dit verder toegelicht.

Daarnaast wordt de ruimtedruk binnen industrieclusters meegewogen bij het opstellen van de ontwikkelpaden in Hoofdstuk 5.

In het buitengebied liggen landbouwgebied en natuur op plekken dicht bij elkaar zonder dat ze een versterkend effect op elkaar hebben. Verschillende gebieden in Nederland zijn dan ook gekenmerkt als een gebied waar een meervoudige opgave ligt. Hierbij kan gedacht worden aan de stikstofproblematiek naast Natura 2000 of landbouwgrond in veengebieden. Het opwekken van energie in deze gebieden kan bijdragen aan een ander bedrijfsmodel voor boeren waar energieproductie onderdeel van kan zijn. Als archetype zijn een zone rondom Natura 2000, veengronden en verziltingsgebied meegenomen als gebieden waar een meervoudige opgave ligt.

Het principe van de Voorkeursvolgorde Zon is eerst kijken naar daken, vervolgens naar restgebieden binnen en buiten stedelijke gebieden en bij voorkeur geen zonne-energie realiseren op landbouwgrond of natuur.¹⁷ Binnen de archetypen voor zonne-energie is in de vorm van brownfields gezocht naar grootschalige gebieden die een industrieel karakter hebben, zoals zandwinnings- of stortplaatsen en spaarbekken, maar ook zones langs infrastructuur of luchthavens zijn voorbeelden die onder trede 2 of 3 vallen.

In een aantal provincies gaat men uit van een plaatsingsprincipe van minimaal drie turbines langs infrastructuur of op bedrijventerreinen. Door uit te gaan van een 'ondergrens' van een aantal MW per project binnen een archetype, wordt in theorie tegemoetgekomen aan deze voorkeur. Het aantal MW is gebaseerd op drie turbines die als één project kunnen worden beschouwd.

¹⁷ De Voorkeursvolgorde Zon is in oktober 2023 aangescherpt, zie [kamerbrief](#). Er zijn in de Voorkeursvolgorde Zon uitzonderingsmogelijkheden opgenomen waarbij realiseren van zonne-energie op landbouwgrond of natuur niet als ongewenst wordt aangemerkt. De uitzonderingsmogelijkheden zijn agri-pv, gebieden die op basis van bestuurlijk bindende afspraken in transitie zijn en gebieden waarbij aanleg van zonne-energie die bijdraagt aan efficiënter gebruik van het net.

4.2 Netinpassing archetypen

In deze paragraaf bespreken we de relevante aspecten rondom de netinpassing van de archetypen. Een uitgebreide omschrijving hiervan is te vinden in Bijlage C. In deze paragraaf bespreken we de hoofdpunten.

Door wijdverbreide netcongestie is in een groot deel van Nederland sprake van een tekort aan transportcapaciteit voor teruglevering van elektriciteit. In de meeste provincies houdt deze situatie volgens de huidige planning aan tot eind van de jaren '20 of begin van de jaren '30 (Netbeheer Nederland, 2025a), maar mogelijk nog langer als projecten voor netuitbreidingen verdere vertraging oplopen. Congestie speelt vaak ook op het hoogspanningsnet, maar in steeds meer delen van Nederland ook op lagere netvlakken. Een gebied is pas daadwerkelijk geschikt voor teruglevering als op alle netvlakken capaciteit beschikbaar is. Ook als de ergste problemen met netcongestie achter de rug zijn, zal efficiënt gebruik van het net noodzakelijk blijven om nieuwe netcongestie te voorkomen en om kosten en de ruimtelijke impact van het elektriciteitsnet te beperken.

Door deze congestie kunnen nieuwe of grotere aansluitingen voor teruglevering vaak niet worden gerealiseerd en ontstaan wachtrijen. Met het nieuwe prioriteringskader dat vanaf 2026 van kracht wordt, worden groot- en kleinverbruikers op gelijke wijze beoordeeld en is er naar verwachting geen automatische voorrang meer voor kleinverbruikers (ACM, 2025). Wel krijgen congestieverzachtende oplossingen, zoals opslag, prioriteit.

4.2.1 Algemene aandachtspunten voor netinpassing

De netimpact van hernieuwbare opwek wordt in hoofdzaak bepaald door vier factoren:

1. De mate waarin opwek fysiek is gekoppeld aan lokale (stuurbare) vraag.
2. De match tussen opwek- en vraagprofiel en de gekozen dimensionering.
3. Het netvlak waarop wordt aangesloten en benutting van bestaande netcapaciteit.
4. Overige productie in het gebied.

Het koppelen van hernieuwbare opwek aan nabijgelegen elektriciteitsvraag vermindert de benodigde transportstromen over het net. Daarbij is fysieke nabijheid van belang, zodat vraag en aanbod op hetzelfde onderdeel van het elektriciteitsnet zitten. Idealiter vindt de opwek plaats achter dezelfde aansluiting als de afname. Dit voorkomt echter niet automatisch netbelasting: bij hoge productie kan alsnog teruglevering optreden, of het wegvallen van vraag kan leiden tot een hogere nettobelasting van het net. Desondanks is lokale koppeling in vrijwel alle gevallen gunstiger dan grootschalige teruglevering zonder nabij verbruik. Teruglevering hoeft niet direct tot extra netcongestie en netuitbreidingen te leiden. Zolang de netbelasting door teruglevering binnen de bestaande capaciteit blijft, is er geen probleem. Als het vermogen van teruglevering lokaal (structureel) hoger is dan het vermogen voor de vraag naar elektriciteit en de netcapaciteit, dan moet het net

specifiek voor teruglevering uitgebreid worden of moeten maatregelen genomen worden om de overtollige opwek af te schakelen, op te slaan of om te zetten (zie Paragraaf 4.2.2).

De match tussen opwek- en vraagprofiel is bij het koppelen van vraag en aanbod cruciaal. Sectoren met een stabiel of overdag hoog elektriciteitsverbruik (zoals industrie, logistiek en kantoren) sluiten beter aan bij zonne-energie dan huishoudens, waar de vraag vooral in de ochtend en avond piekt. Windenergie op land heeft een gunstiger profiel dan zonne-energie, doordat de productie meer gespreid is over het jaar en relatief hoog is in de winter. De combinatie van windenergie en zonne-energie is energetisch het meest robuust en leidt tot een hogere directe benutting en lagere terugleveringspieken dan opwek van een van beide opties.

Ook de dimensionering van de opwek is bepalend. Dimensioneren op jaarlijkse energie-vraag (MWh) kan leiden tot hoge terugleveringspieken en relatief lage directe benutting, terwijl dimensioneren op de vraagpiek (MW)¹⁸ de netimpact sterk beperkt, maar een kleiner deel van de totale vraag invult. Curtailment en opslag kunnen ervoor zorgen dat meer opwek gerealiseerd kan worden zonder hoge terugleveringspieken, zeker bij zonne-energie.

Kanttekening hierbij is dat ook als alle hernieuwbare opwek direct achter de meter benut wordt, dit wel degelijk kan leiden tot een hogere netbelasting en grotere problemen met netcongestie. Er valt dan namelijk vraag weg op momenten met veel hernieuwbare opwek, waardoor de nettobelasting op de elektriciteit toeneemt. Desalniettemin is het gunstiger voor het elektriciteitsnet als het aanbod zoveel mogelijk gekoppeld wordt aan de vraag.

Naast de match met de vraag zijn ook de beschikbare netcapaciteit en het netvlak waarop opwek aangesloten wordt relevante factoren. Als er nog netcapaciteit beschikbaar is in een gebied, dan kan hernieuwbare opwek op land ook nog ingepast worden zonder dat deze gekoppeld hoeft te worden aan lokale vraag.

Alternatieve transportrechten en capaciteitsbeperkingscontracten bieden in theorie ruimte voor nieuwe projecten in congestiegebieden, doordat teruglevering buiten piekuren mogelijk wordt. Om hernieuwbare opwek met dit soort contracten te realiseren, is doorgaans opslag, afschakeling en/of een afwijkend productieprofiel noodzakelijk, zoals windenergie in zongedomineerd congestiegebied of oost-westoriëntatie bij zonne-energie. Voor producenten is een capaciteitsbeperkend contract gunstiger, aangezien dit tijdelijk is en alternatieve transportrechten permanent. Daarnaast zijn alternatieve transportrechten voor producenten niet interessant, aangezien ze geen korting kunnen krijgen op nettarieven (omdat ze die nu niet betalen).

¹⁸ Dit houdt in dat het piekvermogen van de productie (bij zonnepanelen gaat het om het omvormervermogen, niet het paneelvermogen) vrijwel gelijk is aan het piekvermogen van de vraag. Meer hierover is te vinden in Bijlage C.2.2.

Tot slot is ook de samenhang met andere productiebronnen van belang voor de net-impact. Dit is een specifiek aandachtspunt voor windenergie op land nabij de gebieden waar windparken op zee aangesloten worden en eventueel kerncentrales gerealiseerd worden. In die gebieden zijn er lokaal vaak al grote overschotten van opwek die knelpunten op het hoogste niveau van het hoogspanningsnet, het 380 kV-net, kunnen veroorzaken (CE Delft, 2024b). Windenergie op land kan die knelpunten vergroten. Bij zonne-energie is dit risico kleiner, doordat de overlap van opwek van zonne-energie en windparken op zee beperkt is. Daarnaast heeft de hoeveelheid windenergie op land, zonne-energie op dak en zonne-energie op land die al in het gebied is gerealiseerd, ten opzichte van de vraag en de netcapaciteit, ook invloed op de hoeveelheid hernieuwbare opwek op land die nog gerealiseerd kan worden. Ook andere productiebronnen, zoals grote kerncentrales of in de toekomst ook SMR's, kunnen in bepaalde gebieden zorgen dat minder hernieuwbare opwek ingepast kan worden in het elektriciteitsnet.

4.2.2 Rol van flexibiliteit en nieuwe contractvormen

Flexibiliteit wordt steeds belangrijker voor de inpassing van hernieuwbare opwek. Opslag (met name batterijen), afschakeling (curtailment) en koppeling met flexibele afnemers kunnen teruglevering beperken en maken het mogelijk om meer opwek binnen bestaande aansluitingen te realiseren. Batterijen kunnen daarnaast inkomsten genereren via markten voor onbalans en flexibiliteit, maar zijn op zichzelf meestal niet rendabel wanneer zij uitsluitend worden ingezet voor uitgestelde levering. In de praktijk is sprake van stapeling van verdienmodellen.

Curtailment is een essentieel instrument voor kostenoptimale systeeminpassing. Het tijdelijk afschakelen van productie tijdens piekmomenten is maatschappelijk vaak efficiënter dan het dimensioneren van netten of opslag op zeldzame pieken (CE Delft, 2023b). Dit geldt met name voor zonne-energie rond het middaguur in de zomer. Curtailment zorgt door de ontlasting van het elektriciteitsnet ervoor dat nieuwe projecten ingepast kunnen worden, waardoor uiteindelijk meer hernieuwbare opwek gerealiseerd kan worden.

4.2.3 Wat is inpasbaar met netcongestie?

In gebieden met teruglevercongestie zijn er nog wel mogelijkheden om extra hernieuwbare opwek te realiseren, maar deze zijn sterk voorwaardelijk. Kansrijke opties zijn onder meer: opwek voor invulling van eigen verbruik zonder teruglevering, realisatie van projecten die al transportcapaciteit toegewezen hebben gekregen, realisatie van nieuwe opwek met alternatieve transportrechten of capaciteitsbeperkingscontracten (met name windenergie op land in zongedomineerde congestiegebieden of zonne-energie in windgedomineerde congestiegebieden), bijplaatsen van zonne-energie of windenergie binnen bestaande aansluitingen (bijvoorbeeld zonne-energie bij windparken); en opwek binnen groepscontracten of gesloten distributiesystemen, zoals bij energiehubbs op bedrijventerreinen.

Voor al deze opties geldt echter wel dat deze problemen met netcongestie kunnen veroorzaken of vergroten, als de hernieuwbare opwek gerealiseerd wordt in gebieden waar al congestie voor teruglevering speelt. De netbeheerders bepalen congestie op basis van de fysieke stromen, en niet op basis van de capaciteit. Dit betekent dat het realiseren van extra opwek binnen dezelfde aansluiting alsnog de problemen met netcongestie kan vergroten. Alternatieve transportrechten, capaciteitsbeperkingscontracten en groepscontracten dragen alleen bij aan inpassing van meer hernieuwbare opwek in deze gebieden (zonder het vergroten van problemen met netcongestie) als er geen extra productie plaatsvindt op de momenten dat de teruglevercongestie plaatsvindt. Ook als alle hernieuwbare opwek direct achter de meter benut wordt, kan dit wel leiden tot een hogere netbelasting en grotere problemen met netcongestie (zie Paragraaf 4.2.1).

4.2.4 Conclusies

Een efficiënte netinpassing is vanwege de wijdverbreide problemen met netcongestie essentieel voor verdere doorgroei van hernieuwbare opwek op land in de komende jaren. Dit wordt in de eerste plaats bereikt door maximaal gebruik te maken van bestaande aansluitingen, opwek te koppelen aan lokale en flexibele vraag, en te kiezen voor complementaire opwekprofielen (met name combinaties van windenergie en zonne-energie). Flexibiliteit via opslag en afschakeling is daarbij onmisbaar. Hernieuwbare opwek zonder nabij verbruik en met scherpe productiepieken, zoals standalone zonneparken, is vanuit netperspectief het minst gunstig, maar kan wel een optie zijn als er nog netcapaciteit beschikbaar is. Ook na toekomstige netuitbreidingen blijft efficiënte inpassing noodzakelijk om verdere verzwaring van het elektriciteitsnet te beperken.

4.3 Maatschappelijke kosten en baten

In deze paragraaf bespreken we eerst op hoofdlijnen de methodiek die we hebben toegepast voor het bepalen van de maatschappelijke kosten en baten (Paragraaf 4.3.1) en welke effecten we hebben meegenomen in de analyse (Paragraaf 4.3.2). Een uitgebreide beschrijving van de methodiek en de effecten is te vinden in Bijlage D. Daarna volgen de resultaten van de analyse (Paragraaf 4.3.3) en de conclusies (Paragraaf 4.3.4).

4.3.1 Methodiek

De analyse van de maatschappelijke kosten en baten hebben we per archetype uitgevoerd in de vorm van een ‘mini-mkba’ of ‘quickscan’.¹⁹ Dit betekent dat we ons hebben gericht op de *belangrijkste effecten die onderscheidend zijn tussen de archetypes*. We hebben dus *niet alle mogelijke effecten* meegenomen. Zo kijken we bijvoorbeeld niet naar sociaalmaatschappelijke waarden als energiegelijkheid, weerbaarheid of circulariteit; deels omdat deze niet of beperkt onderscheidend zijn tussen de archetypes, maar ook deels omdat deze ‘zachtere’ waarden moeilijker te beoordelen zijn. Ecologische effecten hebben we beperkt meegenomen vanwege de scope van deze studie en het feit dat deze effecten sterk situatie- en locatieafhankelijk zijn, terwijl we (fictieve) archetypes hebben onderzocht. In de volgende Paragraaf (4.3.2) laten we zien welke effecten wel zijn meegenomen.

Om de archetypes – die in hoeveelheid opwek kunnen verschillen – onderling vergelijkbaar te maken, hebben we per archetype de maatschappelijke kosten afgezet tegen de verwachte opwek (in MWh). Dit drukt de maatschappelijke kosten per opgewekte eenheid elektriciteit uit: de *maatschappelijke* Levelized Cost of Energy (LCOE).

De maatschappelijke baten van hernieuwbare opwek op land – zowel in algemene zin als voor specifieke archetypen – hebben we hoofdzakelijk kwalitatief beschreven.

In de analyse hebben we de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- De **looptijd van de analyses** hebben we vastgesteld op 20 jaar, gebaseerd op de economische levensduur van zonnepanelen en windturbines.²⁰ Voor het startpunt van de analyse nemen we aan dat de archetypes gerealiseerd zijn in **2035**.
- In de analyses van de archetypes hebben we standaard geen **batterijen** en **curtailment** meegenomen. We hebben een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd

¹⁹ Binnen mkba's wordt een vergelijking gemaakt van alle kosten en baten van één of meerdere projectalternatieven met een nulalternatief (de referentie of meest waarschijnlijke ontwikkeling alss het project niet doorgaat). Het verschil tussen het projectalternatief en het nulalternatief vormt het uitgangspunt van een 'klassieke mkba'. In onze analyse vergelijken wij echter niet met een nulalternatief. Wel vergelijken we de verschillende archetypes onderling. Aangezien wij geen complete mkba voorstaan, maar de belangrijkste effecten in beeld brengen, wordt ons type analyse ook wel een 'welvaartsanalyse' genoemd.

²⁰ Voor de economische levensduur zijn we uitgegaan van de levensduur zoals die wordt gebruikt voor de SDE++.

om het effect van deze (in sommige gevallen voor inpassing noodzakelijke) maatregelen te illustreren.

- De kosten en baten drukken we uit in het **prijspeil** van 2024. De resultaten worden gepresenteerd in een contante waarde over de hele looptijd van de analyse.
- Conform aanbevelingen van de [Werkgroep Discontovoet 2025](#) verrekenen we alle kosten en baten met een **discontovoet** van 2,8%.

4.3.2 Welke effecten worden meegenomen?

De kosten en baten die in een mkba worden meegenomen, zijn breder dan de business-case van een investeerder. Binnen de analyse onderscheiden we (zoals gebruikelijk binnen een mkba) drie type effecten:

1. **Directe effecten:** dit zijn de voor- en nadelen voor de exploitant – bijvoorbeeld de eigenaar van een wind- of zonnepark, een woningeigenaar of bedrijf met zonne-energie op dak of agrarische ondernemer met een erfmolen. Effecten betreffen onder andere investerings- en operationele kosten van de infrastructuur.
2. **Indirecte effecten:** dit betreft de doorwerking van de directe effecten via transacties naar andere markten in de economie. In deze analyse gaat dit bijvoorbeeld om netkosten, waarvoor de netbeheerders investeringen doen.
3. **Externe effecten:** dit zijn effecten die onbeoogd zijn door de gebruiker en niet of slechts gedeeltelijk zijn geïnternaliseerd in de kosten (bijvoorbeeld hinder voor omwonenden, CO₂-emissies, biodiversiteitsverlies).

Tabel 7 geeft een overzicht van de effecten die we in onze analyse hebben meegenomen en hoe we deze kosten en baten hebben beoordeeld. In Bijlage D gaan we uitgebreider in op de beoordeling van elk van deze effecten.

Tabel 7 – Overzicht maatschappelijke kosten en baten

Type effect	Effect	Beoordeling	Methode
Direct	Investerings- en operationele kosten opwek en opslag	Kwantitatief	Schatting voor groot- en kleinschalige opwek (zonne-energie, windenergie) o.b.v. SDE++.
	Ontwikkelkosten	Kwantitatief	Schatting o.b.v. input NedZero en Holland Solar.
	Grondgebruik	Kwantitatief	Waardering o.b.v. opportunity costs: • landbouw: landleasekosten; • bedrijven- en industrieterrein: grondwaarde.
	Productiviteitswinst	Kwantitatief	BBP per kWh elektriciteitsverbruik.
Indirect	Effect op netcongestie	Kwalitatief	Kwalitatieve analyse van mogelijke gevolgen van de archetypes op teruglevering- en afnamecongestie op basis van literatuur en eigen expertise.

Type effect	Effect	Beoordeling	Methode
	Benodigde netverzwaringen	Kwalitatief	Kwalitatieve analyse van de mogelijke gevolgen voor de benodigde netverzwaringen in de verschillende archetypes op basis van literatuur en eigen expertise.
Extern	Hinder voor omwonenden	Kwantitatief	Beoordeling hinder voor omwonenden door groot- en kleinschalige opwek (zonne-energie, windenergie) op basis van kengetallen uit de literatuur. Deze kengetallen geven uitdrukking aan de woningwaardedaling als gevolg van visuele hinder, geluidshinder en hinder door slagschaduw. De woningwaardedaling is een reflectie van het welvaartsverlies voor omwonenden.
	CO ₂ -emissies (direct)	Kwalitatief	Een kwalitatieve analyse van vermeden directe emissies (vermeden inzet gascentrales) door verschillen in opwek-profielen.
	CO ₂ -emissies (indirect)	Kwantitatief	Beoordeling van de emissies elders in de keten die ontstaan bij de productie en transport van de assets (zonnepanelen, windturbines, batterijen) op basis van levenscyclusanalyses uitgevoerd voor eerdere mkba's en de CO ₂ -prijzen uit de WLO²¹-scenario's .
	Biodiversiteitsverlies door landgebruik	Kwantitatief	Beoordeling van het biodiversiteitsverlies dat ontstaat bij landgebruik op basis van het Handboek Milieuprijzen.
	Draagvlak	Kwalitatief	Een kwalitatieve analyse van de factoren die invloed hebben op het draagvlak voor het energiesysteem (onder andere lokaal eigenaarschap).
	Recreatie	Kwalitatief	Een kwalitatieve analyse van de factoren die invloed hebben op recreatie.

4.3.3 Maatschappelijke kosten en baten archetypen

In deze paragraaf bespreken we de resultaten van de analyse van maatschappelijke kosten en baten. Aangezien het maatschappelijk draagvlak een belangrijke factor kan zijn voor de realisatie van meer hernieuwbare opwek op land, maar niet duidelijk onder maatschappelijke kosten of baten valt te scharen, bespreken we eerst de resultaten van de analyse van het maatschappelijk draagvlak (kwalitatieve analyse).

Vervolgens bespreken we de maatschappelijke baten van hernieuwbare opwek op land (kwalitatieve analyse) en daarna de maatschappelijke kosten van de archetypes (kwantitatieve analyse volgens de LCOE-systematiek).

Maatschappelijk draagvlak

Het draagvlak is een belangrijk aandachtspunt bij de verdere ontwikkeling van hernieuwbare opwek op land. In de analyse van de maatschappelijke kosten en baten hebben we

²¹ WLO staat voor Welvaart en Leefomgeving.

daarom gekeken naar de mate waarin verschillende archetypen naar verwachting lokaal draagvlak genieten. Aangezien dit soort effecten over het algemeen moeilijk te moneteriseren zijn, hebben we in Bijlage D een kwalitatieve analyse uitgevoerd.²² De resultaten op hoofdlijnen bespreken we hier.

De analyse laat zien dat het verwachte maatschappelijke draagvlak sterk kan verschillen per archetype. Oplossingen met beperkte hinder voor omwonenden, een beperkt ruimtebeslag, goede landschappelijke inpassing en/of multifunctioneel gebruik scoren het meest positief. Met name zonne-energie op daken, gevels en parkeerplaatsen komt gunstig uit de beoordeling, gevolgd door agri-pv, repowering, het bijplaatsen van zonne-energie bij bestaande windparken en opwek op onbenutte of minder waardevolle terreinen. Het koppelen van opwek aan nabijgelegen elektriciteitsvraag kan het draagvlak eveneens versterken. Grootschalige zonne-energie op land en windturbines in de nabijheid van woningen scoren daarentegen minder gunstig, vooral vanwege de grotere visuele impact en hinder voor omwonenden.²³

De beoordeling van de verschillende aspecten die effect hebben op het draagvlak is indicatief en ongewogen, maar de uitkomsten sluiten goed aan bij bestaande beleidskaders, zoals de Voorkeursvolgorde Zon. Draagvlakcreatie – bijvoorbeeld via participatie en lokaal eigenaarschap – is niet meegenomen in de analyse, maar kan in de praktijk wel bijdragen aan het vergroten van het draagvlak en het verzachten van negatieve effecten. Zeker bij vormen van opwek die doorgaans op meer weerstand in de omgeving stuiten, zoals windenergie op land, kan dit een belangrijke rol spelen in de acceptatie en zo bijdragen aan de realisatie van hernieuwbare opwek.

Maatschappelijke baten

In de analyse van maatschappelijke kosten en baten van hernieuwbare opwek op land is de vergelijking van de maatschappelijke kosten een belangrijk onderdeel (zie volgende paragraaf). De realisatie van hernieuwbare opwek heeft echter ook maatschappelijke baten, zoals reductie van CO₂-uitstoot en minder importafhankelijkheid. Daarnaast leidt een toename van de hoeveelheid hernieuwbare opwek op land tot lagere kosten voor het energiesysteem. Meer hierover is te vinden in Paragraaf 2.3.

Deze maatschappelijke baten gelden voor elk van de archetypen; in principe levert 1 kWh zonne-energie van elk van de archetypen bijvoorbeeld evenveel maatschappelijke baten op (behalve als deze bijvoorbeeld door opslag of een andere oriëntatie van zonnepanelen op andere momenten geleverd wordt). De verschillen in opwekprofielen zorgen daarentegen wel voor grotere verschillen in de baten van zonne-energie en windenergie. Zonne-

²² Merk daarnaast op dat verschillende factoren die invloed hebben op het draagvlak – zoals hinder voor omwonenden en ruimtegebruik – ook worden meegenomen in de maatschappelijke kosten. Om 'dubbeltellingen' te voorkomen in een afweging tussen archetypen, dient hiermee dus rekening te worden gehouden.

²³ Merk op dat we hier kijken naar het mogelijke lokale draagvlak dat archetypen genieten, maar dat hernieuwbare opwek op land voor sommige mensen ook een negatieve impact kan hebben op het draagvlak voor de energietransitie als geheel (bijvoorbeeld wanneer zij veel hinder ervaren van zon- of windparken).

energie heeft energetisch gezien over het algemeen een minder gunstig profiel dan wind-energie op land, omdat er minder vollasturen zijn en de opwek vooral in de zomer en overdag plaatsvindt, terwijl de grootste energievraag met name 's avonds ligt en in de winter hoger is. Windenergie op land heeft een hoger winterdeel en minder scherpe middagpieken dan zonne-energie.

De kwantificering van de effecten van deze verschillen in opwekprofielen valt echter buiten de scope van deze studie. Daarom kwantificeren we alleen de maatschappelijke kosten van de archetypen, en maken we bij de maatschappelijke baten geen onderscheid tussen de archetypen.

Maatschappelijke kosten

Figuur 17 geeft een overzicht van maatschappelijke LCOE per archetype (een tabel met de getallen die bij de figuur horen is te vinden in Bijlage D.1).²⁴ De kosten zijn grofweg als volgt verdeeld: 60-65% directe kosten, 5-15% indirecte kosten (netverzwaring, zie Tekstkader 7 hieronder) en 25-35% externe kosten.²⁵ De directe kosten – de kosten voor de investeerder – worden hoofdzakelijk bepaald door de investerings- en operationele kosten (55-60%). De opportunity costs zijn over het algemeen beperkt (gemiddeld 0-4%) met een paar uitschieters: bij zonne-energie op land bij industrieclusters of bedrijven-terreinen kunnen door relatief duurdere grond de opportunity costs oplopen tot 20% van de maatschappelijke kosten.²⁶ De opportunity costs van het gebruik van landbouwgrond zijn beperkt (maximaal 5% in het geval van conventioneel zonne-energie op land). Mogelijke baten die ontstaan doordat een archetype extra netcapaciteit vrijmaakt, illustreren we aan de hand van een gevoeligheidsanalyse in de volgende paragraaf.

De externe kosten worden hoofdzakelijk bepaald door hinder voor omwonenden²⁷ (gemiddeld 1% van de maatschappelijke kosten bij zonne-energie en 25% bij windenergie) en ketenemissies (25% bij zonne-energie en 5% bij windenergie). Merk op dat in Figuur 17 zichtbaar is dat de hinder door windturbines bij mobiliteitshubs relatief hoog uitvalt, omdat uit onze analyse blijkt dat er relatief veel woningen staan rondom deze locaties. Deze woningdichtheid is echter gebaseerd op gebieden in slechts drie gemeenten (zie Bijlage D.2 voor meer detail).

²⁴ Dit is exclusief mogelijke additionele kosten voor batterijopslag en curtailment. Hier gaan we later in deze paragraaf op in.

²⁵ Deze percentages zijn bedoeld om aan te geven hoe de verschillende typen kosten (direct, indirect, extern) zich grofweg tot elkaar verhouden. De percentages zijn gebaseerd op gemiddelden voor de verschillende archetypen. Voor archetypen met windenergie varieert het aandeel directe kosten als onderdeel van totale maatschappelijke kosten bijvoorbeeld van 40 tot 90%; het gemiddelde van de archetypen is 65%.

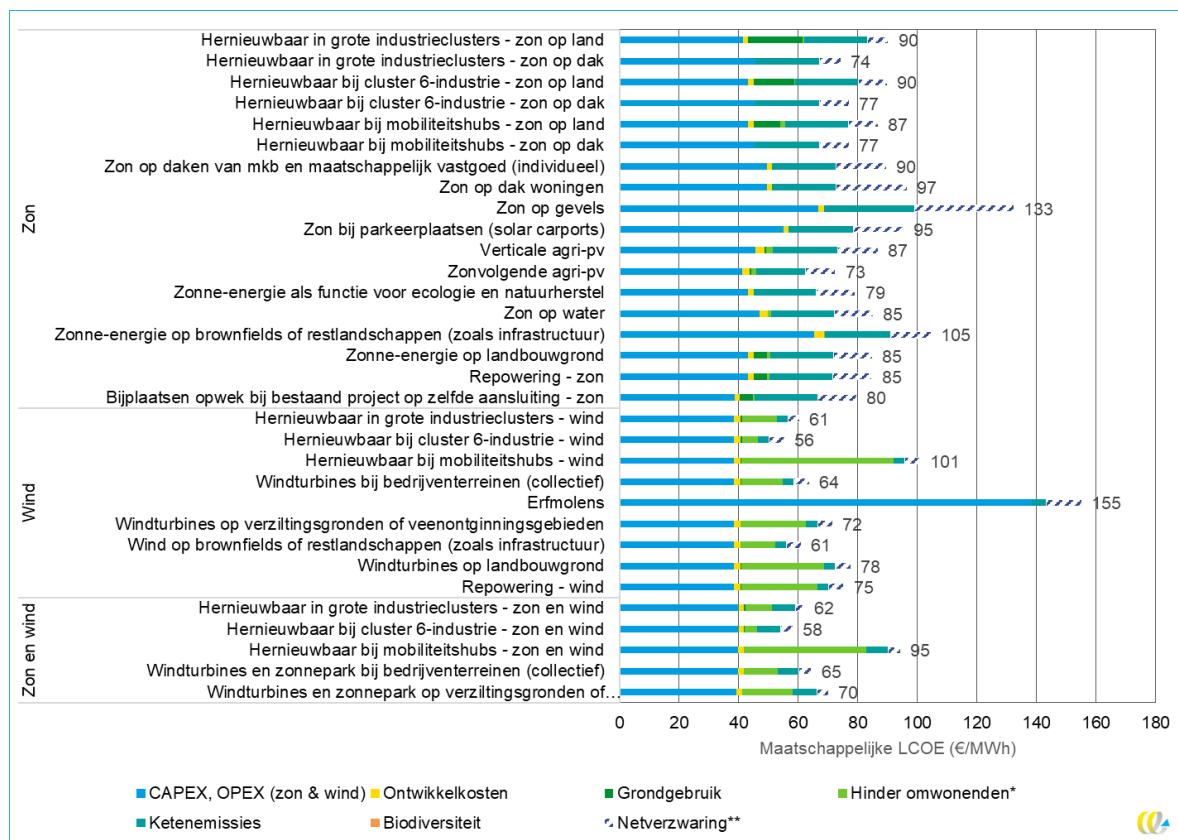
²⁶ Hiervoor zijn we uitgegaan van indicatieve kengetallen die een gemiddelde of typische grondwaarde representeren (zie Bijlage D). In de praktijk kan de grondwaarde per locatie sterk verschillen. Zo kunnen stukken braakliggende grond zonder potentie voor bedrijvigheid of woningbouw wel degelijk interessant zijn voor bijvoorbeeld zonne-energie op land.

²⁷ Omwonenden worden in veel gevallen voor (een deel van) de hinder gecompenseerd door de overheid of het project zelf. In een mkba worden dit soort effecten echter niet meegenomen, omdat dit om een overdracht gaat tussen de overheid (of marktpartij) en burgers; de kost voor de een is een baat voor de ander en streept dus tegen elkaar weg. De externe kosten voor hinder blijven bestaan.

Tekstkader 7 – Maatschappelijke kosten voor netverzwaringen

Het hangt van de specifieke situatie af of er maatschappelijke kosten voor netverzwaringen zijn. Dat geldt voor alle archetypen. Als hernieuwbare opwek op land gerealiseerd wordt op locaties waar voldoende netcapaciteit beschikbaar is of de hernieuwbare opwek (grotendeels) lokaal benut wordt (zie ook gevoeligheidsanalyse dimensionering opwek), dan hoeft het achterliggende elektriciteitsnet niet verzaamd te worden. Dan worden alleen aansluitkosten gemaakt, die zeer beperkt zijn in vergelijking met de kosten voor netverzwaringen aan het achterliggende net. Er kunnen echter ook gevallen zijn waar wel netverzwaringen nodig zijn voor het realiseren van hernieuwbare opwek. Daarom geven we in Figuur 17 en de figuren daarna de netverzwarkosten weer als 'mogelijke' kosten. Meer informatie over wanneer wel of geen netverzwaringen nodig zijn bij nieuwe hernieuwbare opwek is te vinden in Paragraaf 4.2.

Figuur 17 – Maatschappelijke LCOE per archetype



* De hinder voor omwonenden is sterk locatieafhankelijk (zie Bijlage D.2 voor discussie). Daarnaast worden omwonenden in veel gevallen voor (een deel van) de hinder gecompenseerd door de overheid of het project zelf. In een mkba worden dit soort effecten echter niet meegenomen, omdat het gaat om een overdracht tussen de overheid (of marktpartij) en burgers: de kosten voor de één zijn een baat voor de ander en strepen dus tegen elkaar weg. De externe kosten voor hinder blijven bestaan.

** Of er netverzwaring nodig is, is sterk locatie- en situatieafhankelijk. We hebben de maatschappelijke kosten hiervan dus als 'mogelijke' kosten weergegeven.

Groot- en kleinschalige opwek

Wanneer we archetypes met grootschalige en kleinschalige opwek vergelijken, vallen een aantal zaken op. Allereerst laat Figuur 17 zien dat de netverzwarkosten voor kleinschalige opwek hoger uit kunnen vallen, omdat er bij lagere terugleveringsniveaus in totaal grotere investeringen in het net moeten worden gedaan. Zoals hiervoor in Tekstkader 7 toegelicht, hangt de netimpact echter af van de hoeveelheid eigen of lokaal verbruik.

Bij meer teruglevering op het laagspanningsnet moet niet alleen het laagste netvlak verzwakt worden, maar ook de hogere netvlakken. Met name kleinschalige, decentrale oplossingen – zoals zonne-energie op gevels, solar carports of zonne-energie op daken van woningen, mkb of maatschappelijk vastgoed – laten daarom relatief hoge netverzwarkosten zien. De kosten voor zonne-energie op gevels vallen daarnaast nog extra hoog uit door de lage vollasturen.

In het algemeen geldt daarnaast dat de directe kosten (met name de investeringskosten, ontwikkelkosten en operationele kosten) lager uitvallen naarmate de schaal toeneemt. Doordat we in deze analyse ook de indirecte en externe kosten meenemen, is dit echter geen doorslaggevende factor in de vergelijking tussen de archetypes. Ten slotte neemt relatief gezien de hinder voor omwonenden minder sterk toe naarmate de schaal van een project verder toeneemt. Het plaatsen van een eerste windturbine zorgt bijvoorbeeld voor de grootste hinder; wanneer een tweede of derde turbine wordt bijgeplaatst, neemt het welvaartsverlies voor omwonenden relatief gezien minder sterk toe dan bij de eerste. Hetzelfde principe geldt voor de omvang van een zonnepark (ter illustratie: de additionele hinder van een 2 MWp-zonnepark ten opzichte van een 1 MWp-zonnepark is groter dan de additionele hinder van een 11 MWp-zonnepark ten opzichte van een 10 MWp-zonnepark).

Vergelijking van archetypes met zonne-energie

In de vergelijking van de maatschappelijke LCOE zien we dat een aantal archetypes met zonne-energie gunstig scoort. Zo vallen de maatschappelijke kosten van grootschalige zonne-energie op dak bij industrieclusters of bedrijventerreinen (met name door de lagere netverzwarkosten) en zon-volgende agri-pv (met name door hoge vollasturen) relatief laag uit.²⁸ Ook het bijplaatsen van zonne-energie bij een bestaand windpark (geen additionele aansluitingskosten) of een zonnepark als functie voor ecologie en natuurherstel (naast positieve effecten voor natuurgebieden ook geen hinder voor omwonenden) zijn vanuit maatschappelijk perspectief interessante archetypes.

Wanneer we inzoomen op zonne-energie op land op landbouwgebied, valt op dat de maatschappelijke kosten van verticale agri-pv hoger uitvallen dan die van conventionele zonne-energie op land ('zonneweide op landbouwgrond'). De belangrijkste oorzaak daarvan is dat de investeringskosten en operationele kosten voor verticale agri-pv hoger zijn, terwijl de

²⁸ Zon-volgend zonder 'agri-functie' zou ook lage maatschappelijke kosten hebben, maar hebben we niet als apart archetype meegenomen.

vollasturen (iets) lager zijn. Het feit dat zo'n 90% van het land dat nodig is voor agri-pv nog benut kan worden voor landbouwdoeleinden, betaalt zich maatschappelijk gezien niet terug. Als we kijken naar conventionele zonne-energie op land, beslaan de opportunity costs slechts 5% van de totale maatschappelijke kosten. Merk hierbij op dat we hiervoor hebben gerekend met gemiddelde of typische landleasekosten van landbouwgrond met zonne-energie. In de praktijk kunnen (vermeden) gemiste landbouwopbrengsten sterk verschillen per situatie en type landbouw.

Locaties van hernieuwbare opwek

De archetypen zijn vastgesteld voor verschillende gebiedstypen. Deze gebiedstypen hebben invloed op de maatschappelijke kosten, met name via grondgebruik (opportunity costs en biodiversiteitsverlies) en hinder voor omwonenden.

Niet in alle archetypes vindt direct en monofunctioneel ruimtegebruik plaats. Dit is vooral van toepassing op bij zonne-energie op land en agri-pv, en in beperkte mate bij windturbines. Kijkend naar de gebiedstypen waarin de archetypes deze vormen van opwek zitten, zijn de grondwaarde en dus de opportunity costs het laagst voor landbouwgebied. Daarna volgen bedrijventerreinen, cluster 6-industrie en grote industrieclusters. De resultaten laten zien dat de meeste opportunity costs te zien zijn bij zonne-energie op land bij mobiliteitshubs, cluster 6-industrie en grote industrieclusters (grofweg 10 tot 20% van de maatschappelijke kosten). Bij conventionele zonne-energie op land bij landbouwgrond ligt dit rond de 5%. Het biodiversiteits-verlies door grondgebruik dat we gekwantificeerd hebben, speelt slechts een marginale rol.

De mate waarin omwonenden hinder ondervinden van de gerealiseerde opwek, hangt – naast de hoogte van de turbines en de grootte van een zonnepark – af van de bevolkingsdichtheid van een gebied. Hoe hoger de bevolkingsdichtheid, hoe meer omwonenden hinder ondervinden. Zo zijn landbouwgebieden relatief dunbevolkt, terwijl de woningdichtheid rond bedrijventerreinen en industriegebieden hoger ligt. In Bijlage D gaan we dieper in op de kengetallen die we hebben gebruikt en de manier waarop deze kengetallen zijn bepaald.

In de praktijk is de specifieke locatie van een project en de afstand tot het net/stations bovendien nog een belangrijke factor voor de hoogte van de aansluitkosten van een project. Omdat we met archetypen werken en het dus niet om concrete projectlocaties gaat, werken we daarom met gemiddelde aansluitkosten (onderdeel van de investeringskosten uit de SDE++).

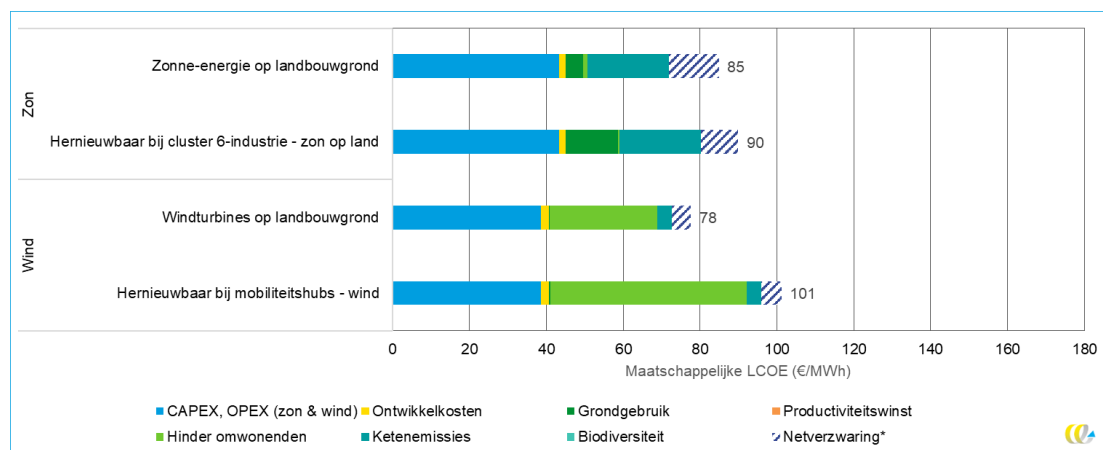
Koppelen van vraag en aanbod

Zoals besproken in Paragraaf 4.2.1 vermindert het lokaal koppelen van hernieuwbare opwek aan nabijgelegen elektriciteitsvraag doorgaans de benodigde transportstromen en is dit het meest effectief wanneer vraag en aanbod zich op hetzelfde deel van het net bevinden, bij voorkeur achter dezelfde aansluiting. Ook gelijktijdigheid in opwek en verbruik speelt hierbij een rol. Dit voorkomt echter niet automatisch netbelasting,

omdat bij hoge productie of wegvallende vraag alsnog teruglevering en daarmee extra belasting kan optreden. Desondanks is lokale koppeling vrijwel altijd gunstiger dan grootschalige teruglevering zonder nabij verbruik, zolang teruglevering binnen de bestaande netcapaciteit blijft.

Figuur 18 illustreert hoe dit zich bij zonne-energie op land uit in de netverzwakingskosten, die lager uitvallen voor de archetypes waar aanbod aan vraag wordt gekoppeld. Daartegenover staat dat in dit voorbeeld de opwek op duurdere grond komt wanneer het bij de vraag wordt geplaatst, wat leidt tot hogere opportunity costs. De opportunity costs zijn in dit geval hoger dan de bespaarde netverzwakingskosten. Voor windenergie zien we weinig verschil in de netverzwakingskosten. Daarnaast staan er gemiddeld gezien in de buurt van mobiliteitshubs meer woningen dan in landbouwgebied, waardoor er meer hinder wordt ondervonden van de turbines.

Figuur 18 – Illustratie koppelen vraag en aanbod



* Of er netverzwaring nodig is, is sterk locatie- en situatieafhankelijk. We hebben de maatschappelijke kosten hiervan dus als 'mogelijke' kosten weergegeven.

Gevoeligheidsanalyses

Maatschappelijke waarde door creëren extra netcapaciteit

Wanneer er sprake is van afnamecongestie en een archetype ervoor zorgt dat er extra netcapaciteit beschikbaar komt, kan dit in potentie voor substantiële baten zorgen. De baten kunnen ontstaan wanneer deze extra netcapaciteit de mogelijkheid biedt dat bestaande bedrijven zich kunnen uitbreiden of nieuwe bedrijven zich kunnen vestigen. Figuur 19 illustreert hoe deze baten zich verhouden tot de maatschappelijke kosten. De twee gevoeligheidsvarianten (Variant 1 en Variant 2) geven een bandbreedte weer, uitgaande van een optimistisch en conservatief scenario. De maatschappelijke waarde hebben we benaderd door een schatting te maken van de bruto productiviteitswinst van bedrijven door middel van de gemiddelde

toegevoegde waarde (BBP) per eenheid elektriciteitsverbruik (zie Bijlage D voor meer detail) (Ecorys, 2024).²⁹

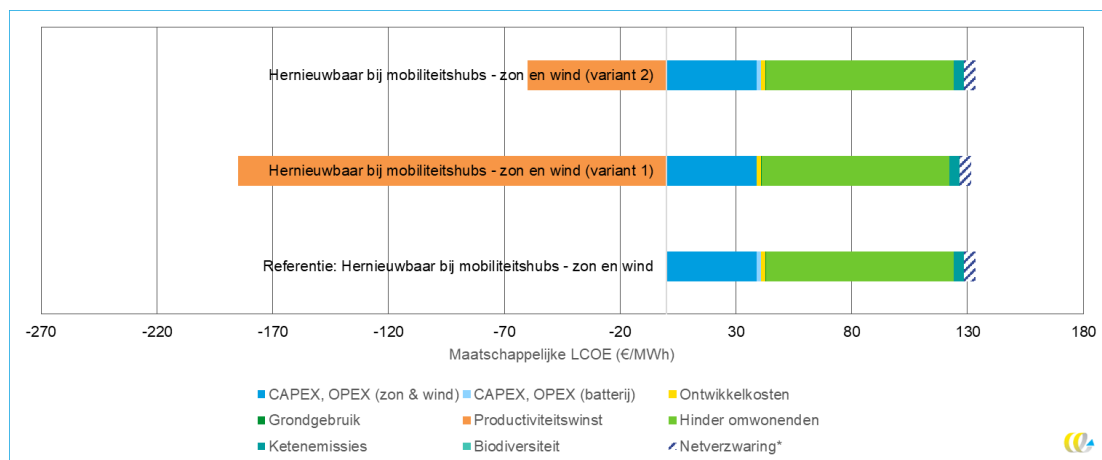
Voor de uitgangspunten van deze gevoeligheidsanalyse hebben we ons gebaseerd op eerder onderzoek waarin is gekeken hoe hernieuwbare opwek kan bijdragen aan het ruimte maken op het net in het geval van congestie (EqoLibrium, 2025). Binnen de mobiliteitshub wordt 6 MW windenergie, 1 MW zonne-energie en 5 MWh batterij gerealiseerd, wat leidt tot 0,7 MW extra netruimte en ongeveer 1,9 GWh extra vraag die per jaar kan worden voorzien.

Voor deze gevoeligheidsanalyse hebben we verder aangenomen dat er bij realisatie van dit archetype nog voor een periode van vijf jaar afnamecongestie is, en er voor deze periode dus extra elektriciteitsverbruik mogelijk is. Voor de toegevoegde waarde per eenheid elektriciteitsverbruik zijn we uitgegaan van het gemiddelde van de industriële sectoren (SBI C). Hierbij is het belangrijk te vermelden dat de uiteindelijke maatschappelijke waarde sterk afhangt van het type sector dat de extra netcapaciteit kan benutten. Zo kent de basisindustrie een aanzienlijk lagere toegevoegde waarde per eenheid elektriciteitsverbruik in vergelijking met de maak-industrie (tot een factor 400 lager) (CE Delft, 2025a).

Merk verder op dat de bruto productiviteitswinst is gebaseerd op de gemiddelde toegevoegde waarde per eenheid elektriciteitsverbruik van de sector en dus niet een-op-een kan worden overgenomen als welvaartswinst in onze analyse. Niet voor elk bedrijf zal de mogelijkheid om extra elektriciteit te verbruiken leiden (direct) tot een toename van de productie. Niet voor elk type bedrijf is de beschikbaarheid van elektriciteit in deze mate beperkend voor de productiviteit: voor (elektrische) productieprocessen is dit bijvoorbeeld heel anders dan voor panden met een kantoorfunctie. Daarnaast kan een productietoename op een plek ervoor zorgen dat elders in het land minder zal worden geproduceerd, of zou deze additionele productie mogelijk ook door andere bedrijven verzorgd kunnen worden. De *netto* productiviteitswinst zal dus in veel gevallen lager uitvallen.

²⁹ Het conservatieve scenario (GA2) gaat uit van de huidige verhouding tussen toegevoegde waarde en elektriciteitsverbruik; de optimistische variant (GA1) gaat uit van een toekomstgericht scenario waarin de verhouding tussen elektriciteitsverbruik en toegevoegde waarde is veranderd door elektrificatie van productieprocessen.

Figuur 19 – Gevoeligheidsanalyse productiviteitswinst



* Of er netverzwaring nodig is, is sterk locatie- en situatieafhankelijk. We hebben de maatschappelijke kosten hiervan dus als 'mogelijke' kosten weergegeven.

Impact van de dimensionering opwekvermogen ten opzichte van de elektriciteitsvraag

De wijze van dimensionering van de opwek ten opzichte van de vraag heeft een sterke invloed op de terugleveringspiek en het aandeel van de opwekte elektriciteit dat zelf wordt verbruikt. Tabel 8 illustreert dit aan de hand van vier varianten. Hoe hoger het vermogen is ten opzichte van de jaarlijkse vraag, hoe meer er wordt teruggeleverd (en hoe minder er zelf wordt verbruikt) en hoe hoger de terugleveringspiek. Het valt op dat voor de resterende 4% die in Variant 2 wordt teruggeleverd, de terugleveringspiek nog relatief hoog is. Daarom hebben we in Variant 1 als uitgangspunt genomen dat er niets wordt teruggeleverd, maar dat de elektriciteit die niet zelf wordt verbruikt, wordt gecurtaild. Op deze manier kan extra opwek in gebieden met terugleveringscongestie toch gerealiseerd worden.

Tabel 8 – Varianten gevoeligheidsanalyse dimensionering opwek ten opzichte van de vraag (zie analyses in Paragraaf C.2.2)

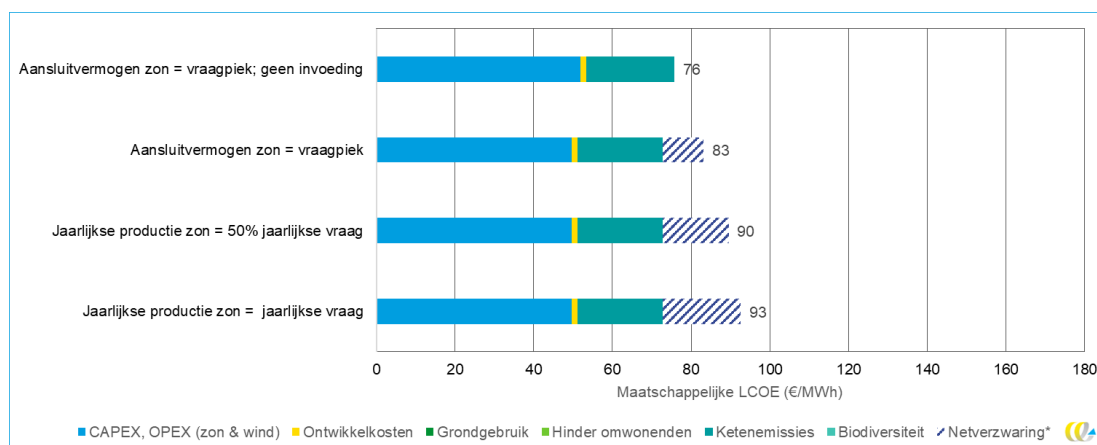
#	Wijze van dimensionering	Vermogen zonne-energie (MW) ³⁰	Terugleveringspiek (MW)	Eigengebruik zonnestroom	Deel vraag ingevuld met eigen productie
1	Aansluitvermogen zonne-energie = vraagpiek; geen teruglevering (door curtailment)	1	0	96%	24%
2	Aansluitvermogen zonne-energie = vraagpiek	2	0.46	96%	24%

³⁰ Dit is het paneelvermogen van de zonnepanelen. We gaan in deze analyse uit van aansluiten van de zonnepanelen op 50% van het paneelvermogen, wat betekent dat het omvormervermogen de helft is van deze waarden.

#	Wijze van dimensionering	Vermogen zonne-energie (MW) ³⁰	Terug-leveringspiek (MW)	Eigengebruik zonnestroom	Deel vraag ingevuld met eigen productie
3	Jaarlijkse productie zonne-energie = 50% jaarlijkse vraag	4	1.49	71%	35%
4	Jaarlijkse productie zonne-energie = jaarlijkse vraag	8	3.51	44%	44%

De varianten hebben we doorgerekend voor het archetype 'Zonne-energie op dak van mkb en maatschappelijk vastgoed'. Figuur 20 laat zien hoe lagere netimpact door minder opwekvermogen tot uitdrukking komt in de kosten: de netverzwarkosten bedragen 21% van de maatschappelijke kosten wanneer jaarlijkse productie gelijk is aan de jaarlijkse vraag, tot 12% wanneer het aansluitvermogen zonne-energie gelijk is aan de vraagpiek. Wanneer de resterende 4% niet wordt teruggeleverd (Variant 4), vervallen de netverzwarkosten.

Figuur 20 – Resultaten gevoeligheidsanalyse dimensionering opwek ten opzichte van de vraag



* Of er netverzwaring nodig is, is sterk locatie- en situatieafhankelijk. We hebben de maatschappelijke kosten hiervan dus als 'mogelijke' kosten weergegeven.

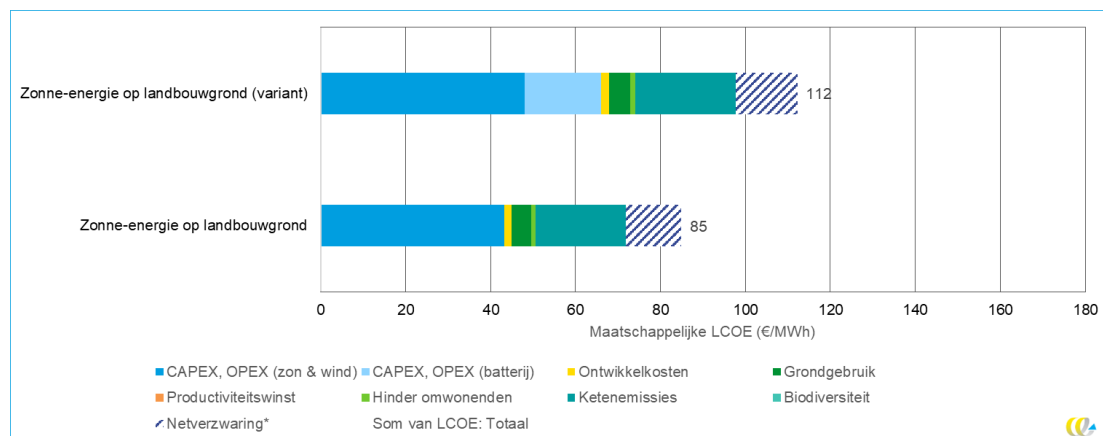
Maatschappelijke kosten van noodzakelijke maatregelen voor inpassing zonnepark

In deze gevoeligheidsanalyse bespreken we het mogelijke effect op de maatschappelijke kosten van batterijopslag en curtailment, maatregelen die nodig kunnen zijn om een zonnepark (eerder) te kunnen inpassen op het net, ook met congestie. Dit kan gerealiseerd worden met een capaciteitsbeperkingscontract of alternatieve transportrechten. Figuur 21 illustreert hoe de kosten kunnen toenemen wanneer deze maatregelen noodzakelijk zijn. De directe kosten voor opslag beslaan zo'n 10-15% van de maatschappelijke kosten; curtailment is in dit voorbeeld zo'n 10%.³¹ Daartegenover staan hogere inkomsten

³¹ Het effect op de maatschappelijke kosten hebben we hier simpelweg bepaald door de totale opwek met 10% te verminderen; we hebben geen rekening gehouden met marktprijzen en het feit dat curtailment veel tijdens piekmomenten plaatsvindt.

– en, zolang het elektriciteitssysteem nog niet fossielvrij is, meer CO₂-besparing – omdat er meer zonnestroom buiten de piek kan worden teruggeleverd en uitgespaarde netverzwaringskosten door een lagere terugleverpiek. Deze baten hebben we niet gekwantificeerd.

Figuur 21 – Gevoeligheidsanalyse noodzakelijke maatregelen



* Of er netverzwaring nodig is, is sterk locatie- en situatieafhankelijk. We hebben de maatschappelijke kosten hiervan dus als 'mogelijke' kosten weergegeven.

Repowering

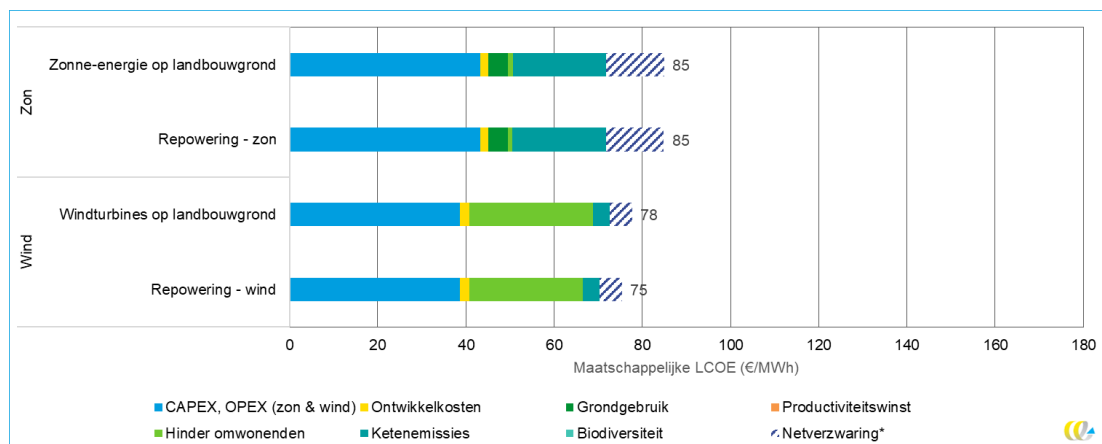
Om de maatschappelijke kosten en baten voor repowering te onderzoeken, hebben we gekeken naar een archetype waar een bestaand zonnepark wordt vervangen en naar een archetype waar een bestaand windpark wordt vervangen. In beide gevallen hebben we aangenomen dat het vermogen aan opwek gelijk blijft, maar in de praktijk komt het ook vaak voor dat het vermogen stijgt (voor de uitkomsten van deze analyse maakt dat geen verschil). Voor het windpark hebben we aangenomen dat meerdere (kleine) turbines worden vervangen door drie grotere. Daarnaast hebben we als referentie vastgesteld dat het oude zonne- of windpark anders verwijderd zou worden zonder dat daarvoor wat in de plaats komt. In de praktijk blijkt dat de kosten – ook de ontwikkelkosten en aansluitkosten – voor repoweringprojecten redelijk gelijk zijn aan normale (greenfield)projecten. Grotere turbines vereisen bijvoorbeeld nieuwe vergunningen, geheel nieuwe funderingen en aansluitingen. Ook over grondvergoedingen moet vaak heronderhandeld worden, omdat de marktomstandigheden in de tussentijd zijn veranderd.³² De directe kosten voor repowering zijn dus zeer vergelijkbaar met greenfield-projecten; de externe kosten verschillen licht van elkaar.³³

³² Bron: Holland Solar, NedZero.

³³ Aangezien we als referentie hebben aangenomen dat de wind- of zonneparken zonder repowering verdwijnen, betekent dit dat de omwonenden in de referentie geen hinder meer ondervinden. Dit zal tot een stijging van de woningwaarde moeten leiden.

Figuur 22 geeft het verschil met de referentiesituatie weer. Door deze benadering verschillen de externe kosten van hinder bij een greenfieldproject en bij repowering dus alleen van elkaar in het type gebied (en dus de hoeveelheid woningen in de buurt) waarin deze projecten gerealiseerd zouden worden.

Figuur 22 – Gevoeligheidsanalyse repowering

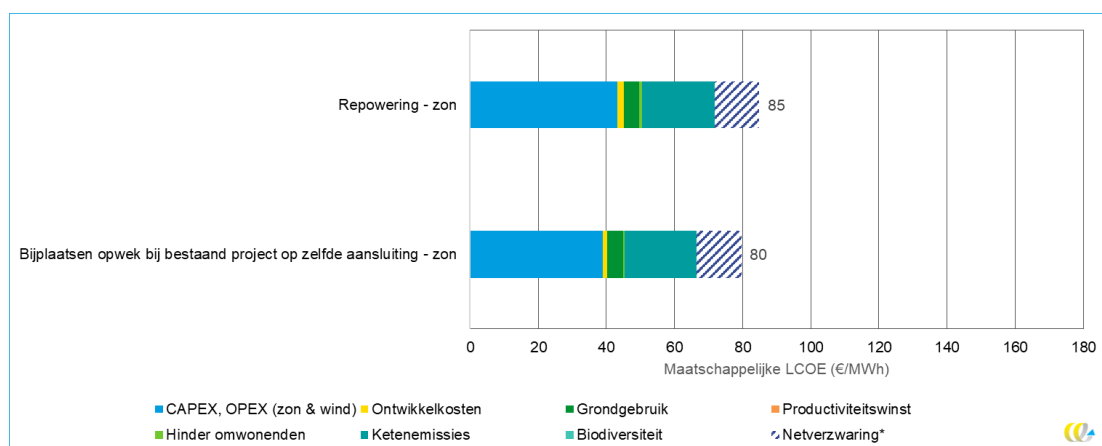


* Of er netverzwaring nodig is, is sterk locatie- en situatieafhankelijk. We hebben de maatschappelijke kosten hiervan dus als 'mogelijke' kosten weergegeven.

Zonne-energie bijplaatsen bij bestaande windparken

Het plaatsen van zonne-energie bij bestaande windprojecten kan – vergeleken met losse zonneparken – leiden tot minder impact op het elektriciteitsnet wanneer het van dezelfde netaansluiting gebruik kan maken. Daarmee kan het in congestiegebieden extra opwek mogelijk maken. Daarnaast kan het bijplaatsen van een zonnepark bij een bestaand project aantrekkelijk zijn, omdat de additionele hinder voor omwonenden – vergeleken met een los zonnepark – lager is. Daarentegen zal er een groter vermogen aan batterijopslag nodig zijn en zal er meer curtailment moeten plaatsvinden (Van Druten & Van Wieringen, 2025). Deze meerkosten hebben we niet gekwantificeerd.

Figuur 23 – Gevoeligheidsanalyse: bijplaatsen zonne-energie bij windpark



* Of er netverzwaring nodig is, is sterk locatie- en situatieafhankelijk. We hebben de maatschappelijke kosten hiervan dus als 'mogelijke' kosten weergegeven. Meer hierover is te vinden in Paragraaf 4.2.1.

Factoren die invloed hebben op hoeveelheid hinder van windturbines

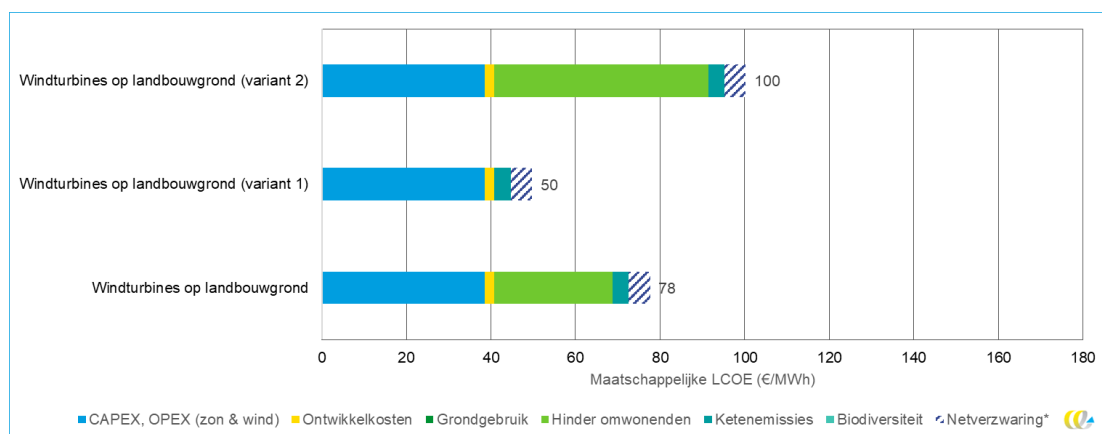
De locatie waar windturbines geplaatst worden, is uiteraard de belangrijkste factor die bepaalt hoeveel hinder er wordt ondervonden. Uit de ruimtelijke analyse volgt een groot aantal gebieden waarin het plaatsen van windturbines in theorie mogelijk is.

De bevolkingsdichtheid van deze gebieden varieert sterk. Figuur 24 demonstreert hoe de woningdichtheid van een gebied invloed heeft op de externe kosten van hinder.

Tekstkader 8 – Toelichting op varianten gevoeligheidsanalyse

Zoals in Bijlage D.2 uitgebreid toegelicht hebben we – kijkend naar deze bandbreedte aan aantal woningen per km² – er in onze analyse voor gekozen om uit te gaan van een woningdichtheid die overeenkomt met het 1e kwartiel van de bandbreedte (25% van de data is lager of gelijk aan deze waarde). In Figuur 24 laat Variant 1 de maatschappelijke kosten zien voor een situatie waarin de windturbines in een gebied worden geplaatst zonder woningen binnen een straal van 2,5 kilometer (de onderkant van de bandbreedte); Variant 2 schetst een situatie met een hogere woningdichtheid (de mediaan).

Figuur 24 – Gevoeligheidsanalyse: woningdichtheid van gebieden

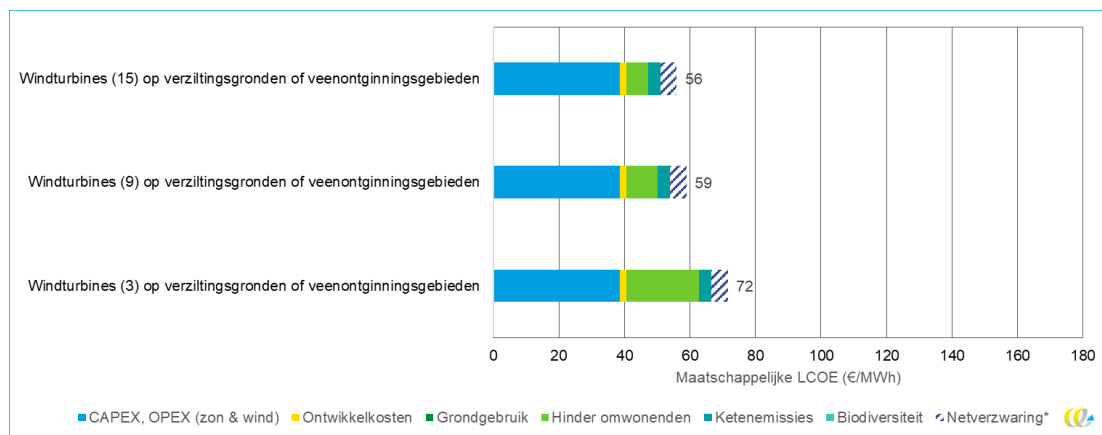


* Of er netverzwaring nodig is, is sterk locatie- en situatieafhankelijk. We hebben de maatschappelijke kosten hiervan dus als 'mogelijke' kosten weergegeven.

Zoals eerder benoemd, is het vanuit maatschappelijk oogpunt gunstig om hernieuwbare opwek te clusteren. Hiermee kan (vanuit nationaal perspectief) het totaal aantal omwonenden dat hinder ondervindt van wind- of zonneparken namelijk beperkt worden. Deze gevoeligheidsanalyse, te zien in Figuur 25, illustreert hoe de externe kosten (per MWh) van hinder voor omwonenden afnemen naarmate de omvang van een windpark toeneemt. Bij drie windturbines – het uitgangspunt voor de archetypes in onze analyse – betreffen de externe kosten nog 50% van de totale maatschappelijke kosten. Bij negen windturbines neemt dit af tot 30%, en bij vijftien turbines tot nog iets meer dan 20%.³⁴

³⁴ Andere factoren die invloed hebben op de geschatte externe kosten door hinder zijn onder andere de hoogte van de windturbines (hoe hoger, hoe meer hinder) en de aangenomen gemiddelde woningwaarde (we zijn uitgegaan van de gemiddelde woningwaarde van heel Nederland).

Figuur 25 – Gevoeligheidsanalyse: hinder door windparken



* Of er netverzwaring nodig is, is sterk locatie- en situatieafhankelijk. We hebben de maatschappelijke kosten hiervan dus als 'mogelijke' kosten weergegeven.

4.3.4 Conclusies

Binnen de analyse van maatschappelijke kosten hebben we drie onderdelen beoordeeld: het maatschappelijk draagvlak (kwalitatieve analyse), de maatschappelijke baten (kwalitatieve analyse) en de maatschappelijke kosten van de archetypes (kwantitatieve analyse, uitgedrukt in de maatschappelijke LCOE).

Het **maatschappelijk draagvlak** voor hernieuwbare opwek op land verschilt duidelijk per archetype. Oplossingen met beperkt ruimtebeslag, geringe hinder en multifunctioneel gebruik – zoals zonne-energie op daken, gevels en parkeerplaatsen – scoren het meest positief, gevolgd door onder meer agri-pv, repowering en opwek op onbenutte terreinen. Grootschalige zonne-energie op land en windturbines nabij woningen komen minder gunstig uit de analyse. Draagvlakcreatie – bijvoorbeeld via participatie en lokaal eigenaarschap – is niet meegenomen in de analyse, maar kan in de praktijk wel bijdragen aan het vergroten van het draagvlak en het verzachten van negatieve effecten. Zeker bij vormen van opwek die doorgaans op meer weerstand in de omgeving stuiten, zoals windenergie op land, kan dit een belangrijke rol spelen in de acceptatie en zo bijdragen aan de realisatie van hernieuwbare opwek.

Hernieuwbare opwek op land levert op verschillende manieren **maatschappelijke baten** op, bijvoorbeeld door CO₂-reductie, een lagere importafhankelijkheid en lagere systeemkosten bij een groter aandeel hernieuwbare energie. Deze baten gelden in principe voor alle archetypen in gelijke mate per opgewekte kilowattuur, al verschillen zonne-energie en windenergie in hun opwekprofiel. Zonne-energie kent relatief minder vollasturen en produceert vooral overdag en in de zomer, terwijl windenergie op land een gunstiger winterprofiel heeft.

De kwantificering van deze profielverschillen valt buiten de scope van deze studie; daarom worden in de analyse alleen de maatschappelijke kosten tussen archetypen onderscheiden en niet de baten.

De analyse van de **maatschappelijke kosten** hebben we per archetype uitgevoerd in de vorm van een 'mini-mkba' of 'quickscan'.³⁵ Dit betekent dat we ons hebben gericht op de *belangrijkste effecten die onderscheidend zijn tussen de archetypes*. We hebben dus *niet alle mogelijke effecten* meegenomen. Zo kijken we bijvoorbeeld niet naar sociaal-maatschappelijke waarden als energiegelijkheid, weerbaarheid of circulariteit; deels omdat deze niet of beperkt onderscheidend zijn tussen de archetypes, maar ook deels omdat deze 'zachtere' waarden moeilijk te beoordelen zijn. Ecologische effecten hebben we beperkt meegenomen vanwege de scope van deze studie en het feit dat deze effecten sterk situatie- en locatieafhankelijk zijn, terwijl we (fictieve) archetypes hebben onderzocht. Onze benadering is dus een versimpeling van de werkelijkheid, maar voor het doel van deze studie zijn we hierdoor wel in staat om de grote lijnen te onderscheiden. Als uiteindelijk specifieke locaties worden onderzocht voor de ontwikkeling van hernieuwbare opwek op land, dan kunnen meer effecten (bijvoorbeeld ecosysteemdiensten, werkelijke hinder, etc.) worden meegenomen worden.

De analyse van maatschappelijke kosten van hernieuwbare opwek op land geeft inzicht in hoe de verschillende archetypen zich tot elkaar verhouden en welke factoren hierin een belangrijke rol spelen. De maatschappelijke kosten bestaan grofweg uit 60-65% directe kosten voor investeerders, 5-15% indirecte kosten voor netverzwaring en 25-35% externe kosten. Deze externe kosten worden vooral bepaald door hinder voor omwonenden en ketenemissies: bij zonne-energie is hinder beperkt (circa 1% van de maatschappelijke kosten) en zijn ketenemissies relatief dominant (ongeveer 25%), terwijl bij windenergie de hinder voor omwonenden juist dominant is (circa 25%) en ketenemissies een kleinere rol spelen (ongeveer 5%).

De hoogte van de netverzwarkosten hangt sterk samen met het spanningsniveau waarop wordt teruggeleverd. Teruglevering op lagere spanningsniveaus leidt relatief tot hogere netkosten, wat met name speelt bij kleinschalige, decentrale toepassingen zoals zonne-energie op gevels, carports of daken van woningen, mkb en maatschappelijk vastgoed. Dit is niet het geval als alleen opwek voor eigen vraag gerealiseerd wordt, en de teruglevering beperkt is. Koppelen van vraag en aanbod – waarbij ook de gelijktijdigheid van opwek en verbruik een belangrijke rol speelt – verlaagt netimpact en netverzwarkosten. Als er echter aanzienlijk meer geproduceerd wordt dan de lokale vraag en veel teruggeleverd moet worden, kunnen de maatschappelijke kosten juist oplopen, met name

³⁵ Binnen mkba's wordt een vergelijking gemaakt van alle kosten en baten van één of meerdere projectalternatieven met een nulalternatief (de referentie of meest waarschijnlijke ontwikkeling als het project niet doorgaat). Het verschil tussen het projectalternatief en het nulalternatief vormt het uitgangspunt van een 'klassieke mkba'. Het verschil met een klassieke mkba is dat wij in onze analyse niet met een nulalternatief vergelijken. Wel vergelijken we de verschillende archetypes onderling. Aangezien wij geen complete mkba voorstaan, maar de belangrijkste effecten in beeld brengen, wordt ons type analyse ook wel een 'welvaartsanalyse' genoemd.

daar waar op lagere spanningsniveaus wordt ingevoed. Bij zonne-energie leidt nabijheid van vraag vaak tot hogere opportunity costs vanwege duurdere grond, terwijl bij windturbines een kleinere afstand tot woningen kan resulteren in meer hinder voor omwonenden.

Zon-volgende agri-pv kent relatief lage maatschappelijke kosten: hoewel de investeringskosten hoger zijn, worden deze gecompenseerd door aanzienlijk hogere vollasturen, bijna 30% hoger dan bij conventionele zonne-energie op land. Opportunity costs van grondgebruik blijken bij landbouwgrond beperkt, waardoor de extra baten van agri-pv ten opzichte van reguliere zonne-energie gering zijn. Bij industrieclusters en bedrijven-terreinen zijn de opportunity costs van grond juist substantieel, wat zonne-energie op land op deze locaties vanuit maatschappelijk perspectief minder aantrekkelijk maakt.

Bij windenergie op land zorgen grote projecten in gebieden met een lage bevolkingsdichtheid voor relatief lage externe kosten van hinder voor omwonenden. Dit komt doordat de hinder beperkt toeneemt bij het realiseren van grotere projecten, waardoor de externe kosten per kWh geproduceerde elektriciteit dan lager zijn. Daarnaast zijn de kosten voor netuitbreidingen lager wanneer projecten direct op het hoogspanningsnet aangesloten worden. Dit zorgt ervoor dat grootschalige projecten lagere maatschappelijke kosten hebben.

Tegelijkertijd kan extra opwek waarmee nieuwe netcapaciteit mogelijk wordt gemaakt in gebieden met netcongestie voor afname aanzienlijke maatschappelijke baten opleveren, bijvoorbeeld doordat bedrijven kunnen uitbreiden of nieuwe activiteiten zich kunnen vestigen. De omvang van deze baten hangt sterk af van het type bedrijfsactiviteit en de daadwerkelijke netto productiviteitswinst.

Daarnaast is gekeken naar maatregelen zoals batterijen en curtailment om zonneparken, ook bij congestie, eerder op het net te kunnen inpassen. Opslag vertegenwoordigt in deze analyse circa 10-15% van de maatschappelijke kosten en curtailment ongeveer 10%, maar daar staan hogere inkomsten en – zolang het elektriciteitssysteem nog niet volledig fossielvrij is – extra CO₂-besparing tegenover, doordat meer zonnestroom buiten piekmomenten kan worden teruggeleverd. De verhouding tussen het geïnstalleerde opwekvermogen en de lokale vraag is daarbij bepalend voor de benodigde netverzwaring en de maatschappelijke kosten, waarbij in sommige gevallen curtailment maatschappelijk gunstiger is dan volledige teruglevering.

4.4 Overige effecten

De ruimtelijke effecten, netinpassing en maatschappelijke kosten en baten zijn niet de enige relevante effecten en afwegingen van de archetypen. Andere relevante effecten zijn:

- **Milieu-impact en impact op leefomgeving:** hernieuwbare opwek op land heeft impact op milieu en de leefomgeving. Relevante milieueffecten van hernieuwbare opwek op land zijn geluid, ecologie en landschappelijke impact. Voor nieuwe projecten zijn milieuonderzoek (milieueffectrapportage, mer) en mitigerende maatregelen middelen om de milieu-impact te beperken. De externe kosten door milieu-impact en impact op de leefomgeving worden (deels) meegenomen bij de maatschappelijke kosten- en batenanalyse (Paragraaf 4.3).
- **Energiezekerheid en zelfvoorzienendheid:** door hernieuwbare opwek, eventueel met batterijen, kunnen individuen of regio's meer zelfvoorzienend worden. Er kunnen verschillende redenen zijn waarom dit een drijfveer is. Zo kan meer zelfvoorzienendheid voor individuen zorgen voor meer weerbaarheid tegen storingen van het elektriciteitsnet, aangezien eigen opwek met opslag als back-up kan fungeren. Daarnaast zorgt meer zelfvoorzienendheid ervoor dat er minder afhankelijkheid is van schommelingen van elektriciteitsprijzen, doordat er meer gebruik wordt gemaakt van de eigen productie. Tot slot kunnen stakeholders zelfvoorzienendheid en het idee minder afhankelijk te zijn van het elektriciteitsnet en anderen op zichzelf ook als een drijfveer zien.
- **Sociale aspecten:** zoals maatschappelijk en politiek draagvlak. De sociale aspecten hebben we kwalitatief beoordeeld bij de maatschappelijke kosten en baten (Paragraaf 4.3).

4.5 Businesscases

In deze paragraaf gaan we in grote lijnen in op de businesscase van hernieuwbare opwek op land. De businesscase wordt niet expliciet meegenomen in de beoordeling van de archetypen en in de ontwikkelpaden, maar is uiteraard van belang voor de totstandkoming van nieuwe projecten en het behouden van bestaande projecten. In de maatschappelijke kosten- en batenanalyse en het bijbehorende ontwikkelpad zijn de CAPEX, OPEX, ontwikkelkosten en kosten voor grondgebruik in kaart gebracht en meegenomen. Deze zijn terug te vinden in Figuur 7. Beleid en ondersteuningsmaatregelen, zoals subsidies, hebben ook effect op de businesscase. In Tekstkader 14 in Paragraaf 6.2 'Beleidsaanbevelingen' wordt verder ingegaan op de EPBD (Energy Performance of Building Directive) en de two-sided Contract for Difference (CfD).

De twee factoren die de inkomsten van productiebronnen bepalen, zijn het aantal draaiuren en de capture price (gemiddelde elektriciteitsprijs van een hernieuwbaar energieproject). Uit een studie van CE Delft en Witteveen en Bos, over hernieuwbare opwek in

2035 voor een CO₂-vrij elektriciteitssysteem, volgt op basis van modellering een capture price van € 15/MWh voor zonne-energie en € 22/MWh voor windenergie op land (CE Delft & Witteveen+Bos, 2024), wat een stuk lager is dan de kosten voor het realiseren van deze bronnen. De lage capture price van zonne-energie komt door de grote opgestelde vermogens en de overschotten op zonnige momenten. Op basis van de capture price, het aantal draaiuren en de kosten is vervolgens een inschatting gemaakt van de businesscase in 2035 op basis van de day-aheadmarkt. Daaruit volgt dat met de huidige marktordening en zonder overheidsstimulering (dus geen SDE++ of CfD) er voor windenergie en zonne-energie op land een negatieve businesscase volgt. Dit is overigens ook zo voor windenergie op zee en kernenergie, waarbij de laatste significant ongunstiger is dan wind- en zonne-energie. Andere vormen, zoals zonne-energie op dak, waren geen onderdeel van deze vergelijking.

4.5.1 Businesscase korte termijn

Voor beide vormen van hernieuwbare opwek op land geldt sterk: de businesscase wordt bepaald door de vraag naar elektriciteit en de daarmee gekoppelde prijzen op de elektriciteitsmarkt. Momenteel blijft de vraag naar elektriciteit nog achter in verhouding bij de groei van hernieuwbare opwek. Dit maakt de businesscase momenteel moeilijk (KPMG, 2025). Daarin spelen ook negatieve prijsuren een rol, die met name een grotere impact hebben op de businesscase van zonne-energie, vanwege minder jaarlijkse draaiuren. Pas als de vraag naar elektriciteit significant toeneemt, en met name op momenten dat er productie van windenergie en zonne-energie plaatsvindt (dit kan eventueel ook met flexibiliteit/opslag), wordt ook de businesscase en de investeringsbereidheid voor nieuwe projecten van hernieuwbare opwek gunstiger.

De marktwaarde van zonnestroom op de elektriciteitsmarkt is de afgelopen jaren afgenomen door de toename van zonne-energie. Tijdens uren met steeds meer zonnestroom en relatief (nog) lage landelijke vraag naar elektriciteit (vaak rond het middaguur) ontstaan door mismatch in aanbod en vraag regelmatig zeer lage of zelfs negatieve elektriciteitsprijzen: in 2024 waren er 458 uren met negatieve elektriciteitsprijzen en in 2025 waren dit er 585.³⁶ Hierdoor vermindert de opbrengst van zonne-installaties bij teruglevering, en dit verslechtert de businesscase. Het is onzeker hoe zich dit ontwikkelt richting de toekomst, aangezien er verschillende factoren invloed op hebben. Als er bijvoorbeeld meer elektriciteitsvraag verplaatst wordt naar overdag, bijvoorbeeld elektrisch laden, dan is dit positief voor zonne-energie. Ook zullen steeds meer (grootschalige) zonne-energie-installaties in staat zijn om met behulp van dynamische omvormers af te schakelen op momenten van negatieve prijzen, waardoor er waarschijnlijk minder negatieve prijsuren zijn. Uiteraard wordt er op momenten van afschakelen geen geld verdiend, wat de businesscase niet ten goede komt, maar deze wordt ook niet verslechterd door negatieve inkomsten. Eventueel kan opslag een rol spelen voor uitgestelde teruglevering, en daarmee verbetering van de

³⁶ [Solar Magazine - Nederland heeft nu al recordaantal uren met negatieve stroomprijs & 2025 Meer duurzame energie, ook meer ongebruikte overschotten | Nationaal Klimaat Platform](#)

businesscase. In het geval van netcongestie en alternatieve contracten zal opslag en afschakeling vaak noodzakelijk zijn voor de realisatie van zonne-energie, om op geschikte momenten (buiten de zonnepiek) terug te kunnen leveren.³⁷ Dit wordt verder besproken in de gevoeligheidsanalyse Paragraaf 4.3.3.

Netcongestie kan ook een positieve rol spelen in de investeringsbereidheid: aangezien het door netcongestie onwaarschijnlijk is dat partijen meer transportcapaciteit voor afname krijgen, ontstaat er waarschijnlijk meer investeringsbereidheid voor hernieuwbare opwek voor eigen gebruik, eventueel aangevuld met opslag en flexibele sturing, als oplossing om te kunnen elektrificeren of uitbreiden. Het is bedrijfs-/organisatiespecifiek of deze investering in verhouding staat met de baten en of dit een oplossing kan bieden voor afnamenetcongestie.

4.5.2 Inzet op eigen gebruik voor betere businesscase

Ondanks de verslechterde businesscase voor teruglevering en teruglevercongestie bij zonne-energie, tonen verschillende analyses aan dat de businesscase voor (toekomstig) eigen verbruik doorgaans gunstig is en blijft. Ook voor kleinverbruikers blijft zonne-energie lonen indien er voornamelijk ingezet wordt op eigen verbruik, ondanks de beëindiging van de salderingsregeling (CE Delft & TNO, 2024). De vermeden kosten voor de inkoop van elektriciteit (inclusief belastingen) zijn dusdanig gunstig dat een passende hoeveelheid zonnepanelen in lijn met (toekomstig) eigen verbruik zich waarschijnlijk terugverdiend. Dit kan wel als gevolg hebben dat bijvoorbeeld niet het volledige dak benut wordt voor zonnepanelen, aangezien dit (momenteel) niet gunstig is voor de gebouweigenaar. Een aandachtspunt hierbij is dat de arbeidskosten voor de installatie van zonne-energie vaak de hoogste kosten hebben, waardoor het vaak financieel ongunstig is om eerst een deel van het dak vol te leggen en later nog een deel. Eigen gebruik kan worden vergroot door inzet van flexibele vraagsturing en opslag. Opslag in batterijen kent relatief hoge investeringskosten, die mogelijk niet in verhouding staan voor de eindgebruiker tegenover inkoop van elektriciteit. Dit aspect valt verder buiten de scope van deze studie.

Ook voor windenergie op land geldt dat productie voor eigen gebruik in de meeste gevallen zorgt voor een betere businesscase. Dit speelt bijvoorbeeld bij windturbines direct bij industrie, bedrijventerreinen of agrariërs.

³⁷ Waarbij gewaarborgd dient te worden dat opslag zelf niet congestie verergert.

5 Ontwikkelpaden

In dit hoofdstuk bespreken we de ontwikkelpaden voor hernieuwbare opwek op land richting 2040. Eerst bespreken wat we verstaan onder ontwikkelpaden. Vervolgens bespreken we de perspectieven en invulling van de ontwikkelpaden en gaan we in op de afwegingen tussen de ontwikkelpaden, en relateren we dit aan de opgave voor hernieuwbare opwek op land. Tot slot gaan we in op het tijdspad van de ontwikkelpaden.

5.1 Wat verstaan we onder ontwikkelpaden?

Ontwikkelpaden geven inzicht in de **mogelijke** ontwikkeling van hernieuwbare opwek op land richting 2040. Bij de ontwikkelpaden vullen we de opgave voor hernieuwbare opwek op land, die volgt uit de analyses in Hoofdstuk 2, in met de verschillende archetypen. Bij de ontwikkelpaden zijn er twee assen waarop gevarieerd wordt:

1. Hoeveel hernieuwbare opwek in totaal? Uit de analyse van de scenario's in Hoofdstuk 2 volgt een bandbreedte van de ontwikkelingen richting 2040.
2. Hoe wordt deze opgave ingevuld? Hier gaat het over welke archetypen wel/niet gerealiseerd worden, en welk deel van de ruimtelijke potentie van de archetypen (zie Paragraaf 4.1.1) benut wordt.

Er zijn verschillende ontwikkelpaden uitgewerkt, die elk een eigen perspectief hebben. Daarin zijn verschillende richtingen voor de ontwikkeling van hernieuwbare opwek op land weergegeven, evenals uithoeken van de mogelijke ontwikkelingen. Er worden drie ontwikkelpaden uitgewerkt. Er zijn uiteraard ook nog ontwikkelpaden vanuit andere perspectieven denkbaar, bijvoorbeeld vanuit lokaal draagvlak.

Voor elk van de ontwikkelpaden is bepaald welke archetypen binnen het perspectief passen en onder welke voorwaarden. Dit is gebaseerd op de effecten van archetypen, die zijn weergegeven in Hoofdstuk 4.

De ontwikkelpaden geven, zoals hiervoor beschreven, inzicht in de uithoeken van **mogelijke** ontwikkelingen. De ontwikkelpaden zijn daarmee geen wensbeelden. De praktijk zal naar verwachting een combinatie van de verschillende ontwikkelpaden zijn. Het doel van de ontwikkelpaden is ook niet om te schetsen hoe een optimale invulling van de opgave van hernieuwbare opwek op land eruitziet, maar om inzicht te geven in no-regrets en de keuzes scherp te maken.

5.2 Ontwikkelpaden

5.2.1 Toelichting ontwikkelpaden

Er zijn drie ontwikkelpaden uitgewerkt, elk met een eigen perspectief. In elk van de ontwikkelpaden vullen we de opgave voor hernieuwbare opwek op land in vanuit een ander perspectief. Deze perspectieven zijn netinpassing, ruimtelijke inpassing en maatschappelijke kosten en baten. Dit betekent dat we drie ontwikkelpaden uitwerken. Hieronder volgt een omschrijving van de perspectieven van de drie ontwikkelpaden.

Deze worden verder uitgewerkt in Paragraaf 5.3:

1. **Minimaliseren ruimtegebruik:** bij dit ontwikkelpad ligt de focus op optimaal gebruik van de ruimte. Dit betekent dat er vol ingezet wordt op multifunctioneel ruimtegebruik door het maximaal benutten van de potentie voor zonne-energie op daken, ook als er weinig/geen vraag naar elektriciteit is. Er worden geen nieuwe windturbines en zonneparken gerealiseerd op landbouwgrond, verziltingsgronden of veenontginningsgebieden of op water. Er vindt geen repowering plaats van bestaande zonneparken op landbouwgrond.
2. **Optimale netinpassing:** bij dit ontwikkelpad ligt de focus op de optimale netinpassing en het minimaliseren van netuitbreidingen (boven op uitbreidingen die al gedaan worden voor toename van de elektriciteitsvraag). Dit gebeurt door het koppelen van hernieuwbaar aanbod aan vraag, op het niveau van individuele netaansluitingen en op regionaal niveau (in het voorzieningsgebied van een HS/MS-station). Daarbij wordt het aansluitvermogen van hernieuwbare opwek gedimensioneerd op de (toekomstige) vermogenspiek van de elektriciteitsvraag³⁸, zodat er geen grote hoeveelheden elektriciteit teruggeleverd worden en er (vrijwel) geen extra netuitbreidingen nodig zijn, specifiek voor teruglevering. Verder wordt bij dit ontwikkelpad ingezet op het optimaal gebruikmaken van het bestaande elektriciteitsnet door repowering van afgeschreven windturbines en zonnepanelen en het realiseren van extra opwek in gebieden waar nog capaciteit beschikbaar is.
3. **Optimalisatie maatschappelijke kosten:** bij dit ontwikkelpad worden de maatschappelijke kosten voor hernieuwbare opwek op land geminimaliseerd. Dit betekent dat alleen de archetypen met lage maatschappelijke kosten gerealiseerd worden.³⁹ Dit betekent dat er bij zonne-energie op daken alleen ingezet wordt op opwek voor eigen gebruik, omdat de benodigde netverzwaringen bij teruglevering op lage netvlakken tot hoge maatschappelijke kosten leiden. Verder wordt ingezet op grootschalige projecten voor hernieuwbare opwek op land die geclusterd worden in gebieden met weinig omwonenden om de externe kosten voor hinder

³⁸ Om de teruglevering van hernieuwbare opwek op land te beperken, is het nodig dat het opgesteld vermogen van de hernieuwbare opwek op land gedimensioneerd wordt op de piek van de vraag. Als er meer hernieuwbare opwek gerealiseerd wordt, bijvoorbeeld als de productie van hernieuwbare opwek op jaarbasis gelijk is aan de vraag, dan is er veel teruglevering nodig en ligt het vermogen voor teruglevering hoger dan het vermogen van afname. In dat geval zijn uitbreidingen nodig van de netcapaciteit, specifiek voor teruglevering.

³⁹ Alleen archetypen met maatschappelijke kosten onder de mediaan (voor alle archetypen) worden gerealiseerd.

op omwonenden te minimaliseren. De projecten zijn door de clustering zo groot-schalig dat ze direct aangesloten kunnen worden op het hoogspanningsnet, waardoor minder netuitbreidingen nodig zijn. Daarnaast wordt maximaal ingezet op projecten voor windenergie op land (met zonne-energie en opslag) als oplossing voor afnamecongestie, aangezien dit grote maatschappelijke waarde heeft. Er wordt niet ingezet op opties met hoge maatschappelijke kosten, zoals zonneparken in industriële gebieden, zonne-energie op gevels en erfmolens.

Tekstkader 9 – Flexibiliteit bij hernieuwbare opwek in de ontwikkelpaden

Afschakeling, opslag en conversie

In elk van de ontwikkelpaden kunnen afschakeling, opslag en conversie naar andere energiedragers bijdragen aan een efficiëntere netinpassing en vermindering van de maatschappelijke kosten. De toepassing van flexibiliteit is niet expliciet gemaakt in de uitwerking van de ontwikkelpaden, maar zien we als een randvoorwaarde bij elk van de ontwikkelpaden.

Er is niet aan de voorkant vastgelegd hoeveel hernieuwbare opwek gerealiseerd moet worden binnen de ontwikkelpaden. Er wordt vanuit het perspectief van het ontwikkelpad beredeneerd welk deel van de potentie van verschillende archetypen meegenomen wordt, en de totale hoeveelheid hernieuwbare opwek op land is een uitkomst daarvan. Vervolgens wordt een koppeling gemaakt met de totale opgave voor hernieuwbare opwek op land door op basis van de uitwerking van de ontwikkelpaden een reflectie te geven op wat nodig is om de onderkant en bovenkant van de bandbreedte uit Hoofdstuk 2 te halen.

5.2.2 Methodiek uitwerking ontwikkelpaden

Bij de uitwerking van de ontwikkelpaden wordt ten eerste voor elk van de ontwikkelpaden verder geconcretiseerd wat het perspectief en de sturingsprincipes zijn. Vervolgens wordt een categorisering gemaakt van hoe alle archetypen binnen het ontwikkelpad passen. Dat doen we op basis van de impact van de archetypen op het perspectief van het ontwikkelpad (bijvoorbeeld netimpact: hoe meer impact, hoe minder wenselijk). Archetypen met een lage impact worden in ieder geval gerealiseerd binnen het ontwikkelpad. Daarnaast zijn er archetypen die in elk geval niet binnen het ontwikkelpad passen, omdat de impact groot is. Maar er zijn ook archetypen die alleen onder bepaalde voorwaarden binnen het ontwikkelpad meegenomen worden.

Op basis van de categorisering van archetypen wordt de indicatieve kwantitatieve uitwerking van de ontwikkelpaden vastgesteld. Voor archetypen die een lage impact hebben, wordt de volledige ruimtelijke potentie⁴⁰ meegenomen of, bij de ontwikkelpaden *optimale netinpassing* en *optimalisatie maatschappelijke kosten*, de volledige potentie voor het

⁴⁰ We gebruiken hiervoor de ondergrens van de ruimtelijke potentie met harde en zachte belemmeringen, aangezien dit het meest zekere is. Zie Paragraaf 4.1.1.

invullen van de elektriciteitsvraag. Archetypes met een hoge impact worden helemaal niet meegenomen.

Belangrijk om te benoemen is dat het gaat om een indicatieve kwantitatieve uitwerking, met als doel om mogelijkheden en afwegingen inzichtelijk te maken. In de praktijk zal nooit het volledige potentieel van gunstige archetypen gerealiseerd worden, en er zal ook niet 0% van minder gunstige archetypen gerealiseerd worden.

5.3 Uitgewerkte ontwikkelpaden

In deze paragraaf bespreken we in meer detail voor de drie ontwikkelpaden hoe de invulling van deze ontwikkelpaden eruitziet en hoe de indicatieve kwantitatieve uitwerking bij die ontwikkelpaden uitvalt. In Bijlage E is een overzicht van de detailuitwerking van de ontwikkelpaden te vinden.

Tekstkader 10 – Onzekerheden indicatieve kwantitatieve uitwerking ontwikkelpaden

Onzekerheden indicatieve kwantitatieve uitwerking ontwikkelpaden

De uitwerking van de ontwikkelpaden is gebaseerd op het scenario Koersvaste Middenweg 2040, dat uitgaat van een forse groei van de elektriciteitsvraag. Die toename van de elektriciteitsvraag is geen zekerheid.

We gaan ervan uit dat alle potentie benut kan worden indien er vraag is. In de praktijk zal niet al deze potentie technisch/economisch benut kunnen worden.

We maximaliseren het aanbod ten opzichte van de vraag op nationaal niveau. In de praktijk heb je regio's waar minder aanbod dan vraag mogelijk is, dus zal dit niet altijd mogelijk zijn.

We nemen aan dat overal repowering mogelijk is. In de praktijk is dit niet altijd haalbaar en zal een deel van het vermogen van bestaande projecten in 2040 niet meer operationeel zijn.

5.3.1 Minimaliseren ruimtegebruik

Bij dit ontwikkelpad ligt de focus op het minimaliseren van de ruimtelijke impact van hernieuwbare opwek op land. Dit gebeurt door maximale inzet op multifunctioneel ruimtegebruik, door het volledige potentieel voor zonne-energie op dak te realiseren (ook als er weinig/geen elektriciteitsvraag is). Er wordt geen zonne-energie op land gerealiseerd bij dit ontwikkelpad. Multifunctioneel ruimtegebruik bij zonne-energie op land (zoals agri-pv) past ook binnen het perspectief van dit ontwikkelpad, maar wordt in de indicatieve kwantitatieve uitwerking niet meegenomen.

De potentie voor windenergie op land binnen de grenzen van bedrijventerreinen en mobiliteitshubs wordt maximaal benut, aangezien hiervoor ruimte op de terreinen wordt gebruikt en windenergie op land vanwege de beperkte ruimtelijke impact niet of nauwelijks interfereert met de bedrijfsactiviteiten. De grote industrieclusters hebben te maken met een grote ruimtedruk door ontwikkelingen vanuit de industrie en overige toekomstige ontwikkelingen van het energiesysteem (Pondera Consult & CE Delft, 2023). Ondanks de beperkte ruimtelijke impact van windenergie op land is dit daarom niet meegenomen in dit ontwikkelpad. Indien er voldoende ruimte beschikbaar is voor windenergie op land op bijvoorbeeld het eigen terrein van industrie, dan kan dit wel een optie zijn.

Bij windenergie op land vindt repowering plaats van bestaande projecten die aan het einde van de levensduur zitten, om optimaal gebruik te maken van de bestaande ruimte. Bij zonne-energie op land vindt geen repowering plaats van zonne-energie op landbouwgrond, indien sprake is van monofunctioneel ruimtegebruik, waardoor een deel van het huidige vermogen aan zonneparken in 2040 niet meer operationeel is. Daarnaast wordt extra opwek bij bestaande projecten gerealiseerd om de ruimte zo efficiënt mogelijk te gebruiken.

Tekstkader 11 – Aannames indicatieve kwantitatieve uitwerking ontwikkelpad 'Minimaliseren ruimtegebruik'

Aannames indicatieve kwantitatieve uitwerking ontwikkelpad

- Volledige benutting van ruimtelijk potentieel voor zonne-energie op daken.
Zonne-energie op gevels is ook een optie, maar voor nu niet in kwantificering meegenomen, omdat de potentie van daken al groter is dan wat in totaal aan zonne-energie nodig is in 2040 en zekerder is dan zonne-energie op gevels. Het deel dat nu is meegenomen bij zonne-energie op daken kan ook op gevels gerealiseerd worden.
- Geen nieuwe zonne-energie op land.
- Volledige benutting ruimtelijk potentieel windenergie op land in mobiliteitshubs en bedrijventerreinen. Hierbij wordt alleen de potentie binnen deze gebieden zelf, niet eromheen, meegenomen.
- Voor erfmolens wordt aangenomen dat bij elk van de agrarische erven één erfmolen gerealiseerd wordt.
- Geen windenergie op land in andere gebieden.
- Huidig vermogen zonne-energie op landbouwgrond in 2040 niet meer operationeel.

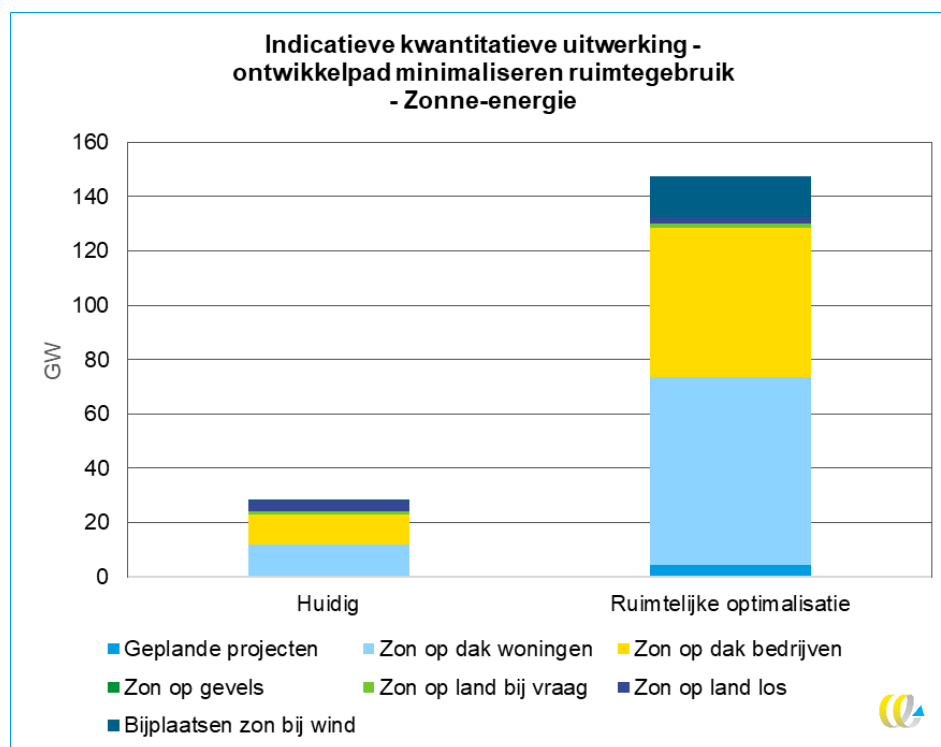
Zonne-energie

Figuur 26 toont de indicatieve uitwerking van het ontwikkelpad voor zonne-energie.

De grootste toename komt van zonne-energie op daken van woningen (bijna 70 GW, nu is dat 12 GW), maar ook bij bedrijven (mobiliteit, mkb, bedrijventerreinen en solar carports, samen ruim 55 GW, nu is dat 11 GW) worden veel extra zonnepanelen gerealiseerd. Daarnaast wordt 14 GW gerealiseerd door het bijplaatsen van zonne-energie bij bestaande windparken. Door het niet repoweren van bestaande zonneparken op landbouwgrond neemt het opgesteld vermogen ruim 1 GW af.

In totaal wordt er ruim 140 GW zonne-energie gerealiseerd, met alleen zonne-energie op daken en extra zonne-energie bij windenergie op land. Hierbij is dus aangenomen dat de volledige ruimtelijke potentie van zonne-energie op daken benut wordt. Met realisatie van zonneparken met multifunctioneel ruimtegebruik (zoals agri-pv) kan nog een groter vermogen gerealiseerd worden (zie Figuur 15 in Paragraaf 4.1.1).

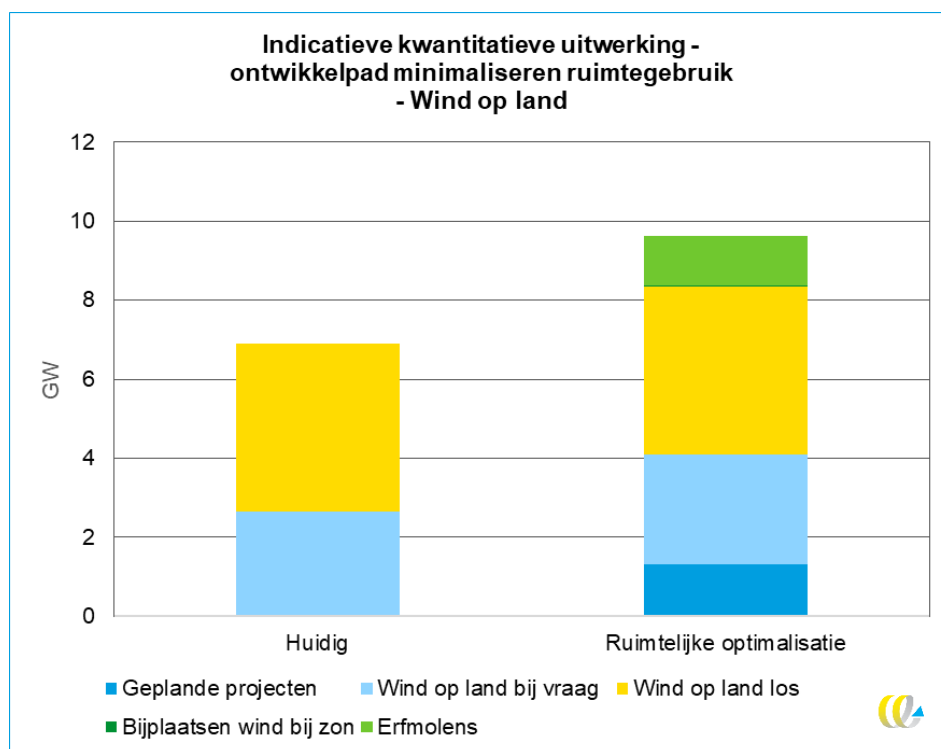
Figuur 26 – Indicatieve kwantitatieve uitwerking ontwikkelpad 'Minimaliseren ruimtegebruik – zonne-energie'



Windenergie op land

Figuur 27 toont de indicatieve kwantitatieve uitwerking van het ontwikkelpad voor windenergie op land. De grootste toename komt van erfmolens. Daarnaast wordt extra windenergie in industrieclusters, bedrijventerreinen en mobiliteitshubs gerealiseerd, maar minder dan bij het ontwikkelpad 'Optimale netinpassing', omdat we bij dit ontwikkelpad alleen de potentie op de terreinen zelf (en niet eromheen) meenemen. In totaal wordt circa 10 GW windenergie op land gerealiseerd bij dit ontwikkelpad in 2040, ruim 2 GW extra ten opzichte van de huidige windturbines en de bestaande plannen.

Figuur 27 – Indicatieve kwantitatieve uitwerking ontwikkelpad 'Minimaliseren ruimtegebruik – windenergie op land'



5.3.2 Optimale netinpassing

Bij dit ontwikkelpad ligt de focus op de optimale netinpassing en het minimaliseren van netuitbreidingen voor teruglevering van hernieuwbare opwek. Het elektriciteitsnet zal in de komende jaren fors uitgebreid worden voor de voorziene toename van de elektriciteitsvraag. Binnen dit ontwikkelpad minimaliseren we de netuitbreidingen die daarbovenop nodig zijn voor teruglevering van hernieuwbare opwek op land. Dit gebeurt door het realiseren van decentrale oplossingen: het koppelen van hernieuwbaar aanbod aan vraag, op het niveau van individuele netaansluitingen en op regionaal niveau (in het voorzieningsgebied van een HS/MS-station). Daarnaast ligt de focus op het optimaal benutten van de bestaande elektriciteitsinfrastructuur.

Bij dit ontwikkelpad wordt het aanbod van windenergie en zonne-energie gedimensioneerd op de toekomstige vraag naar elektriciteit. Daarbij wordt het vermogen van de hernieuwbare opwek gedimensioneerd op de vraagpiek.⁴¹ Een groot deel van de geproduceerde elektriciteit wordt direct benut. Er zal wel teruglevering plaatsvinden, maar er zijn geen aanvullende netuitbreidingen nodig voor hernieuwbare opwek, omdat het piekvermogen voor teruglevering lager is dan de piekvraag.⁴² Curtailment, opslag en eventueel conversie kunnen ervoor zorgen dat een groter vermogen aan hernieuwbare opwek ten opzichte van de vraag kan worden aangesloten, zonder dat extra netuitbreidingen nodig zijn.

Bij het dimensioneren van het aanbod op de toekomstige vraag is ook de interactie met andere productiebronnen, zoals windenergie op zee en kernenergie, van belang. Dit is een specifiek aandachtspunt voor windenergie op land nabij de gebieden waar windparken op zee aangesloten worden en eventueel kerncentrales gerealiseerd worden. In die gebieden zijn er lokaal vaak al grote overschotten van opwek die knelpunten op het hoogste niveau van het hoogspanningsnet, het 380 kV-net, kunnen veroorzaken (CE Delft, 2024b). Windenergie op land kan die knelpunten vergroten. Daarom wordt in de gebieden waar al overschotten van opwek zijn geen aanvullende windenergie op land gerealiseerd.

Bij dit ontwikkelpad wordt, naast koppeling aan de vraag, ook maximaal ingezet op benutting van de aanwezige netcapaciteit. Dat gebeurt op verschillende manieren:

- Bij alle bestaande projecten die aan het einde van de levensduur zitten, wordt repowering toegepast. Daarbij blijft het opgesteld vermogen gelijk, en wordt geen extra hernieuwbare opwek toegevoegd, omdat dit extra belasting op het elektriciteitsnet veroorzaakt. Aangezien nieuwe windturbines groter zijn en nieuwe zonnepanelen efficiënter, betekent dit dat er dan minder nieuwe windturbines en zonnepanelen geplaatst worden dan oorspronkelijk. Als er opslag, curtailment en/of conversie toegepast wordt, kan er wel meer opwek gerealiseerd worden binnen de bestaande aansluitingen.
- Daarnaast wordt ingezet op het realiseren van nieuwe zonne-energie en windturbines in gebieden waar op dit moment nog geen sprake is van teruglevercongestie of waar in de toekomst netcapaciteit beschikbaar komt door geplande netuitbreidingen. In die gebieden is namelijk nog ruimte op het net beschikbaar voor extra hernieuwbare opwek.

⁴¹ Om de teruglevering van hernieuwbare opwek op land te beperken, is het van belang dat het opgesteld vermogen van de hernieuwbare opwek op land gedimensioneerd wordt op de piek van de vraag. Als er meer hernieuwbare opwek gerealiseerd wordt, bijvoorbeeld als de productie van hernieuwbare opwek op jaarbasis gelijk is aan de vraag, dan is er veel teruglevering nodig en ligt het vermogen voor teruglevering hoger dan het vermogen van afname. In dat geval zijn uitbreidingen nodig van de netcapaciteit, specifiek voor teruglevering, of moeten maatregelen genomen worden om de overtollige opwek af te schakelen, op te slaan of om te zetten

⁴² In de praktijk is er op dit moment in veel gebieden al meer aanbod aan hernieuwbaar dan vraag, waardoor er al congestie voor teruglevering is. In dit ontwikkelpad wordt in deze gebieden pas nieuwe hernieuwbare opwek gerealiseerd als voldoende extra elektriciteitsvraag gerealiseerd wordt om nieuwe opwek in te passen zonder ergere congestie of netuitbreidingen.

- Er wordt ingezet op het realiseren van zonneparken bij bestaande windparken en windturbines bij bestaande zonneparken, indien dit niet tot extra netbelasting leidt. Het bijplaatsen van hernieuwbare opwek bij bestaande projecten heeft als voordeel dat windenergie en zonne-energie gecombineerd worden en de aansluiting efficiënter benut wordt, maar kan wel degelijk leiden tot extra netcongestie en netuitbreidingen. Dit is met name bij het bijplaatsen van zonneparken een risico, aangezien in de meeste regio's zonnestroom zorgt voor de grootste problemen met terugleveringscongestie. Daarom nemen we alleen het bijplaatsen van windturbines bij bestaande zonneparken mee. Vanuit het perspectief van efficiënte benutting van het net is het niet noodzakelijk dat de windturbines achter dezelfde aansluiting gerealiseerd worden als de bestaande zonneparken. Het is in algemene zin gunstig voor de benutting van het net als windturbines gerealiseerd worden in voorzieningsgebieden van HS/MS-stations met veel zonne-energie. Bij het bijplaatsen van windturbines in gebieden met veel zonne-energie zal wel curtailment en/of opslag nodig zijn om te voorkomen dat de piekbelasting door teruglevering toeneemt (Van Druten & Van Wieringen, 2025).
- Nieuwe contractvormen, zoals capaciteitsbeperkingscontracten en alternatieve transportrechten, zullen nodig zijn om de beschikbare netcapaciteit zo goed mogelijk te kunnen benutten.

Het realiseren van nieuwe windparken of zonneparken zonder nabijgelegen vraag in gebieden zonder beschikbare netcapaciteit vraagt om aanvullende netcapaciteit en wordt daarom niet meegenomen bij dit ontwikkelpad. Als dit wel gebeurt, dan heeft het vanuit de netinpassing de voorkeur om windenergie en zonne-energie te combineren, idealiter ook met flexibele afschakeling (curtailment) en opslag, om de netcapaciteit zo efficiënt mogelijk te benutten. Daarnaast is het dan gunstig om grootschalige projecten te realiseren die direct op het hoogspanningsnet aangesloten worden. In dat geval zijn namelijk geen uitbreidingen op het laag- en middenspanningsnet nodig. Daarnaast is het vanuit de netinpassing wenselijk om de opwek zo dicht mogelijk bij grootschalige elektriciteitsvraag te realiseren.

Tekstkader 12 – Aannames indicatieve kwantitatieve uitwerking ontwikkelpad ‘Optimale netinpassing’

Specifieke aannames ontwikkelpad ‘Optimale netinpassing’

We maximaliseren het aanbod ten opzichte van de vraag op sectorniveau en maken hiervoor gebruik van cijfers op nationaal niveau (zie Bijlage E.2). In de praktijk heb je regio's waar minder aanbod dan vraag mogelijk is, dus zal het niet altijd mogelijk zijn om genoeg opwek te realiseren voor de lokale vraag.

Zonnepanelen worden aangesloten op 50% van het paneelvermogen om zoveel mogelijk opwek te kunnen realiseren bij de bestaande vraag.⁴³ Dit betekent dat 2 kW paneelvermogen gerealiseerd kan worden per kW elektriciteitsvraag. Bij windenergie op land gaan we uit van maximaal 1 MW windenergie op land per MW elektriciteitsvraag.

Bij zonneparken en windturbines op land wordt ook de potentie rondom cluster 6-industrie en bedrijven-terreinen meegenomen, aangezien er dan nog steeds nabijheid is tussen vraag en aanbod.

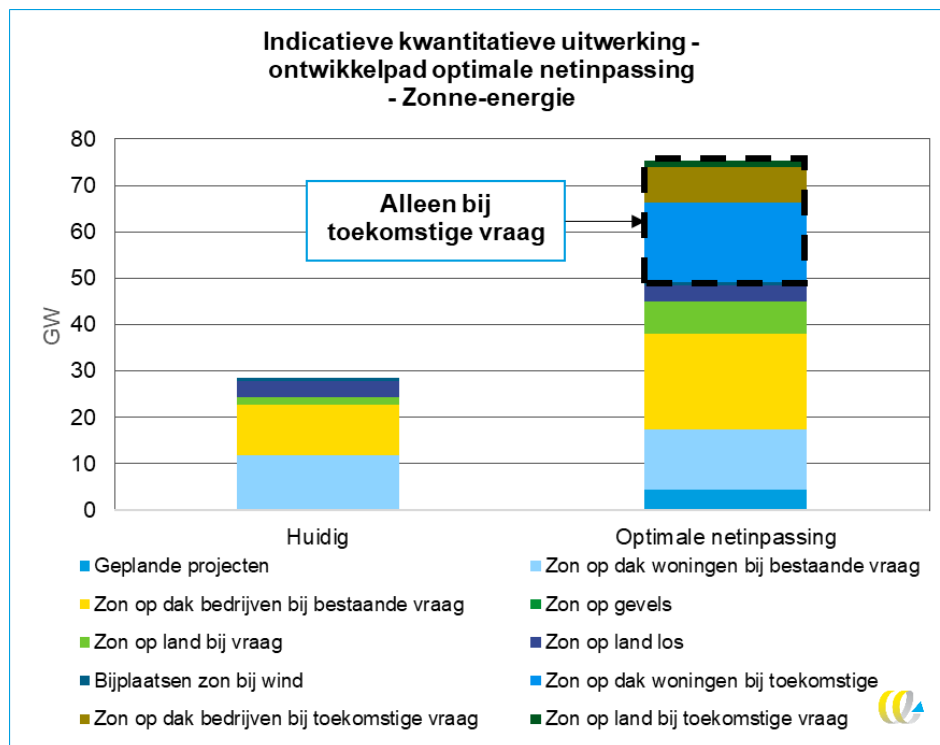
We nemen aan dat er geen zonne-energie bij bestaande windenergie op land gerealiseerd wordt, omdat dit in veel gevallen extra netcongestie veroorzaakt.

Zonne-energie

Figuur 28 toont de indicatieve kwantitatieve uitwerking van het ontwikkelpad (zie Tekstkader 12 voor de aannames) voor zonne-energie. In totaal wordt er bij dit ontwikkelpad circa 75 GW zonne-energie gerealiseerd in 2040, wat een forse groei is ten opzichte van het huidige opgesteld vermogen (28 GW). Dit betekent dat er richting 2040 met een efficiënte netinpassing en koppeling aan lokale vraag en bestaande netcapaciteit nog veel groei mogelijk is van zonne-energie, zonder dat daar op grote schaal netuitbreiding voor nodig is. Een deel van deze groei is inpasbaar bij de huidige elektriciteitsvraag (volgens inschatting tot een totaal van 50 GW zonne-energie), maar een groot deel van de groei (het bovenste blok) kan alleen ingepast worden als de elektriciteitsvraag toeneemt (nog 25 GW extra). Bijvoorbeeld door elektrificatie van de mobiliteitssector. De elektriciteitsvraag van die sector is nu nog zeer beperkt, maar zal naar verwachting richting 2040 fors toenemen en er zal daardoor bij de mobiliteit ook een fors vermogen aan zonne-energie gerealiseerd kunnen worden.

⁴³ Dit betekent dat een deel van de geproduceerde elektriciteit gecurtailed of eventueel opgeslagen wordt.

Figuur 28 – Indicatieve kwantitatieve uitwerking ontwikkelpad 'Optimale netinpassing – zonne-energie'. Gestreept blok bovenin geeft aanvullende potentie bij toename elektriciteitsvraag weer.



De figuur laat verder zien dat de grootste groei van het opgesteld vermogen van zonne-energie komt van zonne-energie op daken van woningen (circa 30 GW in 2040, nu is dat 12 GW) en zonne-energie op daken van bedrijven (circa 28 GW in 2040, nu is dat 11 GW). De groei van zonne-energie bij bedrijfsdaken komt van zonne-energie bij mobiliteitshubs, industrie, bedrijventerreinen, mkb en maatschappelijk vastgoed. Daarnaast wordt er bij dit ontwikkelpad zonne-energie op land bij elektriciteitsvraag (van industrie en mobiliteitshubs) gerealiseerd (circa 8 GW in 2040, nu is dat 1 GW).

Bij zonne-energie op daken van woningen, bij mkb-bedrijven, maatschappelijk vastgoed en bedrijventerreinen (exclusief mobiliteit, die zitten bij archetype mobiliteitshubs) wordt slechts een deel van de totale potentie benut. Bij zonne-energie op woningen wordt ongeveer 30% van het nog beschikbare dakoppervlak benut en bij mkb-bedrijven, maatschappelijk vastgoed en bedrijventerreinen slechts 20%, als het paneelvermogen beperkt wordt tot de (toekomstige) vraag. Dit komt doordat de toekomstige elektriciteitsvraag van deze sectoren onvoldoende is voor het lokaal benutten van de productie als al het dakoppervlak benut wordt. Daarnaast is er bij woningen, mkb-bedrijven, maatschappelijk vastgoed en bedrijventerreinen nu al veel zonne-energie gerealiseerd, waarmee al een groot deel van de toekomstige elektriciteitsvraag van deze sectoren ingevuld kan worden. Er wordt bij deze sectoren geen zonne-energie op gevels gerealiseerd, omdat er al (ruim) voldoende potentie voor zonne-energie op dak is ten opzichte van de toekomstige elektriciteitsvraag.

Bij de industrie en ook bij de mobiliteitssector wordt de uitrol van zonne-energie niet beperkt door de elektriciteitsvraag, maar door de ruimtelijke potentie. Bij deze archetypen wordt het volledig ruimtelijk potentieel benut, maar dit is onvoldoende om in de vermogenspiek van de elektriciteitsvraag te voorzien, vanwege de grote vraag naar elektriciteit. Voor de industrie zou zonne-energie op gevels daarom een interessante optie kunnen zijn, om nog meer opwek lokaal te realiseren.⁴⁴

Windenergie op land

Figuur 29 toont de indicatieve kwantitatieve uitwerking van windenergie op land voor dit ontwikkelpad. Er wordt boven op de bestaande en geplande windturbines nog extra windenergie op land gerealiseerd bij elektriciteitsvraag: bij cluster 6-industrie en bij mobiliteits-hubs en bedrijventerreinen. Daarnaast worden er wat extra erfmolens gerealiseerd en wordt er een klein vermogen aan windenergie op land gerealiseerd bij bestaande zonneparken. Er vindt repowering plaats van alle bestaande windturbines die einde levensduur zijn, maar hierbij wordt bij de repowering geen extra vermogen aan windturbines toegevoegd, waardoor het energetisch effect hiervan netto nul is (maar door grotere windturbines wel minder ruimte nodig is). Door curtailment en opslag kan binnen de bestaande aansluiting meer vermogen gerealiseerd worden, maar dat is bij de kwantificering niet meegenomen.

Er wordt geen toename van windenergie op land in de grote industrieclusters meegenomen in dit ontwikkelpad, aangezien hiervoor door de aanlanding van windenergie op zee lokaal vaak al grote overschotten van opwek aanwezig zijn, die knelpunten veroorzaken op 380 kV-verbindingen en die door extra windenergie op land vergroot kunnen worden. Indien er voldoende netcapaciteit is op de 380kV-verbindingen, dan kan het realiseren van windenergie op land in de grote industrieclusters wel een optie zijn.

Er kan in potentie nog veel windenergie op land gerealiseerd worden door benutting van het bestaande elektriciteitsnet in gebieden zonder terugleveringscongestie en gebieden met teruglevercongestie door zonne-energie. Daarnaast kan nog meer windenergie op land gerealiseerd worden in gebieden waar extra netcapaciteit gerealiseerd wordt voor afname. Het is echter onduidelijk hoeveel windenergie op land hiermee nog gerealiseerd kan worden. Daarom wordt dit niet kwantitatief meegenomen.

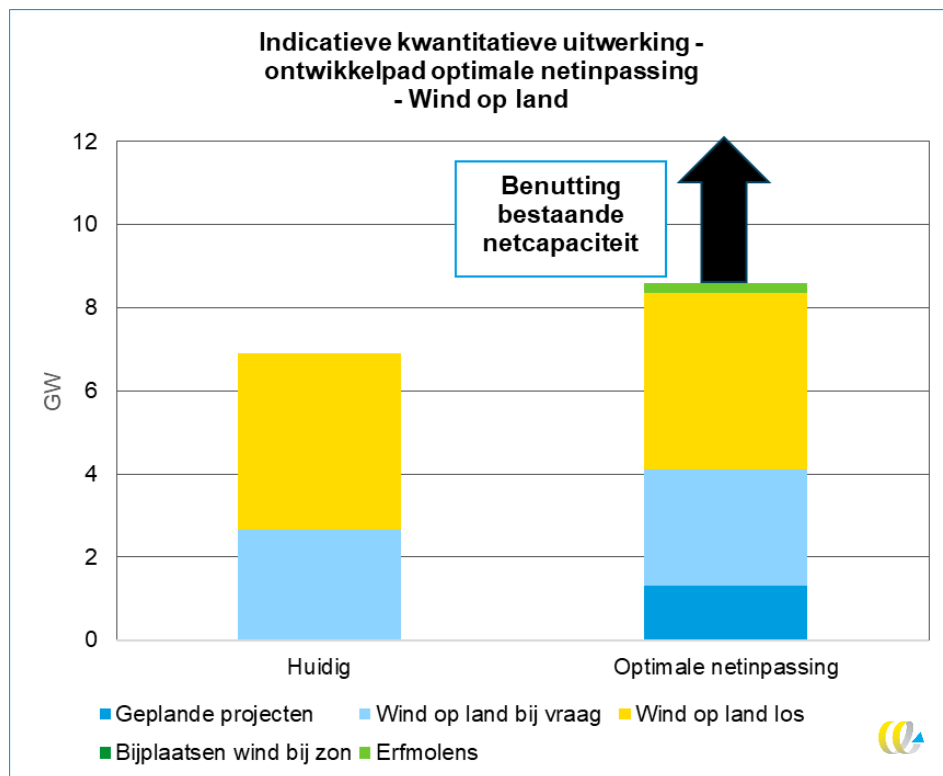
In totaal wordt er ongeveer 8,5 GW windenergie op land gerealiseerd in 2040 in dit ontwikkelpad, wat minder is dan 0,5 GW groei ten opzichte van de huidige windturbines en bestaande plannen. Deze toename is beperkt, omdat de ruimtelijke potentie voor nieuwe windturbines op land nabij locaties met elektriciteitsvraag beperkt is.⁴⁵ Door benutting van

⁴⁴ Dit is niet meegenomen in de indicatieve kwantitatieve uitwerking, aangezien de potentie voor zonne-energie op gevels bij industrie niet bekend is. Dit zou verder onderzocht moeten worden.

⁴⁵ Hierbij gaan we uit van een lage inschatting van de potentie, inclusief aanvullende beperkingen (zie Tekstkader 10). Echter, bij een hogere inschatting van de potentie geldt ook de conclusie dat er weinig potentie is nabij elektriciteitsvraag.

de bestaande capaciteit op het elektriciteitsnet kan naar verwachting nog een stuk meer windenergie op land gerealiseerd worden, maar dit is niet gekwantificeerd.

Figuur 29 – Indicatieve kwantitatieve uitwerking ontwikkelpad 'Optimale netinpassing – windenergie op land'



5.3.3 Optimalisatie maatschappelijke kosten

Bij dit ontwikkelpad ligt de focus op het minimaliseren van de maatschappelijke kosten voor hernieuwbare opwek op land. Dit gebeurt door inzet op de archetypen die de laagste maatschappelijke kosten hebben. Dit betekent bijvoorbeeld dat er ingezet wordt op zonne-energie op daken, maar alleen als er geen extra netuitbreidingen nodig zijn door teruglevering (dus aanleg in lijn met eigen verbruik, en dus gelijke aannames als bij ontwikkelpad 'Optimale netinpassing'). Teruglevering op het laagspanningsnet en middenspanningsnet leidt namelijk tot relatief hoge maatschappelijke kosten voor netverzwaringen.

Daarnaast wordt er bij dit ontwikkelpad, onder de juiste condities, ingezet op grootschalige productie (> 100 MW). Naast schaalvoordelen leidt inzet op grootschalige opties per MWh geproduceerde elektriciteit tot lagere externe kosten van hinder voor omwonenden. Ook zijn de kosten voor netuitbreiding lager, doordat deze grootschalige projecten direct op het hoogspanningsnet aangesloten worden (zie Paragraaf 4.3). Grootschalige zonne-energie op dak of windenergie bij industrieclusters of mobiliteitshubs kan de netimpact verder drukken. In het geval van windturbines moet daarbij echter wel rekening worden gehouden met externe kosten door hinder voor omwonenden. Het plaatsen van groot-

schalige opwek in gebieden met een lage bevolkingsdichtheid heeft daarom in principe de voorkeur. Voor grootschalige zonne-energie op land wordt ingezet op zonvolgend agri-pv, aangezien dit – ondanks de hogere investeringskosten – relatief lage maatschappelijke kosten per opgewekte eenheid elektriciteit kent vanwege het hoge aantal vollasturen.

Ook wordt ingezet op het bijplaatsen van opwek bij bestaande windparken, aangezien de maatschappelijke kosten lager zijn doordat een bestaande aansluiting gebruikt kan worden. Om de additionele kosten voor netuitbreidingen en de impact op omwonenden te minimaliseren, wordt ingezet op het combineren van windturbines en zonne-energie.

Repowering van bestaande windturbines en zonneparken hoeft vanuit maatschappelijk kostenperspectief niet per definitie gunstig te zijn. De besparingen in directe kosten door repowering ten opzichte van nieuwe projecten zijn namelijk beperkt, en daarbij komt nog dat als er geen repowering plaatsvindt, de netcapaciteit beschikbaar komt voor nieuwe projecten. Als repowering wel plaatsvindt, dan kan het vanuit maatschappelijk perspectief gunstig zijn om een groter vermogen te realiseren, aangezien grotere projecten relatief lagere maatschappelijke kosten hebben, mits hiervoor netcapaciteit beschikbaar is.

Er wordt bij dit ontwikkelpad geen zonne-energie op land gerealiseerd bij industrie, mobiliteitshubs en bedrijventerreinen, aangezien de opportunity costs door het landgebruik relatief hoog zijn. In deze gebieden worden wel windturbines en zonne-energie op dak gerealiseerd, aangezien dit niet – of, in het geval van windturbines, zeer beperkt – ten koste gaat van ruimte voor bedrijfsactiviteiten. Daarnaast kan windenergie op land in combinatie met zonne-energie op dak en opslag mogelijk extra capaciteit voor afname van elektriciteit in congestiegebieden realiseren, wat in potentie hoge maatschappelijke baten kan opleveren.

Er wordt in dit ontwikkelpad niet ingezet op solar carports, zonne-energie op gevels en erfmolens, aangezien deze archetypen hoge maatschappelijke kosten hebben door relatief hoge investeringskosten (solar carports, erfmolens) of een lager aantal vollasturen (zonne-energie op gevels).

Tekstkader 13 – Aannames indicatieve kwantitatieve uitwerking ontwikkelpad 'Optimalisatie mkba'

Aannames indicatieve kwantitatieve uitwerking ontwikkelpad

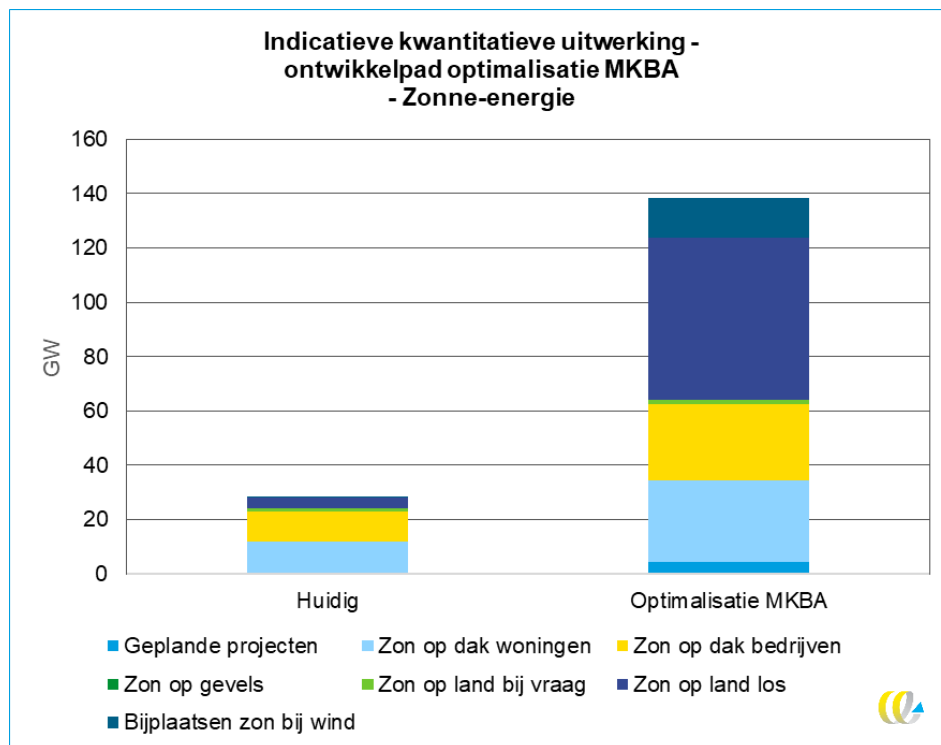
- Alle archetypen met maatschappelijke kosten onder de mediaan worden benut.
- Benutting zonne-energie op dak gelijk aan ontwikkelpad optimale netinpassing.
- Voor zonne-energie op land: benutting 10% potentieel agri-pv, zonvolgend.
- Bij zonneparken volledige benutting van het potentieel van zonneparken met een functie voor ecologie en natuurherstel. Bij windenergie op land: volledige benutting van het potentieel voor windenergie op verziltingsgronden of veenontginningsgebieden, omdat dit gebieden zijn met minder woningen en daarmee minste externe kosten door hinder met zich meebrengt. In de praktijk is dit afhankelijk van de specifieke situatie en kunnen maatschappelijke kosten in andere gebieden ook laag zijn.

Zonne-energie

Figuur 30 toont de indicatieve uitwerking van het ontwikkelpad voor zonne-energie.

De grootste toename komt van losse zonneparken (zonvolgend agri-pv en zonneparken als functie van ecologie en natuurherstel); een toename tot zo'n 60 GW in totaal (nu 3,5 GW). Daarnaast wordt circa 30 GW zonne-energie op daken bij woningen gerealiseerd (nu 12 GW), 28 GW zonne-energie op dak bij bedrijven (nu 11 GW) en bijna 15 GW zonneparken bij bestaande windparken (nu minder dan 1 GW). In totaal is er in dit ontwikkelpad circa 140 GW zonne-energie in 2040. Al moet benadrukt worden dat het totale vermogen en de aannames voor het realiseren van zonne-energie tot op zekere hoogte arbitrair zijn: in theorie is de potentie voor grootschalige zonneparken en agri-pv nog een stuk groter dan wat nu aangenomen is.

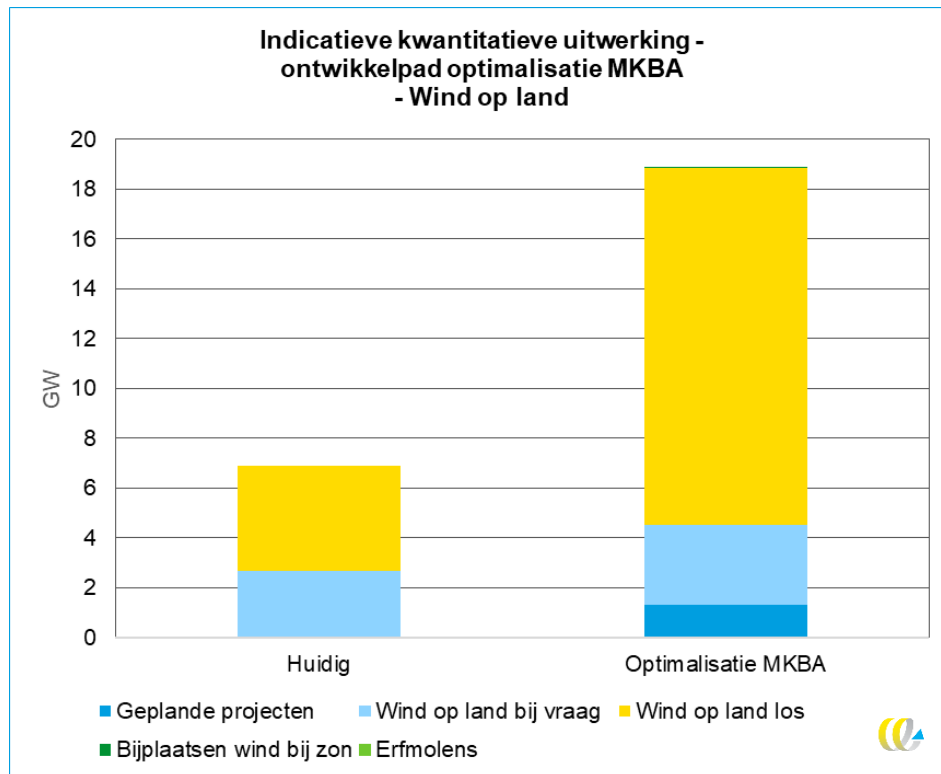
Figuur 30 – Indicatieve kwantitatieve uitwerking ontwikkelpad 'Optimalisatie maatschappelijke kosten – zonne-energie'



Windenergie op land

Figuur 31 toont de indicatieve uitwerking van windenergie op land in het ontwikkelpad. De figuur laat zien dat er wat extra windturbines gerealiseerd worden nabij elektriciteitsvraag, maar de potentie hiervoor is beperkt (wat ook naar voren kwam bij de andere ontwikkelpaden). Er vindt een forse toename van losse windenergie op land plaats op verziltingsgronden of in veenontginningsgebieden. In totaal leidt dit tot circa 19 GW windenergie op land, ruim 11 GW meer dan de huidige situatie en bestaande plannen. Al moet ook bij windenergie op land, net als bij zonne-energie, benoemd worden dat de aannames in het ontwikkelpad arbitrair zijn, en dat de potentie voor grootschalige windenergie op land in gebieden met een lage bevolkingsdichtheid bijvoorbeeld nog veel hoger ligt.

Figuur 31 – Indicatieve kwantitatieve uitwerking ontwikkelpad 'Optimalisatie maatschappelijke kosten – windenergie op land'



5.4 Conclusies uit de ontwikkelpaden

In de voorgaande paragraaf hebben we de uitwerking van de drie ontwikkelpaden besproken. Deze geven inzicht in hoe de opgave voor hernieuwbare opwek op land ingevuld **kan** worden, vanuit verschillende perspectieven. Het is echter niet zo dat er 'gekozen' moet worden tussen deze ontwikkelpaden, de optimale invulling van de opgave voor hernieuwbare opwek op land zal een combinatie zijn van deze ontwikkelpaden. Het doel van de ontwikkelpaden is dan ook niet om verschillende opties te schetsen, maar om inzicht te krijgen in welk archetype vanuit elk van de drie perspectieven gunstig is (no-regrets) en waar de verschillen tussen de ontwikkelpaden zitten, zodat er iets te kiezen is. Dat brengen we in kaart in deze paragraaf. Daarnaast geven we op basis van de uitgewerkte ontwikkelpaden een reflectie op wat nodig is voor de ondergrens en bovengrens voor de totale hoeveelheid hernieuwbare opwek op land in Nederland in de scenario's voor 2040 (uit Hoofdstuk 2).

5.4.1 Wat zijn no-regrets vanuit de ontwikkelpaden?

In deze paragraaf bespreken we de no-regrets vanuit de ontwikkelpaden. Dit zijn de archetypen die in elk van de ontwikkelpaden terugkomen. Dit betekent echter niet dat de no-regrets in alle gevallen wenselijk zijn. Voor individuele gevallen kunnen deze conclusies afwijken.

Er zijn enkele archetypen die in elk van de ontwikkelpaden naar voren komen en die we daarmee zien als **no-regrets** voor de ontwikkeling van hernieuwbare opwek op land:

- Maximaal benutten van de **potentie van zonne-energie op daken in industrie-clusters, bij cluster 6 en bij mobiliteitsclusters**. Dit zijn gebieden met een forse (toekomstige) elektriciteitsvraag, relatief lage maatschappelijke kosten en zonne-energie op dak is ook vanuit ruimtelijk perspectief gunstig. Deze opties zijn alleen no-regret als er niet meer zonnepanelen gerealiseerd worden dan de piekvraag naar elektriciteit. Op nationaal niveau ligt de vraag van deze sectoren hoger dan de potentie, maar op lokaal niveau hoeft dat niet altijd het geval te zijn.
- Realiseren van **windenergie op land op de terreinen cluster 6-industrie, mobiliteitshubs en op bedrijventerreinen**. Dit zijn gebieden waar vanuit de toekomstige elektriciteitsvraag nog meer windenergie op land gerealiseerd kan worden en windenergie op land heeft door het beperkte (directe) ruimtegebruik geen groot effect op bedrijfsactiviteiten, waardoor de opportunity costs laag zijn. Tot slot kan windenergie op land, in combinatie met zonne-energie en opslag, in sommige gevallen bijdragen aan het verminderen van afnamecongestie.
- **Realiseren zonne-energie op daken mkb, maatschappelijk vastgoed, bij bedrijventerreinen en op woningen** met een aansluitvermogen **maximaal gelijk aan de piekvraag**. Niet het volledige potentieel van deze archetypen is no-regret. De totale potentie is namelijk groter dan de piekvraag in deze sectoren en het realiseren van meer opwek van de piekvraag leidt tot extra netuitbreidingen en hogere maatschappelijke kosten. Curtailment, opslag en eventueel conversie kunnen ervoor zorgen dat een groter vermogen aan hernieuwbare opwek ten opzichte van de vraag kan worden aangesloten, zonder dat extra netuitbreidingen nodig zijn.
- **Repowering van windenergie op land en zonne-energie op dak**, aangezien gebruikgemaakt wordt van bestaande capaciteit op het elektriciteitsnet en ruimte die reeds gebruikt wordt voor deze toepassingen. Repowering is geen zekerheid en als dit niet gerealiseerd wordt, zal het vermogen aan windenergie op land afnemen:
 - Bij zonne-energie op land is repowering van monofunctionele zonneparken op landbouwgrond niet no-regret, aangezien dit geen optimale invulling is van de ruimte in Nederland.

5.4.2 Waar valt er iets te kiezen?

Naast de no-regrets zijn er ook archetypen die in een deel van de ontwikkelpaden terugkomen. Dit betekent dat die archetypen vanuit een bepaald perspectief wenselijk zijn, maar vanuit een ander perspectief niet. Hier valt dus iets te kiezen. Op de volgende bladzijde bespreken we de belangrijkste verschillen tussen de ontwikkelpaden en daarmee de keuzes die gemaakt kunnen worden. Hierbij is ook van belang wat noodzakelijk is voor het realiseren van de opgave voor hernieuwbare opwek op land. Daar gaan we in Paragraaf 5.4.3 op in.

De belangrijkste keuzes die voorliggen bij **zonne-energie** zijn:

- Bij **zonne-energie op daken bij woningen, mkb, maatschappelijk vastgoed en bedrijventerreinen** is de belangrijkste keuze of het volledige potentieel benut wordt. Ruimtelijk gezien is het gunstig om zoveel mogelijk van de opgave voor zonne-energie met zonne-energie op dak te realiseren. Maar het gevolg daarvan is dat er in de gebouwde omgeving flinke hoeveelheden elektriciteit teruggeleverd worden. Hiervoor zijn uitbreidingen aan de LS-, MS- en HS-netten nodig, met relatief hoge maatschappelijke kosten als gevolg, of moeten er maatregelen genomen worden om de overvloedige opwek af te schakelen, op te slaan of om te zetten (al zal dit naar verwachting onvoldoende zijn om netuitbreidingen te voorkomen als een groot aandeel van het dakoppervlak benut wordt).
- **Zonne-energie op land in industriecusters en cluster 6-industrie.** Bij de industrie zit veel vraag naar elektriciteit, die in de toekomst nog verder zal toenemen. Daardoor kan er bij deze gebieden doorgaans zonne-energie op land gerealiseerd worden zonder dat daar significante netuitbreidingen voor nodig zijn. Het realiseren van zonne-energie op land bij industrie gaat echter wel ten koste van de beschikbare ruimte voor bedrijfsactiviteiten, wat ervoor zorgt dat deze archetypen ten opzichte van alternatieven relatief hoge maatschappelijke kosten hebben.
- **Zonne-energie op gevels** kan naast zonne-energie op daken gerealiseerd worden en vanuit netinpassing gunstig zijn, omdat het opwekprofiel afwijkt en er meer productie in de ochtend en avond is. De maatschappelijke kosten voor zonne-energie op gevels zijn, ten opzichte van andere archetypen, relatief hoog. Voor de industrie zou zonne-energie op gevels daarom een interessante optie kunnen zijn, om nog meer opwek lokaal te realiseren.
- **Solar carports** zijn ruimtelijk gezien gunstig, omdat er sprake is van multifunctioneel ruimtegebruik. De elektriciteitsvraag op deze locaties is beperkt (ruim onvoldoende om alle lokale productie te kunnen gebruiken), en deze optie heeft ook relatief hoge maatschappelijke kosten ten opzichte van andere archetypen.
- **Agri-pv zonvolgend en andere vormen van grootschalige zonneparken** hebben, ten opzichte van andere archetypen, relatief lage maatschappelijke kosten. De lokale elektriciteitsvraag is echter vaak beperkt, waardoor er wel

netuitbreidingen nodig zijn om deze stroom terug te leveren. Er zijn bij groot-schalige zonneparken die op het HS-net worden aangesloten echter wel minder netuitbreidingen nodig dan bij teruglevering van zonne-energie op daken op LS- en MS-niveau. Indien grootschalige zonneparken gerealiseerd worden, hebben restlandschappen, brownfields, verziltingsgronden of veenontginningsgebieden, of zonne-energie als functie voor ecologie en natuurherstel ruimtelijk gezien de voorkeur. Verticale agri-pv kan ook een optie zijn, maar vanuit maatschappelijke kosten bezien is het bij agri-pv gunstiger om zonzvolgende opstellingen te realiseren, vanwege een hogere opbrengst.

- Bij **repowering** is het de afweging of ook bij maatschappelijk minder gunstige opties, zoals monofunctionele zonne-energie op landbouwgrond, repowering toegepast wordt aan het einde van de levensduur. De besparing in maatschappelijke kosten ten opzichte van nieuwe zonneparken is beperkt. Voor het efficiënt gebruik van het elektriciteitsnet is het wel wenselijk om de bestaande capaciteit van het elektriciteitsnet te gebruiken.
- **Realiseren van zonne-energie bij bestaande windparken** heeft forse ruimtelijke potentie. Voor de netimpact en maatschappelijke kosten is het gunstig om wind-energie en zonne-energie te combineren, en er kan gebruikgemaakt worden van de bestaande aansluiting. Maar het realiseren van zonne-energie bij bestaande windparken kan wel degelijk leiden tot extra netcongestie en netuitbreidingen. Dit is met name bij het bijplaatsen van zonneparken een risico, aangezien in de meeste regio's teruglevering van zonnestroom zorgt voor de grootste problemen met netcongestie door teruglevering.

De belangrijkste keuzes die voorliggen bij windenergie op land zijn:

- De belangrijkste keuze is of er ook in **gebieden met weinig elektriciteitsvraag** windenergie op land gerealiseerd wordt. De potentie voor windenergie op land in gebieden nabij de elektriciteitsvraag is namelijk beperkt. Indien windenergie op land gerealiseerd wordt in gebieden met weinig elektriciteitsvraag, dan heeft het vanuit netperspectief de voorkeur om het te realiseren in gebieden waar nog netcapaciteit beschikbaar is. De maatschappelijke kosten zijn het laagst bij grootschalige windparken die aangesloten worden op HS-niveau, in gebieden met zo min mogelijk omwonenden. Vanuit ruimtelijk perspectief is het dan wenselijk om windturbines te realiseren op verziltingsgronden, veenontginningsgebieden, brownfields en restlandschappen.
- Het realiseren van windenergie op land in **grote industrieclusters** is een afweging. De ruimtelijke impact van windenergie op land is beperkt, waardoor het geen impact hoeft te hebben op bedrijfsactiviteiten. De grote industrieclusters zijn echter wel gebieden met een grote toekomstige ruimtedruk, waardoor ook de beperkte ruimtelijke impact van windenergie op land onwenselijk kan zijn. Daarnaast zijn de grote industrieclusters gebieden waar windparken op zee aangesloten worden op het hoogspanningsnet, waardoor in die gebieden vaak al grote overschotten van opwek zijn die knelpunten op het hoogste niveau van het hoogspanningsnet,

het 380 kV-net, kunnen veroorzaken. Windenergie op land kan die knelpunten vergroten.

- Het is ook een overweging om windenergie op land te realiseren **in de gebieden rondom** de grote industrieclusters, cluster 6-industrie en bedrijventerreinen. Voor een gunstige netimpact is de nabijheid van windturbines bij grote elektriciteitsvragers wenselijk. Daarnaast is ook bij windenergie op land rondom de grote industrieclusters de interactie met windenergie op zee een aandachtspunt.
- De realisatie van **erfmolens** is ook een afweging. Dit kan op eigen erven gerealiseerd worden om invulling te geven aan de eigen vraag, maar de maatschappelijke kosten van erfmolens zijn relatief hoog ten opzichte van andere archetypen.
- De mate van **repowering** van windenergie op land is ook een afweging. Het repoweren van windenergie op land aan het einde van de levensduur zien we als no-regret. Maar het is ook mogelijk om bij repowering meer vermogen aan windenergie op land te realiseren. Door curtailment en opslag kan binnen de bestaande aansluiting meer vermogen gerealiseerd worden, maar dat is bij de kwantificering niet meegenomen. Het is ook mogelijk om een grotere aansluiting te realiseren, maar dan levert dit wel extra netbelasting op. Vanuit het perspectief van externe kosten voor hinder voor omwonenden (die nemen bij het bijplaatsen van nieuwe windturbines minder toe) is het realiseren van meer vermogen bij repowering gunstig.

Daarnaast zijn er enkele archetypen die in geen enkel ontwikkelpad terugkomen. Dat deze archetypen in geen van de ontwikkelpaden terugkomen, betekent niet dat deze per definitie maatschappelijk onwenselijk zijn. In individuele gevallen kunnen deze archetypen als nog gunstig zijn. Daarnaast is het onzeker welk deel van de potentie van de andere opties daadwerkelijk gerealiseerd kan worden en of de potentie van de andere opties voldoende is om tot aan de totale nationale opgave voor hernieuwbaar op land te komen (meer hierover in Paragraaf 5.4.3). De archetypen die in geen van de ontwikkelpaden terugkomen, zijn:

- **Zonne-energie op land bij bedrijventerreinen (zonder mobiliteit):**⁴⁶ er is namelijk voldoende potentie voor zonne-energie op daken om aan de toekomstige elektriciteitsvraag te voldoen en zonne-energie op dak heeft vanuit ruimtelijk perspectief en maatschappelijke kosten de voorkeur. Op individueel niveau kunnen zonneparken wel nuttig zijn als er bedrijventerreinen zijn waar er onvoldoende potentie is voor zonne-energie op dak voor het invullen van de toekomstige elektriciteitsvraag.
- **Zonne-energie op landbouwgrond (geen agri-pv):** dit is doorgaans niet gekoppeld aan vraag, en daardoor niet gunstig vanuit de netinpassing. Vanuit ruimtelijk perspectief hebben andere gebieden de voorkeur en op landbouwgrond heeft agri-

⁴⁶ Deze archetypen zitten in het archetype mobiliteitshubs. Deze komt terug in verschillende ontwikkelpaden, omdat daar meer elektriciteitsvraag is ten opzichte van de potentie voor zonnepanelen.

pv ruimtelijk gezien de voorkeur vanwege meervoudig ruimtegebruik. Die wenselijkere opties hebben in theorie ruim voldoende potentieel (meer hierover in Paragraaf 5.4.3). Grootschalige productieparks van zonne-energie op landbouwgrond hebben relatief lage maatschappelijke kosten, maar dat geldt ook bij grootschalige productie in andere gebieden waar de ontwikkeling van hernieuwbare opwek wenselijker is (zoals brownfields of restlandschappen):

- Voor windenergie op land geldt vanuit dezelfde argumentatie ook dat het de voorkeur heeft om dit te realiseren in andere gebieden, met name op verziltingsgronden of veenontginningsgebieden. Voor windenergie op land geldt echter dat de potentie in andere gebieden minder groot is (hierover meer in Paragraaf 5.4.3), en dat windenergie op landbouwgrond daarom bij een grote doorgroei van windenergie op land wel een reële optie blijft. Daarnaast gaat toepassing van windenergie op land slechts beperkt ten koste van landbouwactiviteiten, doordat de (directe) ruimtelijke impact kleiner is.

5.4.3 Wat is nodig voor de totale opgave voor hernieuwbare opwek op land?

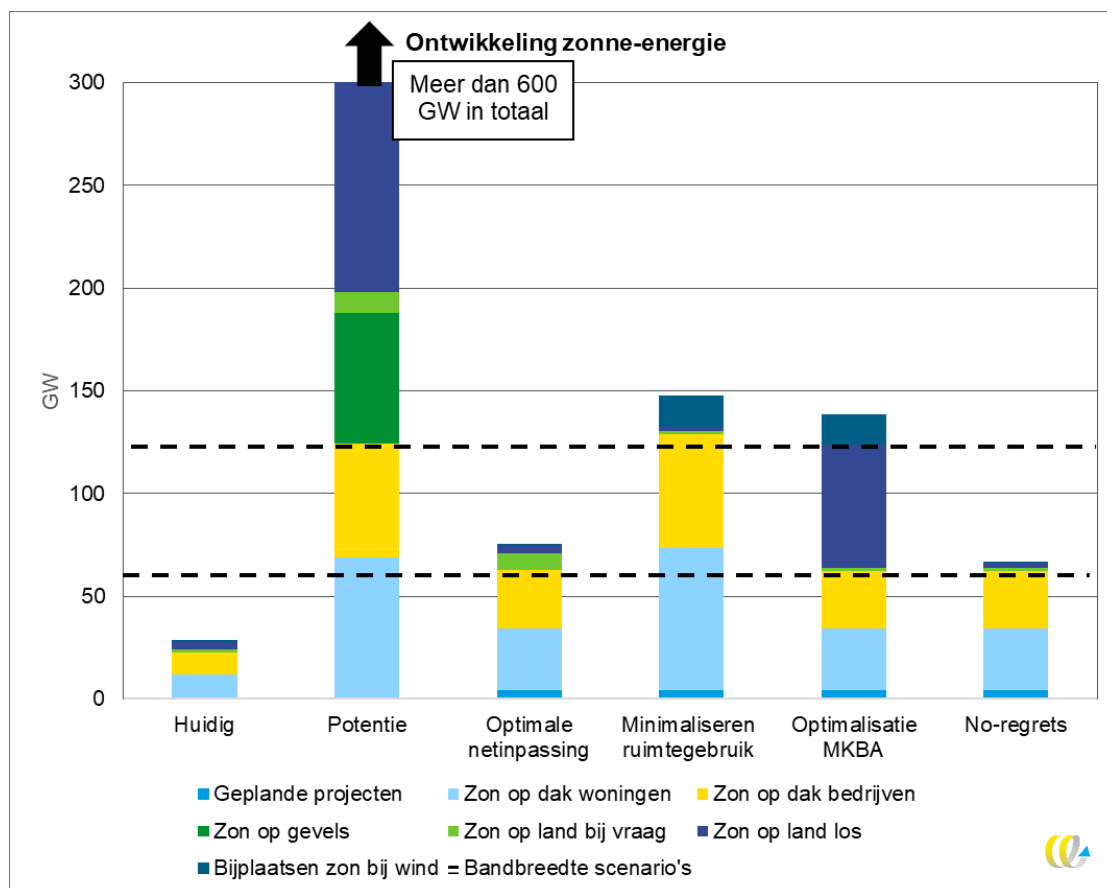
In Hoofdstuk 2 is de groei van hernieuwbare opwek op land richting 2040 in verschillende energiescenario's bepaald. In deze paragraaf bespreken we wat nodig is om de opgave voor zonne-energie en windenergie op land in te vullen.

Zonne-energie

Uit de scenario-analyse volgt een groei van zonne-energie van 28,5 GW in 2024 (36 GW met verwachte groei komende jaren) naar 57 GW tot 127 GW in 2040. De afwegingen rondom de totale opgave voor zonne-energie, zoals de bijdrage aan klimaatdoelstellingen, lagere systeemkosten en meer energie-onafhankelijkheid zijn te vinden in Hoofdstuk 2.

Bij zonne-energie is de totale potentie van de no-regret-opties, die in elk van de ontwikkelpaden terugkomen, 60 GW (inclusief huidige en bestaande plannen), zoals te zien is in Figuur 32. Het is dus in theorie mogelijk om de ondergrens van de scenario's richting 2040 te bereiken met alleen de no-regret-opties. Bij de inschatting van het potentieel zijn technische en ruimtelijke beperkingen al meegenomen, maar alsnog zal in de praktijk niet alle potentie van de no-regret-opties gerealiseerd kunnen worden. Daarom zullen naar verwachting ook andere opties nodig zijn voor het realiseren van de ondergrens van de hoeveelheid zonne-energie in de scenario's voor 2040.

Figuur 32 – Mogelijke ontwikkelingen zonne-energie voor de verschillende ontwikkelpaden. De stippellijnen geven de onder- en bovengrens aan van scenario's voor zonne-energie in 2040. Potentie gaat om ruimtelijk potentieel, zie Paragraaf 4.1.1.



Voor het realiseren van de bovengrens van de scenario's voor zonne-energie richting 2040 zijn de no-regret-opties in ieder geval onvoldoende. Er zijn grofweg twee opties om tot de bovengrens van de scenario's te komen:

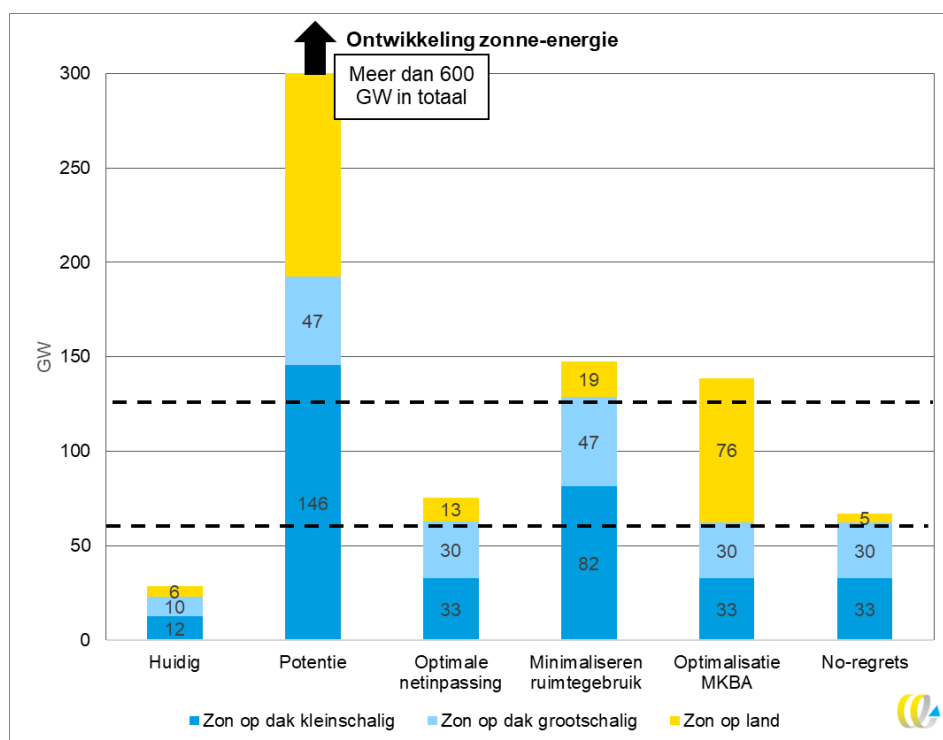
1. Benutten van resterend potentieel van zonne-energie op daken. Er is naar verwachting voldoende potentie voor zonne-energie op daken om tot 127 GW zonne-energie op dak te komen, al zal dan wel ongeveer 80% van het nog beschikbare potentieel bij woningen en bedrijven benut moeten worden, hoewel deze niet direct deze opgewekte elektriciteit zullen gebruiken. Deze zal getransporteerd moeten worden naar andere gebruikers, met netuitbreidingen als gevolg, of er moeten maatregelen genomen worden om de overtollige opwek af te schakelen, op te slaan of om te zetten (al zal dit naar verwachting onvoldoende zijn om netuitbreidingen te voorkomen als een zo groot aandeel van het dakoppervlak benut wordt).
 - Bij de inschatting van het potentieel voor zonne-energie op daken zijn technische en ruimtelijke beperkingen al meegenomen (zie Paragraaf 4.1.1).

Echter, alsnog zal niet al deze potentie in de praktijk (rendabel) gerealiseerd kunnen worden.

2. Het is ook mogelijk om extra zonne-energie op land te realiseren. De potentie voor zonne-energie op land is in theorie enorm (honderden GW, zelfs exclusief monofunctionele zonne-energie op landbouwgrond). Dit betekent dat slechts een beperkt deel van deze potentie nodig is, zeker als er ook ingezet wordt op realisatie van zonne-energie op dak.

Figuur 33 toont de opsplitsing tussen kleinschalige zonne-energie op dak, grootschalige zonne-energie op dak en zonne-energie op land bij de verschillende ontwikkelpaden.⁴⁷ De figuur laat zien dat elk van de ontwikkelpaden, en de no-regret-ontwikkelingen, een forse groei van zowel kleinschalige zonne-energie op dak als grootschalige zonne-energie op dak heeft. Verdere toename van zonne-energie op land is, zoals hierboven besproken, een afweging.

Figuur 33 – Mogelijke ontwikkelingen zonne-energie voor de verschillende ontwikkelpaden, onderscheid tussen zonne-energie op dak kleinschalig, zonne-energie op dak grootschalig en zonne-energie op land.



⁴⁷ Bij deze opsplitsing is aangenomen dat alle zonne-energie op bedrijfsdaken grootschalig is. Dit is doorgaans het geval, maar in de praktijk is ook een deel van de projecten van zonne-energie op dak bij bedrijven kleinschalig. Daarmee wordt grootschalige zonne-energie op dak in dit overzicht (iets) overschat.

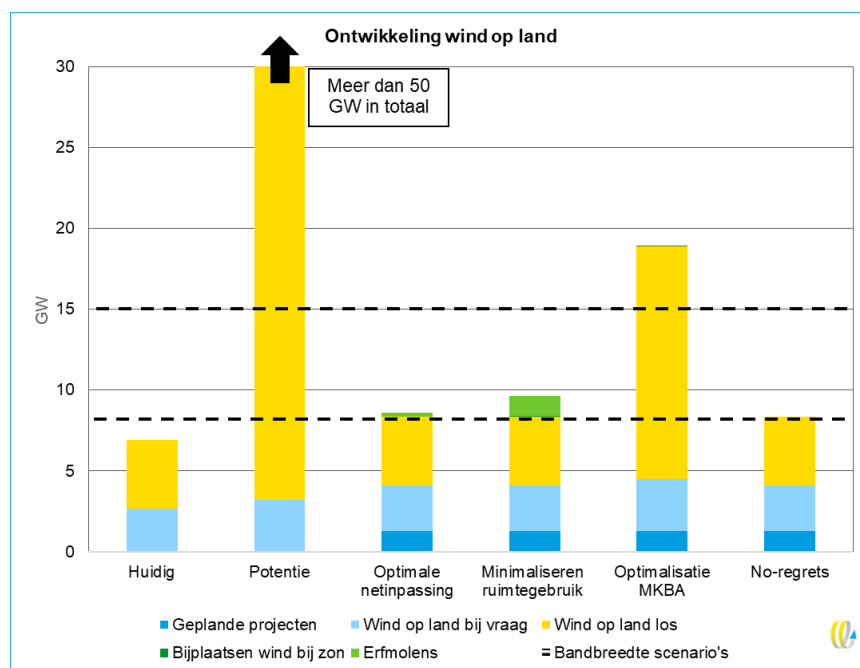
Windenergie op land

Voor windenergie op land volgt uit de scenario's een groei van bijna 7 GW in 2024 (8 GW met bestaande plannen) naar 8 GW tot 15 GW in 2040. De afwegingen rondom de totale hoeveelheid windenergie op land zoals de bijdrage aan klimaatdoelstellingen, lagere systeemkosten en meer energie-onafhankelijkheid zijn te vinden in Hoofdstuk 2.

Bij windenergie op land is het huidige vermogen en de geplande projecten al voldoende voor het realiseren van de ondergrens van de scenario's voor 2040. Dan is het wel van belang dat bij alle windturbines op land die aan het einde van de levensduur zitten repowering plaatsvindt, wat geen zekerheid is.

Voor het realiseren van meer windenergie op land zal het realiseren in gebieden zonder significante elektriciteitsvraag noodzakelijk zijn, aangezien er onvoldoende potentie is nabij de elektriciteitsvraag. De totale potentie voor windenergie op land in deze gebieden is ruim voldoende (tientallen GW) om tot de bovengrens van de scenario's voor 2040 te komen (15 GW). Dit betekent dat slechts een beperkt deel van deze potentie benut hoeft te worden. Vanuit maatschappelijke kosten en energetische optimalisatie is het dan wenselijk om in te zetten op grootschalige opties die direct op het HS-net worden aangesloten en om in te zetten op optimaal gebruik van de bestaande capaciteit op het elektriciteitsnet. Vanuit ruimtelijk perspectief is het dan wenselijk om in te zetten op verziltingsgronden of veenontginningsgebieden. In die gebieden is in theorie ruim voldoende potentie voor het realiseren van in totaal 15 GW windenergie op land (bovengrensscenario's 2040).

Figuur 34 – Mogelijke ontwikkelingen windenergie op land voor de verschillende ontwikkelpaden. De stippellijnen geven de onder- en bovengrens aan van scenario's voor windenergie op land in 2040. Potentie gaat om ruimtelijk potentieel, zie Paragraaf 4.1.1.



Doorkijk richting 2050

De hiervoor genoemde analyses geven inzicht in de ontwikkeling van hernieuwbare opwek op land in verschillende scenario's voor 2040. De energietransitie is echter niet afgerond in 2040. Richting 2050 zal de vraag naar elektriciteit en ook de benodigde hoeveelheid hernieuwbare opwek nog verder toenemen. Voor windenergie op land wordt voor 2050 8-17 GW voorzien in de beschouwde scenario's. Voor zonne-energie wordt voor 2050 77-175 GW voorzien in de beschouwde scenario's. Dit betekent dat richting 2050 ook een groter deel van het potentieel – en daarmee meer opties – benut zullen moeten worden.

5.5 Hoe ziet de verdeling van hernieuwbare opwek over provincies eruit bij de ontwikkelpaden?

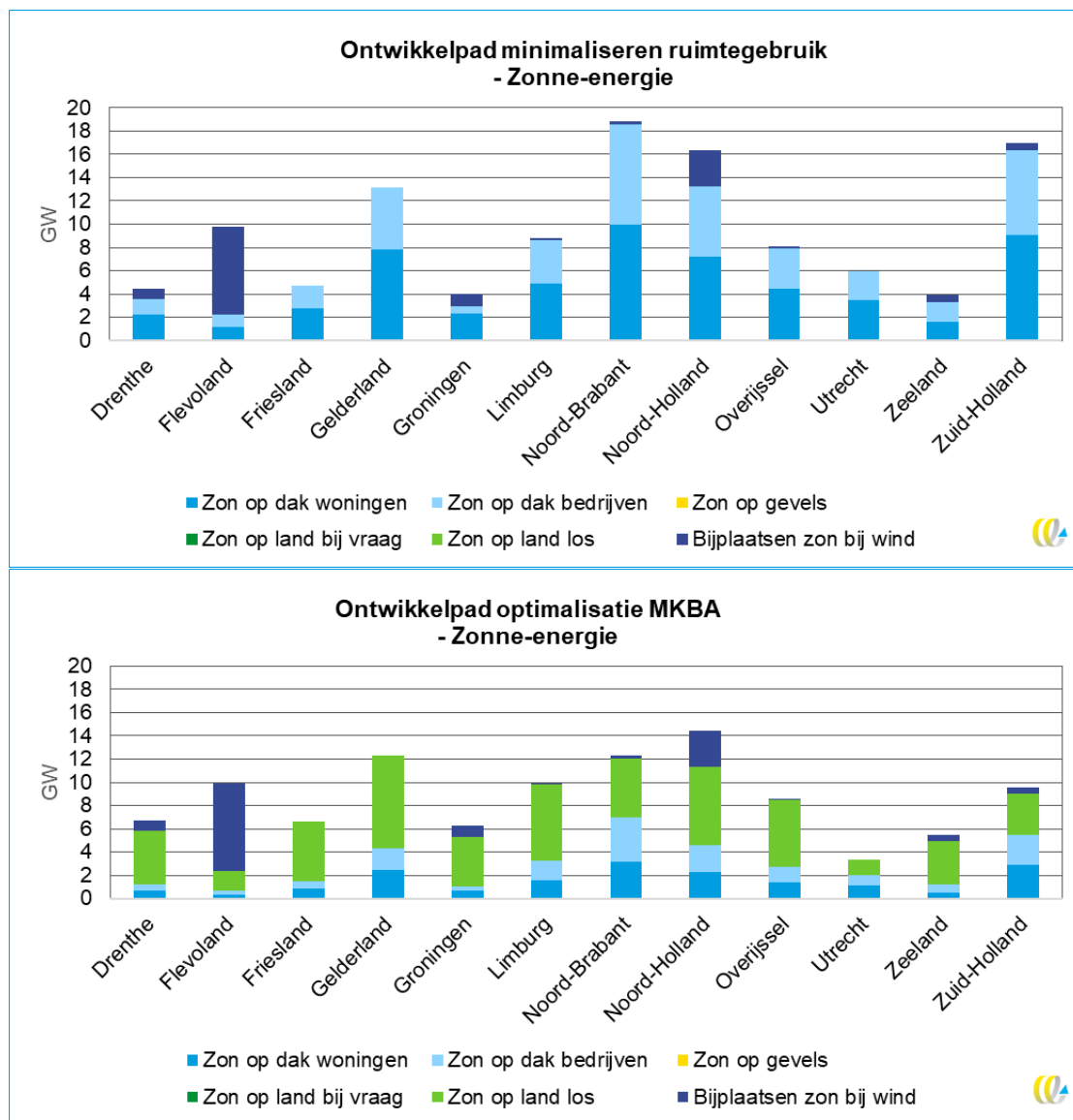
De keuzes voor ontwikkelpaden hebben ook impact op de verdeling van de opgave van hernieuwbare opwek op land over de regio's. In bovenstaande paragrafen zijn analyses gedaan op nationaal niveau, maar voor een volledige afweging is ook van belang wat keuzes voor ontwikkelpaden en archetypes betekenen voor de regio's. Daarvoor hebben we voor de ontwikkelpaden de verdeling over de provincies bepaald.⁴⁸

Bij de ontwikkeling van zonne-energie zitten de grootste verschillen tussen de ontwikkelpaden 'minimaliseren ruimtegebruik' en 'optimalisatie maatschappelijke kosten'. Beide ontwikkelpaden gaan uit van een forse groei van het vermogen aan zonne-energie, maar er wordt ingezet op verschillende opties. Bij het ontwikkelpad 'Minimaliseren ruimtegebruik' wordt maximaal ingezet op zonne-energie op daken, terwijl bij het ontwikkelpad 'Optimalisatie maatschappelijke kosten' ook ingezet wordt op forse door groei van zonne-energie op land.

De onderstaande figuur toont wat de verdeling van het extra vermogen (ten opzichte van de huidige situatie) is bij beide ontwikkelpaden. De figuur laat zien dat bij het ontwikkelpad 'Minimaliseren ruimtegebruik' de meeste zonnepanelen gerealiseerd worden in de provincies met de meeste inwoners (Gelderland, Noord-Brabant, Noord-Holland en Zuid-Holland). Bij het ontwikkelpad 'Optimalisatie maatschappelijke kosten' worden relatief minder zonnepanelen gerealiseerd in dichtbevolkte gebieden en relatief meer in dunner bevolkte provincies, omdat daar meer ruimte is voor zonne-energie op land.

⁴⁸ Deze analyse is gebaseerd op de inschatting van de ruimtelijke potentie (zie Paragraaf 4.1.1). Hierin zijn zachte en harde beperkingen meegenomen. Provinciale verordeningen zijn hierin meegenomen, maar overig lokaal beleid en politiek draagvlak voor windenergie op land en zonne-energie zijn niet meegenomen.

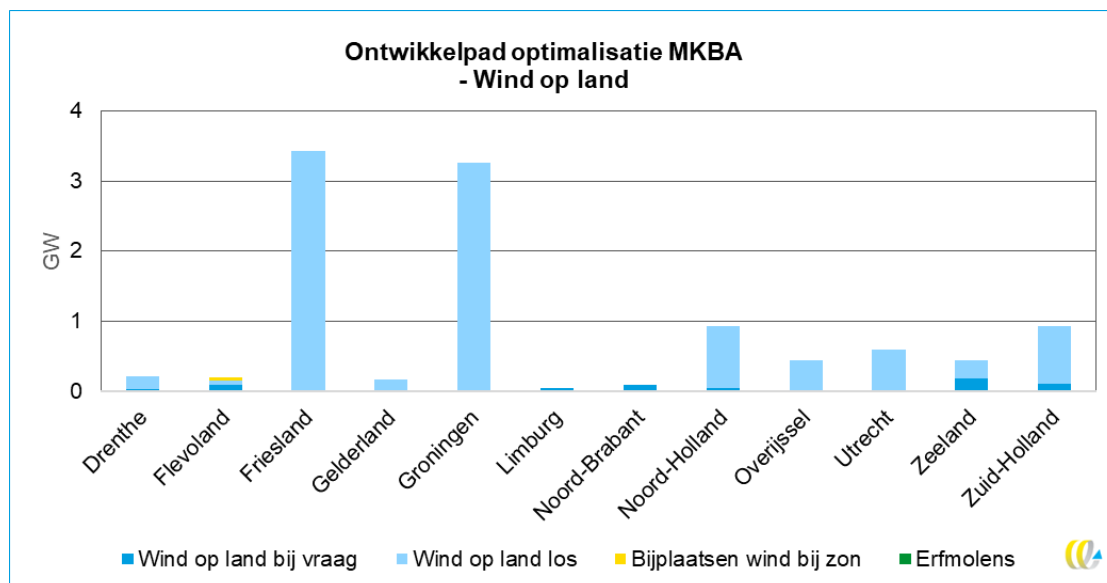
Figuur 35 – Provinciale uitsplitsing ontwikkelpaden - zonne-energie



Ook bij windenergie op land zijn er duidelijke verschillen tussen de ontwikkelpaden. Bij het ontwikkelpad 'Minimaliseren ruimtegebruik' wordt alleen ingezet op windenergie op land bij vraag en is de totale toename van windenergie beperkt in alle provincies.⁴⁹ In het ontwikkelpad 'Optimalisatie mkba' wordt ingezet op ontwikkeling van grootschalige windenergie op verziltingsgronden of veenontginningsgebieden. Dit leidt tot een grote groei van windenergie op land in met name Friesland en Groningen. Dit laat zien dat deze keuze voor grootschalige windparken kan leiden tot een scheve verdeling van de ontwikkeling van windenergie op land over de provincies.

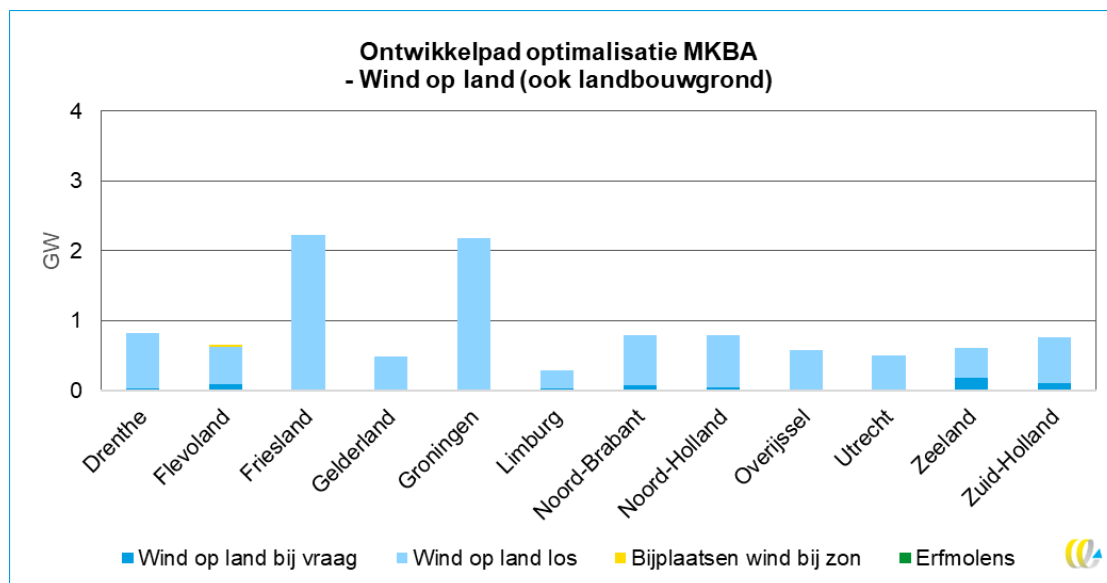
⁴⁹ Bij het ontwikkelpad 'Optimale netinpassing' is de toename van windenergie op land door benutting van de bestaande netcapaciteit niet gekwantificeerd. Daarom is voor dit ontwikkelpad ook geen uitsplitsing.

Figuur 36 – Provinciale uitsplitsing ontwikkelpaden – windenergie op land



Daarbij maakt het specifiek bij de ontwikkeling van windenergie op land ook uit welke type gronden gebruikt worden. Indien windenergie op land niet alleen op verziltingsgronden of veenontginningsgebieden, maar ook op landbouwgrond gerealiseerd wordt, dan is de verdeling van nieuwe windturbines op land over de provincies al een stuk gelijkmatiger. Al is ook in dit geval het aandeel nieuwe windturbines nog steeds het grootst in Friesland en Groningen.

Figuur 37 – Provinciale uitsplitsing ontwikkelpad 'Optimalisatie mkba' (gevoeligheid met landbouwgrond) – windenergie op land



5.6 Tijdspad en haalbaarheid ontwikkelpaden

5.6.1 Hoe ziet het tijdspad van de ontwikkelpaden eruit?

De ontwikkelpaden geven inzicht hoe de opgave voor hernieuwbare opwek op land in 2040 ingevuld kan worden. Het is echter ook van belang om te weten wat wanneer mogelijk is en hoe het tijdspad van de ontwikkelpaden eruitziet. Dat geeft ook inzicht wanneer keuzes gemaakt moeten worden.

In de komende jaren zijn er nog verschillende projecten in ontwikkeling. Er zitten nog projecten in de pijplijn voor windenergie op land, waardoor het vermogen van windenergie op land de komende jaren nog kan groeien van 6,9 GW naar 8,2 GW (als al deze projecten gerealiseerd worden en repowering bij bestaande projecten plaatsvindt) (RVO, 2025a). Voor zonne-energie wordt de komende jaren een groei van 28,5 GW naar ruim 36 GW⁵⁰ verwacht (RVO, 2025b). Er zitten dus nog wel wat projecten in de pijplijn, maar lang niet voldoende voor de opgave voor hernieuwbare opwek op land in 2040.

De komende jaren zal naar verwachting weinig aanvullende groei mogelijk zijn voor zonne-energie op land en windenergie op land boven op de projecten in de pijplijn. Deze projecten hebben namelijk lange doorlooptijden, onder meer door de benodigde onderzoeken, subsidietrajecten en vergunningsverlening. Dat geldt met name voor nieuwe projecten voor windenergie op land. Voor windenergie op land ligt de doorlooptijd voor nieuwe projecten tussen de vijf en tien jaar. Voor zonne-energie op land zijn ook onderzoeken, vergunningen en subsidies en is de doorlooptijd ook enkele jaren (tot vijf jaar), maar doorgaans wel een stuk korter dan voor windenergie op land (NVDE, 2022). Zonne-energie op daken kan doorgaans relatief snel (minder dan een jaar) gerealiseerd worden.

Daarnaast zal netcongestie voorlopig een belangrijke beperking zijn bij de verdere uitrol van hernieuwbare opwek op land. Tot de problemen met netcongestie opgelost zijn, zullen met name de opties uit het ontwikkelpad 'Optimale netinpassing' gerealiseerd kunnen worden, aangezien daarvoor geen aanvullende netuitbreidingen nodig zijn. Dit zijn ook de opties die we als no-regret classificeren. Het gaat dan met name om zonne-energie op dak voor invulling van eigen verbruik en wind, en zonne-energie op land bij bedrijven en industrie. Afschakeling, opslag en conversie kunnen eraan bijdragen dat nog meer opwek op deze locaties ingepast kunnen worden. Daarnaast kan nog meer windenergie en zonne-energie op land gerealiseerd worden door toepassing van congestiemanagement en/of alternatieve transportrechten (in combinatie met afschakeling, opwek en/of conversie).

Hoeveel hernieuwbare opwek ingepast kan worden tot de grootste problemen met netcongestie opgelost zijn, is afhankelijk van de ontwikkeling van de vraag naar elektriciteit.

⁵⁰ Zie Tabel 1 in paragraaf 2.1 voor opsplitsing in verschillende vormen van zonne-energie.

Het ontwikkelpad 'Optimale netinpassing' gaat uit van de prognoses van de elektriciteitsvraag in 2040, met een elektriciteitsvraag die bijna drie keer zo hoog ligt als de huidige vraag. Het is van belang dat de uitrol van hernieuwbare opwek op land in de pas loopt met de ontwikkeling van elektriciteitsvraag om de problemen met netcongestie te beperken.

De problemen met netcongestie door teruglevering zullen volgens de huidige verwachtingen aanhouden tot 2030-2035 (afhankelijk van de regio) (Netbeheer Nederland, 2025a), maar mogelijk nog langer als projecten voor netuitbreidingen verdere vertraging oplopen. Als de grootste problemen met netcongestie opgelost zijn, zijn er meer mogelijkheden voor het realiseren van zonne-energie en windenergie op land. Al zal ook dan efficiënte benutting van het elektriciteitsnet van belang blijven.

Het algemene beeld is dus dat de zonne-energie op land (en dus niet zonne-energie op dak) en windenergie op land lange doorlooptijden hebben en daarom niet snel extra van deze komende groei van hernieuwbare opwek op land tot in ieder geval 2035 beperkt wordt door netcongestie en ook afhankelijk is van de snelheid van de toename van de elektriciteitsvraag. Daarna kan een flinke versnelling plaatsvinden en tussen 2035 en 2040 zal een snelle groei van de hernieuwbare opwek op land nodig zijn, om tot de bovengrens van de scenario's voor hernieuwbare opwek op land te komen. Hieronder gaan we in meer detail in op de mogelijke tijdspaden voor zonne-energie en windenergie op land.

Zonne-energie

Tabel 9 geeft een illustratie van mogelijke tijdspaden voor zonne-energie tot 2040 en de benodigde groei per jaar voor het realiseren van de ondergrens en bovengrens van de scenario's voor 2040 (zie Hoofdstuk 2 voor bandbreedte en afwegingen rondom hoeveelheid zonne-energie). Daarbij hanteren we de volgende uitgangspunten:

- De monitor zon-pv geeft een inschatting van de toename van zonne-energie tot 2027 (RVO, 2025b). We nemen aan dat dit gerealiseerd wordt.
- We nemen aan dat tot 2030 alleen extra zonne-energie bij elektriciteitsvraag gerealiseerd kan worden en dat de vraag naar elektriciteit slechts beperkt toeneemt. Dit betekent dat we uitgaan van de potentie van het ontwikkelpad 'Optimale netinpassing' voor het realiseren van zonne-energie op dak bij bestaande vraag als maximum voor 2030.
- We nemen aan dat tussen 2030 en 2035 netcongestie een beperking blijft, maar dat de elektriciteitsvraag gaat stijgen, waardoor wel meer zonne-energie ingepast kan worden. Dit betekent dat we uitgaan van de potentie van het ontwikkelpad 'Optimale netinpassing' voor het realiseren van zonne-energie op dak bij de toekomstige elektriciteitsvraag⁵¹ als maximum voor 2035.

⁵¹ In sommige regio's is voor 2035 alweer netcapaciteit beschikbaar en met congestiemanagement en alternatieve transportrechten kan ook in congestiegebieden zonne-energie gerealiseerd worden die niet direct gekoppeld aan is afname. Dit betekent dat er tot 2035 naar verwachting meer mogelijk is dan in het ontwikkelpad 'Optimale netinpas-

- We nemen aan dat na 2035 de grootste problemen met netcongestie voor invoeding achter de rug zijn en verdere doorgroei van zonne-energie mogelijk is. In de praktijk kunnen projecten voor netuitbreiding verdere vertraging opleveren, in welk geval er ook na 2035 beperkingen zullen zijn.

Tabel 9 – Mogelijk tijdspad zonne-energie tot 2040

	2024	2027	2030	2035	2040	Groei periode 2020-2024
Ondergrens scenario's 2040 ⁵²	29 GW	36 GW	41 GW	49 GW	57 GW	4,2 GW per jaar gemiddeld (minimum 3,7 GW per jaar, maximum 4,8 GW per jaar) (RVO, 2025b)
Groei per jaar in periode		2,6 GW	1,6 GW	1,6 GW	1,6 GW	
Bovengrens-scenario's 2040	29 GW	36 GW	49 GW	75 GW	127 GW	
Groei per jaar in periode		2,6 GW	4,2 GW	5,2 GW	10,4 GW	

De tabel laat zien dat de benodigde groei voor de ondergrens van de scenario's voor 2040 lager ligt dan de groei in de afgelopen jaren (2020-2024) en de verwachte groei tot 2027. Daarnaast ligt de hoeveelheid zonne-energie in 2030 en 2035 lager dan wat in die jaren naar verwachting maximaal inpasbaar is in het elektriciteitsnet.

Om tot de bovengrens van de scenario's voor 2040 te komen, moet de groei per jaar flink hoger liggen dan de verwachte groei tot 2027. Daarnaast vereist dit een forse groei voor de periode 2035-2040, die ook flink hoger ligt dan de groei van de afgelopen jaren. Dit is dus zeer uitdagend. Daarbij moet wel benoemd worden dat dit om een indicatief tijdspad gaat en dat mogelijk meer groei mogelijk is tot 2035 bij een efficiënte netinpassing met afschakeling en opslag. Toch blijft de conclusie staan dat er forse groei nodig is, met name als de grootste problemen met netcongestie opgelost zijn.

De opties waarvoor gekozen kan worden om nog meer zonne-energie te realiseren boven op de no-regret-opties (meer benutting zonne-energie op dak of meer zonne-energie op land) zullen met name in de periode na de grootste problemen met netcongestie gerealiseerd kunnen worden (volgens huidige planning 2030-2035). Hoewel 2035 nog ver weg is, is het wel van belang om tijdig deze keuzes te maken. Nieuwe projecten voor zonne-energie op land hebben namelijk doorlooptijden van enkele jaren. Zonne-energie op dak kan sneller gerealiseerd worden, maar ook daar is het van belang om tijdig een visie op de benutting van dakoppervlak te ontwikkelen, aangezien bedrijven en woningeigenaren

sing'. Aan de andere kant zal de elektriciteitsvraag in 2035 lager liggen dan de elektriciteitsvraag waar in het ontwikkelpad 'Optimale netinpassing' van uitgegaan is, omdat dat gebaseerd is op een scenario voor 2040. Dat zal ervoor zorgen dat tot 2035 minder zonne-energie bij afnemers ingepast kan worden dan in dit ontwikkelpad.

We maken voor deze analyse de aanname dat deze effecten elkaar ongeveer opheffen.

⁵² Voor de ondergrens ligt de benodigde groei tot 2030 en 2035 lager dan wat naar verwachting maximaal haalbaar is met netcongestie. Daarom gaan we hiervoor uit van lineaire groei vanaf 2027 tot 2040.

nu al keuzes maken (of gemaakt hebben) over de ontwikkeling van zonne-energie en het onwaarschijnlijk is dat zij extra zonnepanelen bijplaatsen of zonnepanelen weghalen voor het einde van de levensduur.

Windenergie op land

Tabel 10 geeft een illustratie van mogelijke tijdspaden voor windenergie op land tot 2040 en de benodigde groei per jaar, voor het realiseren van de ondergrens en bovengrens van de scenario's voor 2040 (zie Hoofdstuk 2 voor bandbreedte en afwegingen rondom hoeveelheid windenergie op land). Daarbij hanteren we de volgende uitgangspunten:

- De Monitor Windenergie op land geeft een inschatting van het vermogen van de projecten die nog in de pijplijn zitten (RVO, 2025a). We nemen aan dat al deze projecten gerealiseerd worden en het vermogen van windturbines die aan het eind van de levensduur zitten door repowering gelijk blijft.⁵³
- We nemen aan dat tot 2032 (keuze voor een nieuw project op zijn vroegst 2027 en doorlooptijd van minimaal vijf jaar) geen nieuwe windturbines op land gerealiseerd kunnen worden boven op de projecten die nu in de pijplijn zitten. Aangezien we uitgaan van een keuze in 2027 en de ondergrens van de doorlooptijd (vijf tot tien jaar, zie begin van deze paragraaf) is de aanname voor 2032 erg ambitieus.
- Netcongestie zal in 2032 nog een uitdaging zijn, maar we verwachten dat er voldoende mogelijkheden zijn om extra windenergie op land in te passen met koppeling aan afname, alternatieve transportrechten in gebieden met teruglevercongestie door zonne-energie, koppeling aan bestaande zonneparken en extra netcapaciteit door netuitbreidingen. Daarom gaan we uit van lineaire groei na 2032.

Tabel 10 – Mogelijk tijdspad windenergie op land tot 2040

	2024	2032	2035	2040	Groei periode 2020-2024
Ondergrens scenario's 2040	7 GW	8 GW	8 GW	8 GW	0,7 GW per jaar gemiddeld (minimum 0,2 GW per jaar, maximum 1,0 GW per jaar) (RVO, 2025a)
Groei per jaar in periode		0,2 GW	0 GW	0 GW	
Bovengrens-scenario's 2040	7 GW	8 GW	11 GW	15 GW	
Groei per jaar in periode		0,2 GW	0,9 GW	0,9 GW	

⁵³ In sommige gevallen zal repowering niet mogelijk zijn voor windturbines aan het einde van de levensduur, terwijl bij andere projecten meer vermogen gerealiseerd zal worden. We nemen voor deze analyse aan dat deze effecten elkaar opheffen.

De tabel laat zien dat de groei in de komende jaren beperkt is. Voor de ondergrens van de scenario's voor 2040 wordt geen extra windenergie op land gerealiseerd. Voor de bovengrens is een jaarlijkse groei van 0,9 GW nodig na 2032, wat ongeveer overeenkomt met de maximale groei per jaar in de afgelopen vijf jaar. Het realiseren van nieuwe windturbines voor 2032 is, zoals eerder besproken, echter wel ambitieus. Als dit later mogelijk is zal een hogere groei per jaar nodig zijn.

Ook voor windenergie op land geldt dat snel keuzes noodzakelijk zijn om de hiervoor genoemde tijdspaden te kunnen realiseren. De belangrijkste reden hiervoor is de lange doorlooptijd voor nieuwe windturbines.

5.6.2 Zijn de benodigde ontwikkelingen haalbaar?

In Hoofdstuk 2 hebben we een inschatting gegeven van de bandbreedte van hernieuwbare opwek die naar verwachting **nodig** is voor het halen van de klimaatdoelstellingen. Met de ontwikkelpaden in dit hoofdstuk geven we inzicht hoe deze opgave ingevuld kan worden. Het is echter ook de vraag wat **haalbaar** is.

Ruimtelijk gezien is er in principe voldoende potentie voor hernieuwbare opwek op land, zoals te zien in Paragraaf 5.4.3. Maatschappelijk en politiek draagvlak en concurrentie met andere ruimtelijke functies kunnen er wel voor zorgen dat de benodigde ruimte niet beschikbaar komt voor hernieuwbare opwek op land. Netcongestie zal de komende jaren nog een beperking zijn voor de uitrol van hernieuwbare opwek op land, maar met koppeling van eigen verbruik, opslag, curtailment en alternatieve transportrechten is naar verwachting nog een aanzienlijke hoeveelheid hernieuwbare opwek inpasbaar in het huidige elektriciteitsnet. De grootste problemen met congestie voor teruglevering zullen volgens de huidige planning in de periode 2030-2035 opgelost zijn. Dit betekent dat er ondanks netcongestie nog forse groei van hernieuwbare opwek op land mogelijk is, al is het niet mogelijk om in dit onderzoek exact te bepalen hoeveel. Netcongestie kan er wel voor zorgen dat er in de periode 2035-2040 een snelle groei van windenergie en zonne-energie op land nodig is om tot de bovengrens van de scenario's voor hernieuwbare opwek voor 2040 te komen.

Concluderend is er ruimtelijk en technisch gezien een forse groei van hernieuwbare opwek op land richting 2040 mogelijk. De economische haalbaarheid (businesscase), de ontwikkeling van beleid om dit te verbeteren, en het maatschappelijk en politiek draagvlak zullen naar verwachting de doorslaggevende factoren worden die gaan bepalen hoeveel hernieuwbare opwek gerealiseerd zal worden richting 2040.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

6.1.1 Nationaal niveau: forse groei hernieuwbare opwek op land nodig. Verschillende scenario's voor mate van groei en verhouding windenergie op land en zonne-energie

Het energiesysteem gaat richting 2040 flink veranderen. De vraag naar elektriciteit zal door elektrificatie van de huidige vraag naar fossiele brandstoffen flink toenemen en voor het halen van de klimaatdoelen moet de CO₂-uitstoot van de elektriciteitssector nog verder dalen. Daarom zal het aanbod van hernieuwbare elektriciteit ook moeten toenemen, waaronder de productie van hernieuwbare opwek op land.

Er zijn de afgelopen jaren verschillende scenariostudies gedaan naar de ontwikkeling van het energiesysteem richting 2040. Deze scenario's geven een inschatting van de ontwikkeling van vraag en aanbod van energie, en daarbij ook een inschatting van de hoeveelheid hernieuwbare opwek op land. Voor dit onderzoek is een metastudie gedaan van scenario's die uitgaan van het halen van de klimaatdoelen richting 2040 en daarmee verschillende mogelijke manieren in kaart brengen waarop deze doelen behaald kunnen worden.

Tabel 11 geeft de bandbreedte van het vermogen hernieuwbare opwek op land in deze scenario's voor 2040 weer. Deze tabel laat het volgende zien:

- In alle scenario's wordt een forse groei voorzien voor zonne-energie op dak en zonne-energie op land. Er is echter nog een grote bandbreedte in de mate van groei die voorzien wordt in de scenario's. De hoeveelheid zonne-energie ligt in de scenario's in 2040 2 tot 4,5 keer hoger dan het huidig opgesteld vermogen.
- Bij windenergie op land wordt in een deel van de scenario's uitgegaan van een forse groei, tot twee keer zoveel als de huidige situatie en bestaande plannen. Maar er zijn ook scenario's die uitgaan van stagnatie en (vrijwel) geen groei ten opzichte van de bestaande plannen. Dat bepaalde scenario's uitgaan van minder groei, komt niet doordat meer windenergie op land niet nuttig is. Hierin is ook het dalende draagvlak voor windenergie op land meegenomen, waardoor een forse groei van windenergie op land als minder realistisch gezien kan worden.

Tabel 11 – Bandbreedte vermogen hernieuwbare opwek op land 2040 ⁵⁴

	Huidig opgesteld vermogen (2024)	Huidige opgesteld vermogen + bestaande plannen	Ondergrens-scenario's 2040	Bovengrens-scenario's 2040
Windenergie op land	6,9 GW	8,2 GW	8 GW	15 GW
Zonne-energie op dak kleinschalig	12,4 GW	15,9 GW	57 GW	127 GW
Zonne-energie op dak grootschalig	10,3 GW	20,5 GW (alle grootschalig, geen onderscheid in Monitor Zon-pv)		
Zonne-energie op land	5,9 GW			

De bandbreedte van de ontwikkeling van hernieuwbare opwek op land richting 2040 in verschillende scenario's is groot. Dit komt enerzijds doordat de noodzaak voor verdere doorgroei van hernieuwbare opwek op land samenhangt met de ontwikkeling van de elektriciteitsvraag (wat bepaalt hoeveel hernieuwbare elektriciteit in totaal nodig is) en de ontwikkeling van windenergie op zee en kernenergie (wat bepaalt welk deel nog door hernieuwbare opwek op land ingevuld moet worden). Deze ontwikkelingen zijn onzeker en de onderzochte scenariostudies gaan dan ook uit van verschillende uitgangspunten.

Daarnaast is het ook een maatschappelijke afweging hoeveel zonne-energie en wind-energie op land als wenselijk gezien worden. De belangrijkste overwegingen hiervoor zijn:

- **CO₂-uitstoot elektriciteitssector:** er zijn klimaatdoelstellingen op nationaal en Europees niveau, waaraan Nederland zich moet houden. Het is echter een afweging welke bijdrage de elektriciteitssector hieraan moet leveren, en welke reductie van de CO₂-uitstoot in deze sector noodzakelijk is. Dit bepaalt mede hoeveel hernieuwbare opwek in Nederland noodzakelijk is. Daarnaast kan meer hernieuwbare opwek op land in Nederland ook bijdragen aan minder CO₂-uitstoot in omliggende landen (door minder import en meer export).
 - Bij de afweging rondom de ontwikkeling van hernieuwbare opwek op land is ook de zekerheid voor het halen van de klimaatdoelstelling een afweging. Er is onzekerheid over de ontwikkeling van windenergie op zee (onzekere uitrolsnelheid en mogelijk lager aantal vollasturen) en kernenergie (haalbaarheid in 2040), wat een overweging kan zijn om in te zetten op een sterkere doorgroei van hernieuwbare opwek op land.
- **Importafhankelijkheid:** bij meer hernieuwbare opwek op land is de totale binnenlandse productie van elektriciteit groter. Dit zorgt ervoor dat minder import van zowel elektriciteit als waterstof nodig is.

⁵⁴ Niet alle scenario's maken onderscheid tussen zonne-energie op dak (kleinschalig en grootschalig) en zonne-energie op land. Daarom geven we hier alleen het totale vermogen van zonnepanelen in de scenario's.

- **Totale systeemkosten:** de hoeveelheid hernieuwbare opwek heeft impact op de totale kosten van het energiesysteem. Uit eerder onderzoek blijkt dat een kosten-optimaal CO₂-vrij elektriciteitssysteem een flinke doorgroei van hernieuwbare opwek op land heeft. De laagste systeemkosten worden behaald als niet alleen het aantal zonnepanelen, maar ook de hoeveelheid windenergie op land nog fors toeneemt, aangezien windenergie op land een relatief goedkope productiebron is (ook goedkoper dan windenergie op zee door de hoge kosten voor netten op zee).
- **Impact op leefomgeving en draagvlak:** bij de afweging rondom hernieuwbare opwek op land zijn ook de impact op de leefomgeving en maatschappelijk draagvlak van belang. Daarbij is het van belang om te benoemen dat ook andere productiebronnen, zoals windenergie op zee en kernenergie, een impact hebben op de leefomgeving.

Een keuze voor een forse doorgroei van windenergie op land, naast de verwachte doorgroei van zonne-energie, leidt naar verwachting tot de laagste systeemkosten, de grootste zekerheid voor het halen van de klimaatdoelen en leidt tot de laagste importafhankelijkheid van energie.

Een lagere ambitie voor windenergie op land kan niet direct opgevangen worden met extra zonne-energie, aangezien zonne-energie een ander productieprofiel heeft en een kWh zonne-energie daarom niet een gelijke bijdrage levert als een kWh windenergie. Voor het minimaliseren van de systeemkosten, het beperken van de netimpact en een grotere leveringszekerheid is een evenwichtige mix van zonne-energie en windenergie op land gewenst.

Hierna bespreken we welke opties er zijn om de opgave voor hernieuwbare opwek op land in te vullen, en welke keuzes daarin gemaakt kunnen worden.

6.1.2 Invulling opgave: koppelen opwek aan lokale vraag no-regret, daarbovenop verschillende keuzes

Naast de afweging hoeveel hernieuwbare opwek op land maatschappelijk wenselijk is in 2040, is het ook de vraag hoe die opgave ingevuld wordt.⁵⁵ We hebben in dit onderzoek archetypen uitgewerkt om de verscheidenheid van mogelijke vormen van hernieuwbare opwek op land samen te brengen in een behapbaar aantal 'hoofdcategorieën'. Een archetype is een techniektype opwek op land met ruimtelijke en energetische eigenschappen, zoals: windenergie bij bedrijventerrein, zonne-energie op bedrijfsdak en solar carports. Er zijn in totaal zeventien archetypen uitgewerkt, waarbij onderscheid is gemaakt naar decentrale oplossingen, losse windturbines en zonneparken en het realiseren van hernieuwbare opwek bij bestaande projecten. Voor deze archetypen zijn de ruimtelijke

⁵⁵ Daarbij zijn de opties voor de invulling van de opgave voor hernieuwbare opwek op land en de wenselijkheid van die opties uiteraard ook een relevante afweging voor het bepalen van de maatschappelijk wenselijke hoeveelheid hernieuwbare opwek op land.

potentie en effecten, aandachtspunten rondom de netinpassing, maatschappelijke kosten en baten, en de overige effecten inzichtelijk gemaakt.

Op basis van de uitwerking en effectbeoordeling van de archetypen zijn verschillende ontwikkelpaden uitgewerkt waarin bepaald wordt hoe de ontwikkeling van hernieuwbare opwek op land eruit **kan** zien, vanuit verschillende perspectieven: netinpassing, het minimaliseren van het ruimtegebruik en maatschappelijke kosten. De ontwikkelpaden geven de uithoeken van mogelijke ontwikkelingen en zijn daarmee geen wensbeelden. Het doel van de ontwikkelpaden is om inzicht te geven in no-regrets en de keuzes scherp te maken.

Ontwikkelingen die in alle drie de ontwikkelpaden terugkomen en daarmee vanuit elk van deze perspectieven gewenst zijn, beschouwen we als no-regrets. Uit de ontwikkelpaden komen verschillende no-regret-ontwikkelingen naar voren:

- Maximaal benutten van de potentie van zonne-energie op daken in industrieclusters, bij cluster 6 en bij mobiliteitsclusters. Dit zijn gebieden met een forse (toekomstige) elektriciteitsvraag, relatief lage maatschappelijke kosten en zonne-energie op dak is ook vanuit ruimtelijk perspectief gunstig.
- Realiseren van windenergie op land op de terreinen cluster 6-industrie, mobiliteitshubs en op bedrijventerreinen. Dit zijn gebieden waar vanuit de toekomstige elektriciteitsvraag nog meer windenergie op land gerealiseerd kan worden, en windenergie op land heeft door het beperkte (directe) ruimtegebruik geen groot effect op bedrijfsactiviteiten. Daarnaast is er potentie in het verminderen van afnamecongestie.
- Realiseren van zonne-energie op dak en bij mkb, maatschappelijk vastgoed, bij bedrijventerreinen en op woningen met een aansluitvermogen maximaal gelijk aan de piekvraag.⁵⁶ Niet het volledige potentieel van deze archetypen is no-regret. De totale potentie is namelijk groter dan de piekvraag in deze sectoren en het realiseren van meer opwek van de piekvraag leidt tot extra netuitbreidingen en hogere maatschappelijke kosten.
- Repowering van windenergie op land en zonne-energie op dak, aangezien gebruikgemaakt wordt van bestaande capaciteit op het elektriciteitsnet en ruimte die reeds gebruikt wordt voor deze toepassingen. Repowering is geen zekerheid en als dit niet gerealiseerd wordt, zal het vermogen aan windenergie op land afnemen.

⁵⁶ Het vermogen voor zonne-energie op dak wordt afgestemd op de vermogenspiek van de vraag om netuitbreidingen te voorkomen. Curtailment, opslag en eventueel conversie kunnen ervoor zorgen dat een groter vermogen aan hernieuwbare opwek ten opzichte van de vraag kan worden aangesloten, zonder extra netuitbreidingen.

Wat is nodig voor de totale opgave voor hernieuwbare opwek op land?

Figuur 38 (zonne-energie) en Figuur 39 (windenergie op land) tonen de potentie van hernieuwbare opwek op land, hoeveel gerealiseerd wordt bij de verschillende ontwikkelpaden en wat de potentie is van de no-regret-opties. Het eerste wat duidelijk zichtbaar is in de figuren is dat de ruimtelijke potentie voor zowel zonne-energie als windenergie op land een stuk hoger ligt dan wat noodzakelijk is richting 2040. Dit betekent dat er echt iets te kiezen is.

Deze figuren laten verder zien dat de potentie van de no-regret-opties bij zonne-energie in theorie voldoende is voor het realiseren van de ondergrens van de onderzochte scenario's voor 2040 (zie Paragraaf 6.1.1). Het is dus in theorie mogelijk om de ondergrens van de scenario's richting 2040 te bereiken met alleen de no-regret-opties.

Bij de inschatting van het potentieel zijn technische en ruimtelijke beperkingen al meegenomen, maar alsnog zal in de praktijk niet alle potentie van de no-regret-opties gerealiseerd kunnen worden. Daarom zullen naar verwachting ook andere opties nodig zijn voor het realiseren van de ondergrens van de hoeveelheid zonne-energie in de scenario's voor 2040.

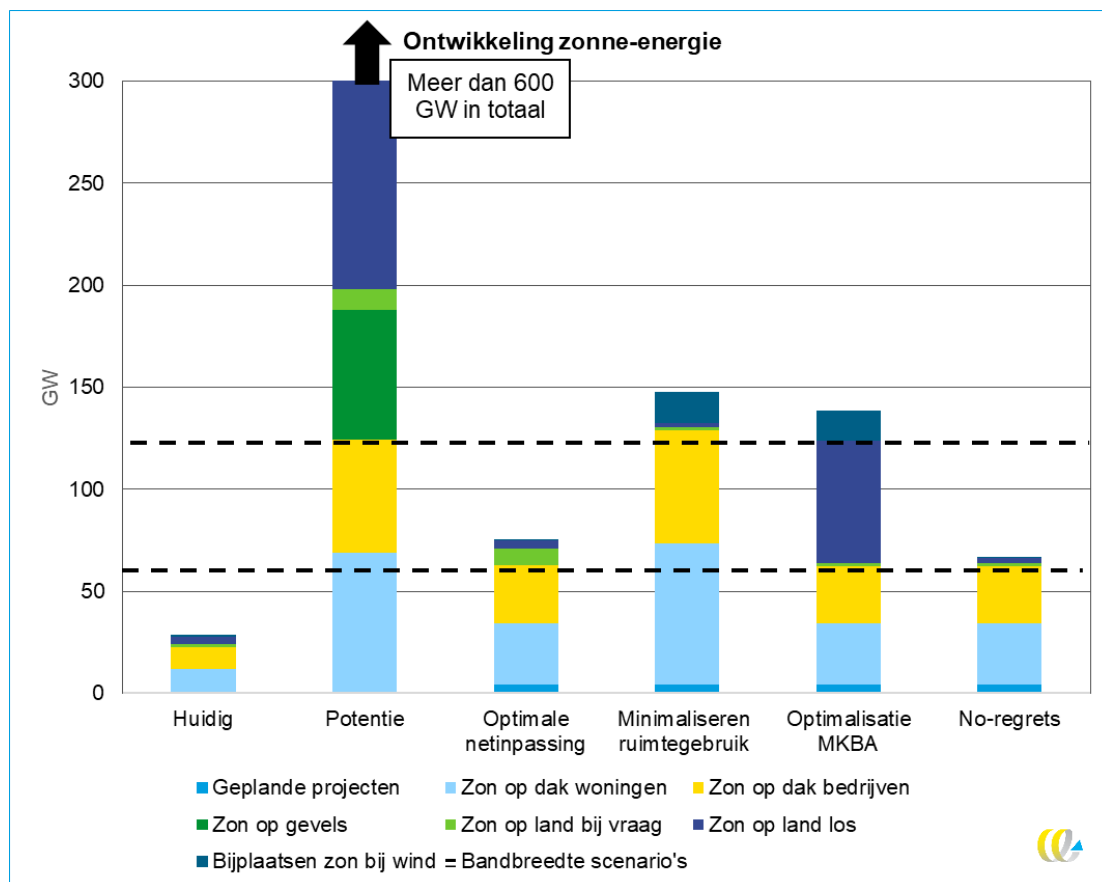
Voor het realiseren van de bovengrens van de scenario's voor zonne-energie richting 2040 zijn de no-regret-opties in ieder geval onvoldoende. Er zijn grofweg twee opties om tot de bovengrens van de scenario's te komen:

1. Benutten resterend potentieel zonne-energie op daken. Er is naar verwachting voldoende potentie voor zonne-energie op daken om tot 127 GW zonne-energie op dak te komen, al zal dan wel ongeveer 80% van het nog beschikbare potentieel bij woningen en bedrijven benut moeten worden, hoewel zij niet direct deze opgewekte elektriciteit gaan gebruiken. Deze zal getransporteerd moeten worden naar andere gebruikers, met netuitbreidingen als gevolg, of er moeten maatregelen genomen worden om de overvloedige opwek af te schakelen, op te slaan of om te zetten (al zal dit naar verwachting onvoldoende zijn om netuitbreidingen te voorkomen als een zo groot aandeel van het dakoppervlak benut wordt).
 - Bij de inschatting van het potentieel voor zonne-energie op daken zijn technische en ruimtelijke beperkingen al meegenomen. Echter, alsnog zal niet al deze potentie in de praktijk (rendabel) gerealiseerd kunnen worden.
2. Het is ook mogelijk om extra zonne-energie op land te realiseren. De potentie voor zonne-energie op land is in theorie enorm (honderden GW, zelfs exclusief monofunctionele zonne-energie op landbouwgrond). Dit betekent dat slechts een beperkt deel van deze potentie nodig is, zeker als er ook ingezet wordt op realisatie van zonne-energie op dak.

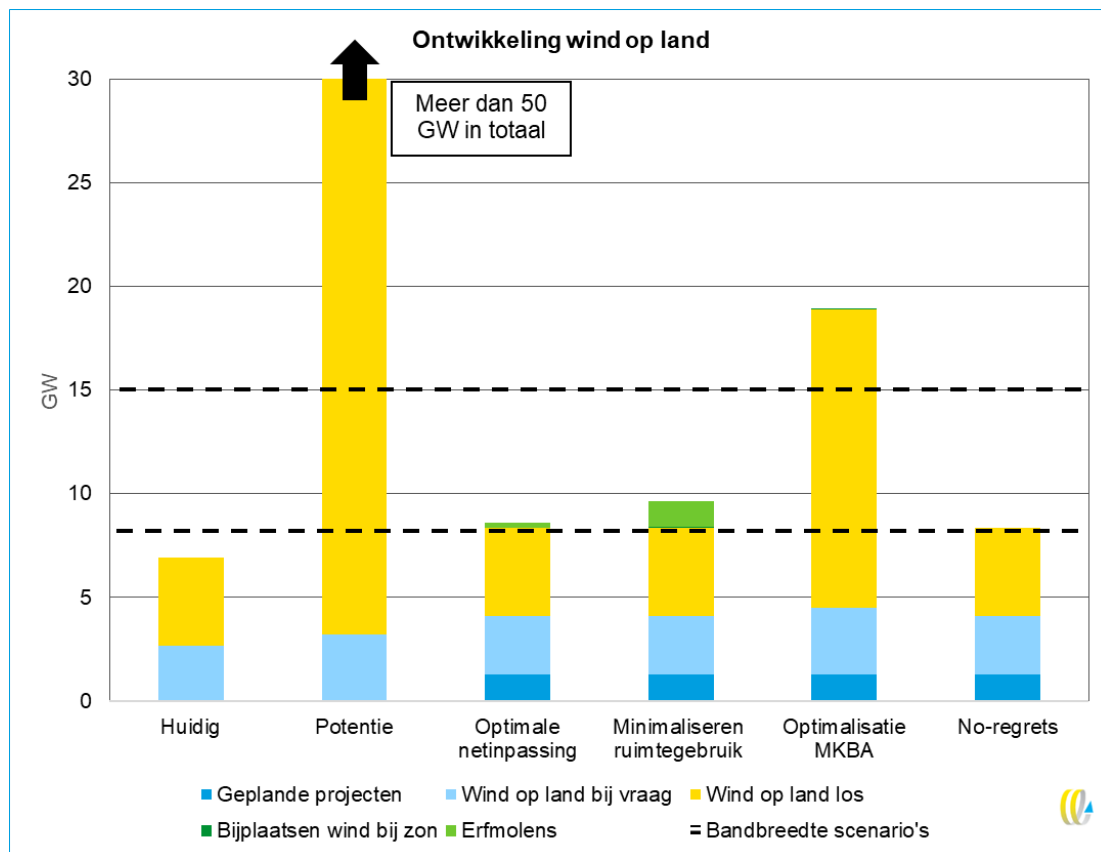
Bij windenergie op land is het huidige vermogen en de geplande projecten al voldoende voor het realiseren van de ondergrens van de scenario's voor 2040. Dan is het wel van belang dat bij alle windturbines op land die aan het einde van de levensduur zitten repowering plaatsvindt, wat geen zekerheid is.

Voor het realiseren van meer windenergie op land zal het realiseren in gebieden zonder significante elektriciteitsvraag noodzakelijk zijn, aangezien er onvoldoende potentie is nabij de elektriciteitsvraag. De totale potentie voor windenergie op land in deze gebieden is ruim voldoende (tientallen GW) om tot de bovengrens van de scenario's voor 2040 te komen (15 GW). Dit betekent dat slechts een beperkt deel van deze potentie benut hoeft te worden. Vanuit maatschappelijke kosten en energetische optimalisatie is het dan wenselijk om in te zetten op grootschalige opties die direct op het HS-net worden aangesloten en om in te zetten op optimaal gebruik van de bestaande capaciteit op het elektriciteitsnet. Vanuit ruimtelijk perspectief is het wenselijk om in te zetten op verziltingsgronden of veenontginningsgebieden. In die gebieden is in theorie ruim voldoende potentie voor het realiseren van in totaal 15 GW windenergie op land (bovengrensscenario's 2040).

Figuur 38 – Mogelijke ontwikkelingen zonne-energie voor de verschillende ontwikkelpaden. De stippellijnen geven de onder- en bovengrens aan van de benodigde hoeveelheid zonne-energie in 2040.



Figuur 39 – Mogelijke ontwikkelingen windenergie op land voor de verschillende ontwikkelpaden. De stippellijnen geven de onder- en bovengrens aan van de benodigde hoeveelheid windenergie op land in 2040.



De bovenstaande analyses geven inzicht in de ontwikkeling van hernieuwbare opwek op land in verschillende scenario's voor 2040. De energietransitie is echter niet afgerond in 2040. Richting 2050 zal de vraag naar elektriciteit en ook de benodigde hoeveelheid hernieuwbare opwek nog verder toenemen. Voor windenergie op land wordt voor 2050 8-17 GW voorzien in de beschouwde scenario's. Voor zonne-energie wordt voor 2050 77-175 GW voorzien in de beschouwde scenario's. Dit betekent dat richting 2050 ook een groter deel van het potentieel en daarmee meer opties benut zullen moeten worden.

Verdeling opgave hernieuwbare opwek op land over de regio's

De keuzes voor ontwikkelpaden hebben ook impact op de verdeling van de opgave van hernieuwbare opwek op land over de regio's. Bij de ontwikkeling van zonne-energie zitten de grootste verschillen tussen de ontwikkelpaden 'Minimaliseren ruimtegebruik' en 'Optimalisatie maatschappelijke kosten'. Bij het ontwikkelpad 'Minimaliseren ruimtegebruik' wordt maximaal ingezet op zonne-energie op daken, waarbij de meeste zonnepanelen gerealiseerd worden in de provincies met de grootste hoeveelheid geschikt dakoppervlak (Gelderland, Noord-Brabant, Noord-Holland en Zuid-Holland). Bij het ontwikkelpad 'Optimalisatie maatschappelijke kosten' wordt ook ingezet op forse doorgroei van zonne-

energie op land. Daardoor worden relatief minder zonnepanelen gerealiseerd in dichtbevolkte gebieden en relatief meer in dunner bevolkte provincies, omdat daar meer ruimte is voor zonne-energie op land.

Ook bij windenergie op land zijn er duidelijke verschillen tussen de ontwikkelpaden. Bij het ontwikkelpad 'Optimalisatie netinpassing' wordt ingezet op realisatie van windenergie op land bij vraag en leidt dit tot de grootste groei van windturbines in Zeeland, Zuid-Holland en Noord-Brabant. In het ontwikkelpad 'Optimalisatie mkba' wordt ingezet op ontwikkeling van grootschalige windenergie op land op verziltingsgronden of veenontginningsgebieden. Dit leidt tot een grote groei van windenergie op land, met name in Friesland en Groningen. Daarbij maakt het specifiek bij de ontwikkeling van windenergie op land ook uit welke type gronden gebruikt worden. Indien niet alleen verziltingsgronden of veenontginningsgebieden, maar ook landbouwgrond gebruikt wordt, dan is de verdeling van nieuwe windturbines op land over de provincies al een stuk gelijkmatiger.

Tijdspad

De ontwikkelpaden geven inzicht in hoe de opgave voor hernieuwbare opwek op land in 2040 ingevuld kan worden. Het is echter ook van belang om te weten wat wanneer mogelijk is en hoe het tijdspad van de ontwikkelpaden eruitziet. Dat geeft ook inzicht in wanneer keuzes gemaakt moeten worden.

De komende jaren zal netcongestie een belangrijke beperking zijn bij de verdere uitrol van hernieuwbare opwek op land. Tot de problemen met netcongestie opgelost zijn (volgens huidige planning rond 2035, maar later als geplande projecten uitlopen) zullen met name de opties uit het ontwikkelpad 'Optimale netinpassing' gerealiseerd kunnen worden, aanzien daarvoor geen aanvullende netuitbreidingen nodig zijn. Het gaat dan met name om zonne-energie op dak voor invulling van eigen verbruik en windenergie en zonne-energie op land bij bedrijven en industrie. Afschakeling, opslag en conversie kunnen eraan bijdragen dat nog meer opwek op deze locaties ingepast kan worden. Daarnaast kan nog meer windenergie en zonne-energie op land gerealiseerd worden door toepassing van congestiemanagement en/of alternatieve transportrechten (in combinatie met afschakeling, opwek en/of conversie). Een deel van deze opties kan pas gerealiseerd worden als de elektriciteitsvraag stijgt. Het is dus van belang dat de uitrol van hernieuwbare opwek op land in de pas loopt met de ontwikkeling van elektriciteitsvraag om de problemen met netcongestie te beperken.

Wanneer de grootste problemen met netcongestie opgelost zijn, zijn er meer mogelijkheden. De opties waarvoor gekozen kan worden om nog meer hernieuwbare opwek op land te realiseren boven op de no-regret-opties (meer benutting van zonne-energie op dak of meer zonne-energie op land, wel of niet meer windenergie op land) zullen voor het grootste deel pas in de periode na 2035 gerealiseerd kunnen worden. Hoewel 2035 nog ver weg is, is het wel van belang om tijdig deze keuzes te maken. Nieuwe projecten voor windenergie en zonne-energie op land hebben namelijk lange doorlooptijden. Dat geldt

met name voor windenergie op land. Om voor 2040 een forse groei van windenergie op land te kunnen realiseren, is snel duidelijkheid nodig. Zonne-energie op dak kan sneller gerealiseerd worden, maar ook daar is het van belang om tijdig een visie op de benutting van dakoppervlak te ontwikkelen, aangezien bedrijven en woningeigenaren nu al keuzes maken (of gemaakt hebben) over de ontwikkeling van zonne-energie, en het onwaarschijnlijk is dat zij extra zonnepanelen bijplaatsen of zonnepanelen weghalen voor het einde van de levensduur.

Het algemene beeld is dus dat de groei van hernieuwbare opwek op land in ieder geval tot 2035 beperkt wordt door netcongestie en ook afhankelijk is van de snelheid van de toename van de elektriciteitsvraag. Nadat de ergste problemen met netcongestie achter de rug zijn, kan in theorie een flinke versnelling plaatsvinden. Dan zal een snelle groei van de hernieuwbare opwek op land nodig zijn om tot de bovengrens van de scenario's voor 2040 te komen. Daarnaast is het van belang om de potentie die er nog is voor nieuwe hernieuwbare opwek op land binnen de bestaande netcapaciteit te realiseren zoveel mogelijk te benutten.

6.2 Beleidsaanbevelingen

In deze studie komen we tot zes aanbevelingen, die we hierna in meer detail bespreken:

1. **Zet hoog in op doorgroei hernieuwbare opwek op land.** Verdere groei van hernieuwbare opwek op land is nodig om de klimaatdoelen te halen en energie-onafhankelijkheid te vergroten. De omvang van de groei is een politieke keuze waarbij CO₂-uitstoot, kosten, importafhankelijkheid en maatschappelijk draagvlak centraal staan. Vanwege onzekerheid over de ontwikkeling van vraag en aanbod van elektriciteit zijn adaptieve doelen nodig, die regelmatig herijkt worden. Omdat er onzekerheid is over de ontwikkeling van windenergie op zee en kernenergie richting 2040, is het verstandig om hoog in te zetten op de doorgroei van hernieuwbare opwek op land. Daarbij raden we aan om niet alleen in te zetten op doorgroei van zonne-energie, maar ook in te zetten op doorgroei van windenergie op land, aangezien dit maatschappelijke meerwaarde kan leveren en leidt tot een goedkoper energiesysteem.
2. **Zet in op no-regrets voor hernieuwbare opwek op land en maak tijdig keuzes over de andere opties.** No-regrets zijn extra zonne-energie op daken met dimensionering op eigen gebruik, windenergie op land op bedrijventerreinen en repowering van bestaande windparken. Deze opties zijn maatschappelijk wenselijk en in veel gevallen ook economisch aantrekkelijk. Ze vragen wel om gericht beleid om het potentieel volledig te benutten. Er zijn boven op de no-regrets nog verschillende grote keuzes die voorliggen, zoals volledige benutting van dakoppervlak of verdere ontwikkeling van grootschalige productieparks. Om de opgave voor hernieuwbare opwek in 2040 te kunnen realiseren, zijn snel keuzes nodig.

3. **Zet in op efficiënte netinpassing van hernieuwbare opwek op land** om verdere doorgroei mogelijk te maken, ondanks netcongestie. Netcongestie zal de komende jaren nog blijven, daarom is het optimaal benutten van het net noodzakelijk om een forse doorgroei van hernieuwbare opwek op land (Aanbeveling 1) richting 2040 te kunnen realiseren.
4. **Verdere groei van hernieuwbare energie op land vereist een expliciete koppeling met ruimtelijke ontwikkelingsstrategieën op zowel nationaal als regionaal niveau.** Beslissingen over wind- en zonne-energie moeten niet uitsluitend op sectorniveau of projectmatig worden genomen, maar moeten worden ingebed in bredere ruimtelijke overwegingen die samenhangen met stedelijke ontwikkeling, agrarische transitie, natuurherstel, waterbeheer en industrieel beleid. Vroege integratie van hernieuwbare energie in gebiedsprogramma's en ruimtelijke visies creëert mogelijkheden voor multifunctioneel ruimtegebruik en clustering nabij infrastructuur en energie-intensieve activiteiten. Dit versterkt de ruimtelijke kwaliteit, ondersteunt maatschappelijke acceptatie en faciliteert efficiëntere net-integratie. Een programmatische aanpak waarin energie- en ruimtelijke planning gezamenlijk worden ontwikkeld, is daarom nodig om samenhang in besluitvorming te versterken en bij te dragen aan een veerkrachtig en toekomstbestendig energiesysteem.
5. **De noodzaak voor subsidie** voor een rendabele businesscase en voor het verlagen van risico's blijft. Stuur hiermee op de ontwikkeling van vormen van hernieuwbare opwek op land die wenselijk geacht worden.
6. **Voer een gedetailleerde regionale uitwerking uit van de ontwikkeling van hernieuwbare opwek op land.** Dit onderzoek heeft een nationale aanpak, maar een groot deel van de bevoegdheden ligt bij regionale overheden en de keuzes hebben een grote regionale impact. Daarnaast is meer inzicht nodig in welk deel van de potentie van archetypen daadwerkelijk (lokaal) gerealiseerd kan worden. Daarvoor is een gedetailleerdere regionale uitwerking van het onderzoek gewenst. Dit onderzoek kan input leveren voor verdere afstemming met de RES-regio's, provincies en gemeenten over doelstellingen/ambities en de keuzes die nog gemaakt moeten worden om de doelstellingen te halen.

6.2.1 Nationale doelstellingen: meer hernieuwbare opwek op land nodig, extra windenergie op land heeft meerwaarde

Scenario's voorzien toename van hernieuwbare opwek, maar hoeveelheid afhankelijk van politieke afweging. De analyse van de scenario's voor 2040 laat een groei van de hernieuwbare opwek op land zien (in alle gevallen groei zonne-energie, sommige scenario's groei windenergie op land). De analyse laat echter ook zien dat het een keuze is hoeveel hernieuwbare opwek op land moet groeien, en dat voor een nationale doelstelling voor hernieuwbare opwek op land een brede afweging noodzakelijk is. Hiervoor is van belang om vast te stellen welke bijdrage de elektriciteitssector moet

leveren aan het halen van de klimaatdoelen, maar ook importafhankelijkheid, kosten en draagvlak zijn belangrijke overwegingen.

De behoefte aan hernieuwbare opwek op land is afhankelijk van de onzekere ontwikkeling van de elektriciteitsvraag. De snelheid van de toename van de elektriciteitsvraag is onzeker, maar het is ook onzeker hoe groot de elektriciteitsvraag zal worden in de toekomst. Voor veel sectoren is duidelijk dat elektrificatie de meest logische verduurzamingsroute is, maar er zijn sectoren waar nog onzeker is of er gekozen wordt voor elektrificatie. Daarnaast is nog onzeker hoe de toekomstige economie van Nederland eruit zal zien, waarbij zowel de toekomst van bestaande bedrijvigheid als potentiële nieuwe bedrijvigheid onzeker is.

Ook aan de aanbodkant van elektriciteit zijn er onzekerheden die de behoefte aan hernieuwbare opwek op land bepalen. De Rijksoverheid heeft ambitieuze doelstellingen rondom windenergie op zee en kernenergie, en de vraag is wat hierin haalbaar is richting 2040. Voor windenergie op zee is de ambitie voor 2040 in het recente Windenergie Infrastructuurplan Noordzee (WIN) verlaagd van 50 GW naar 30-40 GW, maar ook realisatie van die verlaagde doelstelling is geen zekerheid door verminderde marktomstandigheden en vertraging van energie-infrastructuurprojecten. Daarnaast laat onderzoek zien dat het aantal vollasturen van windparken op zee mogelijk wordt overschat en dat de productie van die windparken in de praktijk lager kan uitvallen dan aangenomen is in scenario-studies en beleidsstukken, zoals het eerdere NPE. Bij kernenergie is de vraag of het haalbaar is om de eerste twee grote kerncentrales voor 2040 te realiseren.⁵⁷

Gegeven de onzekerheid over zowel de ontwikkeling van de elektriciteitsvraag als de ontwikkeling van windenergie op zee en kernenergie is het onzeker hoeveel hernieuwbare opwek op land exact nodig zal zijn in 2040. Het is van belang om doelen op te stellen die in lijn zijn met de verwachte en gewenste ontwikkeling van de elektriciteitsvraag. Daarnaast vraagt de onzekerheid over de toekomstige ontwikkelingen om adaptieve doelen, die regelmatig herijkt worden. **We adviseren daarbij om, vanwege de onzekerheid rondom de ontwikkeling van windenergie op zee en kernenergie, in te zetten op hoge doelstellingen voor hernieuwbare opwek op land.** Dit levert een grotere zekerheid op voor het halen van de klimaatdoelen, aangezien de klimaatdoelen dan ook gehaald kunnen worden als andere ontwikkelingen tegenvallen. Daarnaast is het eventueel terugschalen van de ambitie eenvoudiger dan opschalen als andere ontwikkelingen tegenvallen.

Bij het vaststellen van nationale doelstellingen voor hernieuwbare opwek op land dient speciale aandacht uit te gaan naar windenergie op land. Verdere doorgroei van windenergie op land gaat niet vanzelf, maar heeft vanuit maatschappelijk perspectief duidelijk meerwaarde. Het is een relatief goedkope bron die leidt tot lagere kosten voor het

⁵⁷ In de [kamerbrief Voortgang nieuwbouw kernenergie uit mei 2025](#) werd geconcludeerd dat de realisatie van twee nieuwe kerncentrales op zijn vroegst eind jaren '30 haalbaar is, maar nog steeds onzeker is.

energiesysteem, de importafhankelijkheid kan verminderen en de zekerheid vergroot dat klimaatdoelen worden gehaald (ook vanwege onzekerheid rond windenergie op zee en kernenergie). Een lagere ambitie voor windenergie op land kan niet opgevangen worden met extra zonne-energie, aangezien deze een ander productieprofiel heeft.

Bij het bepalen van doelstellingen voor hernieuwbare opwek op land is naast wat nodig en wenselijk is, ook van belang wat haalbaar is. Uit het onderzoek volgt dat de opties die voorhanden zijn en maatschappelijk wenselijk zijn in principe voldoende potentieel hebben voor een ambitieuze doelstelling voor hernieuwbare opwek op land richting 2040. Daarbij moet aangemerkt worden dat alle opties ook belemmeringen hebben en dat de realisatiegraad naar verwachting een stuk lager zal zijn dan het potentieel.

6.2.2 Sturen op no-regrets en tijdig keuzes maken over overige opties

Het onderzoek laat verder zien dat er verschillende manieren zijn om een doelstelling voor hernieuwbare opwek op land te behalen, en dat er dus iets te kiezen valt. Uit de uitwerking van de ontwikkelpaden komen no-regrets en opties waar een afweging te maken valt naar voren. Vanuit beleid is het wenselijk om de no-regrets te stimuleren en om tijdig keuzes te maken over de overige opties, zodat hier beleid op ingericht kan worden.

No-regrets

Als no-regrets voor de ontwikkeling van hernieuwbare opwek op land komen de volgende opties naar voren uit het onderzoek:

- Lege daken voorzien van zonne-energie op daken, in lijn met de eigen vraag van het gebouw en vraag/aanbod in het gebied. Hier is nog flinke doorgroei mogelijk, ook door de verwachte toename van de elektriciteitsvraag.
- Windturbines bij bedrijventerreinen en cluster 6-industrie.
- Repowering van bestaande windenergie op land en zonneparken met multifunctioneel ruimtegebruik.

Bij het realiseren van extra zonne-energie op daken wordt zowel een groei van zonne-energie op daken bij bedrijven en maatschappelijk vastgoed als bij woningen voorzien. De huidige marktomstandigheden en de problemen met netcongestie sturen op dit moment al naar het afstemmen van de opwek op het eigen gebruik en het maximaliseren van eigen gebruik, aangezien teruglevering van zonnestroom minder loont en in congestiegebieden ook niet altijd mogelijk is.

Het realiseren van zonne-energie voor eigen gebruik is op dit moment doorgaans nog steeds rendabel, zowel voor bedrijven als voor woningen. Dat het realiseren van zonne-energie voor eigen gebruik doorgaans rendabel is, betekent echter niet dat het volledige potentieel hiervan ook gerealiseerd wordt. Daarom doen we de volgende aanbevelingen:

- Informeer zowel bedrijven als woningeigenaren over de voordelen van hernieuwbare opwek en de gunstige businesscase voor eigen gebruik. Met name bij woningen bestaat er een negatief sentiment over de rentabiliteit van zonnepanelen door terugleverkosten en de beëindiging van de salderingsregeling. Informeer ook over de mogelijkheden om eigen gebruik te vergroten.
- Specifiek voor zonne-energie op dak van woningen gaat speciale aandacht uit naar huurwoningen. De businesscase is hierbij extra uitdagend, aangezien de verhuurder zonnepanelen aanlegt en moet terugverdienen, maar de huurder ook een deel van de inkomsten moet krijgen. Mogelijk is hiervoor extra stimulering nodig. Daarnaast is een aandachtspunt dat huurders een eerlijk deel van de inkomsten moeten ontvangen, ook na beëindiging van de salderingsregeling (CE Delft & TNO, 2024).
- Gemeentes dienen vanaf 2027 de EPBD te handhaven (zie Tekstkader 14). Op deze manier wordt het potentieel van zonne-energie op dak op openbare en niet-openbare bestaande gebouwen zonder woonfunctie benut in lijn met eigen gebruik. Blijf daarnaast streng handhaven op de verplichting van het installeren van zonnepanelen voor bedrijven die onder de energiebesparingsplicht vallen.
- Uit de analyses volgt dat bij industrie een kleiner deel van de totale potentie van zonne-energie op daken benut is op dit moment, in vergelijking met mkb-bedrijven en maatschappelijk vastgoed. Mogelijke redenen hiervoor zijn een slechtere businesscase doordat grote energieverbruikers relatief weinig energiebelasting betalen en inkoop van elektriciteit dus relatief goedkoop is, waardoor eigen opwek minder loont. Daarnaast zijn de eisen voor financieel rendement in de industrie hoger dan bij bijvoorbeeld woningen en heeft het realiseren van zonne-energie mogelijk minder prioriteit, en is er een voorkeur om geld te investeren in het primaire proces. Tegelijkertijd zien we wel grote maatschappelijke meerwaarde voor het realiseren van zonne-energie op dak bij industrie. Daarom adviseren we communicatie over de voordelen van zonne-energie, handhaving waar mogelijk en om eventueel te onderzoeken hoe belemmeringen voor zonne-energie op daken bij de industrie weggenomen kunnen worden.

Voor het realiseren van windturbines bij industrie en bedrijventerreinen geldt dat afnamenetcongestie een belangrijke prikkel kan zijn voor bedrijven om dit te realiseren.

Het realiseren van extra capaciteit voor afname door windturbines bij industrie en bedrijventerreinen heeft namelijk een grote meerwaarde, zowel maatschappelijk als voor de bedrijven zelf. Een belangrijke belemmering voor het realiseren van windenergie op land bij industrie- en bedrijventerreinen is de vergunningsverlening. We adviseren de Rijksoverheid en regionale overheden om te zoeken naar de mogelijkheden om zoveel mogelijk windenergie op land bij industrie en bedrijventerreinen te realiseren en ook met deze partijen in gesprek te gaan hierover. Kleinere windturbines kunnen een potentiële oplossing zijn, aangezien deze makkelijker gerealiseerd kunnen worden. Maar door schaalvergroting van windturbines door producenten zijn deze naar verwachting beperkt of niet op de markt verkrijgbaar.

Inzet op repowering van bestaande windparken aan het einde van de levensduur is noodzakelijk om te zorgen dat de nationale opgave voor windenergie op land gerealiseerd kan worden en gunstig, omdat bestaande netcapaciteit gebruikt kan worden. Repowering is echter geen zekerheid. Er zijn in veel gevallen nieuwe vergunningen nodig en ook draagvlak en de businesscase voor het realiseren van nieuwe windturbines kunnen een uitdaging zijn. Onderzoek de belemmeringen voor repowering en hoe deze weggehaald kunnen worden.

Keuzes die voorliggen

Er zijn ook archetypes voor hernieuwbare opwek op land, waar een politieke weging van de effecten nodig is om te bepalen of het maatschappelijk wenselijk is.

Voor zonne-energie op dak is een van de belangrijkste keuzes om te kiezen voor het benutten van het volledige dakoppervlak, of alleen voor invulling van de eigen of lokale vraag. Bij mkb-bedrijven, maatschappelijk vastgoed, bedrijventerreinen en woningen is het ruimtelijk potentieel voor zonne-energie op dak een stuk groter dan de lokale vraag. Het is een overweging om ook de rest van het beschikbare dakoppervlak te benutten. Als hiervoor gekozen wordt dan is het noodzakelijk om via stimulering (zoals two-sided CfD) te zorgen dat teruglevering van zonnestroom ook rendabel is. Belangrijk aandachtspunt hierbij is de netimpact. Afschakeling en opslag kunnen ervoor zorgen dat meer zonne-energie op daken ingepast kan worden zonder extra netuitbreidingen, maar als er ingezet wordt op het volledig benutten van het dakoppervlak zal netcongestie alsnog een nog grotere uitdaging zijn. Dit zal in de praktijk betekenen dat de benutting van het volledige dakoppervlak in de komende jaren beperkt blijft en dat vanaf 2035, wanneer in veel regio's de ergste problemen met teruglevercongestie volgens de huidige planning opgelost zijn, nog veel doorgroei nodig is. Het is belangrijk om tijdig een visie op de benutting van dakoppervlak te ontwikkelen, aangezien bedrijven en woningeigenaren nu al keuzes maken (of gemaakt hebben) over de ontwikkeling van zonne-energie. Het is onwaarschijnlijk dat zij extra zonnepanelen bijplaatsen of bestaande panelen weghalen voor het einde van de levensduur.

Daarnaast is het **zowel bij zonne-energie als windenergie op land een keuze of er ingezet wordt op verdere ontwikkeling van losstaande productieparks**. Indien hiervoor gekozen is, heeft het de voorkeur om zonne-energie op land en windenergie op land zoveel mogelijk te combineren. Ook bij bestaande windparken is nog ruimte om zonne-energie op land te realiseren. Daarom raden we aan om te onderzoeken hoe het gezamenlijk realiseren van windenergie en zonne-energie op land gestimuleerd en meegenomen kan worden in vergunningsverlening.

Ook voor windenergie en zonne-energie op land is het van belang om tijdig keuzes te maken, aangezien deze projecten lange doorlooptijden hebben en de pijlpijn aan nieuwe projecten beperkt is. Om een forse groei van windenergie en zonne-energie op land richting 2040 te kunnen realiseren, is het noodzakelijk om hier snel keuzes in te maken.

Er zijn daarnaast nog twee archetypen die in geen van de ontwikkelpaden naar voren komen: **zonne-energie op land op bedrijventerreinen en zonne-energie op land-bouwgrond (geen agri-pv)**. Dat deze archetypen in geen van de ontwikkelpaden terugkomen betekent niet dat deze per definitie maatschappelijk onwenselijk zijn. In individuele gevallen kunnen deze archetypen alsnog gunstig zijn. Daarnaast is het onzeker welk deel van de potentie van de andere opties daadwerkelijk gerealiseerd kan worden en of de potentie van de andere opties voldoende is om tot aan de totale nationale opgave voor hernieuwbaar op land te komen. Daarom adviseren we om deze opties niet nu al af te schrijven, maar op dit moment ook niet actief te stimuleren.

6.2.3 Stuur op efficiënte netinpassing hernieuwbare opwek op land om forse doorgroei mogelijk te maken

Netcongestie zal de komende jaren nog blijven, daarom is het optimaal benutten van het net noodzakelijk om een forse doorgroei van hernieuwbare opwek op land (Aanbeveling 1) richting 2040 te kunnen realiseren. Hiervoor doen we de volgende aanbevelingen:

- Onderzoek hoe in de two-sided CfD, die op dit moment uitgewerkt wordt, gestuurd kan worden op projecten die beperkt aanvullende netbelasting veroorzaken. Het is wenselijk om te sturen op projecten waarbij het vermogen aan opwek wordt gedimensioneerd op de piekvraag, windenergie en zonne-energie worden gecombineerd (op één aansluiting en binnen het voorzieningsgebied van een HS/MS-station), wordt opgewekt in gebieden waar nog netcapaciteit beschikbaar is en projecten waarbij afschakeling, opslag en eventueel conversie worden toegepast om invoedingspieken te beperken.
- Onderzoek, in samenwerking met de netbeheerders, welke potentie congestie-management en alternatieve transportrechten oplevert voor het realiseren van meer hernieuwbare opwek op land en welke barrières hier nu nog voor zijn. De grootste potentie hierbij zien we voor het realiseren van opwek met een afwijkend productieprofiel, zoals windenergie op land in een zongedomineerd congestiegebied of oost-westoriëntatie bij zonne-energie.
- Onderzoek met de ACM en de netbeheerders of het wenselijk en mogelijk is om binnen het nieuwe prioriteringskader voor transportverzoeken ook voorrang te verlenen aan opwekprojecten met een efficiënte netinpassing. Op dit moment zijn alleen bepaalde afnamecategorieën en congestieverzachters opgenomen als categorieën die voorrang kunnen krijgen.

- Hou in de two-sided CfD rekening met de kosten voor maatregelen die noodzakelijk zijn om nieuwe hernieuwbare opwek op land te kunnen realiseren in congestiegebieden, zoals afschakeling en opslag, en het effect hiervan op de businesscase. Het onderzoek laat zien dat deze maatregelen aanvullende kosten opleveren (Paragraaf 4.3.3), waardoor de businesscase uitdagender wordt.

6.2.4 Versterk ruimtelijk beleid voor hernieuwbare opwek op land

De analyse van archetypen en ontwikkelpaden laat zien dat de opwekking van hernieuwbare energie op land evenzeer een ruimtelijke uitdaging is als een energievraagstuk.

De locatie en inrichting van wind- en zonneprojecten bepalen de landschapskwaliteit, beïnvloeden maatschappelijke steun en hebben invloed op de uitvoerbaarheid.

Het versterken van de afstemming tussen energieambities en ruimtelijk beleid is daarom essentieel voor een coherente en evenwichtige ontwikkeling van hernieuwbare energie richting 2040.

Ruimtelijk beleid zou duidelijker richting moeten geven waar en onder welke voorwaarden wind- en zonne-energie geschikt zijn. De geïdentificeerde archetypen, zoals hernieuwbaar in grote industrieclusters, brownfields of restlandschappen (zoals infrastructuur), landbouwgrond, verziltingsgronden of veenontginningsgebieden, bieden een gestructureerde basis voor ruimtelijke differentiatie. Nationale en provinciale overheden kunnen deze archetypen gebruiken om ontwikkeling strategisch te sturen, bijvoorbeeld door windenergie op land te prioriteren bij industrie en langs belangrijke infrastructuur, zonne-energie op daken te stimuleren in de gebouwde omgeving, en randvoorwaarden te definiëren voor zonneparken in landbouwgebieden. Dergelijke differentiatie vergroot de voorspelbaarheid voor marktpartijen en helpt om energieopbrengsten te balanceren met landschapswaarden en andere ruimtelijke functies.

Hernieuwbare energie zou ook explicieter moeten worden verbonden met bredere ruimtelijke transitie. Door wind- en zonneontwikkeling te integreren in woningbouwuitbreiding, agrarische transformatie, klimaatadaptatie en natuurherstel, ontstaan combinaties van functies en een efficiënter ruimtegebruik. Vroege inbedding van energieopwekking in gebiedsgerichte planning verkleint ruimtelijke conflicten en voorkomt dat hernieuwbare energie als een afzonderlijke claim op ruimte wordt behandeld. Ruimtelijke en energie-doelen kunnen op deze manier elkaar versterken in plaats van elkaar tegenwerken.

Ruimtelijke sturing kan bovendien een evenwichtige mix van windenergie en zonne-energie bevorderen die bijdraagt aan systeemefficiëntie. Een geografisch goed verdeelde portefeuille van windenergie op land en zonne-energie kan netcongestie verminderen, netuitbreidingen beperken en de leveringszekerheid verbeteren. Dit vereist afstemming tussen de Rijksoverheid, provincies en gemeenten, evenals duidelijkheid over rollen en verantwoordelijkheden bij ruimtelijke besluitvorming. De analyse van archetypen en ontwikkelpaden in deze studie biedt een conceptueel kader dat dergelijke coördinatie kan ondersteunen.

Tegelijkertijd opereert deze studie op nationaal en strategisch niveau. Meer gedetailleerde en locatie-specifieke aanbevelingen voor ruimtelijk beleid vragen verdere analyse op regionaal en lokaal niveau. Verdere studies met fijnere ruimtelijke resolutie zijn nodig om landschapskenmerken, netcapaciteit, concurrerend ruimtegebruik en maatschappelijke voorkeuren dieper in kaart te brengen. Zulke analyses maken preciezere en context-gevoeliger ruimtelijke keuzes mogelijk. Meer hierover volgt bij de aanbeveling over regionale uitwerking in Paragraaf 6.2.6.

Tot slot zou ruimtelijk beleid ruimte moeten laten voor adaptieve uitvoering. Technologische ontwikkelingen, kostentrends en maatschappelijke voorkeuren kunnen in de loop der tijd veranderen. Door te werken met indicatieve zoekgebieden, periodieke evaluatiemomenten en flexibele planningsinstrumenten kunnen beleidsmakers ervoor zorgen dat de ontwikkeling van hernieuwbare energie zowel aansluit bij klimaatdoelstellingen als bij ambities voor ruimtelijke kwaliteit richting 2040 en verder.

6.2.5 Businesscase hernieuwbare opwek blijft onder druk staan, blijvende stimulering nodig. Stuur daarin op wenselijke ontwikkeling hernieuwbare opwek op land.

Uit verschillende onderzoeken zien we dat de **businesscase voor hernieuwbare opwek op land onder druk blijft staan, mede door de achterblijvende ontwikkeling van de elektriciteitsvraag**. Dit betekent dat stimulering noodzakelijk is om verdere doorgroei van hernieuwbare opwek op land te realiseren (Aanbeveling 1, Paragraaf 6.2.1). Daarbij is het ook belangrijk dat dit beleid stabiel en voorspelbaar is, zodat het voldoende zekerheid geeft voor zowel investeerders als netbeheerders.

Het realiseren van hernieuwbare opwek voor eigen gebruik is naar verwachting nog wel rendabel, waardoor stimulering hiervoor niet per definitie nodig is. Er zijn echter andere barrières waardoor de potentie voor hernieuwbare opwek voor eigen gebruik niet maximaal benut wordt (zie Paragraaf 6.2.2). Er is echter niet in detail onderzocht in dit onderzoek of dit ook rendabel blijft, het is daarom van belang om dit te blijven monitoren.

Er wordt op dit moment gewerkt aan een two-sided Contract for Difference (CfD) naast de SDE++ (zie Tekstkader 14). Dit betekent dat hernieuwbare opwek op land gestimuleerd blijft worden. Vanuit dit onderzoek geven we de volgende overwegingen mee voor de verdere uitwerking van two-sided CfD's:

- Er zit grote potentie voor verdere doorgroei van zonne-energie op dak bij woningen en kleinere bedrijven. Eigen gebruik van zonnestroom bij koopwoningen en bedrijven is naar verwachting nog wel rendabel, daarom is het stimuleren hiervan naar verwachting niet nodig. Maar als de keuze gemaakt wordt om een groter deel van het dakoppervlak te benutten dan de eigen vraag (zie keuzes bij Paragraaf 6.2.2) dan zal naar verwachting wel stimulering nodig zijn. Op dit moment komen

deze partijen niet in aanmerking voor de SDE++. Het is op dit moment nog niet duidelijk of dit bij een two-sided CfD ook het geval is.

- Daarnaast raden we aan om specifiek te kijken naar de noodzaak voor stimulering voor huurwoningen, aangezien de businesscase voor zonne-energie hiervoor uitdagender is doordat de inkomsten gedeeld worden tussen de verhuurder en huurder.
- Overweeg om hekjes op te nemen als er specifieke vormen van hernieuwbare opwek op land met hogere kosten vanuit de Rijksoverheid wel als gewenste ontwikkeling gezien worden. Overweeg daarnaast goed welke vormen van hernieuwbare opwek op land wel en niet gewenst zijn en opgenomen worden.

Tekstkader 14 – EPBD en two-sided Contract for Difference

Beleidsontwikkeling: EPBD en two-sided Contract for Difference

De EPBD (Energy Performance of Building Directive) vanuit de EU heeft als doel het verbeteren van de energieprestatie en het verminderen van de broeikasgasuitstoot van gebouwen binnen de Europese Unie. Hiermee wenst de EU in 2050 een gebouwvoorraad zonder emissies te realiseren. Artikel 10 van de nieuwste versie (EPBD IV)⁵⁸ schrijft een verplichting van zonne-energie op gebouwen voor. Deze Europese richtlijn wordt door de lidstaten uitgewerkt in nationale regelgeving. In Nederland vindt de uitwerking plaats in het Besluit bouwwerken leefomgeving (Bbl), waarvan momenteel een versie in internetconsultatie is. Deze versie schrijft voor dat alle nieuwe gebouwen 'solar ready' moeten zijn om de kosteneffectieve installatie van zonne-energie in een later stadium mogelijk te maken. Nieuwe openbare gebouwen (> 250 m²) vallen onder de zonne-energie-verplichting per 2027. Voor alle nieuwe woongebouwen en alle nieuwe overdekte aanpalende parkeergelegenheden geldt een verplichting vanaf 2030. Ook wordt stapsgewijs een zonne-energie-installatie vereist op bestaande bouwwerken. De voorschriften gaan voor bestaande openbare gebouwen gelden: > 2.000 m² per 2028, > 750 m² per 2029, > 250 m² per 2031. Vanaf 2028 geldt deze bij ingrijpende renovatie van bestaande utiliteitsgebouwen (> 500 m²). Bij bestaande niet-openbare gebouwen zijn er dus enkel eisen voor zonnepanelen wanneer deze niet voor woning bestemd zijn en een grondige renovatie ondergaan. Aangezien bestaande gebouwen in 2050 zogenaamde Zero-Emission Buildings (ZEB) moeten zijn en vanwege andere isolatie-eisen voor gebouwen, zullen in het kader daarvan ook renovaties plaatsvinden, die vervolgens de installatie van zonnepanelen vereisen. De verplichting schrijft een minimale benuttingsgraad van 6% van het dak voor openbare gebouwen en 13% voor niet-openbare gebouwen, mits technisch en economisch haalbaar (terugverdientijd minder dan tien jaar) en fysiek uitvoerbaar. Dit betreft slechts een klein deel van het dak; de focus van de EPBD ligt dus vooral bij eigen verbruik van de opgewekte elektriciteit. Gebouwen die niet verwarmd of gekoeld worden voor personen, zijn uitgesloten van de verplichting.

⁵⁸ [Directive - EU - 2024/1275 - EN - EUR-Lex](#)

Tweezijdig Contract for Difference (CfD). De SDE++-regeling wordt voor nieuwe projecten na 2026 naar verwachting vervangen door een tweezijdig Contract for Difference (CfD). De invulling hiervan is aan een volgend kabinet. Het huidige kabinet werkt momenteel wel de voorbereidingen uit. Een CfD is een afspraak tussen een overheid en een producent van elektriciteit. Er wordt een vaste prijs afgesproken voor de productie. Is de marktprijs lager, dan betaalt de overheid het verschil bij. Is de marktprijs hoger, dan betaalt de producent het verschil terug. Op deze manier wordt het inkomstenrisico voor de producent kleiner en blijft de kostprijs stabiel voor de afnemer.

6.2.6 Nationaal onderzoek: verdere uitwerking en afstemming over regionale uitwerking noodzakelijk

In dit onderzoek zijn ontwikkelpaden uitgewerkt voor de mogelijke ontwikkeling van hernieuwbare opwek op land richting 2040, en geven daarmee inzicht in de mogelijkheden en de afwegingen. Dit onderzoek is echter uitgevoerd vanuit een nationaal perspectief. En de resultaten in Paragraaf 5.5 laten zien dat keuzes op nationaal niveau grote implicaties hebben voor regio's. De uitwerking naar regio's is in deze studie echter slechts beperkt onderzocht. Er is daarom verder onderzoek nodig naar de regionale uitwerking van zowel de ontwikkelpaden als de archetypen. Daarnaast is meer inzicht nodig in welk deel van de potentie van archetypen daadwerkelijk (lokaal) gerealiseerd kan worden.

Daarnaast zullen de uiteindelijke keuzes voor de ontwikkeling van hernieuwbare opwek na 2030 gezamenlijk door lokale overheden en de Rijksoverheid gemaakt moeten worden. De resultaten van dit onderzoek kunnen daarbij ondersteunen doordat het de keuzes en afwegingen in kaart brengt.

Naast de Rijksoverheid zullen ook medeoverheden een visie moeten ontwikkelen op de verdere ontwikkeling van hernieuwbare opwek op land in hun regio. De kaders van dit onderzoek, zoals de archetypen en ontwikkelpaden, zijn ook op lokaal niveau toepasbaar, maar zullen voor lokale besluitvorming wel verder regionaal uitgewerkt moeten worden.

Literatuur

- ACM. (2025, 26 juni). *Acm vraagt reactie op nieuw ontwerpbesluit voorrang maatschappelijke projecten op stroomnet*. Autoriteit Consument & Markt (ACM).
<https://www.acm.nl/nl/publicaties/acm-vraagt-reactie-op-nieuw-ontwerpbesluit-voorrang-maatschappelijke-projecten-op-stroomnet>
- Carlos Ferreira, Gunner Larsen, & Jens Sorensen. (2025). A theoretical upper limit for offshore wind energy extraction.
- CBS. (2023). *Rendementen, co2-emissie elektriciteitsproductie, 2022*. CBS.
<https://www.cbs.nl/nl-nl/maatwerk/2023/51/rendementen-co2-emissie-elektriciteitsproductie-2022>
- CE Delft. (2023a). *Beleid voor grootschalige batterijen en opweknetcongestie*.
- CE Delft. (2023b). *Flexibiliteit in het elektriciteitssysteem in groningen en drenthe*.
- CE Delft. (2023c). *Handboek milieuprijzen 2023. Methodische onderbouwing van kengetallen gebruikt voor waardering van emissies en milieu-impacts*.
- CE Delft. (2024a). *Elektrolyzers, nettarieven en het elektriciteitssysteem*.
- CE Delft. (2024b). *Systeemintegratie wind op zee fase a pvawoz 2031-2040*.
- CE Delft. (2025a). *Maatschappelijke waarde sectoren*.
- CE Delft. (2025b). *Mkba energiehubs - maatschappelijke waarde van twaalf archetypes voor 2.500 energiehubs in nederland - achtergrondrapport*.
- CE Delft, & TNO. (2024). *Feitenbasis aanpassing salderingsregeling zonne-energie*.
- CE Delft, & Witteveen+Bos. (2024). *Elektriciteitsmix en marktdynamiek in 2035 co2-vrij elektriciteitssysteem*.
- Copper8. (2025). *Stralen zonder schaduw - advies over een methodologie voor sturing op de co2-voetafdruk van zonnepanelen*.
- CPB, & PBL. (2025). *Toekomstverkenning wlo - efficiënte co2-prijzen*.
- Dröes, M.I., & Koster, H.R.A. (2021). Wind turbines, solar farms, and house prices. *Energy Policy*, 155, 112327. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112327>
- Ecorys. (2024). *Maatschappelijke kostprijs van netcongestie*.
- Ecorys. (2025). *De netto maatschappelijke kostprijs van netcongestie*.
- EFTI, & Decisio. (2016). *Toeristisch-economische potentie windparken gemeente emmen ; onderzoek naar de impact van windparklocaties op het toerisme*.
- EqoLibrium. (2025). *Lokale energie geeft bedrijven weer ruimte*.
- Faasen, C.J., Franck, P.A.L., & Taris, A.M.H.W. (2014). *Handboek risicozonering windturbines*.
- Generation.Energy. (2021). *Ruimtelijk potentieel van zonnestroom in nederland*. TKI Urban Energy.
https://topsectorenergie.nl/documents/136/Ruimtelijk_potentieel_van_zonnestroom_in_Nederland.pdf
- Horstink, L., Luz, G., Soares, M., & Ng, K. (2019, 15-5-2019). *Review and characterisation of collective renewable energy prosumer initiatives. Proseu-prosumers for the energy union: Mainstreaming active participation of citizens in the energy transition (deliverable n°2.1). Horizon 2020 (h2020-lce-2017) grant agreement n°764056*. University of Porto /UPORTO. Retrieved 2021 from
<https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5c415f172&appld=PPGMS>

- IEA. (2024). *Environmental life cycle assessment of electricity from pv systems – 2023 data update*. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2024/05/Slides_IEA-PVPS-T12_Fact-Sheet-update-2023_v2.0.pdf
- KPMG. (2025). *De business case voor zon, wind op land en co-locatedbess*.
- M. Enserink, R. Van Etteger, A. Van den Brink, & S. Stremke. (2022). *To support or oppose renewable energy projects? A systematic literature review on the factors influencing landscape design and social acceptance*.
- Ministerie van EZK. (2023). *Nationaal plan energiesysteem*.
- Ministerie van KGG. (2025). *Het windenergie infrastructuurplan noordzee*.
- Netbeheer Nederland. (2025a). *Capaciteitskaart elektriciteitsnet*. <https://capaciteitskaart.netbeheernederland.nl/>
- Netbeheer Nederland. (2025b). *Netbeheer nederland scenario's editie 2025*.
- NPRES. (2020). *Analysekaarten*.
- NVDE. (2022). *Druk op doorlooptijd*.
- PBL. (2024a). *Monitor res 2024*.
- PBL. (2024b). *Trajectverkenning klimaatneutraal 2050*. Planbureau voor de Leefomgeving. <https://www.pbl.nl/publicaties/trajectverkenning-klimaatneutraal-2050>
- PBL. (2025). *Eindadvies basisbedragen sde++ 2025*.
- Pondera Consult, & CE Delft. (2023). *Integrale effectenanalyse programma energiehoofdstructuur*.
- Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. (2023). *Kansrijke daken en parkeerplaatsen voor zonnestroom in nederland*.
- Rijksoverheid. (2025). *Ontwerp nota ruimte*.
- Rijksoverheid. (lopend). *Regionale klimaatmonitor*. Rijksoverheid. <https://klimaatmonitor.databank.nl/dashboard/>
- RVO. (2025a). *Monitor windenergie op land 2024*.
- RVO. (2025b). *Monitor zon-pv 2025*.
- RVO. (lopend). *Hoogtebeperkingen luchtvaart*. <https://hoogtebeperkingen-luchtvaart.nl/>
- TKI Urban Energy. (2021). *Ruimtelijke potentieel van zonnestroom in nederland*.
- TNO. (2018). *Zonnepanelen en natuur. Hoe zonnepanelen kunnen samengaan met natuur - een eerste praktische handreiking*.
- TNO. (2022). *De verwachte impact van windturbines op huizenprijzen in nederland. Een ruimtelijke analyse voor de periode 2020-2030*.
- TNO. (2024). *Towards a sustainable energy system for the netherlands in 2050, scenario update and scenario variants for industry*.
- University of Groningen, Wageningen University & Research, & Grauwe Kiekendief. (2018). *Literatuurstudie en formulering richtlijnen voor een ecologische inrichting van zonneparken in de provincies groningen en noord-holland*.
- Van Druuten, E., & Van Wieringen, S. (2025). Cable pooling to add renewables amid grid congestion: Exploring optimal integration of solar and batteries with existing onshore wind under cost uncertainty. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2025, 101971. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.segan.2025.101971>
- Wageningen Universiteit. (2024). *Verkenning agri-pv in nederland: Een onderzoek naar combinaties van zonnepanelen met landbouw productie*.
- Whiffle. (2025). *21 gw roadmap wake study*.
- WindStats. (lopend). *Windenergie statistieken van nederland: Locaties, vermogen, real-time productie & voorspellingen*. Bosch & van Rijn. <https://windstats.nl/>

A Paspoorten en kaarten archetypen

Figuur 40 – Paspoot en kaart archetype 'Hernieuwbare opwek in grote industriële clusters' (bron: Generation.Energy)

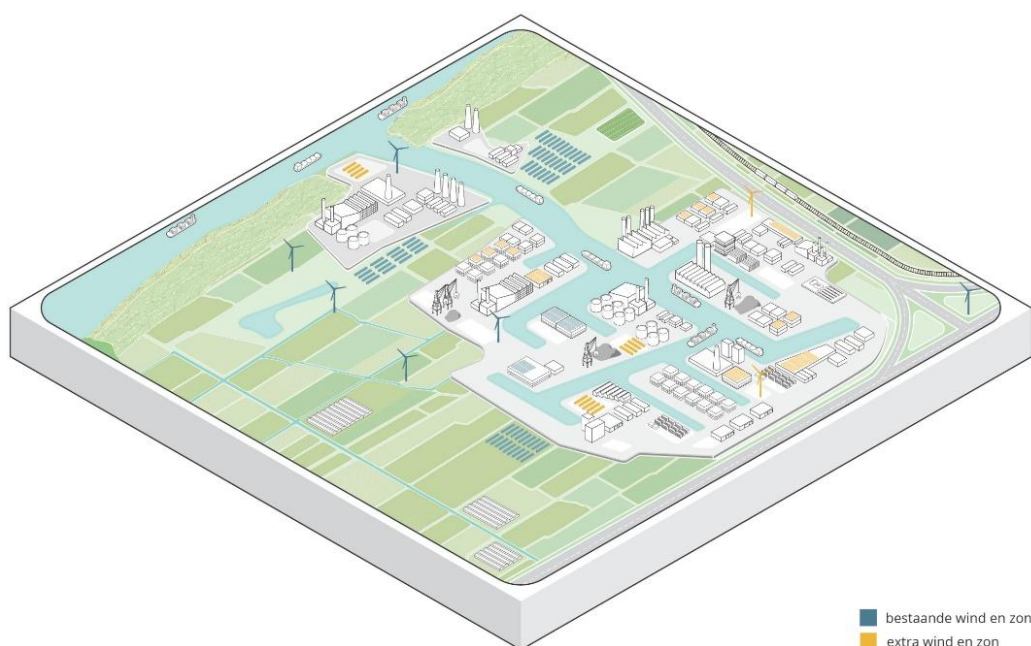
Zon of wind bij vraag Decentraal	
1a.	Zonne-energie of windenergie in grote industriële clusters
<i>Dit archetype richt zich op grootschalige zonne- en/of windopwekking binnen grote industriële clusters, waar al een aanzienlijke en relatief stabiele vraag naar elektriciteit aanwezig is.</i> <i>Installaties zijn doorgaans aangesloten op het middenspannings- of hoogspanningsniveau en kunnen bestaan uit zonne-energie, windenergie, of een combinatie van beide, afgestemd op de lokale omstandigheden. Door de opwekking direct naast de vraag te situeren, kan een groot deel van de elektriciteit ter plaatse worden gebruikt, waardoor de export naar het bredere netwerk beperkt blijft.</i> <i>Ruimtelijk bouwt het archetype voort op bestaande industriële terreinen en infrastructuur, wat resulteert in een beperkte extra grondinname en weinig conflicten met omliggende functies.</i> <i>Vanuit een energiesysteem perspectief vermindert deze nauwe koppeling van vraag en aanbod de belasting van het netwerk en de behoefte aan versterking, wat bijdraagt aan een efficiënte en kosteneffectieve energietransitie.</i>	
Combinatie met afname (en welke?)	
Ja, industrie in grote clusters	
Type locatie of gebied	
Industrieel gebied	
Typische Schaalgrootte	
Grootschalig (HS/MS niveau)	

Zon of wind bij vraag | Decentraal

1a. Zonne-energie of windenergie in grote industrieclusters

Productietechniek	Bestaand (MW)	Theoretisch maximale potentieel (MW)	Potentieel na aftrek mogelijke beperking (beleid, radar of economisch) (MW)	Ondergrens maximaal potentieel (zon > 20MW, wind 16.8MW) (MW)	Potentieel na aftrek mogelijke beperking (beleid, radar of economisch) (MW)
Bestaand wind	758				
Bestaand zon	250				
Bestaand zon op dak	463				
Potentieel wind turbine 5.6 MW		622	610	118	118
Zon op veld intensief		5.858	1.313	3.693	367
Zon op veld extensief		246	83	63	0
Zon op gebouwen dak		4.173		3.102	

Zonne-energie of windenergie in grote industrieclusters - Conceptueel Archetype



Zon of wind bij vraag | Decentraal

1b. Zonne-energie of windenergie in de 1km-zone rond grote industriecusters

Dit archetype richt zich op grootschalige zonne- en/of windopwekking in de 1 km-zone rond grote industriële clusters, waar in de directe omgeving een aanzienlijke en relatief stabiele industriële elektriciteitsvraag aanwezig is. Installaties zijn doorgaans aangesloten op het middenspannings- of hoogspanningsniveau en kunnen bestaan uit zonne-energie, windenergie, of een combinatie van beide, afhankelijk van de lokale omstandigheden. Vergeleken met productie uitsluitend binnen de grenzen van het industriële cluster kan hier een groter deel van de opgewekte elektriciteit via lokale netaansluitingen worden geëxporteerd, maar de nabijheid van een belangrijke vraaglocatie maakt nog steeds een hoge mate van lokaal verbruik en systeemintegratie mogelijk.

Ruimtelijk strekt het archetype zich uit naar aangrenzend landbouwgrond, infrastructuurcorridors, bufferzones en andere overgangs- of restlandschappen rond industriële gebieden, wat leidt tot een grotere ruimtelijke impact en de noodzaak van zorgvuldige integratie met bestaande grondgebruik.

Vanuit een energiesysteem perspectief maakt deze ruimtelijke uitbreiding het mogelijk extra hernieuwbare capaciteit dicht bij de vraag te realiseren, waardoor netcongestie en de behoefte aan netversterking beperkt blijven en tegelijkertijd de schaalbare elektrificatie van de industrie wordt ondersteund.

Combinatie met afname (en welke?)

Ja, industrie in grote clusters

Type locatie of gebied

Landbouw, restlandschap, ander

Typische Schaalgrootte

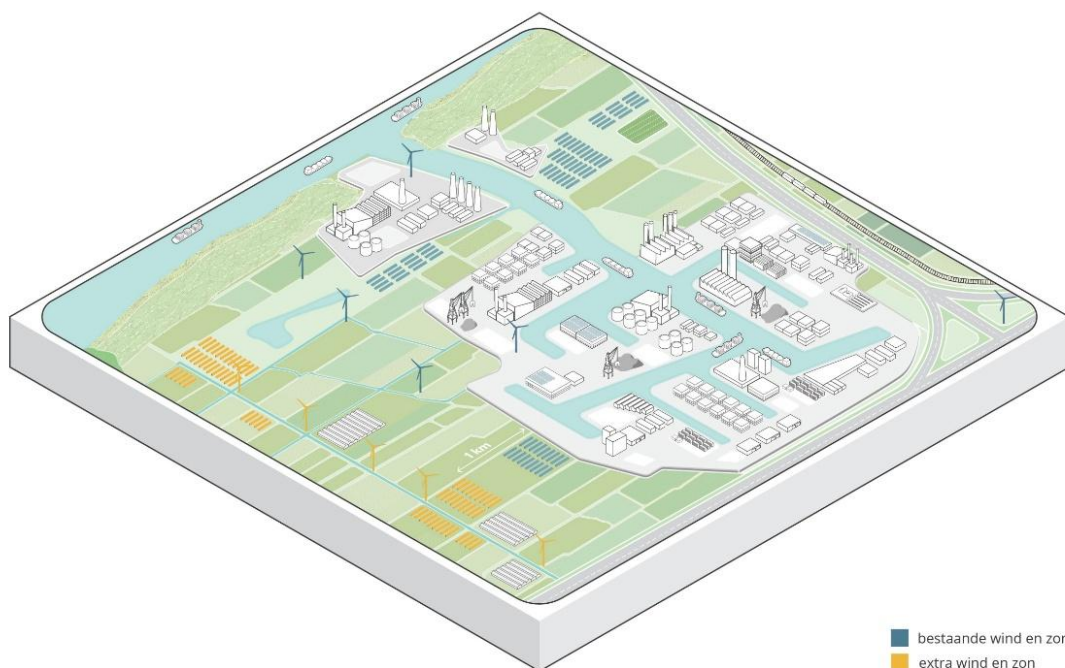
Grootschalig (HS/MS niveau)

Zon of wind bij vraag | Decentraal

1b. Zonne-energie of windenergie in de 1km-zone rond grote industrieclusters

Productietechniek	Bestaand (MW)	Theoretisch maximale potentieel (MW)	Potentieel na aftrek mogelijke beperking (beleid, radar of economisch) (MW)	Ondergrens maximaal potentieel (zon > 20MW, wind 16.8MW) (MW)	Potentieel na aftrek mogelijke beperking (beleid, radar of economisch) (MW)
Bestaand wind	692				
Bestaand zon op veld	226				
Potentieel wind turbine 5.6 MW		1.344	924	364	297
Zon op veld intensief		6.997	6.779	3.486	3.332
Zon op veld extensief		4.573	4.367	1.983	1.951

Zonne-energie of windenergie in de 1km-zone rond grote industrieclusters - Conceptueel Archetype





Zon of wind in grote industrieclusters

Zon op wind bij vraag (Decentraal)

Legenda

 Grootschalige industrieclusters

Basiskaart

Landgebruik

 Water

Administratieve grenzen

 Provincie

 Nationaal

 0 25 50 km

Figuur 41 – Paspoort en kaart archetype 'Hernieuwbare opwek bij cluster 6-industrie' (bron: Generation.Energy)

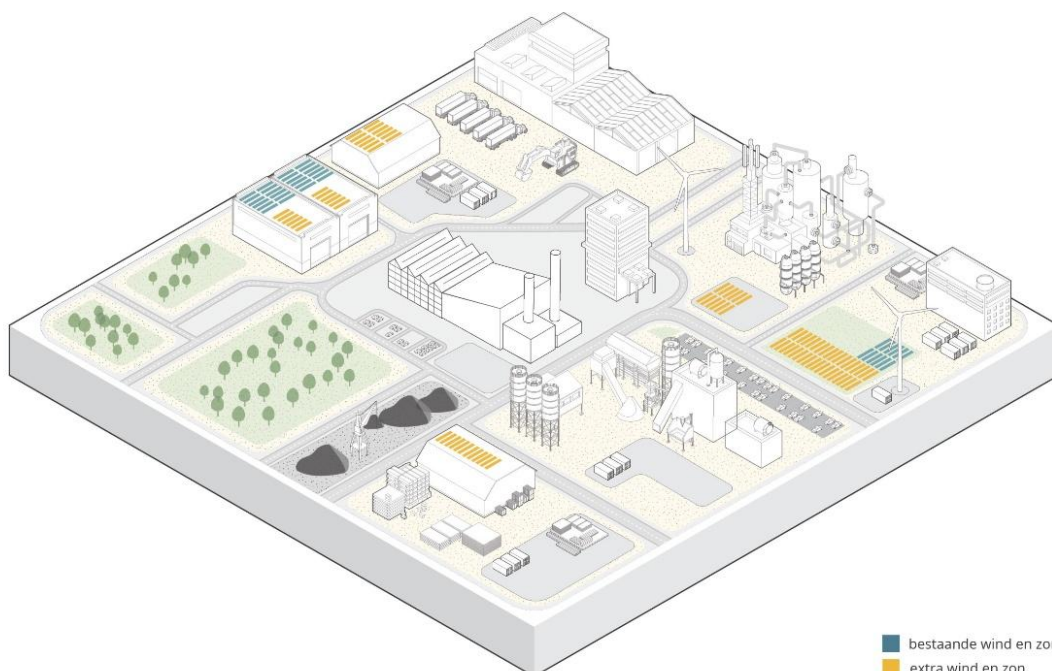
Zon of wind bij vraag Decentraal	
2a.	Zonne-energie of windenergie in cluster 6 industrie
<i>Dit archetype richt zich op zonne- en/of windopwekking binnen industriële gebieden van cluster 6, waar gedeeltelijk industrieel grondgebruik samenvalt met energieproductie. Installaties zijn doorgaans grootschalig en aangesloten op het midden- of hoogspanningsniveau, en kunnen bestaan uit zonne-energie, windenergie of een combinatie daarvan, afhankelijk van de lokale omstandigheden. Door de opwekking naast de industriële vraag te situeren, kan een aanzienlijk deel van de elektriciteit ter plaatse worden verbruikt, waardoor de behoefte aan export naar het bredere netwerk afneemt.</i> <i>Ruimtelijk bouwt het archetype voort op bestaande industriële terreinen en infrastructuur, vaak gebruikmakend van daken, open percelen of andere onderbenutte ruimtes, waardoor extra grondinname en conflicten met omliggende functies worden geminimaliseerd.</i> <i>Vanuit een energiesysteem perspectief vermindert deze co-locatie van aanbod en industriële vraag de belasting van het netwerk, maakt het synergieën mogelijk met flexibele industriële processen of opslag, en draagt het bij aan een kosteneffectieve en veerkrachtige energietransitie.</i>	
Combinatie met afname (en welke?)	
Ja, industrie	
Type locatie of gebied	
Deels industrieel	
Typische Schaalgrootte	
Grootschalig (HS/MS niveau)	

Zon of wind bij vraag | Decentraal

2a. Zonne-energie of windenergie in cluster 6 industrie

Productietechniek	Bestaand (MW)	Theoretisch maximale potentieel (MW)	Potentieel na aftrek mogelijke beperking (beleid, radar of economisch) (MW)	Ondergrens maximaal potentieel (zon > 20MW, wind 16.8MW) (MW)	Potentieel na aftrek mogelijke beperking (beleid, radar of economisch) (MW)
Bestaand wind	62				
Bestaand zon op veld	125				
Bestaand zon op dak	353				
Potentieel wind turbine 5.6 MW		134	118	0	0
Zon op veld intensief		1.537	416	92	0
Zon op veld extensief		78	29	0	0
Zon op gebouwen dak		2.977		2.222	

Zonne-energie of windenergie in cluster 6 industrie - Conceptueel Archetype



Zon of wind bij vraag | Decentraal

2b. Zonne-energie of windenergie in de 500m-zone rond cluster 6 industrie

Dit archetype richt zich op zonne- en/of windopwekking, niet alleen binnen industriële gebieden van cluster 6, maar ook in een straal van 500 m daaromheen. Installaties zijn doorgaans grootschalig en aangesloten op het midden- of hoogspanningsniveau, en kunnen bestaan uit zonne-energie, windenergie of een combinatie daarvan, afhankelijk van de lokale omstandigheden. Door de opwekking dicht bij de industriële vraag te situeren, kan een aanzienlijk deel van de elektriciteit ter plaatse worden verbruikt, waardoor de behoefte aan export naar het bredere netwerk afneemt.

Ruimtelijk strekt dit archetype zich uit naar omliggende grondgebruiksvormen, die vaak landbouwgrond, groenvoorzieningen en restlandschappen omvatten. Dit maakt extra opwekkingscapaciteit mogelijk buiten het industriële perceel zelf, terwijl de nabijheid van de energievraag behouden blijft. Zorgvuldige planning is nodig om conflicten met landbouw, ecologische waarden of recreatief gebruik te voorkomen.

Vanuit een energiesysteem perspectief vergroot dit archetype de flexibiliteit en het opwekkingspotentieel, terwijl het nauw verbonden blijft met de industriële vraag. De 500 m-buffer maakt grotere of gunstiger geplaatste installaties mogelijk, waardoor de productie van hernieuwbare energie wordt gemaximaliseerd, netbelasting wordt verminderd en een kosteneffectieve en veerkrachtige energietransitie wordt ondersteund.

Combinatie met afname (en welke?)

Ja, industrie

Type locatie of gebied

Landbouw, restlandschap, ander

Typische Schaalgrootte

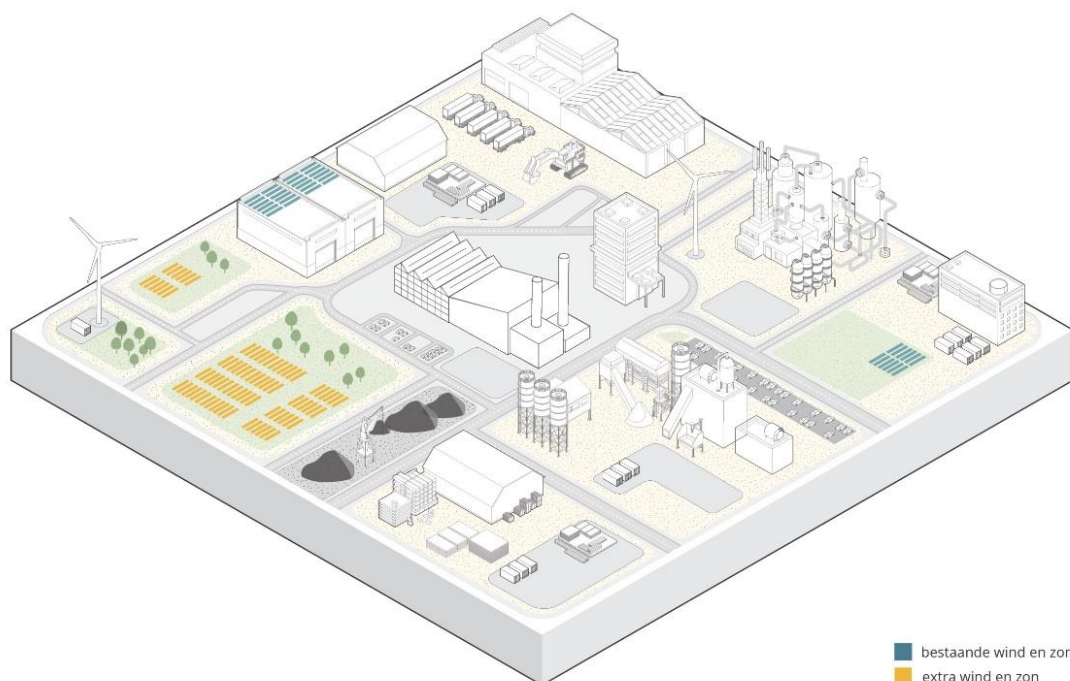
Grootschalig (HS/MS niveau)

Zon of wind bij vraag | Decentraal

2b. Zonne-energie of windenergie in de 500m-zone rond cluster 6 industrie

Productietechniek	Bestaand (MW)	Theoretisch maximale potentieel (MW)	Potentieel na aftrek mogelijke beperking (beleid, radar of economisch) (MW)	Ondergrens maximaal potentieel (zon > 20MW, wind 16.8MW) (MW)	Potentieel na aftrek mogelijke beperking (beleid, radar of economisch) (MW)
Bestaand wind	347				
Bestaand zon op veld	170				
Potentieel wind turbine 5.6 MW		454	190	45	0
Zon op veld intensief		5.136	4.985	1.533	1.441
Zon op veld extensief		1.670	1.495	664	511

Zonne-energie of windenergie in de 500m-zone rond cluster 6 industrie - Conceptueel Archetype





Zon of wind in cluster 6

Zon op wind bij vraag (Decentraal)

Legenda

Cluster 6-industrieën

Basiskaart

Landgebruik

Water

Administratieve grenzen

Provincie

Nationaal

0 25 50 km

Figuur 42 – Paspoort en kaart archetype 'Hernieuwbare opwek bij mobiliteitshubs' (bron: Generation.Energy)

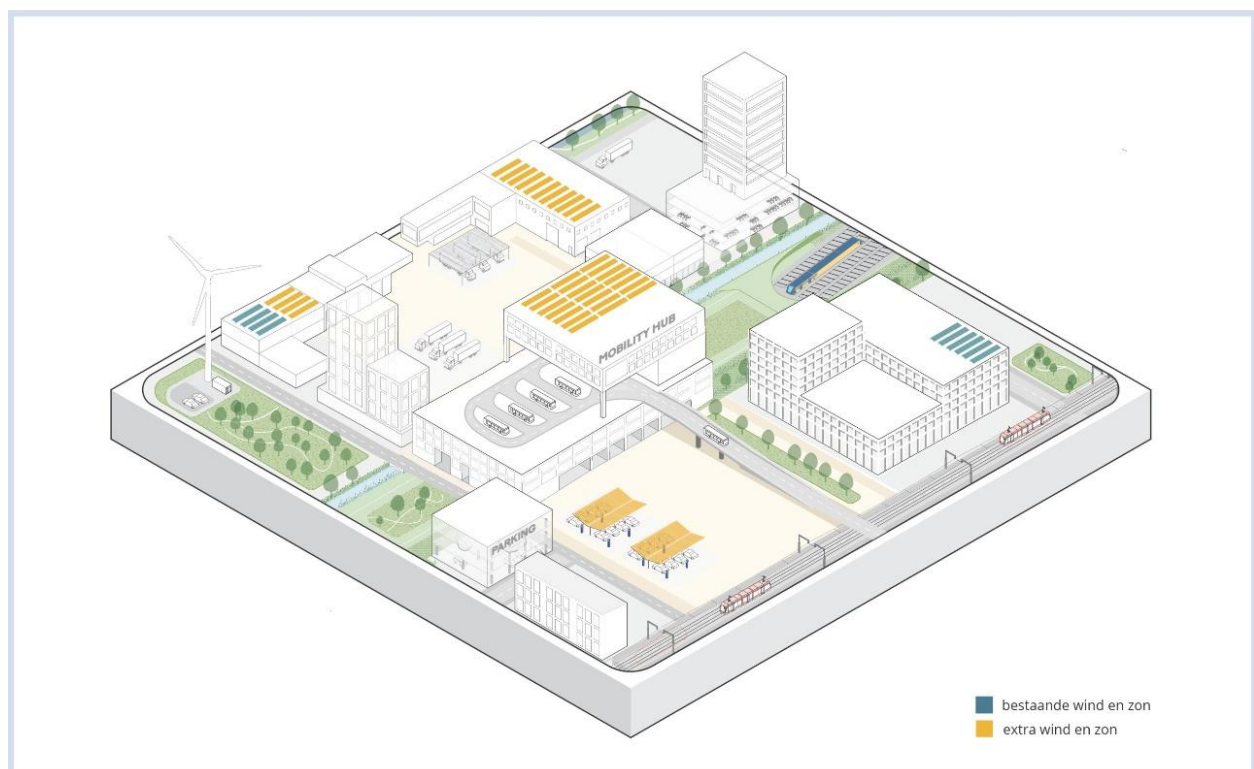
Zon of wind bij vraag Decentraal	
3a.	<i>Zonne-energie of windenergie in mobiliteitshubs</i>
<i>Dit archetype richt zich op zonne- en/of windopwekking bij mobiliteitshubs, waarbij de energieproductie nauw verbonden is met de lokale laadvraag voor elektrische voertuigen en andere vormen van duurzaam vervoer. Installaties zijn doorgaans middenschaal en aangesloten op het middenspanningsniveau, en kunnen bestaan uit zonne-energie, windenergie of een combinatie daarvan, afhankelijk van de locatie-specifieke omstandigheden. Door de opwekking direct op het verbruikspunt te situeren, kan een groot deel van de elektriciteit direct worden gebruikt voor laden, waardoor de afhankelijkheid van het bredere netwerk afneemt.</i> <i>Ruimtelijk is het archetype zeer variabel, wat de diversiteit van mobiliteitshubs weerspiegelt, zoals treinstations, busdepots, park-and-ridevoorzieningen of logistieke overslagpunten. Dit vraagt om flexibele plaatsing, vaak op daken, parkeer-canopies of aangrenzende open terreinen, waardoor bestaande infrastructuur efficiënt wordt benut en extra grondinname wordt geminimaliseerd.</i> <i>Vanuit een energiesysteemperspectief maakt dit archetype directe koppeling van hernieuwbaar aanbod en mobiliteitsvraag mogelijk, vermindert het de belasting van het netwerk tijdens piekladperiodes, en ondersteunt het een kosteneffectieve, lokaal geïntegreerde energietransitie. Door energie te produceren waar deze direct nodig is, kunnen mobiliteitshubs fungeren als gedecentraliseerde energieknooppunten, die bijdragen aan flexibiliteit en veerkracht in het bredere transport- en elektriciteitssysteem.</i>	
Combinatie met afname (en welke?)	
Ja, laadvraag mobiliteit	
Type locatie of gebied	
Wisselend	
Typische Schaalgrootte	
Middelgroot (MS-niveau)	

Zon of wind bij vraag | Decentraal

3a. Zonne-energie of windenergie in mobiliteitshubs

Productietechniek	Bestaand (MW)	Theoretisch maximale potentieel (MW)	Potentieel na aftrek mogelijke beperking (beleid, radar of economisch) (MW)	Ondergrens maximaal potentieel (zon > 20MW, wind 16.8MW) (MW)	Potentieel na aftrek mogelijke beperking (beleid, radar of economisch) (MW)
Bestaand wind	127				
Bestaand zon op veld	107				
Bestaand zon op dak	1.286				
Potentieel wind turbine 5.6 MW		360	302	36	36
Zon op veld intensief		3.860	1.124	1.003	247
Zon op veld extensief		426	189	161	76
Zon op gebouwen dak		10.468		8.003	

Zonne-energie of windenergie in mobiliteitshubs - Conceptueel Archetype



Zon of wind bij vraag | Decentraal

3b. Zonne-energie of windenergie in de 100m-zone rond mobiliteitshubs

Dit archetype richt zich op zonne- en/of windopwekking in een straal van 100 m rond mobiliteitshubs, waarmee de energieproductie wordt uitgebreid buiten de hub zelf, terwijl de koppeling met de lokale laadvraag behouden blijft. Installaties zijn doorgaans middenschaal en aangesloten op het middenspanningsniveau, en kunnen bestaan uit zonne-energie, windenergie of een combinatie daarvan, afhankelijk van de locatie-specifieke omstandigheden. Door de opwekking in de nabijheid te situeren, kan een aanzienlijk deel van de elektriciteit nog steeds direct worden gebruikt voor het laden van voertuigen, waardoor export naar het bredere netwerk wordt beperkt.

Ruimtelijk omvat de 100 m-buffer vaak aangrenzende straten, parkeerterreinen, kleine groenvoorzieningen en service- of commerciële percelen, afhankelijk van de omgeving van de hub. Dit maakt extra opwekkingscapaciteit mogelijk via zonne-canopies, kleinschalige windturbines of grondgebonden PV-installaties, terwijl de installaties binnen handbereik van de energievraag van de hub blijven. Zorgvuldige planning zorgt voor minimale belemmering van de verkeerscirculatie, veiligheid en openbaar gebruik.

Vanuit een energiesysteemperspectief vergroot dit archetype de flexibiliteit en het opwekkingspotentieel ten opzichte van oplossingen uitsluitend op locatie. De 100 m-buffer maakt geoptimaliseerde plaatsing en iets grotere installaties mogelijk, waardoor de productie van hernieuwbare energie verbetert, terwijl de sterke koppeling tussen aanbod en mobiliteitsvraag behouden blijft. Dit ondersteunt een lokaal geïntegreerde, veerkrachtige en kosteneffectieve energietransitie voor de transportsector.

Combinatie met afname (en welke?)

Ja, laadvraag mobiliteit

Type locatie of gebied

Wisselend

Typische Schaalgrootte

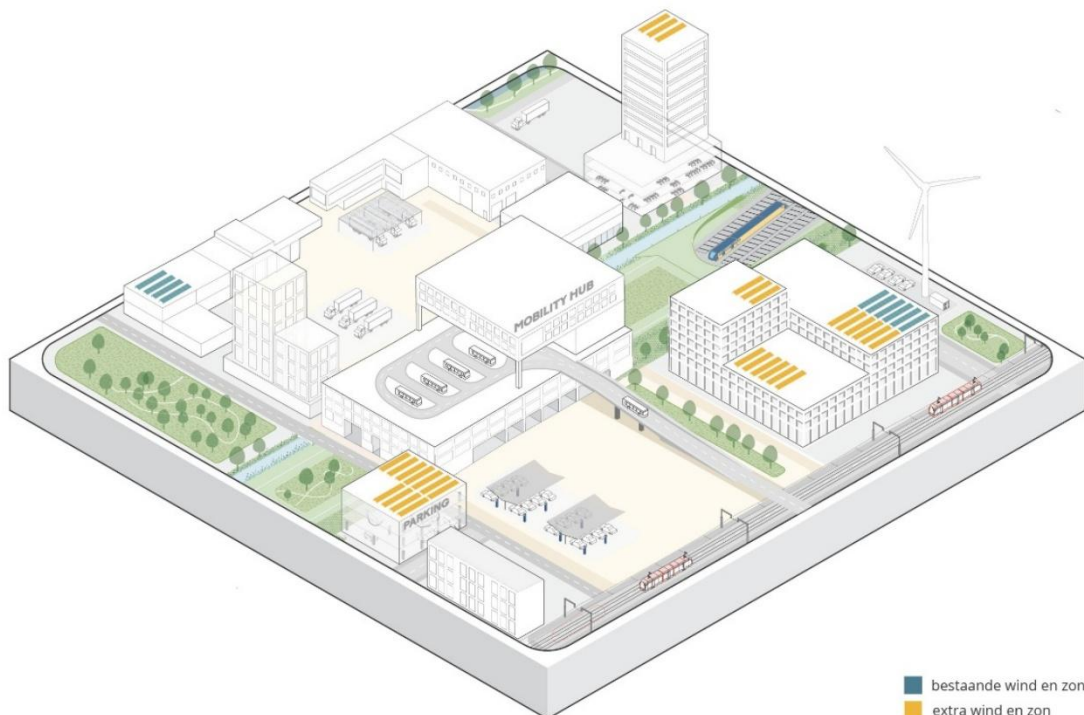
Middelgroot (MS-niveau)

Zon of wind bij vraag | Decentraal

3b. Zonne-energie of windenergie in de 100m-zone rond mobiliteitshubs

Productietechniek	Bestaand (MW)	Theoretisch maximale potentieel (MW)	Potentieel na aftrek mogelijke beperking (beleid, radar of economisch) (MW)	Ondergrens maximaal potentieel (zon > 20MW, wind 16.8MW) (MW)	Potentieel na aftrek mogelijke beperking (beleid, radar of economisch) (MW)
Bestaand wind	17				
Bestaand zon op veld	167				
Potentieel wind turbine 5.6 MW		518	58	0	0
Zon op veld intensief		4.757	4.609	1.529	1.438
Zon op veld extensief		1.929	1.775	625	539

Zonne-energie of windenergie in de 100m-zone rond mobiliteitshubs - Conceptueel Archetype





Zon of wind in mobiliteitshub bedrijventerrein

Zon op wind bij vraag (Decentraal)

Legenda

■ Bedrijventerreinen met mobiliteitshubs

Basiskaart

Landgebruik

■ Water

Administratieve grenzen

Provincie

Nationaal



Figuur 43 – Paspoort en kaart archetype 'Hernieuwbare opwek bij bedrijventerreinen' (bron: Generation.Energy)

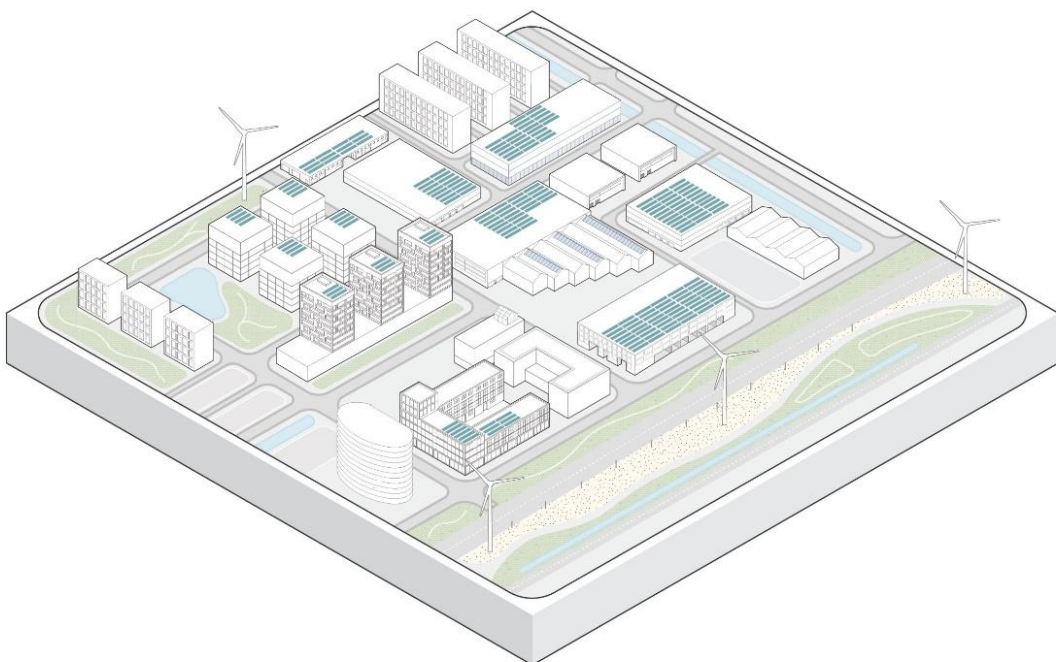
Zon of wind bij vraag Decentraal	
4.	Zonne-energie of windenergie in bedrijventerrein (collectief)
<i>Dit archetype richt zich op zonne- en/of windopwekking op bedrijventerreinen, waarbij installaties collectief worden georganiseerd om te voorzien in de elektriciteitsvraag van meerdere bedrijven. Installaties zijn doorgaans middenschaal en aangesloten op het middenspanningsniveau, en kunnen bestaan uit zonne-energie, windenergie of een combinatie daarvan, afhankelijk van de locatie-specifieke omstandigheden. Door de opwekking binnen of nabij het bedrijventerrein te situeren, kan een aanzienlijk deel van de elektriciteit ter plaatse worden gebruikt, waardoor de afhankelijkheid van het bredere netwerk afneemt.</i> <i>Ruimtelijk bouwt het archetype voort op de bestaande infrastructuur van het bedrijventerrein en omliggende terreinen, die kunnen bestaan uit parkeerplaatsen, daken, kleine groenvoorzieningen en restgronden. Collectieve organisatie maakt het mogelijk dat meerdere bedrijven ruimte delen, de plaatsing optimaliseren en profiteren van schaalvoordelen, terwijl conflicten met ander grondgebruik worden geminimaliseerd.</i> <i>Vanuit een energiesysteem perspectief maakt dit archetype gecoördineerde energieopwekking en -afname binnen een lokaal cluster van bedrijven mogelijk, waardoor de efficiëntie en flexibiliteit van het netwerk verbeteren. Door de productie af te stemmen op de geaggregeerde vraag van meerdere bedrijven, worden piekbelastingen verminderd, kosteneffectieve inzet van hernieuwbare energie mogelijk gemaakt en een veerkrachtige, lokaal geïntegreerde energietransitie ondersteund.</i>	
Combinatie met afname (en welke?)	
Ja, elektriciteit-vraag bedrijven	
Type locatie of gebied	
Bedrijventerreinen en omgeving	
Typische Schaalgrootte	
Middelgroot (MS - niveau)	

Zon of wind bij vraag | Decentraal

4. Zonne-energie of windenergie in bedrijventerrein (collectief)

Productietechniek	Bestaand (MW)	Theoretisch maximale potentieel (MW)	Potentieel na aftrek mogelijke beperking (beleid, radar of economisch) (MW)	Ondergrens maximaal potentieel (zon > 20MW, wind 16.8MW) (MW)	Potentieel na aftrek mogelijke beperking (beleid, radar of economisch) (MW)
Bestaand wind	407				
Bestaand zon op veld	431				
Bestaand zon op dak	2.103				
Potentieel wind turbine 5.6 MW		781	622	112	112
Zon op veld intensief		16.410	5.309	5.676	1.594
Zon op veld extensief		3.865	1.867	2.048	952
Zon op gebouwen dak		17.378		12.532	

Zonne-energie of windenergie in bedrijventerrein (collectief) - Conceptueel Archetype





Zon of wind in bedrijventerrein overig

Zon op wind bij vraag (Decentraal)

Legenda

Overige bedrijventerreinen

Basiskaart

Landgebruik

Water

Administratieve grenzen

Provincie

Nationaal

N 0 25 50 km

Figuur 44 – Paspoort en kaart archetype 'Zonne-energie op dak bij mkb-bedrijven en maatschappelijk vastgoed' (bron: Generation.Energy)

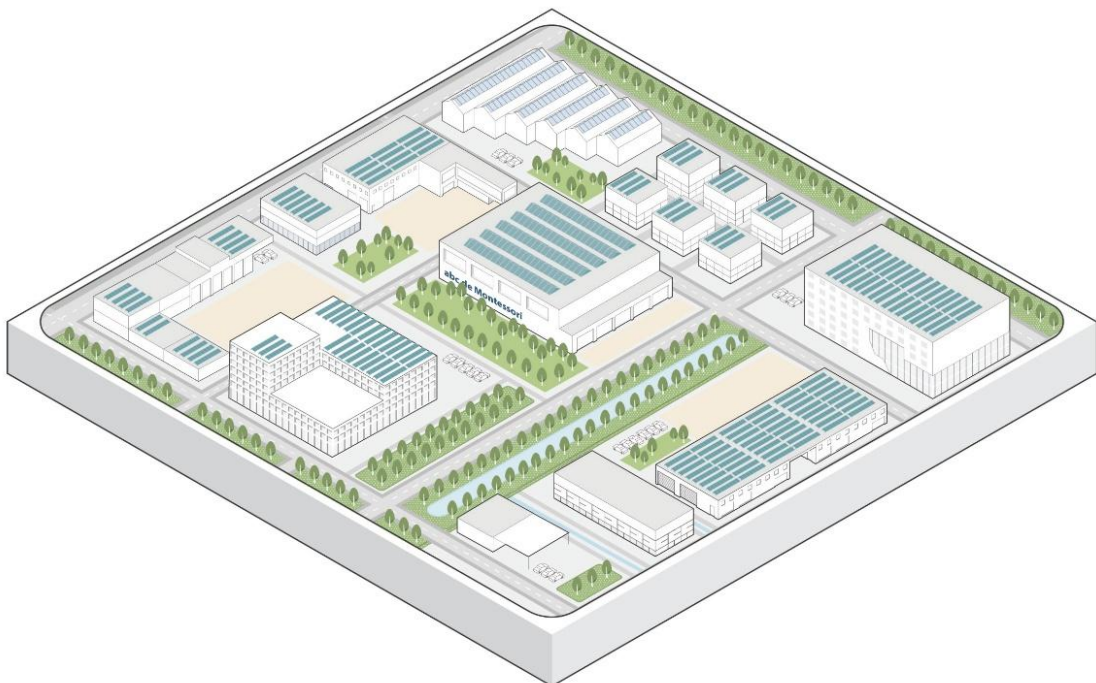
Zon of wind bij vraag Decentraal	
5.	Zonne-energie op daken van MKB en maatschappelijk vastgoed (individueel)
<i>Dit archetype richt zich op zonne-energie-installaties op de daken van individuele MKB-bedrijven en maatschappelijk vastgoed, zoals scholen, sportaccommodaties, zorggebouwen en buurtcentra. Installaties zijn doorgaans kleinschalig en aangesloten achter de meter, waarbij ze rechtstreeks voorzien in de elektriciteitsvraag van het gebouw zelf. Door elektriciteit op het verbruikspunt op te wekken, kan een groot deel van de productie ter plaatse worden gebruikt, waardoor teruglevering aan het openbare net wordt geminimaliseerd.</i> <i>Ruimtelijk maakt het archetype gebruik van bestaande dakoppervlakken binnen bedrijventerreinen en omliggende stedelijke gebieden. Deze daken zijn vaak plat, structureel geschikt en grotendeels onbenut, waardoor energieopwekking mogelijk is zonder extra grondinname en met minimale ruimtelijke impact. Omdat de installaties individueel en niet collectief zijn, kan implementatie gefaseerd en afgestemd op het specifieke gebouw en de gebruiker plaatsvinden.</i> <i>Vanuit een energiesysteemperspectief is dit archetype belangrijk omdat het directe koppeling van vraag en aanbod achter de meter mogelijk maakt, de druk op lokale netten vermindert en de noodzaak voor netversterking voorkomt. Op grote schaal draagt grootschalige dakzonne-energie op MKB- en maatschappelijk vastgoed aanzienlijk bij aan decentrale opwekking, verhoogt het de systeemweerbaarheid en vormt het een kosteneffectieve bouwsteen van de energietransitie, verankerd in dagelijkse economische en maatschappelijke functies.</i>	
Combinatie met afname (en welke?)	
Ja, elektriciteit-vraag bedrijven	
Type locatie of gebied	
Bedrijventerreinen en omgeving	
Typische Schaalgrootte	
Kleinschalig (achter de meter)	

Zon of wind bij vraag | Decentraal

5. Zonne-energie op daken van MKB en maatschappelijk vastgoed (individueel)

Productietechniek	Bestaand (MW)	Theoretisch maximale potentieel (MW)	Potentieel na aftrek mogelijke beperking (beleid, radar of economisch) (MW)	Ondergrens maximaal potentieel (zon > 20MW, wind 16.8MW) (MW)	Potentieel na aftrek mogelijke beperking (beleid, radar of economisch) (MW)
Bestaand zon op dak	6.375				
Zon op gebouwen dak		10.444		8.369	

Zonne-energie op daken van MKB en maatschappelijk vastgoed (individueel) - Conceptueel Archetype





Zon of daken van MKB en maatschappelijk vastgoed

Zon op wind bij vraag (Decentraal)

Legenda

Gebouwfunctie:

- Industrie
- Utiliteit

Basiskaart

Landgebruik

■ Water

Administratieve grenzen

Provincie

Nationaal



Figuur 45 – Paspoort en kaart archetype 'Zonne-energie op dak bij woningen' (bron: Generation.Energy)

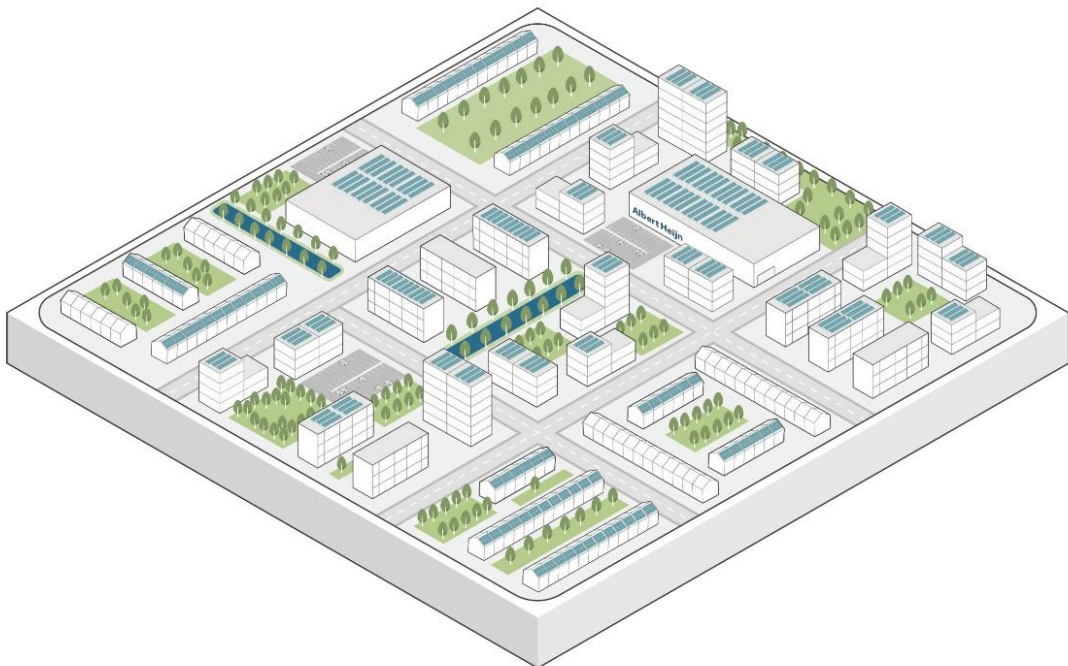
Zon of wind bij vraag Decentraal	
6.	Zonne-energie op dak op woningen
<i>Dit archetype richt zich op zonne-energie-installaties op de daken van individuele woningen, direct gekoppeld aan de elektriciteitsvraag van huishoudens. Installaties zijn doorgaans kleinschalig en aangesloten achter de meter, waarbij ze stroom leveren voor huishoudelijk gebruik zoals apparaten, warmtepompen en elektrische voertuigen. Door elektriciteit thuis op te wekken, kan een aanzienlijk deel van de productie ter plaatse worden gebruikt, waardoor teruglevering aan het distributienet wordt beperkt.</i> <i>Ruimtelijk is het archetype ingebed in woonwijken, waarbij gebruik wordt gemaakt van bestaande schuine of platte daken van eengezinswoningen en appartementengebouwen. Oriëntatie, dakoppervlakte en schaduwvorming bepalen de geschiktheid, maar over het geheel genomen maakt het archetype gebruik van reeds bebouwde oppervlakken, waardoor geen extra grondinname nodig is en de ruimtelijke impact minimaal blijft.</i> <i>Vanuit een energiesysteemperspectief vormt zonne-energie op residentiële daken een hoeksteen van decentrale energieopwekking. Productie achter de meter vermindert piekvraag op het netwerk, vergroot lokaal zelfverbruik en versterkt de systeemweerbaarheid door diversificatie van het aanbod. Op grote schaal speelt dit archetype een cruciale rol bij het betrekken van huishoudens bij de energietransitie, terwijl het een kosteneffectieve en ruimtelijk efficiënte bijdrage levert aan de productie van hernieuwbare elektriciteit.</i>	
Combinatie met afname (en welke?)	
Ja, vraag van woningen	
Type locatie of gebied	
Woonwijken	
Typische Schaalgrootte	
Kleinschalig (achter de meter, kleinverbruikers)	

Zon of wind bij vraag | Decentraal

6. Zonne-energie op dak op woningen

Productietechniek	Bestaand (MW)	Theoretisch maximale potentieel (MW)	Potentieel na aftrek mogelijke beperking (beleid, radar of economisch) (MW)	Ondergrens maximaal potentieel (zon > 20MW, wind 16.8MW) (MW)	Potentieel na aftrek mogelijke beperking (beleid, radar of economisch) (MW)
Bestaand zon op dak (particulier)	9.419				
Bestaand zon op dak (coöorporatie)	2.151				
Zon op gebouwen dak (particulier)		87.691		47.855	
Zon op gebouwen dak (coöorporatie)		13.556		9.119	

Zonne-energie op dak op woningen - Conceptueel Archetype





Zon op dak op woningen

Zon op wind bij vraag (Decentraal)

Legenda

Gebouwfunctie:

- Corporatiewoningen
- Overige woningen

Basiskaart

Landgebruik

■ Water

Administratieve grenzen

Provincie

Nationaal



Figuur 46 – Paspoort en kaart archetype 'Zonne-energie op gevels' (bron: Generation.Energy)

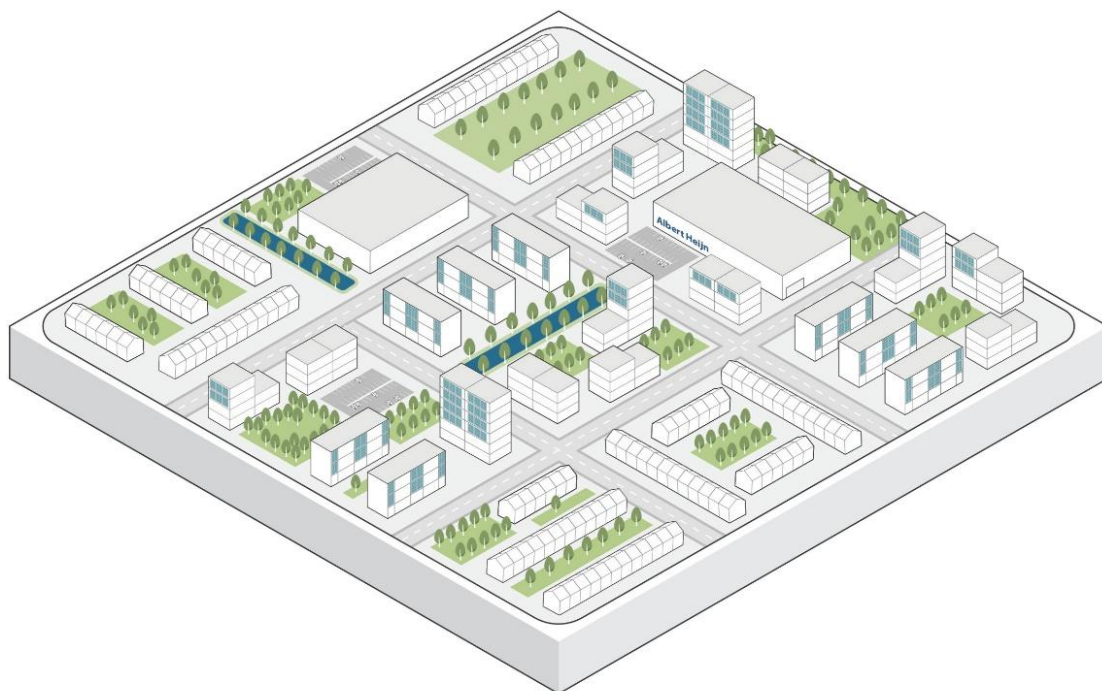
Zon of wind bij vraag Decentraal	
7.	Zonne-energie op gevels
<i>Dit archetype richt zich op zonne-energie-installaties geïntegreerd in gebouwgevels in woonwijken en bedrijventerreinen, waarbij elektriciteit direct wordt geleverd aan woningen en bedrijven. Installaties zijn doorgaans kleinschalig en aangesloten achter de meter, en voorzien in de lokale elektriciteitsvraag voor apparaten, verlichting en steeds vaker voor elektrische verwarming en mobiliteit. Hoewel gevelgebonden zonne-energie per vierkante meter doorgaans lagere opbrengsten levert dan dakinstallaties, levert het energie op complementaire momenten ten opzichte van zonne-energie op daken.</i> <i>Ruimtelijk maakt het archetype gebruik van verticale gebouwoppervlakken, waaronder gevels van appartementen, kantoren, commerciële gebouwen en gemengd gebruik. Oost-, west- en zuidgevels zijn hierbij vooral relevant, met name in dichtbebouwde stedelijke gebieden waar dakruimte beperkt is. Door gebruik te maken van bestaande gebouwschillen maakt dit archetype energieopwekking mogelijk zonder extra grondinname en met minimale impact op de openbare ruimte.</i> <i>Vanuit een energiesysteem perspectief draagt zonne-energie op gevels bij aan diversiteit en temporele spreiding van decentrale elektriciteitsopwekking. Door elektriciteit te produceren buiten de middaggolf die typisch is voor dakzonne-energie, helpt het lokale productieprofielen te verzachten en het zelfverbruik achter de meter te vergroten. Op grote schaal kan dit archetype bijdragen aan de versterking van de systeemweerstand, het benutbare hernieuwbare potentieel in dichtbebouwde gebieden vergroten en een belangrijk aanvullend bouwblok vormen in een ruimtelijk efficiënte energietransitie.</i>	
Combinatie met afname (en welke?)	
Ja, vraag van woningen en bedrijven	
Type locatie of gebied	
Woonwijken en bedrijventerreinen	
Typische Schaalgrootte	
Kleinschalig (achter de meter, kleinverbruikers)	

Zon of wind bij vraag | Decentraal

7. Zonne-energie op gevels

Productietechniek	Bestaand (MW)	Theoretisch maximale potentieel (MW)	Potentieel na aftrek mogelijke beperking (beleid, radar of economisch) (MW)	Ondergrens maximaal potentieel (zon > 20MW, wind 16.8MW) (MW)	Potentieel na aftrek mogelijke beperking (beleid, radar of economisch) (MW)
Bestaand	?...				
Utiliteit en industrie		98.392		39.357	
Grondgebonden woningen		67.645		13.529	
Gestapelde woningen		27.667		11.067	

Zonne-energie op gevels - Conceptueel Archetype





Zon op gevels

Zon op wind bij vraag (Decentraal)

Legenda

Gebouwfunctie:

- Industrie
- Utiliteit
- Woning hoogbouw
- Woning laagbouw

Basiskaart

Landgebruik

■ Water

Administratieve grenzen

Provincie

Nationaal



Figuur 47 – Paspoort en kaart archetype 'Erfmolens' (bron: Generation.Energy)

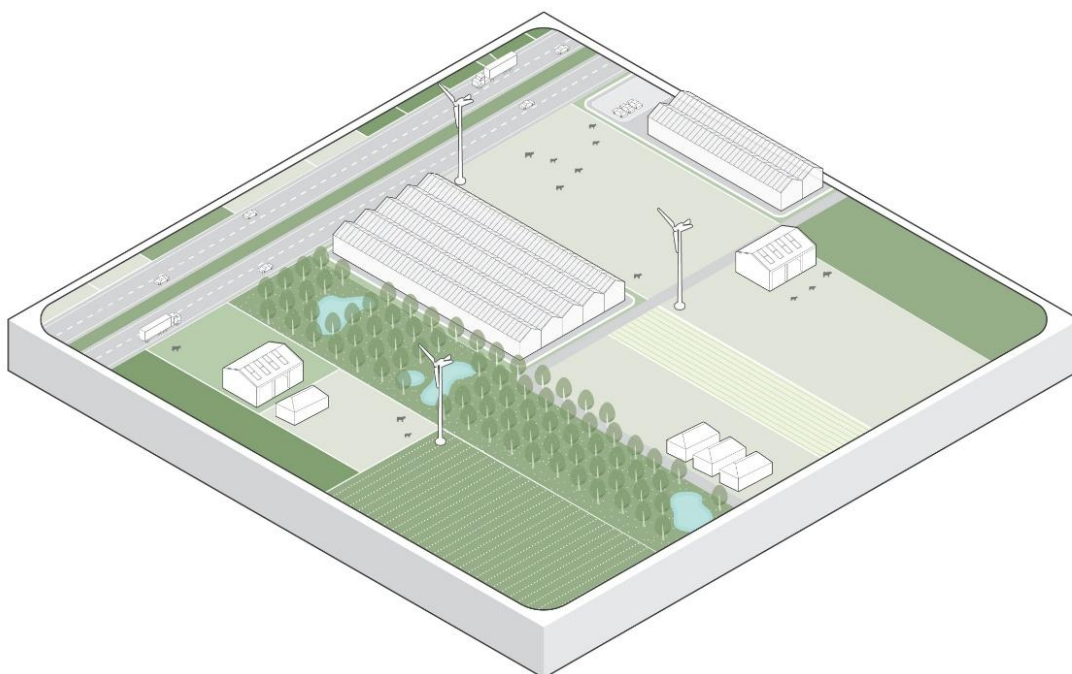
Zon of wind bij vraag Decentraal	
8.	Erfmolens
<i>Dit archetype richt zich op kleine tot middenschaal windturbines (erfmolens) op landbouwpercelen, die rechtstreeks voorzien in de elektriciteitsvraag van boerderijen. Erfmolens zijn doorgaans achter de meter aangesloten en dienen voornamelijk voor het eigen verbruik, zoals ventilatie, koeling, irrigatie, verwerking en steeds vaker geëlektrificeerde machines. Door elektriciteit dicht bij de vraag te produceren, kan een groot deel van de opgewekte energie ter plaatse worden gebruikt, waardoor teruglevering aan het openbare net wordt beperkt.</i> <i>Ruimtelijk is het archetype ingebed in landbouwlandschappen, waarbij de turbines worden geplaatst op erven, langs toegangswegen of nabij landbouwgebouwen. Hun beperkte hoogte en capaciteit in vergelijking met grote windturbines maakt integratie binnen bestaande boerderijstructuren mogelijk, terwijl het open karakter van het landschap behouden blijft. De plaatsing wordt vaak beperkt door afstanden tot woningen, landschapswaarden en regelgeving op het gebied van luchtvaart en natuur, waardoor zorgvuldige afstemming op lokaal niveau nodig is.</i> <i>Vanuit een energiesysteemperspectief maken erfmolens directe koppeling van windopwekking en landbouwelijke elektriciteitsvraag mogelijk, wat bijdraagt aan decentrale en veerkrachtige energiesystemen. Ze verminderen piekvraag op landelijke netten, verlagen de energiekosten voor boeren en ondersteunen de elektrificatie van landbouwprocessen. Op grote schaal mobiliseert dit archetype een breed verspreid maar aanzienlijk hernieuwbaar potentieel, waardoor het een belangrijk bouwblok vormt in een gebalanceerde en ruimtelijk sensitieve energietransitie.</i>	
Combinatie met afname (en welke?)	
Ja, vraag landbouw	
Type locatie of gebied	
Landbouwgebied	
Typische Schaalgrootte	
Kleinschalig of middelgroot (vaak achter de meter)	

Zon of wind bij vraag | Decentraal

8. *Erfmolens*

Productietechniek	Bestaand (MW)	Theoretisch maximale potentieel (MW)	Potentieel na aftrek mogelijke beperking (beleid, radar of economisch) (MW)	Ondergrens maximaal potentieel (zon > 20MW, wind 16.8MW) (MW)	Potentieel na aftrek mogelijke beperking (beleid, radar of economisch) (MW)
Bestaand	?...				
Erfmolens		6.543			

Erfmolens - Conceptueel Archetype





Erfmolens

Zon op wind bij vraag (Decentraal)

Legenda

 Boerenerven voor kleine windturbines

Basiskaart

Landgebruik

 Water

Administratieve grenzen

 Provincie

 Nationaal



Figuur 48 – Paspoort en kaart archetype 'Solar carports' (bron: Generation.Energy)

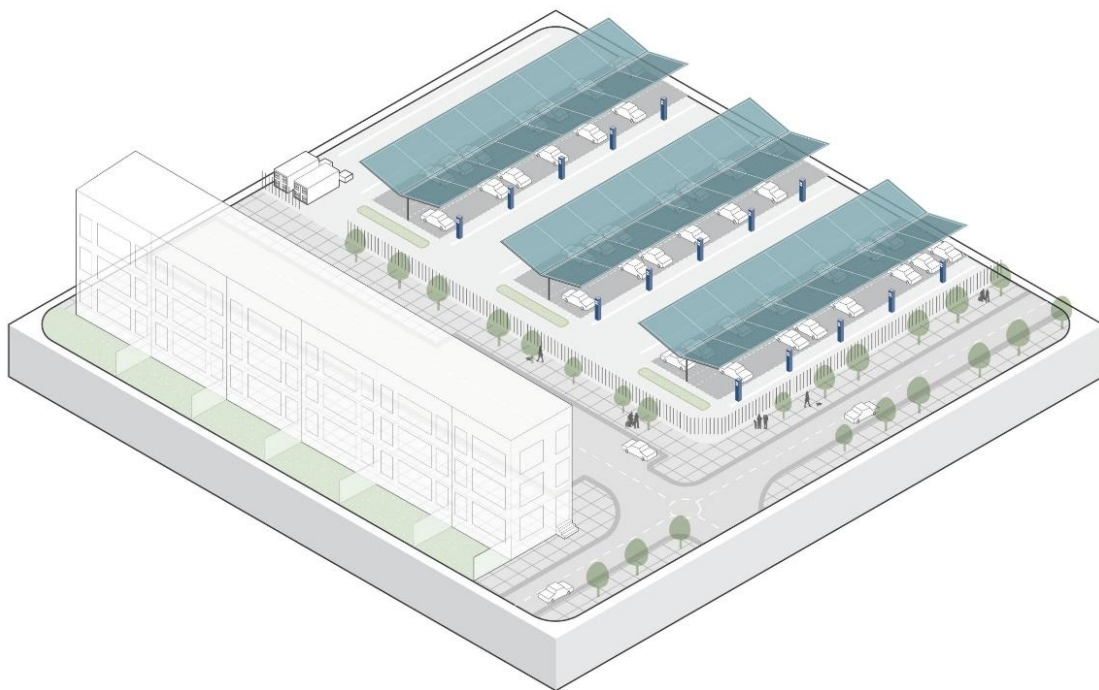
Zon of wind bij vraag Decentraal	
9.	Zonne-energie bij parkeerplaatsen (solar carports)
<i>Dit archetype richt zich op zonne-energie-installaties boven parkeerterreinen in de vorm van zonnecarports, direct gekoppeld aan de lokale laadvraag voor elektrische voertuigen. Installaties kunnen variëren van klein- tot middenschaal en zijn doorgaans aangesloten op laag- of middenspanning, afhankelijk van de grootte van de parkeerfaciliteit en de laadinfrastructuur. Door opwekking te combineren met mobiliteitsgerelateerde elektriciteitsvraag, kan een aanzienlijk deel van de geproduceerde elektriciteit lokaal worden gebruikt.</i> <i>Ruimtelijk bouwt het archetype voort op bestaande parkeervoorzieningen, zoals parkeerterreinen bij winkelcentra, kantoren, publieke voorzieningen, mobiliteitshubs en bedrijventerreinen. Zonnecarports maken efficiënt gebruik van reeds verharde oppervlakken, bieden extra voordelen zoals schaduw en weersbescherming, en voorkomen concurrentie met ander grondgebruik. Integratie omvat vaak laadpunten, batterijopslag en slim energiemanagement.</i> <i>Vanuit een energiesysteem perspectief maakt dit archetype directe koppeling van hernieuwbare opwekking en elektrische mobiliteit mogelijk, vermindert het piekbelastingen op het netwerk en verbetert het lokaal zelfverbruik. Door elektriciteit op te wekken op plekken en momenten waarop voertuigen geparkeerd staan, ondersteunen zonnecarports flexibele laadstrategieën en dragen ze bij aan een kosteneffectieve, ruimtelijk efficiënte en veerkrachtige energietransitie.</i>	
Combinatie met afname (en welke?)	
Ja, laadvraag	
Type locatie of gebied	
Zon bij parkeerplaatsen (solar carports)	
Typische Schaalgrootte	
Kleinschalig (LS) of middelgroot (MS)	

Zon of wind bij vraag | Decentraal

9. Zonne-energie bij parkeerplaatsen (solar carports)

Productietechniek	Bestaand (MW)	Theoretisch maximale potentieel (MW)	Potentieel na aftrek mogelijke beperking (beleid, radar of economisch) (MW)	Ondergrens maximaal potentieel (zon > 20MW, wind 16.8MW) (MW)	Potentieel na aftrek mogelijke beperking (beleid, radar of economisch) (MW)
Bestaand	?...				
Carports		10.164			

Zonne-energie bij parkeerplaatsen (solar carports) - Conceptueel Archetype





Zon bij carports

Zon op wind bij vraag (Decentraal)

Legenda

■ Carports

Basiskaart

Landgebruik

■ Water

Administratieve grenzen

Provincie

Nationaal

N 0 25 50 km

Figuur 49 – Paspoort en kaart archetype 'Agri-pv, zonne-energie op landbouwgrond en windenergie op landbouwgrond' (bron: Generation.Energy)

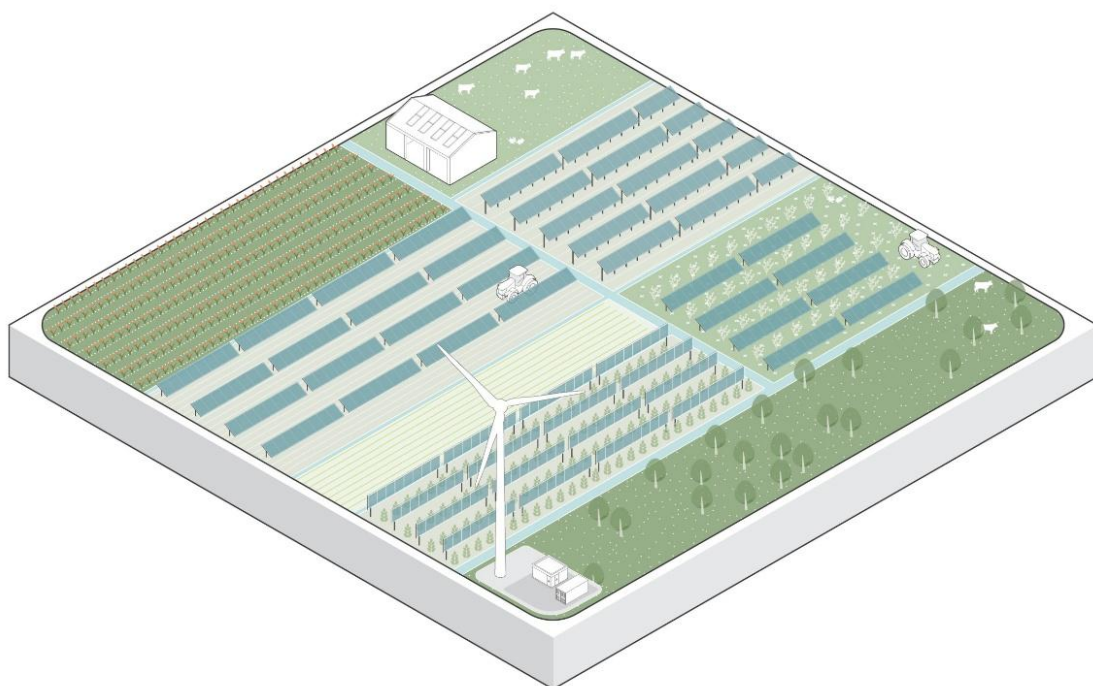
Losse wind of zonneparken	
10.	Zonneweide en/of windmolens op landbouwgrond
<i>Dit archetype richt zich op grondgebonden zonneparken, AgriPV-systemen en windturbines op landbouwgrond, op middelgrote tot grote schaal en doorgaans aangesloten op midden- of hoogspanningsniveau. Het omvat bestaande windturbines en zonneparken, evenals potentiële windturbines (van 4,2 MW) en potentiële zonne-installaties op (1) extensieve akkerbouwgrond, (2) extensief grasland en (3) fruitteeltgebieden. Koppeling met lokale vraag is mogelijk, maar niet altijd direct, afhankelijk van de nabijheid van afnameclusters.</i> <i>Voor zonne-energie op landbouwgrond wordt een onderscheid gemaakt tussen reguliere grondgebonden zonnenvelden (zonneweide) en AgriPV-systemen. Reguliere zonneparken gaan meestal gepaard met volledige of nagenoeg volledige omzetting van het grondgebruik en zijn het meest toepasbaar op extensieve akkerbouw- of graslandpercelen waar de agrarische productiviteit relatief laag is of waar tijdelijke functiewijziging acceptabel is. Deze systemen maximaliseren het elektriciteitsrendement per hectare en zijn voornamelijk productiegericht.</i> <i>AgriPV daarentegen is ontworpen om dubbel grondgebruik mogelijk te maken, zodat landbouwactiviteiten onder of tussen verhoogde zonnepanelen kunnen doorgaan. Deze configuratie is vooral relevant voor fruitteelt (waar panelen als beschermstructuur kunnen functioneren) en voor extensieve grasland- of akkerbouwsystemen die zich kunnen aanpassen aan gewijzigde lichtomstandigheden. AgriPV levert over het algemeen een lager elektriciteitsrendement per hectare op dan conventionele zonnenvelden, maar behoudt de agrarische opbrengst en kan bijdragen aan klimaatadaptatie, bodembescherming en waterretentie.</i> <i>Ruimtelijk is het archetype ingebed in open landbouwlandschappen, waar grotere percelen efficiënte installatie en netaansluiting mogelijk maken. De focus op 4,2 MW-windturbines weerspiegelt een hedendaagse, hoogrenderende turbinemaat die de opbrengst per locatie maximaliseert en tegelijkertijd het totaal aantal benodigde turbines beperkt. Reguliere zonnenvelden geven prioriteit aan compacte en efficiënte lay-outs, terwijl AgriPV-systemen meer afstand en structurele aanpassing vereisen, wat resulteert in een meer geïntegreerde maar ruimtelijk gedifferentieerde landschapsconfiguratie.</i> <i>Vanuit een energiesysteemperspectief vertegenwoordigt dit archetype een substantieel en schaalbaar potentieel voor hernieuwbare energie, dat aanzienlijk bijdraagt aan regionale en nationale productiedoelstellingen. Reguliere zonneparken leveren een hoge opbrengst per hectare en versterken de bulkvoorziening van hernieuwbare energie op MS- of HS-niveau. AgriPV voegt extra capaciteit toe terwijl de agrarische functie behouden blijft, wat bijdraagt aan een multifunctionele en maatschappelijk acceptabele transitie. Samen met grootschalige windopwekking leveren deze configuraties bulkhernieuwbare capaciteit die essentieel is voor het balanceren van decentrale productie elders in het systeem en voor het waarborgen van een robuuste en gediversifieerde energiemix.</i>	
Combinatie met afname (en welke?)	
Mogelijk	
Type locatie of gebied	
Landbouwgebied	
Typische Schaalgrootte	
Middelgroot of groot (MS of HS niveau)	

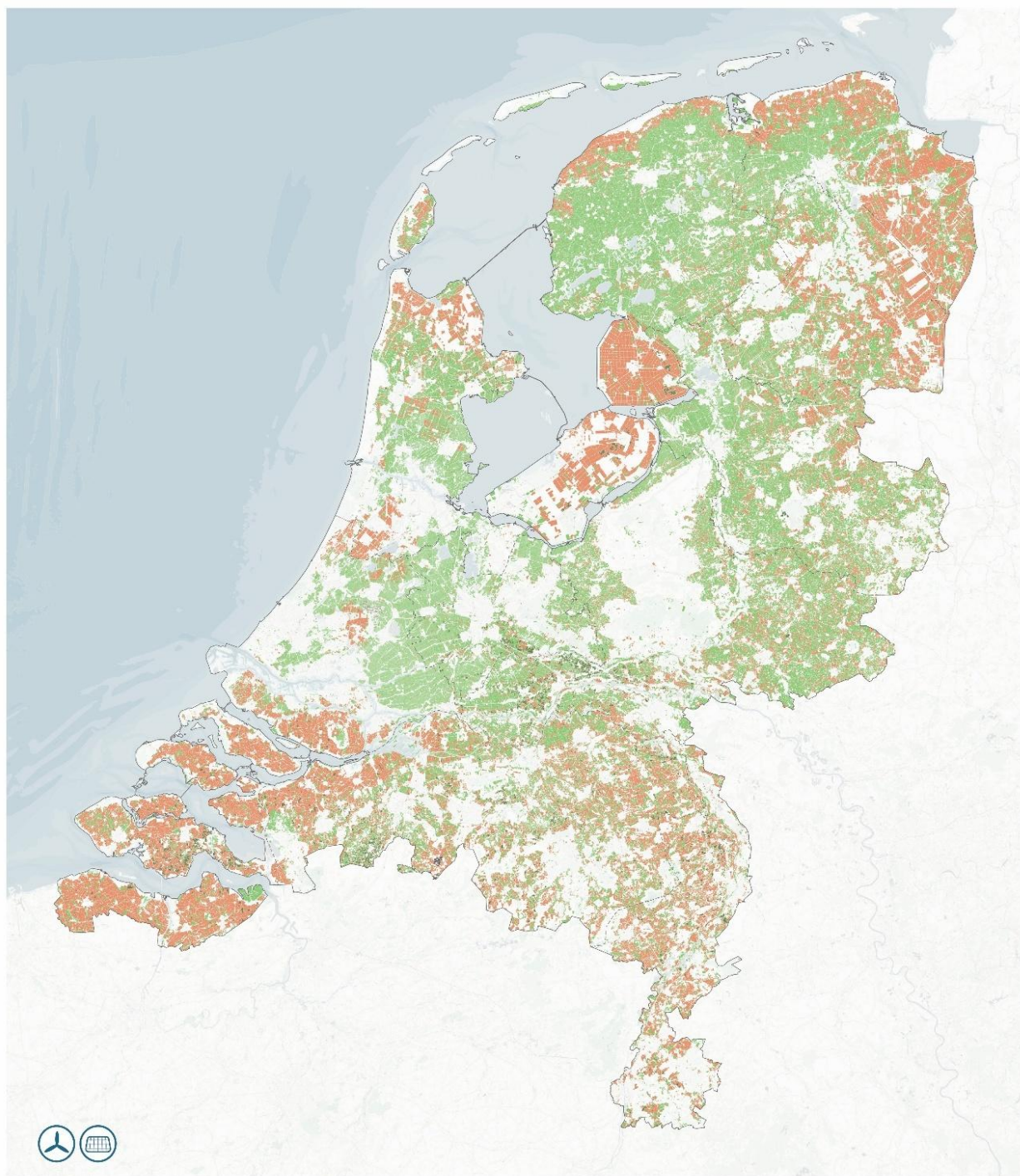
Losse wind of zonneparken

10. Zonneweide en/of windmolens op landbouwgrond

Productietechniek	Bestaand (MW)	Theoretisch maximale potentieel (MW)	Potentieel na aftrek mogelijke beperking (beleid, radar of economisch) (MW)	Ondergrens maximaal potentieel (zon > 20MW, wind 16.8MW) (MW)	Potentieel na aftrek mogelijke beperking (beleid, radar of economisch) (MW)
Bestaand wind	1.531				
Bestaand zon op veld	1.161				
Potentieel wind turbine 4.2 MW		97.600	61.026	55.096	36.204
Zon op veld extensief (akkerland)		219.960	198.283	117.454	110.688
Zon op veld extensief (grasland)		327.026	191.170	263.481	143.429
Zon op veld extensief (fruit)		11.622	11.622	1.012	1.012

Zonneweide en/of windmolens op landbouwgrond - Conceptueel Archetype





Zon of wind in landbouwgebied

Losse wind- of zonneparken

Legenda

Agrarisch terrein:

- Akkerland
- Boom en fruitteelt
- Grasland

Basiskaart

Landgebruik

■ Water

Administratieve grenzen

Provincie

Nationaal



Figuur 50 – Paspoort en kaart archetype 'Zonneparken als functie voor ecologie en natuurherstel'
(bron: Generation.Energy)

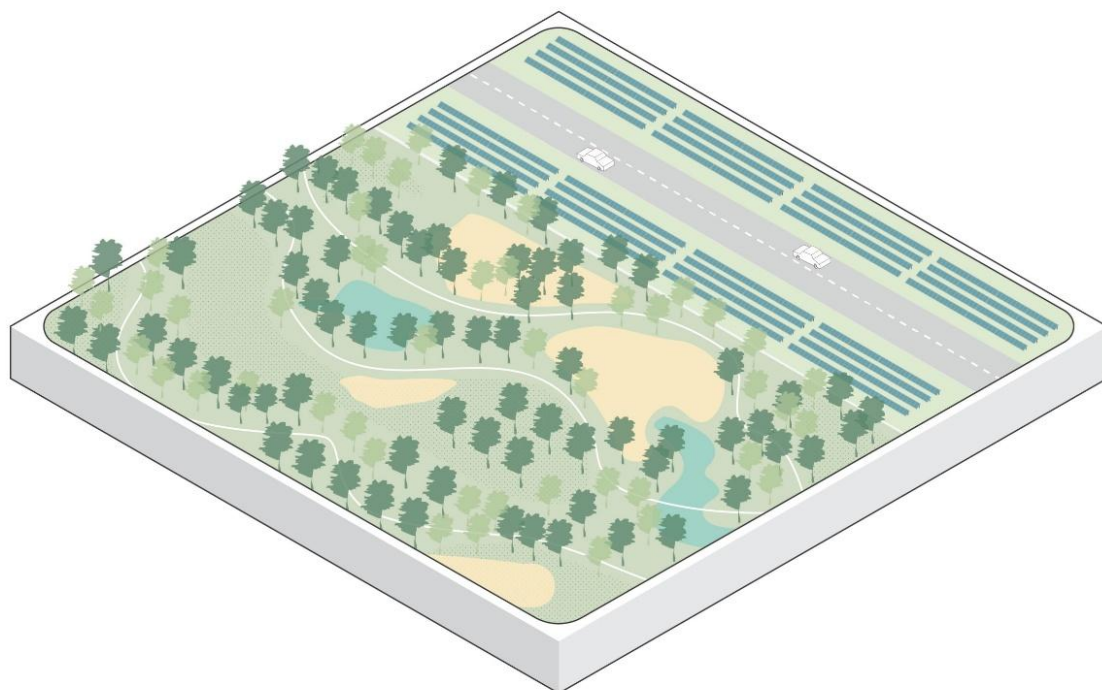
Losse wind of zonneparken	
11.	Zonneparken als functie voor ecologie en natuurherstel: Zon in landbouwgrond rondom Natura 2000
<i>Dit archetype richt zich op grondgebonden zonneparken op landbouwgrond rondom Natura 2000-gebieden, waarbij energieproductie expliciet wordt gecombineerd met ecologische versterking en natuurhersteldoelstellingen. Installaties zijn doorgaans middel- tot grootschalig en aangesloten op midden- of hoogspanningsniveau. Het archetype omvat bestaande zonneparken op land en extensieve vormen van AgriPV, ontworpen om ecologisch beheer en multifunctioneel landgebruik mogelijk te maken. Koppeling met lokale vraag is mogelijk, maar niet altijd direct, afhankelijk van de nabijheid van afnameclusters.</i> <i>Ruimtelijk is het archetype gesitueerd in landbouwtransitiezones grenzend aan beschermde natuurgebieden. Deze zones spelen vaak een rol als buffer voor Natura 2000-sites tegen intensieve landbouwactiviteiten. Zonneparken in deze context zijn ontworpen met een lagere paneeldichtheid, bredere tussenruimtes, ecologische corridors en natuurinclusief beheer dat biodiversiteit, bodembeheer en waterregulatie bevordert. AgriPV-concepten kunnen laag-intensief agrarisch gebruik mogelijk maken terwijl de habitatkwaliteit verbetert. Zorgvuldige ruimtelijke inpassing en afstemming met regelgeving zijn essentieel om compatibiliteit met natuurdoelen te waarborgen.</i> <i>In de Nederlandse context is dit archetype relevant omdat veel Natura 2000-gebieden worden omringd door landbouwgrond die onder ecologische en stikstofgerelateerde druk staat. Het combineren van zonne-energieontwikkeling met landgebruikstransitie kan extensivering ondersteunen, milieudruk verminderen en ecologische bufferzones creëren, mits natuurdoelen leidend blijven in ontwerp en beheer.</i> <i>Vanuit een energiesysteemperspectief levert dit archetype substantiële hernieuwbare opwekkingscapaciteit op schaal, efficiënt aangesloten op MS- of HS-niveau. Hoewel het niet primair vraaggericht is, versterkt het regionale productieportefeuilles en ondersteunt het nationale hernieuwbare-doelstellingen. Tegelijkertijd integreert het door energieproductie af te stemmen op ecologisch herstel klimaat- en biodiversiteitsdoelstellingen, en draagt het bij aan een meer systemische en ruimtelijk gebalanceerde energietransitie.</i>	
Combinatie met afname (en welke?)	
Mogelijk	
Type locatie of gebied	
Natuurgebied	
Typische Schaalgrootte	
Middelgroot of groot (MS of HS niveau)	

Losse wind of zonneparken

11. Zonneparken als functie voor ecologie en natuurherstel: Zon in landbouwgrond rondom Natura 2000

Productietechniek	Bestaand (MW)	Theoretisch maximale potentieel (MW)	Potentieel na aftrek mogelijke beperking (beleid, radar of economisch) (MW)	Ondergrens maximaal potentieel (zon > 20MW, wind 16.8MW) (MW)	Potentieel na aftrek mogelijke beperking (beleid, radar of economisch) (MW)
Bestaand zon op veld	0				
Zon op veld extensief (AgriPV)		74.730	47.632	50.235	30.515

Zonneparken als functie voor ecologie en natuurherstel: Zon in landbouwgrond rondom Natura 2000- Conceptueel Archetype





Zon in landbouwgrond rondom Natura 2000

Losse wind- of zonneparken

Legenda

500 m zone rondom Natura-2000

Basiskaart

Landgebruik

Water

Administratieve grenzen

Provincie

Nationaal



Figuur 51 – Paspoort en kaart archetype 'Zonne-energie op water' (bron: Generation.Energy)

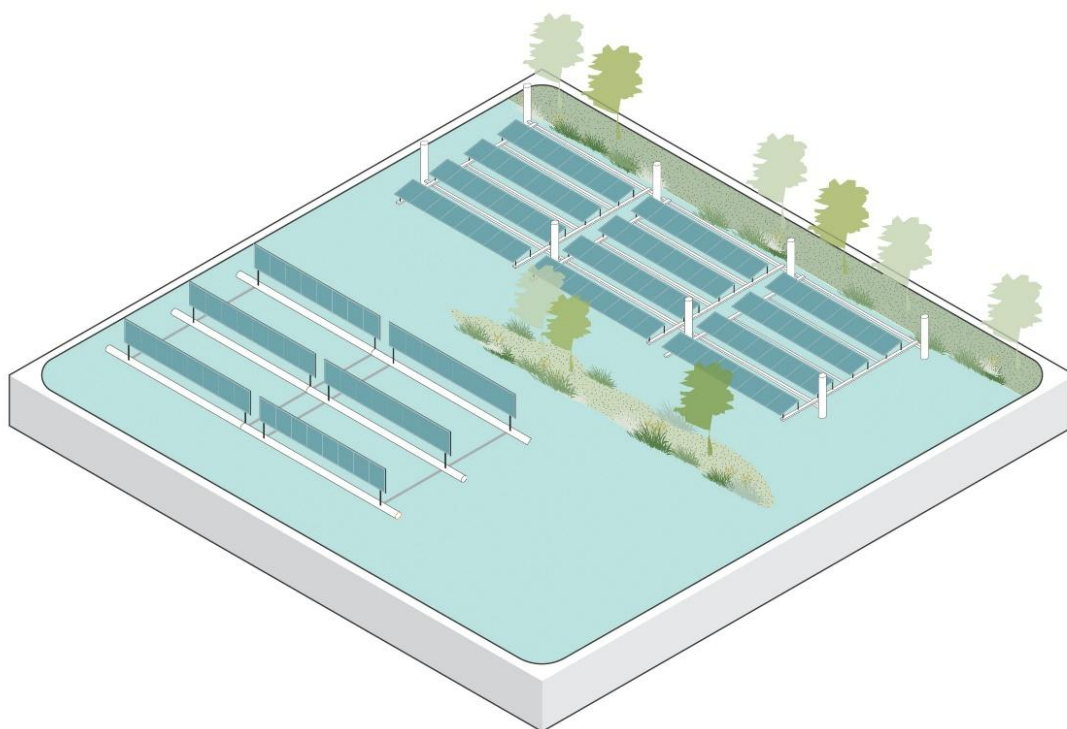
Losse wind of zonneparken	
14.	Zonne-energie op water
<i>Dit archetype richt zich op drijvende zonne-energie-installaties op binnenwateren, waaronder reservoirs, bassins, retentieplassen, voormalige winningsterreinen en andere kunstmatige of semi-natuurlijke wateroppervlakken. Installaties zijn doorgaans middel- tot grootschalig en aangesloten op midden- of hoogspanningsniveau. Het archetype omvat bestaande projecten voor zonne-energie op water, evenals potentiële intensieve zonne-energieontwikkeling op wateroppervlakken zoals bassins en retentiereservoirs, watergevulde mijnputten, slib- of bezinkbassins en andere wateren die geschikt zijn voor drijvende zonne-installaties.</i> <i>Ruimtelijk is het archetype gesitueerd op bestaande wateroppervlakken, waardoor extra grondinname wordt vermeden en gebieden worden benut die anders niet beschikbaar zijn voor conventionele energie of landbouw. Intensieve opstellingen maximaliseren de elektriciteitsopbrengst per hectare water, terwijl voldoende ruimte wordt behouden voor ecologische en operationele overwegingen, zoals waterstroming, recreatief gebruik of waterbeheersinfrastructuur. Integratie vereist aandacht voor structurele stabiliteit, verankering, onderhoudstoegang en effecten op waterkwaliteit en biodiversiteit. Dit archetype wordt relevant in een context van uitgebreide kunstmatige wateroppervlakken, met name in stedelijke en industrieel aangrenzende landschappen, die grote gebieden geschikt maken voor energieopwekking zonder te concurreren met landbouw of natuurgebieden. Drijvende zonne-energie kan landgebonden hernieuwbare energie aanvullen, onderbenutte wateroppervlakken optimaal benutten en multifunctioneel gebruik ondersteunen, zoals gecombineerde zonneproductie en waterbeheer.</i> <i>Vanuit een energiesysteemperspectief bieden drijvende zonne-installaties aanzienlijke hernieuwbare elektriciteitsmogelijkheden op middel- en grootschalige schaal. Hoewel ze niet direct gekoppeld zijn aan lokale elektriciteitsvraag, leveren deze installaties bulkhernieuwbare energie aan het netwerk, vaak nabij industriële of stedelijke centra. Drijvende systemen profiteren bovendien van een hogere efficiëntie dan sommige landgebonden systemen door koelende effecten van water en verminderde vervuiling. Al met al levert dit archetype een flexibele, ruimtelijk efficiënte en aanvullende bron van hernieuwbare energie, waarmee de nationale capaciteit wordt versterkt en een veerkrachtige energietransitie wordt ondersteund.</i>	
Combinatie met afname (en welke?)	
Nee	
Type locatie of gebied	
Binnenwater	
Typische Schaalgrootte	
Middelgroot of groot (MS of HS niveau)	

Losse wind of zonneparken

14. Zonne-energie op water

Productietechniek	Bestaand (MW)	Theoretisch maximale potentieel (MW)	Potentieel na aftrek mogelijke beperking (beleid, radar of economisch) (MW)	Ondergrens maximaal potentieel (zon > 20MW, wind 16.8MW) (MW)	Potentieel na aftrek mogelijke beperking (beleid, radar of economisch) (MW)
Bestaand zon op water	474				
Zon op water intensief bassins en spaarbekken		1.867	1.867	975	975
Zon op water intensief delfstof- winning en vloe- of slibvelden		2.569	2.569	1.986	1.986
Zon op water intensief overig water		70.002	70.002	49.432	49.432

Zonne-energie op water - Conceptueel Archetype





Zon op water

Losse wind- of zonneparken

Legenda

■ Watervlak met recreatieve functie (buiten Natura-2000)

Watervlak brownfields (buiten Natura-2000):

□ Bassin

■ Spaarbekken

■ Vloei- en/ of slibveld

■ Water met delfstofwinningsfunctie

Basiskaart

Landgebruik

■ Water

Administratieve grenzen

□ Provincie

□ Nationaal



Figuur 52 – Paspoort en kaart archetype 'Hernieuwbare opwek op verziltingsgronden of veenontginningsgebieden (bron: Generation.Energy)

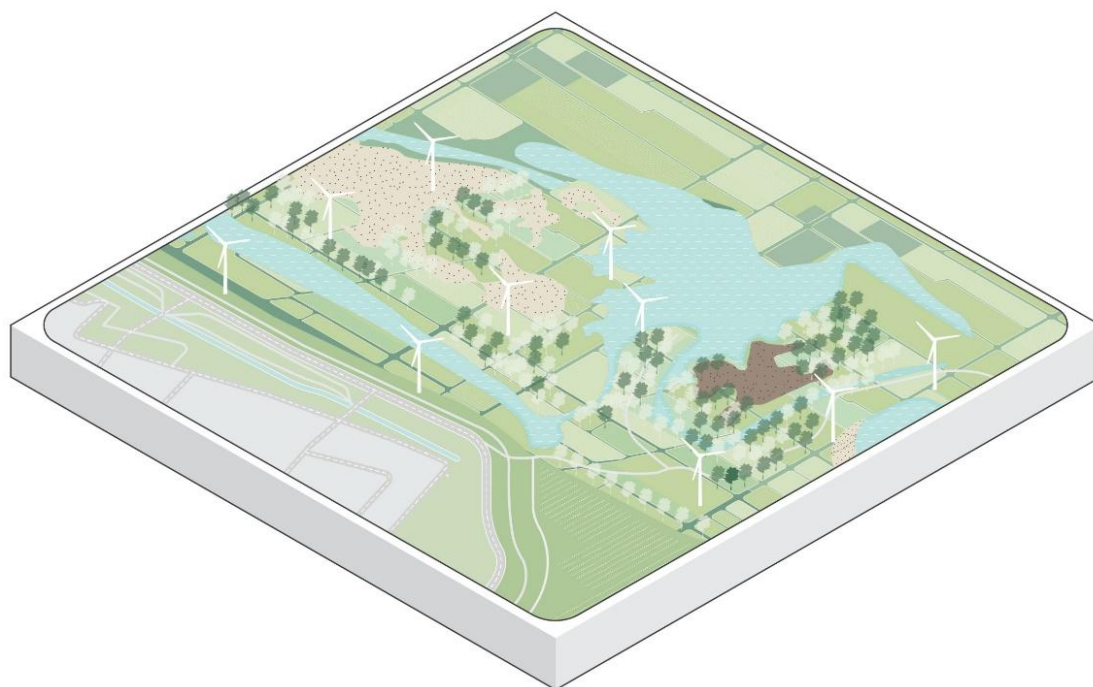
Losse wind of zonneparken	
12.	Windparken (evt. + zon) op verziltingsgronden en veenontginningsgebieden
<i>it archetype richt zich op grootschalige windparken, eventueel gecombineerd met zonne-energie op verziltingsgronden en veenontginningsgebieden. Installaties zijn doorgaans aangesloten op hoogspanningsniveau en opereren op grote schaal. Het archetype omvat bestaande windturbines evenals potentiële 4,2 MW-turbines in gebieden zoals veenontginningen en zones die worden beïnvloed door verzilting. Koppeling met lokale vraag is mogelijk, maar niet noodzakelijk direct, afhankelijk van de nabijheid van industriële clusters of andere grote afnemers.</i> <i>Ruimtelijk is het archetype ingebed in landschappen met verminderde agrarische productiviteit of structurele milieu-uitdagingen, zoals inzakkende veenbodems of verzilte gebieden. Deze landschappen zijn vaak open, grootschalig en relatief weinig bebouwd, wat efficiënte plaatsing van turbines en netaansluiting ondersteunt. De keuze voor 4,2 MW-turbines weerspiegelt een hedendaagse, hoogrenderende turbinemaat die geschikt is om de opbrengst per locatie te maximaliseren en tegelijkertijd het totaal aantal benodigde turbines te beperken. In sommige gevallen kan windopwekking worden aangevuld met zonne-energie om landgebruik en netinfrastructuur te optimaliseren.</i> <i>In de Nederlandse context is dit archetype relevant omdat bepaalde landbouwgebieden op lange termijn onder druk staan door bodemdegradatie, bodemdaling of waterstress gerelateerd aan klimaatverandering. Het toewijzen van hernieuwbare energieproductie aan deze landschappen kan een transitie in landgebruik ondersteunen, economische druk op marginale landbouwsystemen verminderen en alternatieve inkomstenmodellen creëren, terwijl het open karakter van het landschap behouden blijft.</i> <i>Vanuit een energiesysteem perspectief vertegenwoordigt dit archetype een grootschalige, impactvolle hernieuwbare opwekkingscapaciteit. Grote 4,2 MW-turbines aangesloten op HS-niveau leveren een aanzienlijke bijdrage aan de regionale en nationale energievoorziening, verbeteren de systeemefficiëntie en kosteneffectiviteit. Door productie te concentreren in geschikte, lagere kwaliteit landschappen ondersteunt dit archetype een strategische allocatie van grootschalige hernieuwbare energie, versterkt het de energie zekerheid en biedt het een robuuste ruggengraat voor een veerkrachtig en gediversifieerd energiesysteem.</i>	
Combinatie met afname (en welke?)	
Mogelijk	
Type locatie of gebied	
Bodem met lage kwaliteit of land met waterstress	
Typische Schaalgrootte	
Grootschalig (HS - niveau)	

Losse wind of zonneparken

12. Windparken (evt. + zon) op verziltingsgronden en veenontginningsgebieden

Productietechniek	Bestaand (MW)	Theoretisch maximale potentieel (MW)	Potentieel na aftrek mogelijke beperking (beleid, radar of economisch) (MW)	Ondergrens maximaal potentieel (zon > 20MW, wind 16.8MW) (MW)	Potentieel na aftrek mogelijke beperking (beleid, radar of economisch) (MW)
Bestaand wind	1.421				
Potentieel wind turbine 4.2 MW (veenontginning)		17.476	4.439	11.109	3.457
Potentieel wind turbine 4.2 MW (verzilting)		15.007	9.862	9.916	6.653

Windparken (evt. + zon) op verziltingsgronden en veenontginningsgebieden - Conceptueel Archetype





Wind in waterstressgebied

Losse wind- of zonneparken

Legenda

-  Ontgonnen veenvlakte
-  Verziltingsgebied

Basiskaart

Landgebruik

 Water

Administratieve grenzen

 Provincie

 Nationaal



Figuur 53 – Paspoort en kaart archetype 'Hernieuwbare opwek bij brownfields of restlandschappen'
(bron: Generation.Energy)

Losse wind of zonneparken	
13.	Zonne-energie of windenergie op brownfields of restlandschappen (zoals infrastructuur)
<i>Dit archetype richt zich op wind- en zonne-energie-installaties op braakliggende terreinen en restlandschappen, waaronder onderbenutte industrieterreinen, infrastructuurland, voormalige stortplaatsen en gebieden van mineralenwinning. Installaties zijn doorgaans middel- tot grootschalig en aangesloten op midden- of hoogspanningsniveau. Het archetype omvat bestaande windturbines (inclusief zones binnen 100 m van infrastructuur), bestaande zonneparken op velden, evenals potentiële 4,2 MW-windturbines op infrastructuur, stortplaatsen en mijnbouwlocaties. Voor zonne-energieontwikkeling wordt zowel intensief als extensief gekeken naar infrastructuur, luchthavens en restgrond van stortplaatsen of mijnbouw.</i> <i>Ruimtelijk maakt het archetype gebruik van onderbenutte, gedegradeerde of functioneel beperkte gronden, waardoor energie-infrastructuur kan worden ingezet zonder te concurreren met hoogwaardig landbouw- of natuurgebied. Intensieve zonne-installaties maximaliseren het elektriciteitsrendement per oppervlakte-eenheid, terwijl extensieve indelingen mogelijkheden bieden voor multifunctioneel landgebruik, biodiversiteitsversterking of tijdelijke aanpassing van het grondgebruik. Luchthavens en grote infrastructuurcorridors maken zowel intensieve als extensieve zonne-energie mogelijk vanwege de beschikbare open oppervlakken en minimale schaduwbeperkingen. Windturbines worden geplaatst om conflicten met bestaande functies te vermijden en te profiteren van open, verhoogde of lineaire landvormen die kenmerkend zijn voor restlandschappen.</i> <i>In de Nederlandse context is dit archetype relevant omdat braakliggende terreinen en restlandschappen onderbenutte ruimtelijke capaciteit voor energieopwekking vertegenwoordigen, vaak nabij netinfrastructuur en verwijderd van gevoelige ecologische of dichtbevolkte gebieden. Hernieuwbare energie hier inzetten vermindert concurrentie met landbouw en natuur, versnelt ruimtelijk efficiënte energietransities en draagt bij aan de herontwikkeling van gedegradeerde of marginale locaties.</i> <i>Vanuit een energiesysteem perspectief levert dit archetype flexibele, middel- tot grootschalige hernieuwbare opwekking, zowel elektriciteit als hybride wind-zonneproductie, die strategisch nabij afnameclusters of netaansluitingen kan worden geplaatst. Intensieve zonne-installaties leveren hoge elektriciteitsopbrengst per hectare, terwijl extensieve indelingen en combinaties met windturbines zorgen voor veerkrachtige en gediversifieerde energieprofielen. Door gebruik te maken van gedegrademd of onderbenut land, breidt dit archetype het nationale potentieel voor hernieuwbare energie uit zonder concessies te doen aan voedselproductie of natuurdoelen, en ondersteunt het een kosteneffectieve en ruimtelijk gebalanceerde energietransitie.</i>	
Combinatie met afname (en welke?)	
Mogelijk	
Type locatie of gebied	
Brownfields of restlandschappen	
Typische Schaalgrootte	
Middelgroot of groot (MS of HS niveau)	

Losse wind of zonneparken

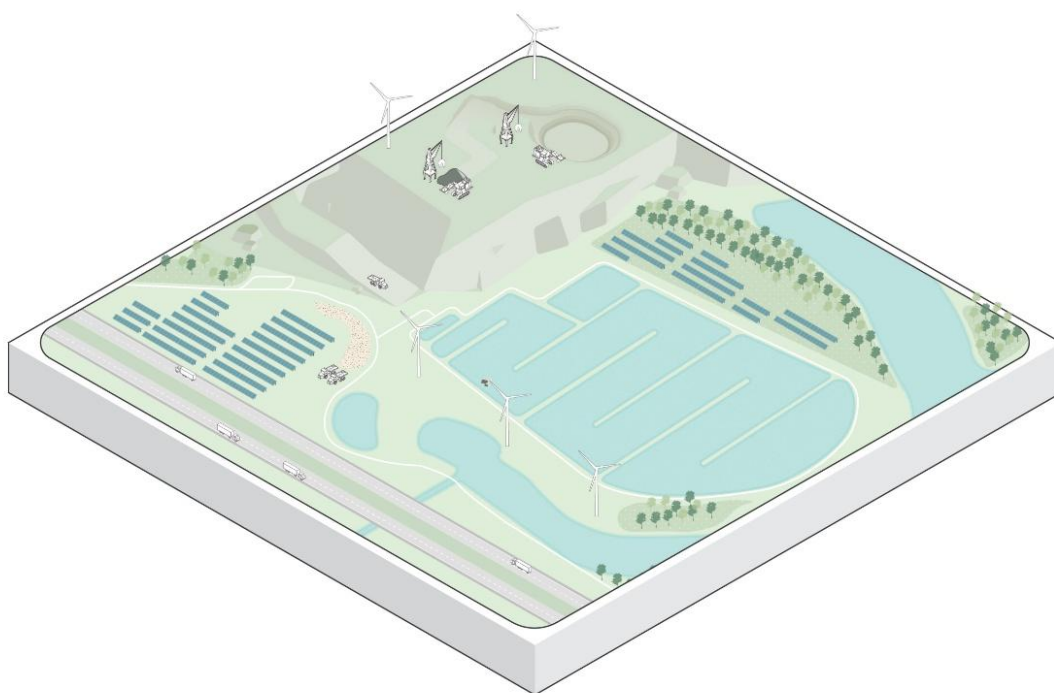
13. Zonne-energie of windenergie op brownfields of restlandschappen (zoals infrastructuur)

Productietechniek	Bestaand (MW)	Theoretisch maximale potentieel (MW)	Potentieel na aftrek mogelijke beperking (beleid, radar of economisch) (MW)	Ondergrens maximaal potentieel (zon > 20MW, wind 16.8MW) (MW)	Potentieel na aftrek mogelijke beperking (beleid, radar of economisch) (MW)
Bestaand wind (incl. zone 100m rondom infrastructuur)	893				
Bestaand zon op veld	1.848				
Potentieel wind turbine 4.2 MW: infrastructuur; stortplaatsen en delfstofwinning (land)		1.100	823	0	0
Zon op veld intensief infrastructuur (incl. zone 100m)		141.314	139.333	65.359	63.486
Zon op veld extensief infrastructuur (incl. zone 100m)		71.573	67.048	24.270	23.313
Zon op veld intensief luchthavens		1.622	1.463	910	751
Zon op veld extensief luchthavens		0	0	0	0
Zon op veld intensief stortplaatsen en delfstofwinning (land)		2.212	1.453	1.481	733
Zon op veld extensief stortplaatsen en delfstofwinning (land)		0	0	0	0

Losse wind of zonneparken

13. *Zonne-energie of windenergie op brownfields of restlandschappen (zoals infrastructuur)*

Zonne-energie of windenergie op brownfields of restlandschappen (zoals infrastructuur) - Conceptueel Archetype





Zon of wind in brownfields

Losse wind- of zonneparken

Legenda

Lijninfrastructuur

- Berm en verkeerseilanden
- Berm en verkeerseilanden (100m buffer)

Luchthavens:

- Burger
- Militair

- Stortplaats
- Delfstofwingsgebied

Basiskaart

Landgebruik

- Water

Administratieve grenzen

- Provincie
- Nationaal



Figuur 54 – Paspoort en kaart archetype 'Repowering'

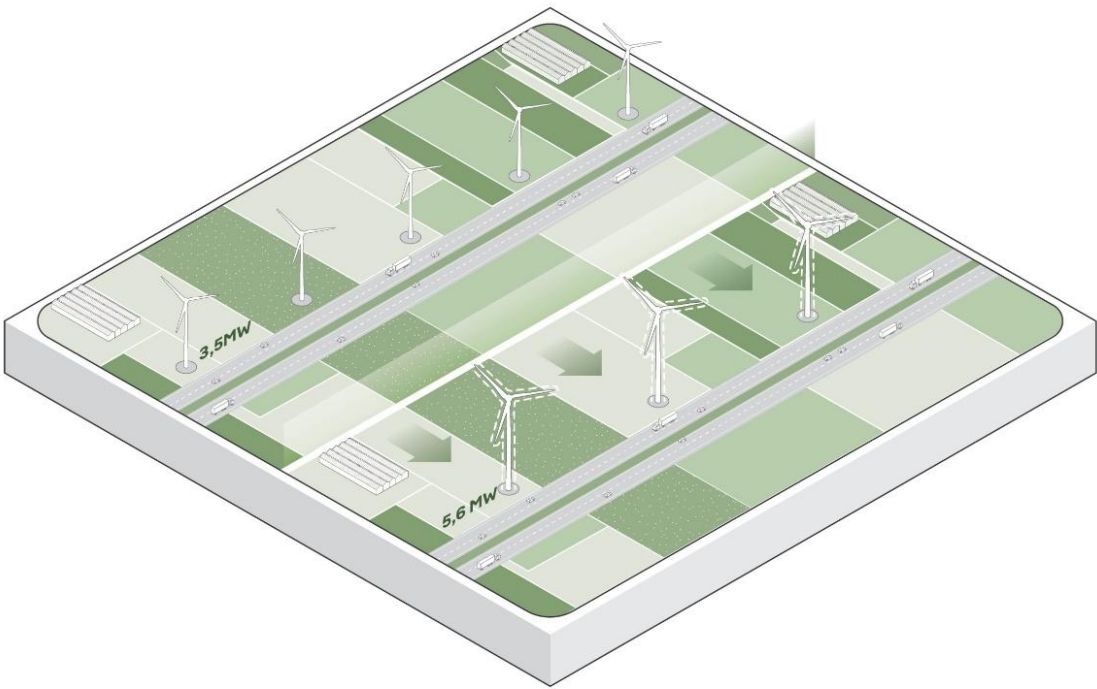
Losse wind of zonneparken	
15.	Repowering wind
<i>Dit archetype richt zich op het upgraden of vervangen van bestaande windturbines door moderne, hoger-capaciteits turbines op bestaande productielocaties. Installaties zijn doorgaans middel- tot grootschalig en aangesloten op midden- of hoogspanningsniveau. Repowering kan inhouden dat oudere turbines worden vervangen door minder, maar grotere en efficiëntere eenheden, waardoor de totale energieopbrengst toeneemt zonder dat het ruimtelijk beslag significant wordt uitgebreid. Koppeling met lokale vraag is mogelijk, maar niet altijd direct, afhankelijk van de nabijheid van industriële clusters of andere afzetpunten.</i> <i>Ruimtelijk is het archetype gesitueerd op bestaande windparklocaties of individuele turbines, waarbij gebruik wordt gemaakt van reeds aanwezige netaansluitingen, funderingen en vergunde grondgebruikzones. Door bestaande locaties te benutten, minimaliseert repowering extra landschappelijke of ecologische impact, vermindert het vergunningstechnische uitdagingen en worden conflicten met ander grondgebruik vermeden. De plaatsing en afstanden van turbines worden geoptimaliseerd om de voordelen van huidige technologie te benutten, met behoud van veilige operationele afstanden en naleving van lokale regelgeving.</i> <i>Dit archetype is relevant omdat veel bestaande windparken zijn gebouwd met oudere, laag-capaciteits turbines die tegenwoordig minder efficiënt zijn. Repowering maakt een substantiële toename van de energieopbrengst per locatie mogelijk zonder nieuwe grond in te nemen of landschapsstructuren significant te wijzigen. Het verlengt bovendien de operationele levensduur van bestaande locaties en brengt de productie in lijn met hedendaagse energiedoelstellingen.</i> <i>Vanuit een energiesysteem perspectief vormt repowering van wind een hoog-efficiënte, laag-impact strategie om de productie van hernieuwbare elektriciteit te verhogen. Het levert schaalbare extra capaciteit op MS- en HS-niveau en draagt bij aan regionale en nationale productiedoelstellingen. Door bestaande infrastructuur te upgraden, versterkt dit archetype de netwerkbetrouwbaarheid, verlaagt het de kosten per eenheid hernieuwbare elektriciteit en ondersteunt het een veerkrachtige energietransitie, terwijl de efficiëntie van reeds ontwikkelde productielocaties maximaal wordt benut.</i>	
Combinatie met afname (en welke?)	
Mogelijk	
Type locatie of gebied	
Bestaande productielocaties	
Typische Schaalgrootte	
Middelgroot of groot (MS of HS niveau)	

Losse wind of zonneparken

15. Repowering wind

Productietechniek	Bestaand (MW)	Theoretisch maximale potentieel (MW)	Potentieel na aftrek mogelijke beperking (beleid, radar of economisch) (MW)	Ondergrens maximaal potentieel (zon > 20MW, wind 16.8MW) (MW)	Potentieel na aftrek mogelijke beperking (beleid, radar of economisch) (MW)
Bestaand wind	6894				

Repowering wind - Conceptueel Archetype





Repowering wind

Losse wind- of zonneparken

Legenda

Bestaande wind (ouder dan 20 jaar):

- Capaciteit < 1 MW
- 12MW ≥ Capaciteit ≥ 1 MW
- Capaciteit > 12 MW

Basiskaart

Landgebruik

Water

Administratieve grenzen

Provincie

Nationaal



Figuur 55 – Paspoorten en kaarten 'Bijplaatsen hernieuwbare opwek bij bestaand project'
(bron: Generation.Energy)

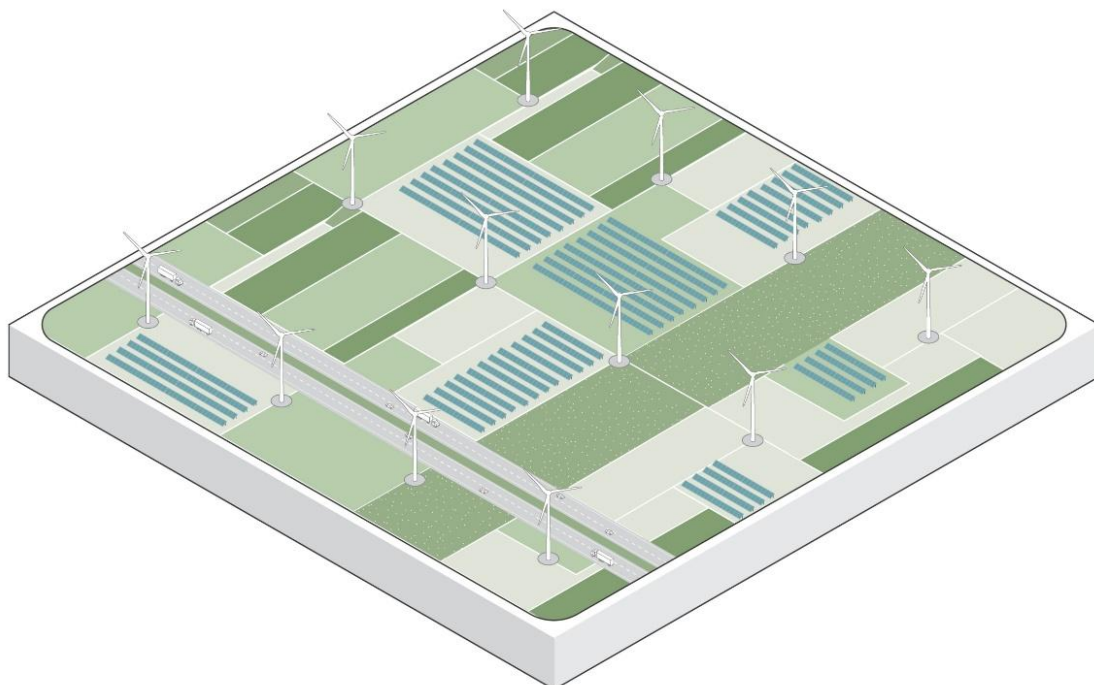
Losse wind of zonneparken	
17.	Bijplaatsen opwek bij bestaand project op zelfde aansluiting: Zonne-energie bijplaatsen bij windenergie
<i>Dit archetype richt zich op het toevoegen van zonne-energie-installaties op locaties waar al windturbines in werking zijn, gebruikmakend van dezelfde netaansluiting. Installaties zijn doorgaans middel- tot grootschalig en aangesloten op midden- of hoogspanningsniveau. Het bouwt voort op bestaande zonne-op-veldprojecten en maakt gebruik van de capaciteit van reeds gevestigde windprojectlocaties. Koppeling met lokale vraag is mogelijk, maar niet altijd direct, afhankelijk van de nabijheid van industriële of residentiële afnameclusters.</i> <i>Ruimtelijk is het archetype gesitueerd op bestaande windparklocaties, inclusief omliggend open land of onderbenutte gebieden nabij de turbines. Door gebruik te maken van reeds vergunde en netaansluitbare terreinen kan extra zonne-energie efficiënt worden geplaatst zonder nieuwe grond in te nemen of uitgebreide vergunningstrajecten. De lay-out wordt zo gepland dat schaduw van turbines wordt geminimaliseerd, operationele veiligheid behouden blijft en de gecombineerde elektriciteitsopbrengst van het co-locatie-systeem van zon en wind wordt geoptimaliseerd.</i> <i>Dit archetype is relevant in situaties waar onderbenutte ruimtes op windparken geschikt zijn voor zonne-energie, waardoor exploitanten de energieproductie van een bestaande aansluiting kunnen maximaliseren. Co-locatie van zon en wind verbetert het efficiënt gebruik van land en net, verlaagt infrastructuurkosten en minimaliseert extra milieu- en landschapsimpact.</i> <i>Vanuit een energiesysteem perspectief biedt dit archetype een kosteneffectieve en complementaire bron van hernieuwbare elektriciteit. Zonne-opwekking kan dagelijkse variaties in windproductie deels compenseren, waardoor het temporele productieprofiel verbetert. Door zon toe te voegen op bestaande windlocaties wordt extra hernieuwbare capaciteit op MS- of HS-schaal gerealiseerd, wordt de systeemflexibiliteit versterkt, het gebruik van het net geoptimaliseerd en wordt een veerkrachtige, gediversifieerde en ruimtelijk efficiënte energietransitie ondersteund.</i>	
Combinatie met afname (en welke?)	
Mogelijk	
Type locatie of gebied	
Bestaande productielocaties	
Typische Schaalgrootte	
Middelgroot of groot (MS of HS niveau)	

Losse wind of zonneparken

17. *Bijplaatsen opwek bij bestaand project op zelfde aansluiting: Zonne-energie bijplaatsen bij windenergie*

Productietechniek	Bestaand (MW)	Theoretisch maximale potentieel (MW)	Potentieel na aftrek mogelijke beperking (beleid, radar of economisch) (MW)	Ondergrens maximaal potentieel (zon > 20MW, wind 16.8MW) (MW)	Potentieel na aftrek mogelijke beperking (beleid, radar of economisch) (MW)
Bestaand zon op veld	657				
Potentieel zon op veld		16.803	16.890	14.231	14.231

Bijplaatsen opwek bij bestaand project op zelfde aansluiting: Zonne-energie bijplaatsen bij windenergie - Conceptueel Archetype





Zon bij plaatsen bij wind

Losse wind- of zonneparken

Legenda

■ 250 m buffer vanaf bestaande windturbines

Basiskaart

Landgebruik

■ Water

Administratieve grenzen

□ Provincie

□ Nationaal



Losse wind of zonneparken

16. *Bijplaatsen opwek bij bestaand project op zelfde aansluiting: Windenergie bijplaatsen bij zonne-energie*

Dit archetype richt zich op het toevoegen van nieuwe windturbines op bestaande locaties voor hernieuwbare energie, met name daar waar al zonne-energie-installaties aanwezig zijn, gebruikmakend van dezelfde netaansluiting. Installaties zijn doorgaans middel- tot grootschalig en aangesloten op midden- of hoogspanningsniveau. Het omvat bestaande windturbines evenals potentiële nieuwe 4,2 MW-turbines die binnen of grenzend aan hetzelfde aansluitpunt worden geplaatst. Koppeling met lokale vraag is mogelijk, maar niet altijd direct, afhankelijk van de nabijheid van afnameclusters.

Ruimtelijk is het archetype gesitueerd op bestaande productielocaties voor hernieuwbare energie, waaronder zonneparken en gecombineerde zon-windlocaties. Door gebruik te maken van bestaande infrastructuur, netaansluitingen en vergunde grondgebruikzones kunnen extra windturbines worden geplaatst zonder noemenswaardige extra grondinname of vergunningstechnische obstakels. Zorgvuldige ruimtelijke planning zorgt ervoor dat turbines veilige afstanden behouden, niet interfereren met bestaande installaties en de totale opbrengst van de locatie optimaliseren.

Veel zonneparken beschikken vaak over onderbenutte netcapaciteit, waardoor extra windcapaciteit efficiënt kan worden toegevoegd. Co-locatie van wind en zon op dezelfde aansluiting maximaliseert het gebruik van bestaande netassets, verlaagt de totale infrastructuurkosten en minimaliseert milieu- en landschapsimpact.

Vanuit een energiesysteem perspectief biedt dit archetype een kosteneffectieve en ruimtelijk efficiënte manier om hernieuwbare opwekking te vergroten. Door wind en zon te combineren, kunnen productieprofielen gedeeltelijk complementair zijn, wat de netstabiliteit en flexibiliteit versterkt. Het levert extra hernieuwbare capaciteit op MS- of HS-niveau, verhoogt de efficiëntie van bestaande infrastructuur en ondersteunt een veerkrachtige en gediversifieerde energietransitie zonder nieuwe aansluitpunten of grote extra grondoppervlakken nodig te hebben.

Combinatie met afname (en welke?)

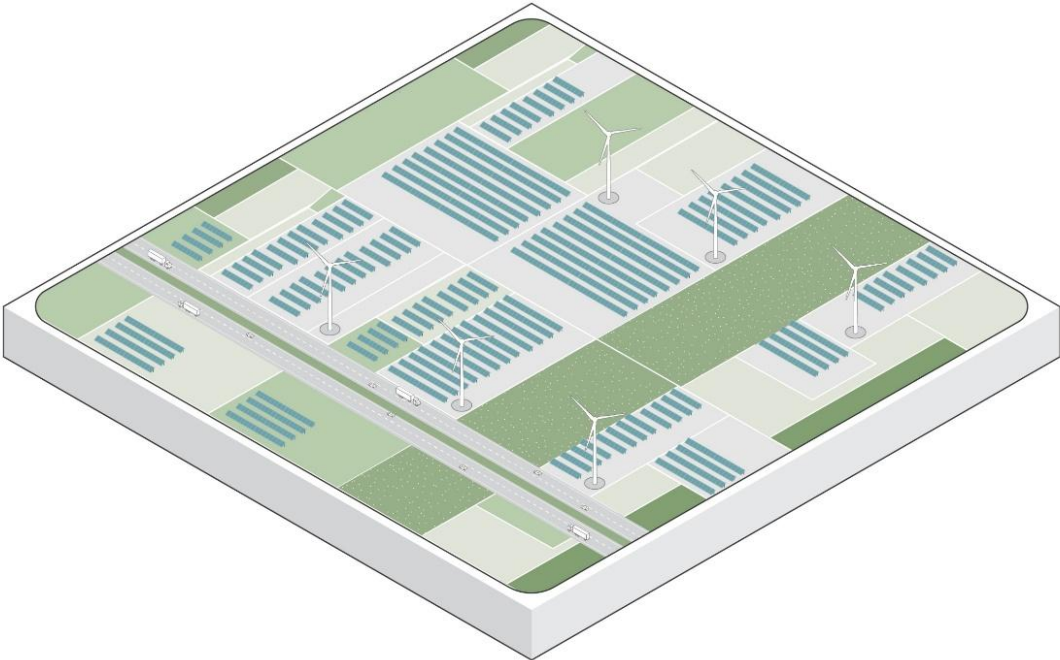
Mogelijk

Type locatie of gebied

Bestaande productielocaties

Typische Schaalgrootte

Middelgroot of groot (MS of HS niveau)

Losse wind of zonneparken					
16.	Bijplaatsen opwek bij bestaand project op zelfde aansluiting: Windenergie bijplaatsen bij zonne-energie				
Productietechniek	Bestaand (MW)	Theoretisch maximale potentieel (MW)	Potentieel na aftrek mogelijke beperking (beleid, radar of economisch) (MW)	Ondergrens maximaal potentieel (zon > 20MW, wind 16.8MW) (MW)	Potentieel na aftrek mogelijke beperking (beleid, radar of economisch) (MW)
Bestaand wind	0				
Potentieel wind turbine 4,2 MW		756	609	38	38
Bijplaatsen opwek bij bestaand project op zelfde aansluiting: Windenergie bijplaatsen bij zonne-energie - Conceptueel Archetype					
					



Wind bij plaatsen bij zon

Losse wind- of zonneparken

Legenda

 250 m buffer vanaf bestaande zonneparken

Basiskaart

Landgebruik

 Water

Administratieve grenzen

 Provincie

 Nationaal



B Ruimtelijke potentieanalyse

B.1 Omschrijving analyse

Voor de ruimtelijke effecten en potenties bouwen we voort op de methodiek die in eerdere studies is gehanteerd. Voor windenergie op land baseren we ons op de methode uit NPRES Analysekaarten (NPRES, 2020), voor zonne-energie op de studie Ruimtelijk potentieel van zonnestroom in Nederland (TKI Urban Energy, 2021) en Kansrijke daken en objecten voor zonnestroom in Nederland (Rijksdienst voor Ondernemend Nederland, 2023). De kennis en methode vormen voor een groot deel de input voor onze GIS-analyses en waar nodig zijn deze geactualiseerd en vertaald naar de ruimtelijke gebieden van de archetypen. In de volgende delen worden de analysestappen en uitgangspunten verder toegelicht.

Bij het bepalen van het ruimtelijk potentieel voor wind- en zonne-energie analyseren we in ons gismodel eerst welke gebieden in aanmerking komen voor potentiële opwek op basis van hardere beperkingen en ruimtelijke voorwaarden die betrekking hebben op de toepassing van de nieuwe technieken in de bestaande omgeving. In een tweede stap kijken we welke zachtere beperkingen er vervolgens invloed op het potentieel hebben en tot slot naar een minimale grootte van een project. Het model bestaat uit een landsdekkende analyse en in deze studie zijn deze resultaten opgesplitst naar de contouren van de archetypes. Hieronder wordt eerst de analysemethode toegelicht en daarna wordt dieper ingegaan op de uitgangspunten.

B.1.1 Ruimtelijk potentieel-analyse (theoretisch maximum)

In de eerste stap van de analyse kijken we naar het ruimtelijk technisch potentieel, oftewel een theoretisch potentieel van windenergie op land, zonne-energie op veld of water, zonne-energie op gebouwen, en de specifieke toepassingen zonne-energie op carports en erfmolens. Voor windenergie op land gelden er vanuit veiligheid en geluid strengere regels die betrekking hebben op de inpasbaarheid van windenergie op land. Hierbij moet gedacht worden aan afstanden tot gebouwen in verband met geluid en veiligheid en hoogtebeperkingen voor luchtvaart. In het gismodel zijn deze beperkingen o.a. op basis van de Handreiking risicozonering windturbines (Faasen et al., 2014) ruimte-

lijk vertaald en worden ze uitgesloten voor windenergie op land. Voor zonne-energie op land en water gelden dit soort beperkingen minder. Voor zonne-energie kijken we in de analyse meer naar de bestaande functie en inrichting van grondgebruik. Op basis van eerdere studies bepalen we of bepaalde gronden geschikt zijn voor zonne-energie. In theorie is het directe ruimtegebruik van windenergie op land te combineren met een andere functie, denk aan een turbine in het grasland of op een bedrijfserf. Voor zonne-energie is het effect op het directe ruimtegebruik in veel gevallen anders: in sommige gevallen is dit te combineren met bestaande functies, maar in veel gevallen zal het de bestaande functie vervangen.

B.1.2 Aftrek van zachtere beperkingen

Vervolgens wordt er in tweede instantie gekeken naar zachtere beperkingen die invloed hebben op andere afwegingen of gronden in aanmerking komen voor wind- of zonne-energie. Provinciaal beleid is een van deze beperkingen. Deze kan invloed hebben in de vorm dat via de ruimtelijke verordeningen de toepassingen van windenergie op land of zonne-energie niet toegestaan zijn of dat er voorkeuren gelden die betrekking hebben op de opstelling. In deze analyse zijn de overeenkomstige regels uit de verschillende verordeningen van de provincies in de analyse opgenomen en de impact hiervan is in beeld gebracht. De voorkeuren voor opstellingen uit de visies niet. Naast de provinciale regels zijn als zachtere beperking voor windenergie-op-landgebieden meegenomen waar strengere regels gelden voor radarzicht. Voor bedrijventerreinen zijn de gronden die in het bestemmingsplan bestemd zijn als uitgeefbare grond voor bedrijvigheid ook meegenomen als een zachtere belemmering voor zonne-energie. De gronden zijn bestemd of gereserveerd voor bedrijven. Vanwege de schaarste aan dit soort uitgeefbare gronden in Nederland is de veronderstelling dat andere ontwikkelingen in deze gebieden mogelijk voorrang krijgen boven de ontwikkeling van zonneparken. Met name bij nieuw te ontwikkelen terreinen geldt dat dit nu nog landbouwgrond is, maar gereserveerd is voor de ontwikkeling van bedrijven.

B.1.3 Opwek op gebouwen, erfmolens en carports

In het geval van zonne-energie op gebouwen, erfmolens en solar carports geldt dat deze al een vorm zijn van een gecombineerd ruimtegebruik. De schaal van de toepassing is kleiner en de beperkingen komen niet zozeer vanuit beleid, maar meer vanuit een technische hoek of lokale omstandigheden. Doordat de specifieke kennis hiervan ontbreekt en het onduidelijk is wat de impact hierop is, zijn deze effecten op nationale schaal niet goed te duiden en geven ze mogelijk een verkeerd beeld. In deze studie is het mogelijke effect van zonne-energie op gebouwen niet doorgerekend. Voor zonne-energie is wel op basis van de informatie van de dataset 'Kansrijke daken', die voor een deel is gebaseerd op een nationale dakenscan (Rijksdienst voor Ondernemend Nederland, 2023) die de situatie in 2021 weergeeft en de methodiek uit de TKI-studie (TKI Urban Energy, 2021), een onderscheid gemaakt tussen een theoretisch maximum (onderzoek TKI Urban Energy) en een meer realistisch potentieel uit de data van RVO.

B.1.4 Bestaande opwek

In de ruimtelijke analyse naar beschikbare ruimte voor windenergie op land en zonne-energie is de ruimte die al wordt benut door bestaande opwek afgetrokken van de potentiële ruimte. Voor zonne-energie op land is dit het bestaande oppervlak. Voor windenergie op land geldt dat er rekening wordt gehouden met een onderlinge beïnvloedingsafstand ten opzichte van bestaande turbines van vier keer de rotordiameter. Voor daken geldt dat in de RVO-dataset de bestaande panelen zijn uitgesloten als potentieel oppervlak en op die manier is deze meegenomen. Dit is echter wel de situatie in 2021. Meer recente data hebben we voor daken niet voor handen. Voor carports, erfmolens en gevels zijn geen data bekend. De locaties van de projecten die in de pijplijn zitten, zijn voor dit project **niet** in beeld en niet meegenomen.

B.1.5 Ruimte naar potentieel

Na het bepalen van de potentiële ruimte wordt dit vertaald naar een energetisch potentieel in MW per gebied. Voor zonne-energie wordt dit bepaald op basis van kentallen die zijn gebaseerd op een hoeveelheid die theoretisch kan worden opgewekt binnen de gegeven ruimte door middel van gangbare systeemopstellingen.

Voor windenergie op land hanteren we in het gismodel een plaatsingsmodel van turbines. In dit model worden alle ruimtes buiten de beperkingen beschouwd als potentiële ruimte, en hierbinnen wordt het maximaal aantal mogelijke turbines geplaatst, waarbij rekening wordt gehouden met een onderlinge afstand ten opzichte van elkaar. Dit model (beperkingen en plaatsing) is doorgerekend voor een aantal referentieturbines met verschillende afmetingen. Het resultaat hiervan wordt gegeven door de maximale optelling in MW.

B.1.6 Specificering van potenties naar archetypes

De archetypes zijn ruimtelijk gespecificeerd op basis van de ruimtelijke indeling van bestaande functie of inrichting of randvoorwaarden die van toepassing zijn in Nederland. Op basis van de ruimtelijke data zijn de gebieden gekaderd en onderverdeeld naar de verschillende archetypes. De uitkomsten van de potenties van de verschillende brontypes die binnen de gebieden van een archetype vallen, worden toegekend als potentie van dit archetype voor heel Nederland. Bij deze toekenning is er een volgorde gehanteerd om te voorkomen dat een potentie dubbel toegekend wordt.

Tot slot is er binnen de archetypen een bovengrens en een ondergrens bepaald. De bovengrens is het ruimtelijk-technisch potentieel. De ondergrens is tot stand gekomen door specifiek naar gebieden zelf te kijken en te bepalen of er projecten met een minimale omvang in MW daadwerkelijk binnen een gebied te realiseren zijn. Voor beiden is het effect van de zachtere beperkingen meegenomen.

Uiteindelijk zijn de waarden per archetype opgeteld voor heel het land.

B.2 Uitleg uitgangspunten GIS-modellen voor bepalen van het ruimtelijk potentieel

B.2.1 Potentieelanalyse grootschalig windenergie op land

Te volgen stappen met uitgangspunten:

Referentieturbines

3,6 MW met tiphoogte 150 m, 4,2 MW met tiphoogte 194 m en 5,6 MW met tiphoogte 241 m (2021).

Ruimtelijke hardere beperkingen

Voor de hardere beperkingen worden de rekenregels uit het Handboek Risicozonering Windturbines (Faasen et al., 2014) gevolgd per turbine. Deze hebben betrekking op veiligheidsafstanden ten opzichte van kwetsbare gebouwen, beperkt kwetsbare gebouwen, hoofdwegen, spoorwegen, vaarwegen, risico-inrichtingen, buisleidingen, hoogspanningsleidingen en primaire waterkering.

- Afstanden met betrekking tot geluid tot woningen in woonkernen 500 m en losse woningen buiten woonkernen 300 m.
- Laagvliegroute 10 en hoogtebeperkingen rondom nationale luchthavens en luchthavens in buurlanden.
- Laagvliegroutes/gebieden van Defensie zijn **niet** in beeld.

Potentiële ruimte voor windenergie op land na aftrek van:

- Resterend gebied na aftrek van de hardere beperkingen.
- Overige beperkingen als kassen, open wateren (Noordzee, Westerschelde, Waddenzee) en bestaande windturbines met beïnvloedingsruimte.

Plaatsingsmodel

In het plaatsingsmodel wordt het theoretisch maximaal aantal turbines binnen de potentiële ruimte geplaatst met een onderlinge afstand van vier keer de rotordiameter. Het resultaat van de potentiële ruimte zijn versnipperde vlakken onderling van grootteverschillen in het plaatsingsmodel. Er wordt rekening gehouden met deze vlakken. Wanneer potentiële ruimte binnen de vier keer rotorafstand ligt, wordt deze niet meegenomen. Deze methode zorgt ervoor dat er geen overlap tussen gebieden is.

Effecten van zachtere ruimtelijke beperkingen door onder andere provinciale regels

Voor beperkende maatregelen vanuit de provinciale verordening zijn meegenomen: Natura 2000, NNN, werelderfgoed, stiltegebied, weidevogelgebieden, boringsvrije zone en waterwingebieden.

Als radarbeperking zijn de 300 ft- en 500 ft-zones meegenomen als mogelijke beperking. Deze zones kennen een strengere toetsing.

Laagvliegroutes/gebieden LBG van Defensie zijn **niet** meegenomen in deze analyse. Hiervoor geldt dat het niet op voorhand uitgesloten wordt, maar dat er wel een toets gedaan dient te worden of windenergie op land in conflict is met hoogten.

Ontwerpbesluit afstandsnormen (niet meegenomen in resultaten)

Het ontwerpbesluit waarvan nog geen besluit is genomen, zal een effect gaan hebben op de mogelijkheden voor windenergie op land. In ons model hebben we deze regels vertaald en doorgerekend voor de referentieturbine 5.6 MW. Hieronder zijn de belangrijkste verschillen beschreven tussen beide uitgangpunten:

- Afstanden ten opzichte van geluid worden aangescherpt, waardoor de afstand tot woningen in het buitengebied, net als woningen in de modelberekening, ook 500 m wordt.
- De afstandsnorm ten opzichte van woningen van twee keer tiphoogte geeft voor een turbine kleiner dan 250 m tiphoogte geen extra afstandsbeperking, omdat deze binnen de geluidsbeperking zal vallen.
- De beperkt kwetsbare gebouwen zullen met dezelfde afstand als de kwetsbare gebouwen worden beschouwd, wat voor de modelberekening een afstand van 241 m aanhouden moet worden in plaats van 75 m.

De effecten die uit het model komen, geven aan dat er 47% van het potentieel voor een turbine van 5.6 MW overblijft in de archetypes. De mogelijkheden voor windenergie op land in het buitengebied zullen minder zijn door de grotere afstand tot woningen. Op en rondom bedrijventerreinen zullen de potentiële mogelijkheden minder zijn, omdat hier veel panden als beperkt kwetsbaar beschouwd zijn. De zal ook mogelijke consequenties hebben voor de repowering van bestaande turbines die op of rondom bedrijventerreinen staan of elders in de buurt van losse woningen.

Berekening ondergrens in MW per archetype

Binnen de archetypes is ook een analyse gemaakt voor een ondergrens. Dit is bepaald door het vermogen op te tellen van turbines die mogelijk dicht bij elkaar gerealiseerd kunnen worden, als dat binnen één project zou kunnen worden gerealiseerd. Dit is in een GIS-analyse gedaan door een ruimtelijk filter te maken van mogelijke turbines die binnen 100 m binnen van de vier keer rotorafstand elkaar overlappen.

Potentieel en vermogen: het vermogen van het aantal turbines dat binnen het archetype potentieel mogelijk geeft het potentieel weer. Bestaande turbines zijn afkomstig uit de dataset van Windstats (WindStats, lopend) en hierbij is gekeken naar het werkelijke vermogen.

B.2.2 Methodiek analyse zonnestroompotentie op velden

Bestaand grondgebruik dat geschikt is voor grootschalige zonnepanelen

Vanuit de methodiek die in het Ruimtelijk potentieel voor zonnestroom is er gekeken naar het huidige grondgebruik en de functie. Dit grondgebruik is vastgelegd in de BGT (Basisregistratie Grootchalig Topografie) (2021) voor heel Nederland en waar de categorisering niet specifiek genoeg is, deze aangescherpt met cbs-data uit BBG (Bestand Bodemgebruik) (2017). In de BGT is er op kavelniveau type grondgebruik met een functioneel gebruik gedefinieerd. In de BBG is een functioneel hoofdgebruik van een gebied weergegeven. Door deze datasets te combineren, kunnen gebieden geselecteerd worden die te combineren zijn voor zonne-energie. Deze methodiek leidt tot een nieuwe categorisering van het grondgebruik die geschikt is in combinatie met een opstelling van een zonnepaneel.

De gronden die in de analyse meegenomen zijn:

- overige begroeide en onbegroeide terreinen (zonder specifiek functioneel hoofdgebruik);
- bermen en verkeerseilanden;
- agrarische terreinen (grasland, akkerland en boom- of fruitteelt);
- bedrijfserven, deel dat bedekt is met gras;
- watervlakken en bassins met een golfslagcategorie 1 en 2, die geen Natura 2000 zijn of een recreatieve functie hebben.

Minimaal oppervlak voor de geschiktheid voor zonne-energie

In de analyse is het uitgangspunt genomen van een minimale afmeting van een kavel van 0,25 ha. Deze grens achten we aannemelijk als een ondergrens voor een zonneproject. Dit zorgt er ook voor in de analyse dat er een filtering is van kleine kavels met onwenselijke vormen die in de praktijk minder geschikt zijn voor het realiseren van zonne-energie op land.

Ruimtelijke beperkingen of specifieke selectie van gebieden

Voor beperkende maatregelen vanuit de provinciale verordening zijn meegenomen: Natura 2000, NNN, werelderfgoed en weidevogelgebieden. Kavels die boven transportbuisleidingen zijn gelegen, zijn uitgesloten.

Op bedrijventerreinen is een onderscheid te maken tussen uitgeefbare gronden en restgronden. Uitgeefbare gronden zijn economisch waardevolle gronden voor andere bedrijvigheid in de toekomst. Dit maakt dat het mogelijk minder realistisch is dat deze direct in aanmerking komen voor de ontwikkeling van zonne-energie.

Binnen de grote industrieclusters zijn leidingenstroken met buisleidingen en kabels gelegen. Het uitgangspunt is dat op de bovenliggende gronden geen zonneparken mogen komen en deze zijn uitgesloten van de analyse.

Onderscheid tussen potentie voor intensieve en extensieve projecten

In de analyse wordt er een onderscheid gemaakt in het potentieel voor zonne-energie op land tussen intensieve en extensieve projecten:

- Er is sprake van een extensieve potentie wanneer dit een potentieel project is, waarbij een opstelling samengaat met een bestaande functie. In deze analyse is als uitgangspunt aangenomen dat zonne-energie op land op agrarische gronden binnen het agrarische gebied en de bermen en verkeerseilanden als extensief worden beschouwd.
- Intensieve potentie zijn projecten waarbij in theorie het hele grondoppervlak geschikt is voor een potentie van zonne-energie. Dit zijn overige begroeide en onbegroeide terreinen, het geschikte deel op bedrijfsserven en water. Voor bepaalde agrarische gronden (uit de data) geldt dat deze zijn gelegen in een andersoortig functioneel gebied dan agrarisch, bijvoorbeeld een bedrijventerrein. Het uitgangspunt is dat deze gronden als potentieel intensief kunnen worden beschouwd.
- Als onderdeel van de archetypes is er bij bedrijventerreinen met intensieve vraag gekeken naar een zone rondom deze terreinen. Ook is er zo gekeken naar infrastructuur. Binnen deze zones zijn de agrarische gronden als intensief beschouwd.

Voor het potentieel in MW/ha zijn de volgende waarden aangenomen:

- Intensieve zonne-energie op land 1 MW/ha. (deze waarde komt afgerond overeen met een vlootgemiddelde van de referentie van zonne-energie op agrarisch grasland, die is opgenomen in de TKI-studie, rekening houdend met een rendementsverbetering naar 27,7% tot 2040) (TKI Urban Energy, 2021).
- Zonne-energie op water 1 MW per ha.
- Extensieve zonne-energie op land 0,43 MW/ha op basis van Verkenning Agri-pv in Nederland (Wageningen Universiteit, 2024):
- Deze benadering voor deze analyse ligt voor een groot deel in lijn met de **Voorkeursvolgorde Zon**. Het merendeel van de geschikte gronden die in deze studie zijn meegenomen, zijn primair geen agrarische gronden of natuurgronden. Wanneer dit wel het geval is, zijn deze als agri-pv meegenomen. Uitzondering hierop zijn de agrarische gronden die als intensieve gebieden. Ook zijn de gronden met natuurwaarden door de filter van NNN en Natura 2000 voor een groot deel meegenomen in de filter.

- **Berekening ondergrens in MW** per archetype: net als bij windenergie op land is er voor zonne-energie een ondergrens berekend per archetype, waarbij is gekeken in hoeverre het binnen een specifiek gebied van een archetype opgeteld een minimale grootte aan project gerealiseerd kan worden. De grootte is gebaseerd op het aantal ha dat benodigd is voor aantal MW en dat aangrenzend is.
- **Bestaande zonneparken** zijn afkomstig uit de dataset van OpenStreetmap (OSM) in combinatie met de Top10NL. Voor het inschatten van wat het huidige vermogen is van een zonneveld is de vuistregel van 1 MW/ha aangenomen voor de huidige parken.

B.2.3 Methode: gebouwen, daken en gevels, solar carports, erfmolens

Voor het berekenen van de potentie en bestaande zonne-energie voor **zonne-energie op daken** gaan we uit van de informatie die beschikbaar is over panden. Vanuit de BAG (Basisregistratie Adressen en gebouwen) (2025) hebben we informatie over het gebouwoppervlak en informatie over het gebruikstype. Deze zijn ook gekoppeld aan een dataset met corporatiewoningen in Nederland. Wanneer we deze combineren met de uitgangspunten van de TKI-studie, kunnen we een theoretisch potentieel geven. Vanuit de RVO-data van de kansrijke daken zijn er gegevens beschikbaar die een potentieel oppervlak weergeven per pand. Beide methodes geven een ondergrens en bovengrens van een potentieel weer en hebben een ander uitgangspunt. Het belangrijkste onderscheid tussen beide methodes is dat de TKI-methode uitgaat van het volledige dak en fracties berekent die betrekking hebben op randen en obstakels. De RVO-data gaan uit van een scan uit een luchtfoto en haalt daar oppervlaktes uit.

Het theoretisch maximum is berekend door het gebouwoppervlak van een pand als gezamenlijk oppervlak te nemen en deze naar de archetypen te onderscheiden, zodat we deze kunnen koppelen aan een potentieel vermogen dat in de TKI-studie is ontwikkeld. We onderscheiden de volgende categorieën:

- Woongebouwen laagbouw en hoogbouw zijn verder opgesplitst in corporatiewoningen en niet-corporatiewoningen.
- Utiliteitsgebouwen bestaan uit alle publieke en commerciële utiliteiten. In de BAG zijn dit de gebruiksfuncties (bijeenkomst, cel, gezondheidszorg, onderwijs, kantoor, logies, sport, winkel en overige gebruiksfunctie).
- Industriegebouwen zijn de gebouwen met een industriefunctie en zonder een van bovengenoemde functies.
- Overige bijgebouwen zijn de gebouwen die geen duidelijke gebruiksfunctie hebben. Deze zijn in klein en groot opgesplitst.
- Kassen zijn niet meegenomen.

Maximum op basis van dakenscan (ondergrens) zijn de data uit de dakenscan van RVO gebruikt uit 2021. De informatie die hierin zijn gebruikt, is het 'technisch potentieel oppervlak'. Dit is een resultante van een dakenscan op basis van luchtfoto's die ontwikkeld is door Readar in opdracht van RVO. In deze scan is per pand in beeld gebracht welk deel van het dak in theorie beschikbaar is voor zonne-energie. In deze scan vanuit de luchtfoto's worden een aantal effecten uitgesloten als potentieel: schaduw door bomen of objecten, bestaande panelen, objecten op daken en zij sluiten noord-daken uit. Een voorwaarde is dat de zonne-instraling > 700 kwh/jr is en een minimale maat van 5 m² heeft.

Het bestaande vermogen is afkomstig van CBS via Klimaatmonitor (Rijksoverheid, lopend). Voor heel Nederland is het opgestelde vermogen van zonne-energie voor woningen, niet-woningen en zonne-energie op land in de Klimaatmonitor weergegeven. Dit is verrekend naar een deel voor woningen, velden en overige panden. Dit totaal is verdeeld over de verschillende archetypes op basis van een verdeling naar rato op basis van gebouwoppervlak per categorie.

Voor zonne-energie op gevels zijn geen specifieke gegevens bekend. Het potentieel voor gevels is de schatting uit de TKI-studie overgenomen voor dit archetype. Deze schatting is gemaakt op basis van de verdeling naar bouwtype en een vormfactor. Dat is de schatting van het geveloppervlak. In gevels zitten onder andere ramen, deuren en andere obstakels (naar inschatting 30-40%) en een deel van de gevel heeft een lage instraling of er is sprake van schaduwwerking of begroeiing. Voor de ondergrens is daarom de inschatting uit de TKI-studie overgenomen. Voor grondgebonden woningen is dit 20% en voor gestapelde woningen en utiliteiten/industrie 40%.

Voor de **kentallen** voor zonne-energie op gebouwen (daken en gevels) baseren we ons op de TKI-kentallen. Deze kentallen geven de potentiële opbrengst per bruto gebruiksoppervlak per bouwtype. De potentiële opwek mwp/ha zijn geactualiseerd naar nieuwe schattingen voor het rendement van panelen richting 2040 en hiervan is een vlotgemiddelde berekend tussen 2025 en 2040.

Daken:

Grondgebonden woningen	2,06 MW/ha;
Gestapelde woningen	1,39 MW/ha;
Utiliteit	1,62 MW/ha;
Industrie	1,49 MW/ha;
Bijgebouw klein	1,39 MW/ha;
Bijgebouw groot	2,40 MW/ha.

Gevels:

Grondgebonden woningen	0,61 MW/ha;
Gestapelde bouw	0,92 MW/ha;
Utiliteit en industrie	1,23 MW/ha.

Methode Solar-carports

De potentiële ruimte voor carports is op basis van de grotere parkeerterreinen gemaakt. In de basisdata vanuit de BGT en BRT Top10NL zijn beide parkeerplaatsen gedefinieerd. In de Top10NL gaat het werkelijk om grotere parkeerterreinen waarvan het oppervlak is meegenomen. Bij de BGT is uitgegaan van parkeervlakken die samengesteld minimaal een oppervlakte hebben van 40 m² en die gelegen zijn in concentratiegebieden bij voorzieningen zoals: sportparken, ziekenhuizen, winkelcentra, etc. Het totale oppervlak is een combinatie van beide.

Voor het potentiële vermogen is ook een kengetal uit de TKI-studie genomen. Het gaat hier om overkapte parkeerplaatsen: 1,82 MW/ha. Bestaande carports zijn niet apart in beeld.

Methode Erfmolens

Vanuit de BGT zijn de erven die binnen 200 m van een boerderij gelegen zijn geselecteerd en aangemerkt als een potentiële locatie voor een erfmolen. Het uitgangspunt is dat er één erfmolen per locatie potentieel is.

Er zijn verschillende groottes in vermogen voor een erfmolen op de markt, van 15 kW tot 72 kW. In deze studie gaan we uit van een turbine met tussen de beide groottes van 40 kW.

B.2.4 Verdeling van potenties naar archetypen zonder dubbeltelling

De archetypen zijn een techniektype opwek op land met ruimtelijke en energetische eigenschappen. Binnen de lijst van archetypen bestaan vanuit de ruimte geredeneerd meer generieke archetypen en specifieke archetypen, waarbij de generieke archetypen meer zijn opgebouwd uit het grondgebruik dat verspreid over het hele land voorkomt. De specifieke archetypen zijn meer gericht op specifieke gebieden, bijvoorbeeld op bedrijventerreinen. In de toekenning van potenties naar de archetypen is het uitgangspunt om hier geen dubbeltellingen in voor te laten komen. Dit hebben we gedaan door de potenties eerst toe te kennen aan de specifieke archetypes en daarna aan de generieke archetypes. Een voorbeeld hiervan is dat de landbouwgrond dat binnen de contouren van archetype grootindustriële cluster en de kilometerzone tot dit archetype is gerekend en niet tot het archetype 'agri-pv'.

Hieronder een overzicht van de volgorde voor windenergie op land en zonne-energie waarin de potenties zijn toegekend:

Bedrijventerreinen:

- grote industrieclusters;
- cluster 6;
- bedrijventerrein als mobiliteitshub;
- overige bedrijventerreinen.

Buitengebied:

- bufferzone (1 km) Grote industrieclusters;
- bufferzone (500 m) Cluster 6;
- bufferzone (100 m) Mobiliteitshubs;
- bijplaatsen zonne-energie of windenergie;
- verziltingsgronden of veenontginningsgebieden (windenergie);
- natuurherstelzone (zon);
- brownfields of restlandschappen Stortplaatsen/Delfstofwinning;
- infrastructuur en Infrastructuurzone (100 m);
- luchthavens;
- agri-pv;
- zonne-energie op water.

Gebouwen:

- woningen;
- gebouwen op bedrijventerreinen (industrie, utiliteit en bijgebouwen);
- mkb.

B.3 Ruimtelijke analyse Archetypes

De energetische potenties voor zonne-energie en windenergie op land zijn toegerekend aan archetypen. Concreet houdt dit in dat de archetypen ruimtelijk zijn gedefinieerd en via een GIS-analyse duidelijk zijn gespecificeerd. Per archetype zijn de verschillende opties voor de opwek van zonne-energie of windenergie op land. Hieronder een beschrijving van de achtergronden en uitgangspunten van de verschillende archetypen. De potentie van elk van de archetypen is te vinden in de paspoorten in Bijlage A.

In eerste instantie wordt er binnen de kaders van een archetype zelf gekeken. Vervolgens is er voor een aantal archetypen ook in een zone rondom gekeken. Dit doen we enerzijds omdat dit overeenkomt met het huidige beeld. Bijvoorbeeld bij de grote industrieclusters zoals Terneuzen, de Rotterdamse haven en Eemshaven is dit al het geval. Dit geldt ook voor andere bedrijventerreinen waar een grotere vraag te verwachten is en waar op de terreinen zelf de ruimte schaarser is. Voor infrastructuur geldt hiervoor een andere reden. Hier kijken we ook in een zone rondom, omdat dit vanuit provinciaal beleid vaak de voorkeur heeft. Langs een lijninfrastructuur van hernieuwbare opwek wordt landschappelijk beter inpasbaar geacht en dit zien we ook terug in ruimtelijke visies.

Voor de ruimtelijke analyse naar archetypen gaat uit van de huidige situatie op basis van de beschikbare informatie. Toekomstige plannen zijn niet in beeld; denk aan plekken waar uitbreidingen van woningen zijn gepland. Voor bedrijventerreinen geldt dat alleen de locaties die onderdeel zijn van de IBIS uit 2022 bekend zijn. Plannen voor verdere uitbreidingen niet.

B.3.1 Decentraal

Grote industriecluster (en zone van 1 km)

Ruimtelijke afweging

In Nederland kennen we vijf energie-intensieve industrieclusters (Noord-Nederland, Chemelot, Noordzeekanaalgebied, Rotterdam-Moerdijk en Zeeland-West-Brabant).

In de Nota Ruimte worden deze gebieden geduid als gebieden die moeten verduurzamen, versterkt worden en beschermd. In dit archetype worden de contouren van de bedrijventerreinen die tot deze energieclusters behoren meegenomen in de analyse. Daarnaast is er in een zone van 1 km rondom deze terreingrenzen apart gekeken naar het potentieel.

GIS-data-analyse

IBIS-bedrijventerreinen (bestaand en gepland) (2022) (selectie van de betreffende terreinen afkomstig van Vereniging Deltametropool).

Voorkomende techniektypen binnen archetype

- zonne-energie op daken (industrie, bijgebouw, utiliteit);
- zonne-energie op veld (intensief en extensief);
- windenergie op land (5,6 MW).

Bedrijventerrein met cluster 6 (en zone van 500 m)

Ruimtelijke afweging

Cluster 6-bedrijventerreinen waar industrie gelegen is, die een hoge uitstoot kent van CO₂.

In de Nota Ruimte worden deze gekenmerkt als gebieden die onderdeel zijn van een regionaal ecosysteem, dat versterkt wordt. Het deel van het bedrijventerrein waarin de industrie is gevestigd, is onderdeel van dit archetype. Daarnaast is er in een zone van 500 m rondom deze terreingrenzen apart gekeken naar het potentieel.

GIS-data-analyse

IBIS-bedrijventerreinen (bestaand en gepland) (2022) (selectie van de betreffende terreinen afkomstig van Vereniging Deltametropool).

Techniektypen binnen archetype

- zonne-energie op daken (industrie, bijgebouw, utiliteit);
- zonne-energie op veld (intensief en extensief);
- windenergie op land (5,6 MW).

Bedrijventerrein met mobiliteitshub (en zone van 100 m)

Ruimtelijke afweging

Bedrijventerreinen met een groot logistiek karakter hebben in de toekomst een grote laad-vraag voor het logistieke wagenpark. In de analyse zijn de bedrijventerreinen waar vijf of meer logistieke bedrijven gevestigd zijn, beschouwd als een Mobiliteitshub. Deze bedrijventerreinen zijn over het algemeen gelegen tegen een woonkern. Voor deze terreinen geldt dat we hier ook in een zone van 100 m eromheen kijken.

GIS-data-analyse

IBIS-bedrijventerreinen (bestaand en gepland) (2022) (selectie van de betreffende terreinen afkomstig van Vereniging Deltametropool).

Techniektypen binnen archetype

- zonne-energie op daken (industrie, bijgebouw, utiliteit);
- zonne-energie op veld (intensief en extensief);
- Windenergie op land (3,6 MW).

Overig bedrijventerrein

Ruimtelijke afweging

De reguliere of overige bedrijventerreinen zijn de bedrijventerreinen waar geen van de bovenliggende energetische profielen aanwezig is. Hier wordt alleen gekeken binnen de contouren van het terrein zelf.

GIS-data-analyse

IBIS bedrijventerreinen (bestaand en gepland) (2022).

Techniektypen binnen archetype

- zonne-energie op daken (industrie, bijgebouw, utiliteit);
- zonne-energie op veld (intensief en extensief);
- windenergie op land (3,6 MW).

Gebouwen mkb

Ruimtelijke afweging

Alle utiliteitsgebouwen waarvan op basis van het gebruik van het pand behoort tot de utiliteitssector. Binnen dit archetype zijn de panden buiten de bedrijventerreinen meegenomen.

GIS-data-analyse

BAG panden met een gebruiksfunctie: bijeenkomst, cel, gezondheidszorg, onderwijs, kantoor, logies, sport, winkel en overige gebruiksfunctie.

Techniektypen binnen archetype

Zonne-energie op daken utiliteit.

Gebouwen woningen

Ruimtelijke afweging

Woningen zijn binnen deze analyse opgesplitst in hoogbouw en laagbouw en in corporatieve woningen en particuliere woningen.

GIS-data-analyse

BAG woonfunctie aangevuld met corporatieve woningen.

Techniektypen binnen archetype

Zonne-energie op daken Woningen.

Erfmolens

Ruimtelijke beschrijving

Op het erf van een boerderij is het mogelijk om het eigen verbruik met een eigen molen op te wekken. Als referentie is aangenomen dat deze binnen 200 meter van de woning is gelokaliseerd.

GIS-data-analyse

Erven BGT in agrarisch gebied, BBG2017 binnen 200 meter van de woning.

Techniektypen binnen archetype

Erfmolens.

Solar-Carports

Ruimtelijke afweging

Waar grotere parkeerterreinen zijn geconcentreerd, kan een zonnestelsel voor opwek gecombineerd worden met locaties waar geladen wordt. In deze analyse zijn grotere parkeerterreinen meegenomen.

GIS-data-analyse

Grotere parkeerterreinen uit de Top10NL, aangevuld met parkeerterreinen uit BGT die zijn gelegen in concentratiegebieden voor commerciële, maatschappelijke en sportterreinen.

Techniektypen binnen archetype

Zonne-energie op Carports.

B.3.2 Losse wind- of zonneparken**Zonne-energie op landbouwgrond rondom Natura 2000-gebied****Ruimtelijke afweging**

Intensieve landbouw naast Natura 2000-gebieden kan een uitstoot hebben die nadelig is voor soorten binnen deze natuurgebieden. Extensieve zonne-energie op land kunnen bijdragen aan het herstel van de biodiversiteit in de zone rondom Natura 2000 door de druk van intensieve landbouw hier weg te nemen. Het belang van natuureffect en -ontwikkeling wordt in RES-monitor (PBL, 2024a) benadrukt. Onze vertaling voor dit archetype is gericht op de Natura 2000-gebieden en het potentieel dat binnen een zone van 500 meter eromheen.

GIS-data-analyse

Natura 2000-gebied, met daaromheen een bufferzone van 500 m. Hierbinnen zijn de agrarische gronden uit de BGT als potentieel aangenomen.

Techniektypen binnen archetype

Zonne-energie op veld extensief op landbouwgrond.

Zon- en windenergie Landbouwgebied**Ruimtelijke afweging**

In landbouwgebied is veel ruimte voor windenergie op land of zonne-energie. Windenergie op land kan gecombineerd worden met landbouw, omdat de voetafdruk van een turbine niet veel oppervlakte inneemt. In het landbouwgebied zijn minder woningen en daardoor zijn hier meer plekken zonder beperkingen. Voor zonne-energie geldt dat het landbouwgebied over het algemeen valt binnen de vierde trede van de zonneladder. Voor agri-pv, waarbij er sprake is van multifunctioneel ruimtegebruik, zijn er mogelijkheden dit te combineren met bestaande landbouw.

GIS-data-analyse

Vanuit de BGT de landbouwgronden (grasland, akkerland, boomteelt en fruitteelt). Voor wind- en zonne-energie is gekeken binnen het BBG-gebied waar het agrarisch areaal is aangegeven.

Techniektypen binnen archetype

- zonne-energie op land extensief;
- windenergie op land (4.2 MW).

Windenergie op verziltingsgronden en veenontginningsgebieden

Ruimtelijke afweging

In gebieden waar complexere en meervoudige opgaven liggen voor de landbouw, kan de opwek van energie voor sommige landbouwbedrijven een perspectief bieden voor de toekomst. In de Nota Ruimte worden onder andere verziltingsgebieden en veengronden aangeduid als gebieden met een meervoudige opgave. Dit archetype kijkt naar de kansen voor windenergie op land in deze gebieden.

GIS-data-analyse

Ontgonnen veenvlakten uit geomorfologische kaart 2019, Atlas Natuurlijk kapitaal
Verziltig grondwater diepte 0 tot 5 m, 2015.

Techniektypen binnen archetype

Windenergie op land (4.2 MW).

Zonne-energie of windenergie brownfields of restlandschappen: infrastructuur (en zone van 1 km), luchthavens en stortplaatsen of delfstofwinning

Ruimtelijke afweging

Onder restlandschappen of brownfields verstaan we terreinen waar een bepaalde functie gecombineerd kan worden met zonne-energie of windenergie op land. Vanuit landschapelijk oogpunt zijn dit terreinen waar sprake is van een onderbreking van het landschap. In geval van voormalige stortplaatsen of delfstofwinning is er mogelijk sprake van deelgronden die te combineren zijn met zonne-energie of windenergie op land. Bij luchthavens is een deel langs de landingsbaan geschikt voor zonne-energie. Infrastructuren zoals snelwegen of spoorwegen zijn ook locaties waarlangs zonne-energie een plek kan krijgen. Voor windenergie op land geldt hier dat een lijnopstelling vaak voorkeur heeft in provinciaal beleid. In de zone van 100 m is het uitgangspunt dat er intensieve parken mogelijk kunnen zijn. Binnen de directe zone van infrastructuur gaat het vooral om randen langs wegen en spoor of in knooppunten.

GIS-data-analyse

Luchthavens, infrastructuur, stortplaatsen en plaatsen voor delfstofwinning afkomstig van BBG2017. Zone 100 m langs snelwegen en spoor Top10NL.

Techniektypen binnen archetype

- Windenergie op land (4.2 MW);
- Zonne-energie op land (intensief en extensief).

Zonne-energie op water: bassins en spaarbekken, vloe- of slibvelden en delfstofwinning en overig water

Ruimtelijke afweging

Voor zonne-energie op water zijn in de analyse de wateren met golfslagcategorie 1 en 2 meegenomen. Daarnaast enkel de watervlakken en geen kanalen, rivieren of sloten. Ook zijn de wateren met een Natura 2000 uitgesloten en, zover dit bekend is, de recreatieve functies. Voor water zijn drie categorieën onderscheiden.

1. Bassins en spaarbekken: deze zijn vaak gelegen bij een energievraag.
2. Vloe- of slibvelden en water voor delfstofwinning: deze zijn enigszins in het buitengebied afgelegen en kunnen als multifunctioneel gelden met zonne-energie.
3. De laatste categorie is het overige water.

GIS-data-analyse

Top10NL watervlakken, golfslagcategorie op basis van TKI-studie, waterbassins BGT, spaarbekkens, vloe- en slibvelden en water voor delfstofwinning BBG2017.

Techniektypen binnen archetype

Zonne-energie op water.

B.3.3 Extra hernieuwbare opwek bij bestaande opwek

Repowering

Zonne-energie bijplaatsen bij wind, Ruimtelijke afweging, windenergie bijplaatsen bij zonne-energie

Ruimtelijke afweging

Waar nu al energie wordt opgewekt door zonne-energie en/of windenergie op land, is het mogelijk om windenergie bij te plaatsen bij zonneparken of zonne-energie op land te plaatsen waar momenteel windenergie op land is. Daarnaast is repoweren een optie. Het uitgangspunt voor repoweren is dat de huidige turbines op dezelfde plek met hetzelfde vermogen kunnen worden teruggeplaatst. Voor het plaatsen van windenergie op land nabij zonne-energie is er 150 m rondom bestaande zonneparken die groter zijn dan 4,5 MW gekeken of hier windenergie op land mogelijk is. Voor zonne-energie bij windenergie is er binnen een straal van 250 m rondom bestaande windturbines gekeken hoeveel zonne-energie hier potentieel te realiseren is.

GIS-data-analyse

Bestaande windturbines (Windstats, dec 2024), bestaande zonneparken OSM 2025 in combinatie met Top10NL.

Techniektypen binnen archetype

- Zonne-energie op land (intensief en extensief);
- Windenergie op land (4,2 MW).

C Netinpassing archetypen

C.1 Algemene aandachtspunten voor netinpassing

Een efficiënte inpassing van hernieuwbare opwek op land in het elektriciteitsnet is een cruciale randvoorwaarde voor nieuwe projecten vanwege de problemen rondom netcongestie die in bijna het hele land spelen en ook in de toekomst een uitdaging zullen blijven.

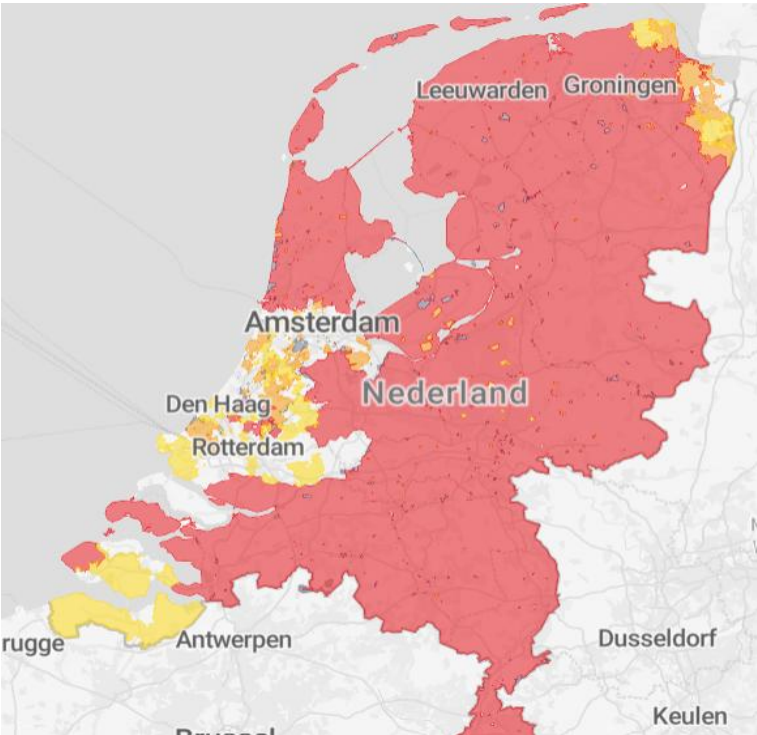
De kaart in Figuur 56 toont de capaciteitskaart voor teruglevering van elektriciteit. Hierin is te zien dat er bijna in heel Nederland, met uitzondering van delen van Noord-Holland, Zuid-Holland en Zeeland, sprake is van een verwacht tekort aan transportcapaciteit op momenten met veel productie voor hernieuwbare bronnen^{59,60}.

Door netcongestie kunnen partijen geen nieuwe of een grotere grootverbruikersaansluiting krijgen voor teruglevering van elektriciteit en is er sprake van een wachtrij. Dat zorgt ervoor dat het erg lastig is om nog nieuwe projecten voor hernieuwbare opwek op land te realiseren in die gebieden. Kleinere projecten, met een kleinverbruikersaansluiting, kunnen wel nog terugleveren binnen een bestaande aansluiting. Naar verwachting zullen kleinverbruikers volgens het nieuwe prioriteringskader vanaf 2026 ook getoetst worden, voordat er een nieuwe aansluiting of uitbreiding vergeven kan worden (ACM, 2025). Met het nieuwe prioriteringskader worden groot- en kleinverbruikers dus op dezelfde manier beoordeeld, en wordt capaciteit toegewezen op basis van het prioriteringskader. Het is nog onduidelijk hoe (hernieuwbare) opwek beoordeeld gaat worden in het nieuwe prioriteringskader, maar waarschijnlijk is er geen voorrangssituatie. Congestieverzachters zoals batterijen en systemen voor slimme netinpassing krijgen wel voorrang.

⁵⁹ In de gebieden waar een tekort aan transportcapaciteit is uitgeroepen en waar sprake is van een wachtrij, is niet per definitie nu al een tekort aan capaciteit. De netbeheerders nemen hierin ook mee dat ze de autonome ontwikkelingen van kleinverbruikersaansluitingen, dus bijvoorbeeld een toename van zonnepanelen bij huishoudens, in de toekomst moeten kunnen faciliteren.

⁶⁰ Het tekort aan transportcapaciteit voor teruglevering van elektriciteit treedt slechts een deel van het jaar op, op momenten met veel windenergie en/of zonne-energie.

Figuur 56 – Capaciteitskaart teruglevering elektriciteit



Bron: (Netbeheer Nederland, 2025a) (7 november 2025).

Tabel 12 – Overzicht huidige situatie netcongestie teruglevering

Provincie	Geen transportcapaciteit voor teruglevering?	Wanneer zijn de huidige problemen opgelost (volgens huidige planning)?
Groningen	In een deel van de provincie is nog beperkte capaciteit beschikbaar	2035
Friesland	In de hele provincie	2027
Drenthe	In de hele provincie	2034
Overijssel	In de hele provincie	2036
Gelderland	In de hele provincie	2035
Flevoland	In de hele provincie	2035
Utrecht	In de hele provincie	2035
Noord-Holland	In noordelijk deel congestie, in zuidelijk deel niet	2027
Zuid-Holland	Slechts beperkte congestie	Nog geen volledige congestie
Zeeland	In een deel van de provincie is nog beperkte capaciteit beschikbaar	Nog geen volledige congestie
Noord-Brabant	In de hele provincie	2027
Limburg	In de hele provincie	2030

Bron: (Netbeheer Nederland, 2025a).

Figuur 56 en Tabel 12 geven een overzicht van de situatie rondom het tekort aan transportcapaciteit in de verschillende provincies. Netuitbreidingen zullen zorgen voor meer transportcapaciteit, waardoor de huidige problemen met tekorten aan capaciteit opgelost worden. Maar deze projecten hebben lange doorlooptijden en de problemen zijn groot. Voor elk van de provincies is een indicatie gegeven wanneer verwacht wordt dat de huidige tekorten aan capaciteit voor teruglevering opgelost zijn. Er wordt hierbij gekeken naar het totaalbeeld. Dat beeld is sterk afhankelijk van de congestie op het hoogspanningsnet: als op dit niveau congestie heerst, is het meestal ook niet mogelijk om op lagere netvlakken terug te leveren. Dit aangezien er op hogere netvlakken ook ruimte moet zijn, indien de stroom niet lokaal gebruikt wordt en verder getransporteerd moet worden. In wezen is een gebied daarom pas congestievrij en geschikt voor teruglevering als op alle netvlakken (zowel van de regionale netbeheerders als van TenneT) er geen congestie is.

In veel gevallen duurt de congestie volgens de huidige planning nog tot het eind van de jaren '20 of begin van de jaren '30, maar mogelijk nog langer als projecten voor netuitbreidingen verdere vertraging oplopen. Daarna is er in principe voldoende capaciteit voor de ontwikkelingen die op dit moment verwacht worden, maar ook dan is er niet oneindig transportcapaciteit beschikbaar en is efficiënte netinpassing nodig. Daarnaast is het wenselijk om de opgave voor uitbreidingen van het elektriciteitsnet te beperken om de kosten en ruimtelijke impact te beperken en de opgave uitvoerbaar te houden. Daarom blijft het van groot belang om het elektriciteitsnet zo efficiënt mogelijk te benutten en er bij nieuwe projecten voor hernieuwbare opwek op land voor te zorgen dat deze zo min mogelijk zorgen voor extra netimpact en dat deze inpasbaar zijn in congestiegebieden.

Voor een efficiënte inpassing in het elektriciteitsnet zijn de volgende aspecten van belang:

Koppeling aanbod aan lokale vraag: een belangrijke manier om de impact van hernieuwbare opwek op het elektriciteitsnet te verminderen, is het realiseren van het hernieuwbare aanbod bij elektriciteitsvraag en het koppelen van het aanbod aan deze vraag. Hierdoor is minder transport van elektriciteit via het net nodig van de opweklocatie naar de locatie van afname. Voor het koppelen van vraag en aanbod is fysieke nabijheid van belang, zodat het aanbod en de vraag op hetzelfde onderdeel van het elektriciteitsnet zitten. Idealiter wordt de hernieuwbare opwek achter dezelfde netaansluiting gerealiseerd.⁶¹ (voor grootverbruikersaansluitingen in gebieden met teruglevercongestie is zelfs dit een vereiste, omdat er niet teruggeleverd kan worden).

Realisatie van hernieuwbaar aanbod bij lokale vraag leidt er niet automatisch toe dat het hernieuwbare aanbod geen extra belasting op het elektriciteitsnet veroorzaakt. Een deel van de geproduceerde elektriciteit wordt lokaal direct benut, maar het is nog steeds mogelijk dat er, op zonnige en/of winderige momenten, hernieuwbare opwek teruggeleverd moet worden. En dat zal gebeuren op momenten dat er weinig of geen resterende capaciteit is op het elektriciteitsnet (omdat andere bronnen dan ook produceren). Ook als alle

⁶¹ Een groepscontract is hierbij ook een mogelijkheid, bijvoorbeeld bij bedrijventerreinen.

hernieuwbare opwek direct achter de meter benut wordt, kan dit wel leiden tot een hogere netbelasting. Er valt dan namelijk vraag weg op momenten met veel hernieuwbare opwek, waardoor de netto-belasting op de elektriciteit toeneemt. Desalniettemin is het gunstiger voor het elektriciteitsnet als het aanbod zoveel mogelijk gekoppeld wordt aan de vraag.

De volgende zaken zijn van belang om te zorgen dat de koppeling van aanbod aan lokale vraag niet zorgt voor meer belasting op het elektriciteitsnet:

- **Dimensionering hernieuwbare opwek:** door de juiste dimensionering van de hoeveelheid opwek ten opzichte van de vraag kan ervoor gezorgd worden dat de geproduceerde elektriciteit vooral de lokale vraag invult en dat er niet op structurele basis meer geproduceerd wordt dan de lokale vraag en teruggeleverd wordt. Hoeveel hernieuwbare opwek wenselijk is, hangt af van hoe goed het vraagprofiel aansluit bij het opwekprofiel en of er ook opslag of afschakeling van opwek toegepast wordt (zie komende twee punten).
- **Type opwek:** een combinatie van windenergie en zonne-energie sluit in het algemeen beter aan bij de elektriciteitsvraag dan alleen windenergie of alleen zon.
- **Aansluiten vraagprofiel bij opwekprofiel:** om zoveel mogelijk van de geproduceerde elektriciteit direct te benutten, is het van belang dat de vraag plaatsvindt op het moment dat elektriciteit geproduceerd wordt. Bij realisatie van zonne-energie is het van belang dat het grootste deel van de elektriciteitsvraag overdag plaatsvindt. Idealiter kan de vraag naar elektriciteit ook flexibel afgestemd worden op de productie, bijvoorbeeld bij logistieke partijen met laadpalen die slim laden toepassen.
- **Opslag en afschakelen opwek:** opslag van elektriciteit met batterijen (of andere vormen van opslag) en het afschakelen van opwek kunnen ervoor zorgen dat de teruglevering van hernieuwbare opwek gereduceerd wordt, op momenten dat de productie toch hoger is dan de lokale vraag.

Alternatieve Transportrechten (ATR) ('non-firm') en capaciteitsbeperkingscontracten (contracten voor nieuwe en bestaande aansluitingen) maken teruglevering buiten piekuren mogelijk en ontsluiten restcapaciteit; ze worden landelijk uitgerold, maar worden, met name voor teruglevering, nog nauwelijks door regionale netbeheerders aangeboden in de praktijk. Met deze alternatieve contractvormen kunnen nieuwe projecten toch een aansluiting krijgen in congestiegebieden of bestaande uitbreiden, weliswaar met beperkingen gedurende terugleverpieken. Voor producenten is een capaciteitsbeperkend contract gunstiger, aangezien dit tijdelijk is en alternatieve transportrechten permanent. Daarnaast zijn alternatieve transportrechten voor producenten niet interessant, aangezien ze geen korting kunnen krijgen op nettarieven (omdat ze die nu niet betalen).

Alternatieve contractvormen zijn voor projecten met hernieuwbare opwek waarschijnlijk alleen mogelijk bij een combinatie met opslag (of andere vorm van flexibiliteit) en/of afschakeling/curtailment en/of bij toepassingen die niet produceren op momenten waarop de terugleveringscongestie plaatsvindt (bijvoorbeeld windturbines in gebieden met congestie door zonne-energie, of verticale panelen met een ander productieprofiel).

Congestiemanagement (voor bestaande aansluitingen): bredere toepassing van congestiemanagement bij de huidige projecten van hernieuwbare opwek op land kan ervoor zorgen dat meer ruimte beschikbaar komt op het net voor nieuwe projecten. Er worden momenteel al congestieonderzoeken door de netbeheerders uitgevoerd om te bepalen welke ruimte hierdoor ontstaat op het elektriciteitsnet. Vervolgens kunnen grootverbruikers flexibel vermogen aanbieden tegen vergoeding (Realtime Interface en Redispatch) of een capaciteitsbeperkings-contract (CBC) afsluiten waarin tegen vergoeding structureel flexibiliteit geboden wordt.

Terugleveringstarief: in 2023 is de ACM begonnen met de voorbereidingen van een terugleveringstarief voor grote producenten van elektriciteit. In november 2025 is de ACM een consultatie gestart voor de vormgeving van een transporttarief voor teruglevering. De motivatie hiervoor is dat de ACM wil dat grote producenten van elektriciteit die stroom terugleveren aan het elektriciteitsnet gestimuleerd worden om het net efficiënt te gebruiken en op een eerlijke manier bij te dragen aan de stijgende kosten voor het verzwaren en uitbreiden van het elektriciteitsnet door het invoeren van een terugleveringstarief.

Cable pooling en co-locatie: het delen van één aansluiting door wind, zonne-energie en/of opslag vermindert piekteruglevering en maakt extra projecten mogelijk zonder extra aansluitcapaciteit (nu al toegestaan en verder verruimd in de nieuwe Energiewet). Uit recent wetenschappelijk onderzoek blijkt dat het mogelijk en financieel aantrekkelijk is om zonne-energie en opslag toe te voegen bij bestaande windparken, om zo meer hernieuwbare elektriciteit te kunnen leveren binnen dezelfde netaansluiting (Van Druten & Van Wieringen, 2025).

Gesloten distributiesysteem (GDS): dit is een elektriciteitsnet op een afgebakend terrein (bijvoorbeeld een industrie- of bedrijventerrein, luchthaven of ziekenhuiscluster) dat niet openbaar toegankelijk is en waarin één beheerder verantwoordelijk is voor de interne elektriciteitsverdeling tussen de verschillende aangesloten op een GDS. Hernieuwbare opwek kan aangesloten worden op een GDS, waarbij lokale optimalisatie van productie en verbruik mogelijk is. Als de hernieuwbare opwek in lijn met het verbruik op een GDS geïnstalleerd wordt, is er geen teruglevercapaciteit nodig.

Opwekprofielen bronnen hernieuwbare opwek: zonne-energie heeft energetisch gezien in algemene zin een minder gunstig profiel dan windenergie op land, omdat er minder vollasturen zijn en er vooral opwek in de zomer is en overdag is, terwijl de grootste energievraag met name 's avonds is en in de winter plaatsvindt. Windenergie op land heeft een hoger winterdeel en minder scherpe middagpieken dan zonne-energie.

Het meest gunstig is echter een combinatie van windenergie en zon. De productie van windturbines en zonne-energie is grotendeels complementair en de combinatie zorgt ervoor dat meer uren elektriciteit geleverd wordt. Dat maakt inpassing aantoonbaar energetisch gunstiger en robuuster dan bij alleen zonne-energie. Zonne-energie georiënteerd op het oosten en westen, met name bij verticale panelen (op gevels of op land), of zonne-energie gecombineerd met opslag is energetisch ook gunstiger, aangezien dit geen middagopwekpiek oplevert.

Capaciteit en netvlakken: veel van de huidige hernieuwbare opwek is nu op het midden-spannings- of laagspanningsnet aangesloten. Direct invoeden op het hoogspanningsnet (110/150 kV), wat mogelijk is bij grotere projecten (> 80 MW), ontlast het MS- en LS-net en kan ervoor zorgen dat er op die netvlakken minder congestie is. In veel regio's zit de congestie echter ook op TenneT-niveau, vaak bij de transformatoren tussen 110/150 kV en 220/380 kV. Daarvoor levert het aansluiten op 110/150 kV niets op. Het is een oplossing in gebieden waar alleen sprake is van congestie op de MS-/LS-netten en kan verergering van de congestie op deze netten beperken.

Kleinverbruik vs. grootverbruik: kleinverbruikers ($\leq 3 \times 80$ A) kunnen doorgaans binnen hun bestaande aansluiting terugleveren. Grootverbruikers kunnen dit niet en hebben toestemming nodig van de netbeheerder voor teruglevering (nettoets). Zoals eerder besproken aan het begin van deze paragraaf wordt er bij het nieuwe prioriteringskader, dat vanaf begin 2026 actief is, geen automatische voorrang aan kleinverbruikers meer gegeven.

Hiervoor hebben we besproken welke opties er zijn om de problemen met teruglevering van elektriciteit te beperken. Er is op dit moment echter ook in een groot deel van Nederland een tekort aan capaciteit voor afname van elektriciteit. Hernieuwbare opwek op land kan een (deel van de) oplossing zijn voor afnamecongestie. Bijvoorbeeld bij afnemers die willen uitbreiden of elektrificeren, maar dit niet kunnen door afnamecongestie. Hernieuwbare opwek kan een deel van de vraag invullen, waardoor afnemers mogelijk binnen dezelfde aansluiting toch extra vraag kunnen realiseren. Daarnaast kan het realiseren van extra hernieuwbare opwek in congestiegebieden voor afname ervoor zorgen dat er meer ruimte ontstaat op het net.

Hernieuwbare opwek op land is echter alleen een oplossing bij afnamecongestie als er ook daadwerkelijk elektriciteit geleverd kan worden op het moment dat de afnamecongestie optreedt. Of dit haalbaar is, verschilt per gebied en daarnaast is dit naar verwachting alleen haalbaar bij windenergie op land (eventueel met zonne-energie) en in combinatie met andere oplossingen (zoals opslag en/of aggregaten). Daarnaast is het van belang dat de hernieuwbare opwek die gerealiseerd wordt als oplossing voor afnamecongestie, niet nieuwe terugleveringscongestie veroorzaakt. Uit recent onderzoek blijkt dat een combinatie van windenergie, zonne-energie en batterijen bij enkele doorgerekende casussen voor bedrijventerreinen met afnamecongestie kan leiden tot een reductie van de piekbelasting

voor afname van 15%, en dat daarmee dus ruimte voor elektrificatie of uitbreidingen wordt gerealiseerd (EqoLibrium, 2025). Het onderzoek benadrukt dat hiervoor een combinatie van windenergie en zonne-energie en een batterij noodzakelijk is voor een significante reductie van de afnamepiek, alleen zonne-energie of hernieuwbare opwek zonder batterij is onvoldoende.

C.2 Overzicht netinpassing per archetype

In deze paragraaf geven we een beschouwing van netinpassing en netimpact van elk van de archetypen. We gaan hierbij in op aandachtspunten bij de netinpassing in het algemeen en specifieke aandachtspunten of maatregelen voor inpassing in congestiegebieden. De netimpact is afhankelijk van de lokale netsituatie en daarmee van de exacte locatie. Echter, er zijn in algemene zin wel specifieke eigenschappen en randvoorwaarden voor een gunstige netinpassing per archetype te beschouwen.

Belangrijke aspecten bij de netinpassing van archetypen zijn de mate van lokale benutting van de opwek, de match tussen aanbod- en vraagprofiel, en de verwachte teruglevering op het net (omvang en momenten). Daarnaast kijken we per archetype naar aandachtspunten rondom inpassing in congestiegebieden. Bij sommige archetypen zijn mitigerende maatregelen mogelijk om de netimpact te reduceren, zoals dimensionering op eigen verbruik, combinatie windenergie en zonne-energie, oost-westoriëntatie, opslag en andere flexibiliteit, curtailment en alternatieve transportrechten en capaciteitsbeperkingscontracten.

In deze paragraaf geven we een beschouwing van de energetische effecten en netimpact van elk van de archetypen. Daarnaast geven we de resultaten van enkele indicatieve kwantitatieve analyses naar de netimpact van de archetypen.

In Tabel 13 zijn de afwegingen rondom de netinpassing van de archetypen opgenomen. De netimpact is afhankelijk van de lokale netsituatie en daarmee van de exacte locatie. Echter, er zijn in algemene zin wel specifieke eigenschappen en randvoorwaarden voor een gunstige netinpassing per archetype te beschouwen. Daarbij geven we aan wat de typische schaalgrootte van de archetypen zijn: kleinschalig (aansluiting op LS-net), middelgroot (aansluiting op MS-net) of grootschalig (aansluiting op HS-net). Belangrijke aspecten bij de energetische effecten van archetypen zijn de mate van lokale benutting van de opwek, de match tussen aanbod- en vraagprofiel en de verwachte teruglevering op het net (omvang en momenten). Daarnaast kijken we per archetype naar aandachtspunten rondom inpassing in congestiegebieden. Bij sommige archetypen zijn mitigerende maatregelen mogelijk om de netimpact te reduceren, zoals dimensionering op eigen verbruik, combinatie windenergie en zonne-energie, oost-westoriëntatie, opslag en andere flexibiliteit, curtailment en alternatieve transportrechten en capaciteitsbeperkingscontracten.

Tabel 13 – Overzicht energetische effecten archetypen

Archetypen	Typische schaalgrootte	Energetische inpassing	Eigenschappen opwekinstallatie i.r.t. netinpassing	Realisatie in congestiegebieden (mogelijkheid tot teruglevering)	Voordelen rondom netcongestie
Hernieuwbaar in grote industrie-clusters	Grootschalig (HS-niveau)	Constante hoge elektriciteitsvraag (stoom, compressoren, e-boilers, elektrolyzers), waardoor hernieuwbare stroom gelijk afgenomen kan worden. Mogelijkheden voor flexibele invulling van vraag bij e-boilers en elektrolyzers. Windenergie sluit goed aan op wintervraag; pv vult zomerdaguren.	Windenergie + zonne-energie met oversizing t.o.v. gemiddelde vraag is verdedigbaar als er flexibele afnemers (e-boilers/electrolyser/batterijen) meeschakelen.	Directe benutting door afnemers mogelijk door constant hoge vraag. Anders kunnen alternatieve contracten of capaciteitsbeperkingscontracten ruimte bieden. Eventueel biedt cable pooling/energiehub ook mogelijkheden.	Gelijke benutting, waardoor elektriciteit niet verder het net op hoeft bij dimensionering op eigen verbruik. E-boilers en elektrolyzers leveren flexmogelijkheden.
Hernieuwbaar bij cluster 6-industrie	Grootschalig (HS- of MS-niveau)	Vaak constante elektriciteitsvraag overdag (kantoortijden en ploegendienst), waardoor hernieuwbare stroom gelijk afgenomen kan worden. Windenergie sluit goed aan op wintervraag; pv vult zomerdaguren aan.	Door stabiele vraag kan hernieuwbare opwek naar verwachting vaak direct benut worden.	Directe benutting door afnemer mogelijk door constante vraag. Anders kunnen alternatieve contracten of capaciteitsbeperkingscontracten ruimte bieden.	Gelijke benutting, waardoor elektriciteit niet verder het net op hoeft bij dimensionering op eigen verbruik. Eventueel kan vraagsturing en opslag nog mogelijkheden rondom flexibiliteit bieden.
Windturbines (evt. + zonne-energie) bij bedrijventerreinen (collectief)	Middelgroot (MS-niveau)	Door als collectief de elektriciteit te gebruiken, hoeft er weinig terug geleverd te worden.	Windenergie sluit goed aan op wintervraag; pv vult zomerdaguren aan. Indien er 's nachts weinig vraag is, kan er dan teruggeleverd moeten worden. Eventueel kan een combinatie met elektrisch laden 's nachts er ook gebruik van de opwek zijn.	Verschillende constructies mogelijk, zoals directe lijn, groepscontracten of energiehub met alternatieve contracten of capaciteitsbeperkingscontracten, waardoor net niet belast wordt in de pieken. Eigen verbruik is daarbij leidend.	Met dimensionering op eigen verbruik is er nauwelijks teruglevering nodig. Kan eventueel ook helpen bij lokale afnamecongestie.

Archetypen	Typische schaalgrootte	Energetische inpassing	Eigenschappen opwekinstallatie i.r.t. netinpassing	Realisatie in congestiegebieden (mogelijkheid tot teruglevering)	Voordelen rondom netcongestie
Hernieuwbaar bij mobiliteitshubs	Middelgroot (MS-niveau)	Zonne-energie kan overdag benut worden voor laden in lente/zomer. Windenergie op land kan 's nachts laden mogelijk maken en in de winter.	Het is gunstig dat de laadvraag relatief stuurbaar is en zich daarmee kan aanpassen op de opwek. Belangrijk aandachtspunt is dat op momenten van tekorten hier stroom vanuit het net naartoe moet voor het laden. In congestiegebieden is dit niet mogelijk, en opslag kan waarschijnlijk ook dat gat niet overbruggen. Hierdoor kan niet continu laden gegarandeerd worden als er geen afnamecapaciteit is voor de hub.	Directe benutting alle hernieuwbare opwek uitdagend, omdat er niet constant vraag is, waardoor teruglevering gewenst is. Eventueel minimale teruglevering mogelijk met opslag.	Eigen gebruik van opwek is gunstig. In de toekomst is het mogelijk om met vehicle-to-grid de elektrische voertuigen zowel stroom te laten op nemen als deze ook terug te leveren aan bijvoorbeeld een huis of het net.
Zonne-energie op daken van mkb en maatschappelijk vastgoed (individueel)	Kleinschalig (achter de meter), evt. teruglevering op LS	Goede match in profielen, want opwek is overdag en vraag ook.	Een batterij ten behoeve van opslag van de zonnestroom is vaak niet rendabel voor deze groep, omdat het verbruik vaak al in lijn is met het zonneprofiel en opslag voor later daarom niet veel toevoegt.	Zoveel mogelijk verbruik achter de meter is het meest gunstig. Eigen gebruik altijd mogelijk.	Met dimensionering op eigen verbruik is er nauwelijks teruglevering.

Archetypen	Typische schaalgrootte	Energetische inpassing	Eigenschappen opwekinstallatie i.r.t. netinpassing	Realisatie in congestiegebieden (mogelijkheid tot teruglevering)	Voordelen rondom netcongestie
Zonne-energie op dak woningen	Kleinschalig (achter de meter, kleinverbruikers)	Minder goede match qua profielen, daarom voor netimpact belangrijk dat aanleg vooral in lijn is met eigen verbruik en flexibele sturing (verbruiken gelijk wanneer er opgewekt wordt).	Een batterij ten behoeve van opslag van de zonnestroom is vaak niet rendabel voor woningen, waardoor eigen verbruik afstemmen noodzakelijk is voor een lage netimpact. In de toekomst is het mogelijk om met vehicle to grid de elektrische voertuigen zowel stroom te laten op nemen als deze ook terug te laten leveren aan bijvoorbeeld een huis of het net.	Voor eigen gebruik altijd mogelijk. Voor beperking netimpact dimensionering op eigen verbruik en idealiter ook afschakelen bij overschotten wenselijk.	Relatief ongunstig voor netcongestie, maar kan gemitigeerd worden met dimensioneren op eigen gebruik en afschakelen.
Zonne-energie op gevels	Kleinschalig (achter de meter, kleinverbruikers)	Zonne-energie op gevels heeft een ander productieprofiel, met een opwekpiek die vooral in de ochtend en 's avonds plaatsvindt. Dat is gunstig voor een combinatie met utiliteiten, industrie en woningen.	Minder vollasturen ten opzichte van op daken, maar dit weegt op tegen het gunstige profiel.	Waarschijnlijk teruglevering goed mogelijk in de ochtend en avond. Opwek rond het middaguur kan eventueel opgevangen worden met eigen verbruik, opslag of curtailment, indien de netbeheerder geen transportcapaciteit heeft rond de middag. Dit kan met een alternatief contract geregeld worden.	Groot voordeel bij oost-westopstelling, namelijk geen piek rond middaguur. Deze vorm biedt ook in de winter met lagere zonne-energievoordelen.

Archetypen	Typische schaalgrootte	Energetische inpassing	Eigenschappen opwekinstallatie i.r.t. netinpassing	Realisatie in congestiegebieden (mogelijkheid tot teruglevering)	Voordelen rondom netcongestie
Erfmolens	Kleinschalig of middelgroot (vaak achter de meter)	Inzet waarschijnlijk vooral voor eigen gebruik achter de meter; bij overschot (met name bij grotere molens) is er sprake van teruglevering. Erfmolens zijn voor agrariërs die veel elektriciteit gebruiken in het donker (zoals bij melken) gunstiger dan zonne-energie.	Erfmolens leveren minder energie op dan hogere molens. Daarmee zijn ze vooral gunstig voor eigen verbruik.	Voor eigen gebruik altijd mogelijk. Voor beperking netimpact dimensionering op eigen verbruik.	Flexibele sturing is mogelijk met koeling of opslag (bijvoorbeeld batterij).
Zonne-energie bij parkeerplaatsen (solar carports)	Kleinschalig (LS) of middelgroot (MS)	Zonnestroom kan (grotendeels) gelijk gebruikt worden voor laden.	Het is gunstig dat de laadvraag relatief stuurbaar is en zich daarmee kan aanpassen op de opwek.	Waarschijnlijk zijn alternatieve contracten, zoals blokstroom, gunstig, omdat de laadvraag op momenten dat er niet teruggeleverd mag worden alsnog de hernieuwbare opwek kan gebruiken.	Afhankelijk van locatie (bijvoorbeeld bij kantoren of winkelcentrum) kan de zonnepiek gelijk gebruikt worden voor laadvraag, waardoor deze niet hoeft te worden teruggeleverd.
Verticale & zonvolgend agri-pv	Middelgroot (MS-niveau)	Afhankelijk van dimensionering voor eigen gebruik of voor grootschalige teruglevering.	Zonvolgend meer opwek dan reguliere zonneparken. Naar verwachting meer productie in ochtend en einde middag/begin avond.	Waarschijnlijk teruglevering goed mogelijk in de ochtend en avond. Opwek rond het middaguur kan eventueel opgevangen worden met eigen verbruik, opslag of curtailment, indien de netbeheerder geen transportcapaciteit heeft rond de middag. Dit kan met een alternatief contract geregeld worden.	Groot voordeel bij oost-westopstelling, namelijk geen piek rond het middaguur. Deze vorm biedt ook in de winter met lagere zonne-energievoordelen.

Archetypen	Typische schaalgrootte	Energetische inpassing	Eigenschappen opwekinstallatie i.r.t. netinpassing	Realisatie in congestiegebieden (mogelijkheid tot teruglevering)	Voordelen rondom netcongestie
Zonneparken als functie voor ecologie en natuurherstel	Middelgroot of groot (MS- of HS-niveau)	Zorgt voor zonnepiek rond middaguur bij teruglevering.	(Gedeeltelijke) oost-west-oriëntatie, curtailen en combinatie met opslag is voor de hand liggend voor minder netbelasting.	Waarschijnlijk alleen mogelijk in gebieden zonder teruglevercongestie of met alternatieve contracten.	Waarschijnlijk geen lokale vraag, dus ongunstig m.b.t. netcongestie.
Zonne-energie op water	Middelgroot of groot (MS- of HS-niveau)	Zorgt voor zonnepiek rond middaguur bij teruglevering.	(Gedeeltelijke) oost-west-oriëntatie, curtailen en combinatie met opslag is voor de hand liggend voor minder netbelasting.	Waarschijnlijk alleen mogelijk in gebieden zonder teruglevercongestie of met alternatieve contracten	Er is voordeel indien er lokale vraag is, bijvoorbeeld bij zandwinplassen of waterschappen.
Windparken op verziltingsgronden of veenontginningsgebieden (evt. + zonne-energie)	Grootschalig (HS-niveau)	Vermoedelijk weinig vraag in directe omgeving	Combinatie windenergie en land, (gedeeltelijke) oost-west-oriëntatie bij zon, curtailen en combinatie met opslag is voor de hand liggend voor minder netbelasting. Combinatie met vraag wenselijk, maar niet altijd haalbaar.	Waarschijnlijk alleen mogelijk in gebieden zonder teruglevercongestie.	Waarschijnlijk geen lokale vraag, dus ongunstig m.b.t. netcongestie.
Zonne-energie of windenergie op brownfields of restlandschappen (zoals infrastructuur)	Middelgroot of groot (MS- of HS-niveau)	Vermoedelijk weinig vraag in directe omgeving. Langs snelwegen is een combi mogelijk met laadinfrastructuur en tunnels. Dichtbij het spoor is een koppeling met treinen en tunnels mogelijk.	Combinatie windenergie en land, (gedeeltelijke) oost-west-oriëntatie bij zonne-energie, curtailen en combinatie met opslag is voor de hand liggend voor minder netbelasting. Combinatie met vraag wenselijk, maar niet altijd haalbaar.	Waarschijnlijk alleen mogelijk in gebieden zonder teruglevercongestie.	Alleen voordelig m.b.t. netcongestie als er lokale vraag is.

Archetypen	Typische schaalgrootte	Energetische inpassing	Eigenschappen opwekinstallatie i.r.t. netinpassing	Realisatie in congestiegebieden (mogelijkheid tot teruglevering)	Voordelen rondom netcongestie
Zonneweide en/of windturbines op landbouwgrond	Middelgroot of groot (MS- of HS-niveau)	Vermoedelijk weinig grote vraag in directe omgeving. Veel van deze stroom zal het net op gaan.	Combinatie van zonne-energie en windenergie zorgt voor gunstigere netinpassing.	Waarschijnlijk alleen mogelijk in gebieden zonder teruglevercongestie of met alternatieve contracten.	Waarschijnlijk geen lokale vraag, dus ongunstig m.b.t. netcongestie.
Repowering	Middelgroot of groot (MS- of HS-niveau)	Dit kan zowel voor zonne-energie als windturbines. Repowering is nodig om te voorkomen dat de hoeveelheid hernieuwbare opwek afneemt. Levert geen extra productie op bij eenzelfde vermogen, maar dan wel minder windturbines of zonnepanelen nodig door grotere windturbines en efficiëntere zonnepanelen. Ook mogelijk om groter productievermogen te realiseren, mogelijk met eenzelfde aansluitvermogen (door curtailment en opslag).	Bij hetzelfde productievermogen geen wijzigingen ten opzichte van de huidige situatie. Combinatie windenergie en land, (gedeeltelijke) oost-west-oriëntatie bij zonne-energie, curtailen en combinatie met opslag om meer productievermogen op de zelfde aansluitcapaciteit te realiseren.	Waarschijnlijk is ophogen van maximale terugleverpiek niet mogelijk in congestiegebieden. Maar wel een mogelijke optie om meer productiecapaciteit achter dezelfde aansluiting te realiseren.	Noodzakelijk om te zorgen dat er niet minder hernieuwbare opwek komt. Daarnaast gunstig om binnen bestaande aansluiting extra terug te leveren.
Bijplaatsen opwek bij bestaand project op dezelfde aansluiting	Middelgroot of groot (MS- of HS-niveau)	Dit kan zowel voor zonne-energie als windturbines en zorgt voor een grotere opbrengst binnen dezelfde aansluiting. Met name zonne-energie bijplaatsen bij windturbines is kansrijk. Uit onderzoek volgt dat het toevoegen van 19 MWp zonne-energie en 7 MW opslag bij 10 MW windturbines financieel optimaal is.	Combinatie windenergie en land, (gedeeltelijke) oost-west-oriëntatie bij zonne-energie, curtailen en combinatie met opslag is voor de hand liggend voor minder netbelasting.	Waarschijnlijk is ophogen van maximale terugleverpiek niet mogelijk in congestiegebieden, maar loont het vooral dat op andere momenten meer opgewekt wordt.	Gunstig om binnen bestaande aansluiting extra terug te leveren.

C.2.1 Conclusies netimpact archetypen

De tabel en de kwantitatieve analyses laten zien dat gunstige energetische inpassing in de eerste plaats wordt bepaald door:

1. De mate waarin opwek fysiek is gekoppeld aan nabijgelegen (stuurbare) vraag.
2. De complementariteit van het productieprofiel en dimensionering op eigen verbruik.
3. Het netvlak en de benutting van bestaande aansluitcapaciteit.

Archetypen die achter de meter leveren of collectief vraag kunnen sturen, minimaliseren teruglevering en drukken congestierisico's. Ontwerpkeuzes als dimensioneren op eigen verbruik, een energiemanagementsysteem, curtailment en alternatieve transportrechten vergroten de speelruimte, maar teruglevering blijft lastig in gebieden met netcongestie.

Gunstig zijn vanuit energetisch oogpunt hernieuwbare opwek in grote industriecusters, omdat er vaak sprake is van vollast-elektriciteitsverbruik. Ook bij collectieve opwek op bedrijventerreinen is er sprake van vraag, al is deze vaak beperkt in verhouding tot de potentie voor hernieuwbare opwek. Opwek combineren met vraag bij individuele bedrijven of maatschappelijk vastgoed en solar carports/mobiliteitshubs met netbewust laden is ook gunstig. Zonne-energie op gevels en verticale agri-pv zijn energetisch gunstig door het gespreide profiel. Repowering en bijplaatsen op dezelfde aansluiting zijn gunstig, omdat per schaarse MW-aansluiting meer MWh hernieuwbare opwek kan worden geleverd. Het bijplaatsen van zonne-energie bij windenergie op land kan echter wel problemen met netcongestie verergeren, aangezien in veel gebieden teruglevercongestie veroorzaakt wordt door zonne-energie. De combinatie van zonne-energie en windenergie is in algemene zin gunstig, omdat de opwekprofielen vaak complementair zijn.

Het benutten van bestaande aansluitingen en het sturen op eigen verbruik is daarom in algemene zin het meest wenselijk. Het realiseren van nieuwe aansluitingen voor grootschalige opwek is in congestiegebieden alleen mogelijk met alternatieve transportrechten, wat eisen stelt aan de exploitanten en wat op dit moment nog beperkt van de grond komt (zie Paragraaf C.1).

Minder gunstig vanuit energetisch oogpunt zijn: standalone zonneparken (inclusief zonne-energie op water) met uitgesproken middagpiek en beperkte lokale afname; windparken en projecten op brownfields/restlandschappen, op verziltingsgronden of veenontginningsgebieden en zonne-energie en windenergie op landbouwgrond, zonder nabij verbruik; grootschalige woning-pv die op laagspanning een overschot creëert, omdat er (nog) geringe vraag is op dat moment. Deze projecten zijn energetisch minder ongunstig als ze nabij vraag en/of met flexibele contracten en flexibele bronnen gerealiseerd worden. Aansluiten op midden- en hoogspanning van grootschalige projecten kan congestie op lagere netten vermijden, maar ook het hoogspanningsnet is op veel plaatsen begrensd.

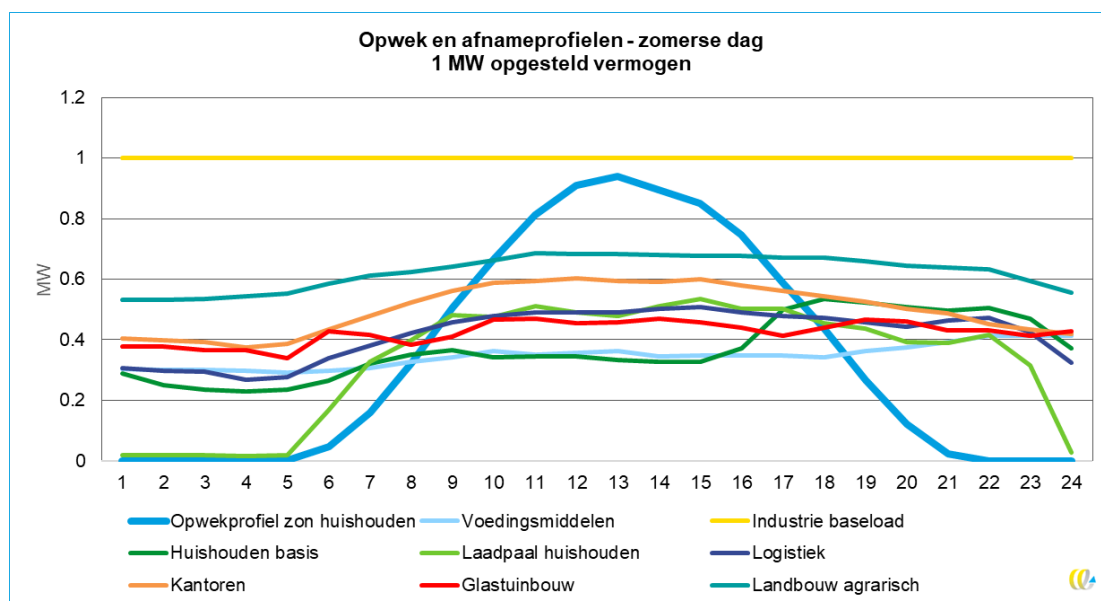
C.2.2 Kwantitatieve analyses netimpact archetypen

Zoals we eerder besproken hebben, bepalen de volgende aspecten in welke mate hernieuwbare opwek direct lokaal benut kan worden en wat de netimpact is van hernieuwbare opwek: dimensionering hernieuwbare opwek, type opwek (alleen zonne-energie of windenergie + zonne-energie), aansluiten vraagprofiel bij opwekprofiel en opslag en afschakelen opwek (meer hierover in Paragraaf C.1). We hebben enkele indicatieve kwantitatieve analyses uitgevoerd om dit te illustreren en onderzoeken in welke sectoren de vraag goed aansluit bij de opwek van hernieuwbare bronnen.

Opwekprofielen tegenover afnameprofielen

Figuur 57 toont het opwekprofiel van zonne-energie op dak en afnameprofielen van verschillende sectoren op een zonnige zomerse dag. Hierbij gaan we voor zowel zonne-energie als voor de afnamesectoren uit van een aansluitvermogen van 1 MW. De figuur laat zien dat in de baseloadindustrie op alle momenten de vraag groter is dan het aanbod van zonne-energie, en dat daarmee alle opwek benut wordt, maar dat maar een beperkt deel van de vraag gedekt wordt door de zonne-energie. Bij de andere sectoren zien we dat overdag de opwek van de zonnepanelen groter is dan de vraag, en dat er dus overdag sprake is van teruglevering (of afschakeling of opslag). Bij al deze sectoren is te zien dat de vraag overdag hoger ligt dan de vraag 's nachts, wat logisch is, omdat er vooral overdag gewerkt wordt, wat dus goed aansluit bij het opwekprofiel. Maar te zien is dat er ook 's nachts nog elektriciteitsvraag is (die niet ingevuld kan worden met productie van de zonnepanelen). De slechtste match tussen de opwek en vraag is er bij huishoudens, aangezien de vraag daar piekt in de ochtend en avond en laag is tijdens de zonnepiek. De verschillen tussen de commerciële sectoren (met uitzondering van baseloadindustrie) zijn beperkt. De directe benutting zal in de praktijk erg verschillen per individueel bedrijf, dus het is lastig om uitspraken te doen over bij welke sector de vraag het beste aansluit bij het opwekprofiel.

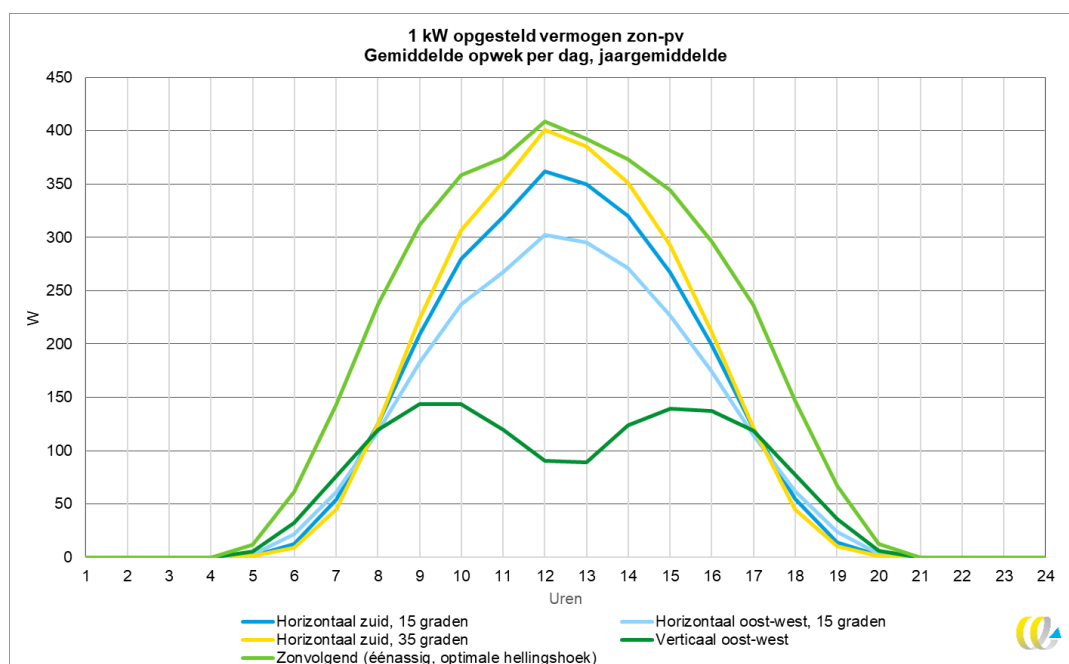
Figuur 57 – Opwek- en afnameprofielen op een zonnige dag (Netbeheer Nederland, 2025b)



Opwekprofielen verschillende type zonne-energie

De archetypen bevatten verschillende vormen van zonne-energie: op daken, solar carports, op land, verticale panelen op gebouwen of op land (agri-pv) en zonvolgend zonne-energie. De instraling van de zonne-energie op deze panelen verschilt, en daarmee verschilt de opbrengst en het moment van opwek. Figuur 58 toont de verschillende opwekprofielen van het jaargemiddelde. Tabel 14 toont welke van de vijf getoonde opwekprofielen overeenkomen met de verschillende archetypen.

Figuur 58 – Opwekprofielen verschillende vormen zonne-energie, directe opbrengst van 1 kWp



Tabel 14 – Koppeling opwekprofielen en verschillende archetypen

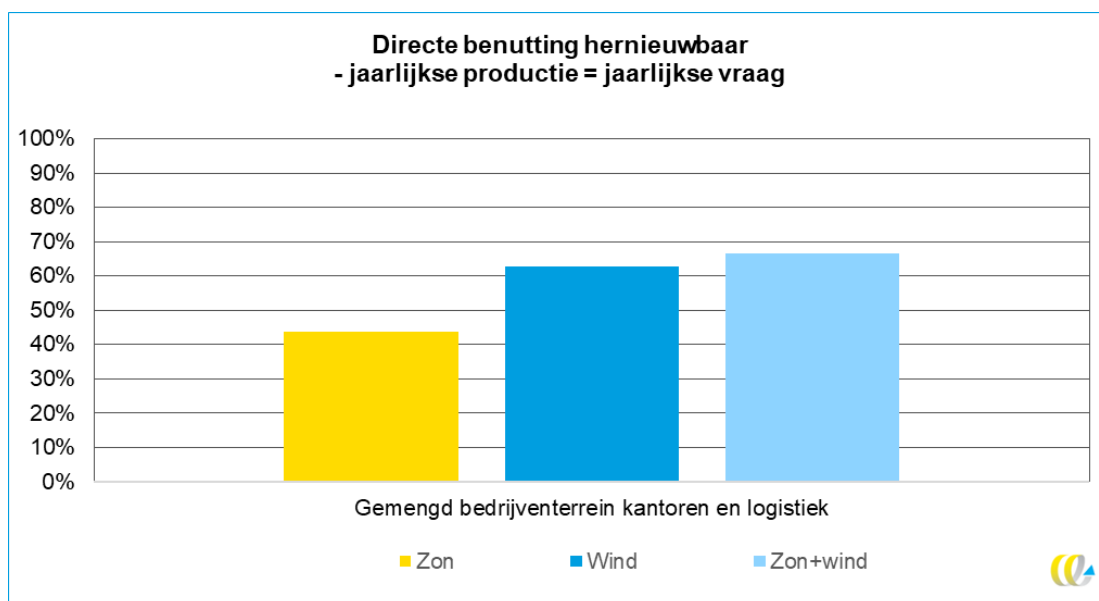
Opwekprofiel	Archetypen
Horizontaal zuid, 15 graden	Zonne-energie op platte daken, solar carports
Horizontaal oost-west, 15 graden	Zonne-energie op platte daken, solar carports
Horizontaal zuid, 35 graden	Zonne-energie op schuine daken, zonne-energie op land
Verticaal oost-west	Zonne-energie op gevel, verticale agri-pv
Zonvolgend (eenassig)	Zonvolgend agri-pv

Uit Figuur 58 is af te leiden dat zonvolgend en verticale zonne-energie eerder en later op de dag al meer opwek genereren. Verticale zonne-energie produceert gemiddeld per jaar minder elektriciteit, doordat het geen piekproductie heeft rond het middaguur. Dit is aan de andere kant wel gunstig met betrekking tot teruglevering: deze vorm draagt als enige niet bij aan overschotten zonnestroom rond het middagmoment. Deze overschotten zorgen in de zomer voor teruglevercongestie. Echter, deze overschotten zijn ook te verhelpen door bij andere vormen van zonne-energie de installatie tijdelijk uit te schakelen rond het middaguur, bij (landelijke) overschotten, of door meer vraag naar elektriciteit te verplaatsen naar het middaguur. Voor nieuwe zonne-energie-installaties is het aannemelijk dat in gebieden met teruglevercongestie er beperkingen zijn voor teruglevering rond het midden van de dag. Alternatieve contracten kunnen in theorie het mogelijk maken om afspraken met de netbeheerder te maken over uitsluitend teruglevering buiten de zonnepiek. In dat geval zal er naar verwachting een combinatie met opslag en afschakeling (curtailment) nodig zijn.

Afname van verschillende type opwek

Een ander relevant aspect is de type opwek. Figuur 59 toont welk aandeel van de hernieuwbare productie direct benut wordt, in het geval dat de productie op jaarbasis even groot is als de vraag. Dit is uitgewerkt voor een gemengd bedrijventerrein met kantoren en logistiek, maar eenzelfde patroon geldt bij andere afnemers. De figuur laat zien dat er bij windturbines een fors groter deel van de hernieuwbare opwek direct benut wordt. De grootste directe benutting wordt behaald bij een combinatie van windenergie en zonne-energie. De terugleveringspiek voor hernieuwbare opwek is ook een stuk lager bij wind-energie of windenergie en zonne-energie, in vergelijking met de situatie dat alleen zonne-energie gerealiseerd wordt.

Figuur 59 – Directe benutting hernieuwbare opwek



Netimpact ten opzichte van de dimensionering zonne-energie

Daarnaast is de dimensionering van de opwek ten opzichte van de vraag van groot belang voor de netimpact. Tabel 15 laat de effecten zien van verschillende manieren van dimensionering van opwek ten opzichte van de vraag bij een groep kantoorgebouwen met een totale vraag van 1 MW⁶². De tabel laat de volgende dingen zien:

- De terugleveringspiek neemt fors toe als ervoor wordt gekozen om de hoeveelheid opwek te dimensioneren op de jaarlijkse vraag (MWh) in plaats van op de vraagpiek (MW). Als er op jaarbasis evenveel productie van zonne-energie is als vraag, dan ligt de terugleveringspiek 3,5 keer zo hoog als de afnamepiek.
- Bij het dimensioneren van de opwek op de jaarlijkse vraag (MWh) wordt ook een stuk minder van de geproduceerde zonnestroom direct benut, in vergelijking met het dimensioneren van de opwek op de vraagpiek (MW).
- Daartegenover staat echter wel dat bij het dimensioneren op de vraagpiek (MW) een stuk kleiner deel van de totale vraag ingevuld wordt met productie van zonne-energie. Dit het dimensioneren van de opwek op de jaarlijkse vraag (MWh) een stuk meer zonnepanelen geplaatst worden. Een groot deel van die extra productie kan niet direct benut worden en wordt teruggeleverd, maar er wordt ook een significant deel van de extra productie wel direct benut.

⁶² Hierbij gaan we uit van een omvormer op 50% van het piekvermogen van de zonnepanelen, wat betekent dat al een deel van de opwek gecurtailed wordt. Indien dit niet het geval is, zullen de terugleveringspieken nog groter zijn.

Tabel 15 – Effecten van verschillende manieren van dimensionering van opwek ten opzichte van de vraag – kantoren met gezamenlijke vraag van 1 MW

Wijze van dimensionering	Vermogen zonne-energie (MW) ⁶³	Terugleverings-piek (MW)	Afnamepiek (MW)	Eigen gebruik zonnestroom	Deelvraag ingevuld met eigen productie
Jaarlijkse productie zonne-energie = jaarlijkse vraag	8	3.51	0.99	44%	44%
Jaarlijkse productie zonne-energie = 50% jaarlijkse vraag	4	1.49	0.99	71%	35%
Aansluitvermogen zonne-energie = vraagpiek	2	0.46	0.99	96%	24%

C.3 Wat is inpasbaar in het elektriciteitsnet?

In de voorgaande paragrafen hebben we besproken wat de aandachtspunten zijn voor een efficiënte inpassing van hernieuwbare opwek in het elektriciteitsnet en hebben we een beschouwing gegeven in welke mate de archetypen hieraan voldoen. In deze paragraaf gebruiken we die inzichten om te bepalen hoeveel hernieuwbare energie ingepast kan worden in het elektriciteitsnet. Daarbij kan onderscheid gemaakt worden tussen drie categorieën:

1. Extra hernieuwbare opwek in gebieden waar op dit moment sprake is van teruglevercongestie. Daarvoor brengen we in deze paragraaf in kaart welke mogelijkheden er nog zijn en wat de randvoorwaarden zijn om nieuwe projecten te kunnen realiseren.
2. Daarnaast zijn er nog enkele gebieden (het zuidelijk deel van Noord-Holland, een groot deel van Zuid-Holland en enkele gebieden in Zeeland en Groningen) waarin op dit moment nog geen sprake is van teruglevercongestie (zie Paragraaf C.1) en waar dus in ieder geval nog meer hernieuwbare opwek ingepast kan worden in het elektriciteitsnet.
3. Tot slot wordt op dit moment gewerkt aan de uitbreidingen van het elektriciteitsnet die de transportcapaciteit zullen vergroten. Wanneer er meer transportcapaciteit gerealiseerd is, kan ook meer hernieuwbare opwek ingepast worden. Al is de ruimte op het net voor nieuwe projecten voor hernieuwbare opwek op land dan ook eindig en blijft efficiënte inpassing in het elektriciteitsnet van belang, om de

⁶³ Dit is het paneelvermogen van de zonnepanelen. We gaan in deze analyse uit van aansluiten van de zonnepanelen op 50% van het paneelvermogen, wat betekent dat het omvormervermogen de helft is van deze waarden.

benodigde uitbreidingen aan het elektriciteitsnet te beperken. Het verschilt per regio wanneer er nieuwe transportcapaciteit beschikbaar is voor nieuwe hernieuwbare opwek op land (zie Paragraaf C.1). Belangrijk hierbij is dat voor de goedkeuring van teruglevercapaciteit voor een project op alle netvlakken ruimte moet zijn. Dit aangezien opgewekte elektriciteit die teruggeleverd wordt op bijvoorbeeld laagspanning, zich begeeft naar hogere netvlakken om verder getransporteerd te worden. Daarom moeten de bovenliggende niveaus congestievrij zijn.

In gebieden waar op dit moment sprake is van een tekort aan capaciteit voor teruglevering kan op verschillende manieren nog meer hernieuwbare opwek gerealiseerd worden. Grofweg zijn er de volgende mogelijkheden om nog extra hernieuwbare opwek te realiseren in congestiegebieden:

- **Opwek voor invullen van eigen vraag:** partijen zonder goedkeuring voor teruglevering kunnen geen elektriciteit terugleveren, maar kunnen wel opwek realiseren om hun eigen verbruik achter de meter in te vullen. Dit kan een optie zijn voor bedrijven met een grootverbruikersaansluiting om zonne-energie op dak of erfmolens te kunnen realiseren. Ook kleinverbruikers kunnen met het nieuwe prioriteringskader, dat vanaf 2026 geldig is (zie toelichting in Bijlage C.1), niet zomaar (meer) capaciteit krijgen voor teruglevering. Dus ook voor partijen met een kleinverbruikers kan het bij het realiseren van extra opwek een randvoorwaarde zijn dat zij niet terugleveren en alleen hun eigen verbruik invullen.
- **Projecten die al aansluiting hebben en netcapaciteit toegekend hebben gekregen, maar die deze nog niet (volledig) gebruiken.** Er zijn projecten die wel al transportcapaciteit toegekend hebben gekregen, maar die nog niet volledig gebruiken. Deze projecten kunnen nog gerealiseerd worden.
- **Windturbines (eventueel met zonnepanelen) bij bedrijventerreinen bij energiehub met groepscontract.** Indien een bedrijventerrein of industriecluster een groepscontract afsluit, kan er achter de aansluiting mogelijk hernieuwbare opwek gerealiseerd worden, indien dit binnen de groepsaansluiting past.
- **Zonne-energie of windenergie bijplaatsen bij bestaande opwek, met dezelfde aansluiting.** Het is mogelijk om extra hernieuwbare opwek te realiseren bij bestaande projecten indien gebruik wordt gemaakt van dezelfde aansluiting of binnen een gesloten distributiesysteem. Zo kunnen er bijvoorbeeld zonnepanelen bij windturbines geplaatst worden of extra zonnepanelen bij een bestaand zonnepark, dankzij opslag en afschakelen van de productie op bepaalde momenten. Het bijplaatsen van zonne-energie bij windenergie op land kan echter wel problemen met netcongestie verergeren, aangezien in veel gebieden teruglevercongestie veroorzaakt wordt door zonne-energie.
- **Nieuwe zonne-energie of windenergie met alternatieve transportrechten of capaciteitsbeperkende contracten.** Deze maken teruglevering buiten piekuren mogelijk en ontsluiten restcapaciteit. Nieuwe hernieuwbare opwekprojecten met een grootverbruikersaansluiting kunnen hier in principe gebruik van maken als ze

buiten de pieken leveren. Om hernieuwbare opwek met dit soort contracten te realiseren, is doorgaans opslag, afschakeling en/of een afwijkend productieprofiel (zoals windenergie in zongedomineerd congestiegebied of oost-westoriëntatie bij zonne-energie) noodzakelijk. Met name windenergie op land in zongedomineerde congestiegebieden of zonne-energie in wind-gedomineerde congestiegebieden lijken hiervoor kansrijk.

- **Voor producenten is een capaciteitsbeperkend contract gunstiger**, aangezien dit tijdelijk is en alternatieve transportrechten permanent. Daarnaast zijn alternatieve transportrechten voor producenten niet interessant, aangezien ze geen korting kunnen krijgen op nettarieven (omdat ze die nu niet betalen).
- **Congestiemanagement bij bestaande hernieuwbare opwek**: bredere toepassing van congestiemanagement bij de huidige projecten van hernieuwbare opwek op land kan ervoor zorgen dat meer ruimte beschikbaar komt op het net voor nieuwe projecten.

Dat deze opties nog gerealiseerd kunnen worden, betekent niet dat deze geen extra netcongestie veroorzaken. De netbeheerders bepalen congestie op basis van de fysieke stromen, en niet op basis van de capaciteit. Dit betekent dat het realiseren van extra opwek binnen dezelfde aansluiting alsnog de problemen met netcongestie kan vergroten. Alternatieve transportrechten, capaciteitsbeperkingscontracten en groepscontracten dragen alleen bij aan inpassing van meer hernieuwbare opwek in deze gebieden (zonder het vergroten van problemen met netcongestie) als er geen extra productie plaatsvindt op de momenten dat de teruglevercongestie plaatsvindt. Ook als alle hernieuwbare opwek direct achter de meter benut wordt, kan dit wel leiden tot een hogere netbelasting en grotere problemen met netcongestie (meer hierover in Paragraaf C.1).

In Tabel 16 bespreken we welke potentie er nog is voor bovenstaande mogelijkheden en welke randvoorwaarden er zijn om dit te kunnen realiseren in congestiegebieden.

Tabel 16 – Potentie en randvoorwaarden inpassing hernieuwbare opwek in congestiegebieden

Type opwek	Potentie in congestiegebieden	Randvoorwaarden
Opwek voor invullen van eigen vraag	Afhankelijk van vraag bij woningen of bedrijven die nog geen zonne-energie op het dak hebben en dit wel kunnen. Bij een dimensionering op maximaliseren eigenverbruik wordt slechts een deel van deze vraag ingevuld met zonne-energie op dak (zie Tabel 15).	Geen teruglevering. Daarvoor vaak afschakeling zonne-energie voor deel van jaar en/of opslag noodzakelijk om teruglevering te beperken. Daarnaast is dimensionering opwek op maximaliseren eigen verbruik noodzakelijk.
Projecten die al aansluiting toegewezen hebben gekregen, maar nog niet gerealiseerd zijn	Wordt al rekening mee gehouden als autonome ontwikkeling door netbeheerders.	Nu nog wel mogelijk om dit te realiseren. Maar alleen projecten die al een aansluiting hebben en waar de netbeheerder rekening mee houdt.
Windenergie op land bij bedrijventerreinen met	Afhankelijk van het aantal energiehubs en groepscontracten dat gerealiseerd wordt. Dat is momenteel nog erg onzeker. Uit een eerdere potentie-	Leidt niet tot extra teruglevering binnen groepscontract. Mogelijk opslag of andere vormen van flexibiliteit noodzakelijk.

Type opwek	Potentie in congestiegebieden	Randvoorwaarden
groepscontract (energiehub)	studie bleek dat zo'n 350 bedrijventerreinen een potentieel interessante energiehub kunnen vormen en zo'n 130 industriële locaties; bij een deel zou een koppeling met windenergie op land mogelijk zijn (CE Delft, 2025b).	
Opwek bijplaatsen bij bestaande productie-locaties	Met name potentie voor zonne-energie bij wind-turbines of extra zonne-energie bij bestaand zonnepark. Uit eerder onderzoek van CE Delft is ingeschat dat hiermee 15 GW extra zonne-energie toegevoegd kan worden binnen bestaande aansluitingen, bij toevoeging van batterijen. In ander onderzoek wordt ingeschat dat 17 GW zonne-energie toegevoegd kan worden bij bestaande windparken (Van Druten & Van Wieringen, 2025).	De teruglevering blijft binnen de bestaande aansluiting, dus piekbelasting voor teruglevering neemt niet toe. Opslag en afschakelen hernieuwbare opwek voor deel van het jaar noodzakelijk.
Nieuwe projecten met alternatieve transport-rechten of capaciteits-beperkend contract.	Grote potentie. Onduidelijk hoeveel ruimte er nog is buiten de pieken, ook bij de netbeheerders.	Projecten kunnen naar verwachting alleen aan eisen alternatieve transportrechten of capaciteitsbeperkend contract voldoen met flexibiliteit (bijv. meer eigen verbruik), opslag en/of afschakeling.
Congestie management bij bestaande projecten	Grote potentie. Dit kan ervoor zorgen dat er ruimte op het net komt voor nieuwe projecten. Onduidelijk hoeveel ruimte dit kan opleveren.	Bestaande opwek en afnemers, die al een aansluiting hebben, moeten hier in grotere aantallen aan meedoen. Projecten kunnen alleen met congestie management meedoen met flexibiliteit, opslag en/of afschakeling.

C.4 Impact van flexibilitetsbronnen op energetische inpassing

Vanwege de toenemende problemen met netcongestie en het toenemende aantal uren met lage (en zelfs negatieve) elektriciteitsprijzen op momenten met veel hernieuwbare opwek, neemt de noodzaak voor flexibiliteit bij hernieuwbare opwek toe. Deze flexibiliteit kan op verschillende manieren geleverd worden. Zo kunnen windturbines en zonne-energie afgeschakeld worden op momenten met lokale congestie of negatieve prijzen. Daarnaast worden steeds vaker batterijen gerealiseerd bij hernieuwbare opwekprojecten. Ook is de koppeling met flexibele afnemers zoals elektrolyzers en power-to-heat een optie. Realisatie van flexibiliteit bij hernieuwbare opwek is voor alle archetypen relevant, daarom geven we hier een losse beschouwing op.

Flexibiliteit door afschakeling, opslag en koppeling met flexibele afnemers kan, zoals eerder besproken, ertoe bijdragen dat meer opwek achter aansluitingen gerealiseerd wordt (zowel bij afnemers als bij bestaande opwek). Daarnaast kan het bijdragen aan congestiemanagement en is flexibiliteit een vereiste om nieuwe projecten met een alternatief transportrecht te realiseren.

Vanwege de dalende kosten voor opslag wordt het voor ontwikkelaars steeds interessanter om opslag te realiseren bij hernieuwbare opwekprojecten. De batterij kan dan gebruikt worden om hernieuwbare elektriciteit op te slaan op momenten met lage prijzen en later te leveren op momenten met hogere prijzen. De inkomsten hiervan zijn echter een stuk lager dan de kosten voor een batterij, wat betekent dat er voor uitsluitend uitgestelde levering geen rendabele businesscase is (CE Delft, 2023a). Een batterij bij hernieuwbare opwek kan ook ingezet worden om te handelen op de onbalansmarkten en spotmarkten. In dat geval wordt deze batterij eigenlijk ingezet als systeembatterij, maar dan bij een aansluiting van hernieuwbare opwek. Het gebruiken van dezelfde aansluiting leidt tot lagere netkosten, maar ook tot lagere inkomsten doordat de batterij niet volledig vrij kan handelen op momenten dat er ook productie van de zonne-energie is (de batterij en de zonnepanelen mogen samen niet meer leveren aan het net dan de omvang van de aansluiting en het voorkomen van het betalen van netkosten voor afname van elektriciteit kan alleen als de batterij opgeladen wordt met zelf opgewekte elektriciteit). Tot slot kunnen batterijen meer opwek achter dezelfde aansluiting (of voor een nieuwe aansluiting met alternatief transportrecht) in congestiegebieden mogelijk maken. In de praktijk zal een stapeling van de verschillende verdienmodellen plaatsvinden.

Curtailment, het afschakelen van opwek, is naast opslag een belangrijke schakel voor efficiënte inpassing van hernieuwbare opwek. Uit onderzoek blijkt dat het op sommige momenten afschakelen van hernieuwbare opwek leidt tot een kostenoptimaal CO₂-vrij elektriciteitssysteem en op momenten met veel hernieuwbare productie tegen de laagste maatschappelijke kosten kan zorgen voor ontlasting van het elektriciteitsnet (CE Delft, 2023b; CE Delft & Witteveen+Bos, 2024). Dit geldt met name voor de grootste productiepieken van zonnestroom, het is niet rendabel om voor deze grootste productiepieken opslag of flexibele vraag te realiseren. Curtailment zorgt door de ontlasting van het elektriciteitsnet ervoor dat nieuwe projecten gerealiseerd kunnen worden en er daardoor uiteindelijk meer hernieuwbare opwek gerealiseerd kan worden. Ook voor de optimale benutting van een aansluiting, bij een combinatie van windenergie, zonne-energie en opslag, is het rendabel om een deel van de tijd de productie af te schakelen (Van Druten & Van Wieringen, 2025).

Het realiseren van elektrolyse bij hernieuwbare opwek op land is een mogelijkheid die kan bijdragen aan de inpassing van hernieuwbare opwek, doordat de elektriciteit omgezet kan worden in waterstof op het moment dat het niet teruggeleverd kan worden. Alleen is er momenteel nog weinig markt voor groene waterstof en zijn de kosten voor elektrolyzers nog hoog, waardoor de businesscase hiervoor uitdagend is. Daarnaast zijn de investeringskosten voor elektrolyzers een groot deel van de totale kosten, waardoor het wenselijk



is om zoveel mogelijk draaiuren te maken. Als een elektrolyser alleen lokaal geproduceerde hernieuwbare elektriciteit benut, dan is het aantal draaiuren beperkt en zal de geproduceerde groene waterstof daardoor ook duurder zijn⁶⁴. Voor een rendabele businesscase zal een elektrolyser daarom ook moeten draaien op uren zonder lokale productie, wat mogelijk nieuwe afnamecongestie kan veroorzaken (CE Delft, 2024a).

⁶⁴ Bij een elektrolyser die optimaal ingezet wordt met de volledige productie van een gecombineerd wind- en zonnepark op land liggen de kosten voor groene waterstof € 2/kg hoger dan bij een elektrolyser aan de kust die gebruikmaakt van elektriciteit van windparken op zee. Als niet de volledige productie van een wind- en zonnepark op land omgezet wordt naar waterstof, en een deel van de geproduceerde elektriciteit geleverd wordt aan het net, dan zijn de kosten van de geproduceerde groene waterstof nog hoger.

D Maatschappelijke kosten en baten

D.1 Resultaten

Tabel 17 – Detailresultaten maatschappelijke LCOE per archetype

Productie-techniek	Archetype	CAPEX, OPEX (Zonne-energie & windenergie)	Ontwikkel- kosten	Grond- gebruik	Hinder omwonenden	Keten- emissies	Bio- diversiteit	Netverzwaring	Totaal
Zonne-energie									
	Hernieuwbaar in grote industrie- clusters - zonne-energie op land	42	2	18	1	21	0	7	90
	Hernieuwbaar in grote industrie- clusters - zonne-energie op dak	46	0	0	0	22	0	7	74
	Hernieuwbaar bij cluster 6- industrie - zonne-energie op land	43	2	14	0	21	0	10	90
	Hernieuwbaar bij cluster 6- industrie - zonne-energie op dak	46	0	0	0	22	0	10	77



Productie-techniek	Archetype	CAPEX, OPEX (Zonne-energie & windenergie)	Ontwikkel- kosten	Grond- gebruik	Hinder omwonenden	Keten- emissies	Bio- diversiteit	Netverzwaring	Totaal
	Hernieuwbaar bij mobiliteitshubs - zonne-energie op land	43	2	9	2	21	0	10	87
	Hernieuwbaar bij mobiliteitshubs - zonne-energie op dak	46	0	0	0	22	0	10	77
	Zonne-energie op daken van mkb en maatschappelijk vast- goed (individueel)	50	1	0	0	22	0	17	90
	Zonne-energie op dak woningen	50	1	0	0	22	0	24	97
	Zonne-energie op gevels	67	2	0	0	30	0	33	133
	Zonne-energie bij parkeer- plaatsen (solar carports)	55	2	0	0	22	0	17	95
	Verticale agri-pv	46	3	1	2	22	0	14	87
	Zonvolgende agri-pv	41	3	0	2	17	0	10	73
	Zonnepark als functie voor ecologie en natuurherstel	43	2	0	0	21	0	13	79
	Zonne-energie op water	47	3	0	1	21	0	13	85
	Zonne-energie op brownfields of restlandschappen (zoals infra- structuur)	65	3	0	0	22	0	14	105
	Zonneweide op landbouwgrond	43	2	5	1	21	0	13	85
	Repowering – zonne-energie	43	2	5	1	21	0	13	85
	Bijplaatsen opwek bij bestaand project op dezelfde aansluiting – zonne-energie	39	1	5	0	21	0	13	80



Productie-techniek	Archetype	CAPEX, OPEX (Zonne-energie & windenergie)	Ontwikkel- kosten	Grond- gebruik	Hinder omwonenden	Keten- emissies	Bio- diversiteit	Netverzwaring	Totaal
Windenergie									
	Hernieuwbaar in grote industrieclusters - windenergie	39	2	1	12	4	0	4	61
	Hernieuwbaar bij cluster 6-industrie - windenergie	39	2	0	5	4	0	5	56
	Hernieuwbaar bij mobiliteitshubs - windenergie	39	2	0	51	4	0	5	101
	Windturbines bij bedrijven-terreinen (collectief)	39	2	0	14	4	0	5	64
	Erfmolens	138	0	0	0	5	0	12	155
	Windturbines op verziltingsgronden of veenontginningsgebieden	39	2	0	22	4	0	5	72
	Windenergie op brownfields of restlandschappen (zoals infrastructuur)	39	2	0	12	4	0	5	61
	Windturbines op landbouwgrond	39	2	0	28	4	0	5	78
	Repowering - windenergie	39	2	0	26	4	0	5	75
Zonne-energie en windenergie									
	Hernieuwbaar in grote industrieclusters - zonne-energie en windenergie	40	2	0	9	8	0	3	62



Productie-techniek	Archetype	CAPEX, OPEX (Zonne-energie & windenergie)	Ontwikkel- kosten	Grond- gebruik	Hinder omwonenden	Keten- emissies	Bio- diversiteit	Netverzwaring	Totaal
	Hernieuwbaar bij cluster 6- industrie - zonne-energie en windenergie	40	2	0	4	8	0	4	58
	Hernieuwbaar bij mobiliteitshubs - zonne-energie en windenergie	40	2	0	41	7	0	4	95
	Windturbines en zonnepark bij bedrijventerreinen (collectief)	40	2	0	11	7	0	4	65
	Windturbines en zonnepark op verziltingsgronden of veenontginningsgebieden	39	2	0	17	8	0	4	70

D.2 Methodiek

Directe effecten

De directe effecten betreffen de voor- en nadelen voor de exploitant (in dit geval: de eigenaren van de opwek- en opslagfaciliteiten en de netbeheerders) van de project-alternatieven (in dit geval: de archetypes) ten opzichte van elkaar. In deze studie kijken we specifiek naar de investeringskosten, operationele kosten, ontwikkelkosten, grondgebruik en mogelijke productiviteitswinst.

Tabel 18 – Scope directe effecten⁶⁵

Effect	Beoordeling	Methode
Investerings- en operationele kosten opwek en opslag	Kwantitatief	Schatting voor groot- en kleinschalige opwek (zonne-energie, windenergie) op basis van SDE++
Ontwikkelkosten	Kwantitatief	Schatting op basis van input NedZero en Holland Solar
Grondgebruik	Kwantitatief	Waardering op basis van opportunity costs: - landbouw: landleasekosten; - bedrijven- en industrieterrein: grondwaarde.
Productiviteitswinst	Kwantitatief	BBP per kWh elektriciteitsverbruik

Investerings- en operationele kosten

Voor de kosten en vollasturen van zonne-energie (zonne-energie op dak, veld, gevel, carports, veld en agri-pv) en windturbines hebben we gebruikgemaakt van de basisbedragen uit de SDE++ (PBL, 2025). Voor zonne-energie hebben we hierbij gebruikgemaakt van de beschikbare basisbedragen voor verschillende schaalgroottes. Voor windenergie hebben we het gemiddelde genomen van beschikbare windsnelheids-categorieën. Voor erfmolens hebben we gebruikgemaakt van kengetallen die via NedZero zijn aangeleverd door een marktpartij.

Voor batterijen zijn we uitgegaan van een 4-uursbatterij, waarvan de investeringskosten zijn berekend aan de hand van de volgende formule:

$$\text{Batterijprijs} = \frac{(865,72 + (\text{MWh} \times 600)^{0,475} \times 354,18)^{\frac{1}{0,475}}}{600} \times 0,9$$

Bron: (CE Delft, 2025b).

De operationele kosten voor batterijen zijn jaarlijks 2,5% van de investeringskosten.

⁶⁵ Belastingen, subsidies en winstmarges zijn geen onderdeel van een mkba, omdat dit een overdracht betreft tussen de overheid en bedrijven/particulieren. Ook netkosten – die gesocialiseerd worden – vallen niet onder een mkba.

Aangezien onze analyse als startpunt 2035 heeft, is het relevant mogelijke kostprijsontwikkelingen mee te nemen in de berekeningen. Op basis van informatie verkregen via Holland Solar en NedZero (zie Tekstkader 15) hebben we besloten geen kostenreductie te hanteren voor zonne-energie en windenergie. Er zijn immers verschillende factoren die ofwel een stuwend ofwel een dempend effect hebben op de prijzen, waardoor het moeilijk is in te schatten hoe de kostencurve in de werkelijkheid eruit zal zien. Voor batterijen wordt nog een forse kostenreductie verwacht: we zijn uitgegaan van een daling van 55% tussen nu en 2035 (CE Delft, 2025b).

Voor windparken kunnen er schaalvoordelen optreden, met name met betrekking tot de aansluitkosten. Aangezien dit sterk projectafhankelijk is en de aansluitkosten als onderdeel van de investeringskosten relatief beperkt zijn (grootweg 10%) hebben we dit niet doorgerekend.⁶⁶

Tekstkader 15 - Factoren met invloed op kostencurves zonne-energie en windenergie

Factoren met invloed op kostencurves zonne-energie en windenergie

- De prijzen van pv-modules bereikten in 2023 een laag niveau en laten sindsdien tekenen van stabilisatie of lichte stijging zien. Geopolitieke handelsspanningen kunnen een opwaarts effect op de prijzen hebben, wat erop wijst dat de reële kosten eerder licht stijgen dan verder dalen. Tegelijkertijd is er nog sprake van dalende prijzen voor polysilicium, wat een dempend effect kan hebben op de moduleprijzen. De netto prijstrend blijft daarmee onzeker.
- Voor omvormers gaat het PBL uit van een jaarlijkse prijsdaling van circa 5%, exclusief inflatiecorrectie. Deze aanname wordt breed gedragen.
- De kosten van arbeidsuren nemen toe met de inflatie, terwijl de benodigde installatietijd per kilowattpiek afneemt door verdere efficiëntieverbeteringen van pv-modules. Deze effecten werken in tegengestelde richting, waardoor de arbeidskosten per kilowattpiek in reële termen beperkt veranderen en in nominale termen licht stijgen.
- De prijzen van windturbines zijn recent licht toegenomen, onder meer als gevolg van hogere materiaal- en personeelskosten. Het is nog onzeker of deze ontwikkeling zich op langere termijn zal voortzetten.
- De aansluitkosten voor zon- en windprojecten zijn de afgelopen periode sterk gestegen en het is aannemelijk dat deze kosten hoog blijven. Deze kosten verschillen sterk per project en worden door netbeheerders via maatwerkoffertes vastgesteld. Bij zonne-energie op dak zijn de aansluitkosten doorgaans lager, omdat vaak gebruik kan worden gemaakt van bestaande aansluitingen.
- De kosten voor besturing en monitoring bij zon- en windprojecten nemen naar verwachting licht toe. Dit hangt samen met toenemende eisen aan netsturing (zoals curtailment), cybersecurity (onder andere NIS2-richtlijnen) en ecologische maatregelen, zoals vogeldetectiesystemen bij windturbines.

Bron: Holland Solar, NedZero.

⁶⁶ Bron: NedZero.

Ontwikkelkosten

Naast de investerings- en operationele kosten hebben we ook een inschatting gemaakt van de ontwikkelkosten van een project. Deze zijn immers niet in de basisbedragen van de SDE++ meegenomen. Ontwikkelkosten omvatten onder andere additionele kosten voor haalbaarheidsonderzoeken, vergunningsprocessen en projectontwikkeling. De ontwikkelkosten kunnen zeer sterk verschillen per project. Tabel 19 gaat dus uit van gemiddelde of typische kosten voor een project en heeft met name als doel de onderlinge verschillen tussen verschillende vormen van opwek inzichtelijk te maken.

Tabel 19 – Gemiddelde of typische ontwikkelkosten

Type	% van CAPEX	Bron
Windturbines	9,5%	NedZero
Erfmolen	5,0%	Eigen aanname
Zonne-energie op dak	5,0%	Eigen aanname
Zonne-energie op gevels	5,0%	Eigen aanname
Solar carports	5,0%	Eigen aanname
Agri-pv (middelgroot)	11,0%	Holland Solar
Agri-pv (groot)	8,0%	Holland Solar
Zonne-energie op water	10,0%	Eigen aanname
Zonne-energie op land (klein)	4,3%	Holland Solar
Zonne-energie op land (middelgroot-groot)	7,2%	Holland Solar
Zonne-energie op infra – brownfield	7,2%	Holland Solar

Grondgebruik

Het type grond waarop de archetypes worden gerealiseerd, vertegenwoordigt een bepaalde maatschappelijke waarde. Daarnaast leggen verschillende vormen van opwek op verschillende wijzen een beslag op deze grond. Zo is het ruimtebeslag per MW voor windturbines aanzienlijk lager dan dat voor zonneparken (0,07 tegenover 0,6 hectare per MW) en is er voor agri-pv in totaal meer ruimte nodig dan bij conventionele zonne-energie op land, terwijl nog zo'n 90% van de grond gebruikt kan worden voor landbouwdoeleinden.

Tabel 20 – Direct ruimtegebruik per type opwek, in m² per MWp

	Bruto	Netto	Bron
Windturbines	700	700	(Pondera Consult & CE Delft, 2023)
Agri-pv	12.500	1.250	Holland Solar
Zonne-energie op land	6.250	6.250	Holland Solar

De maatschappelijke kosten van het grondgebruik bepalen we door middel van ‘opportunity costs’, waarbij we – door te kijken naar de directe economische waarde van grond – uitdrukken wat de eigenaar misloopt bij herbestemming van de grond naar opwek. Deze jaarlijkse gedeelde inkomsten nemen we mee over de gehele looptijd van de analyse. Tabel 21 geeft voor het type gebieden van de archetypes een indicatie van de opportunity costs. Het overzicht laat zien dat met name voor de volgende vier type gebieden opportunity costs een rol spelen: industrieel, deel industrieel, bedrijventerrein en omgeving en landbouw.

Voor grote industrieclusters, cluster 6-industrie en bedrijventerreinen hebben we de gemiste grondopbrengsten bepaald door een inschatting te maken van de gemiddelde verkoopwaarde van een stuk grond (verdisconteerd over de looptijd van de analyse). De marktprijs voor grond – een reflectie van schaarste, locatiekwaliteit, infrastructuurkosten, bestemmingsplan, risicopremies, etc. – gebruiken we hier als proxy voor de opportunity costs. Voor bedrijventerreinen hebben we op basis van grondprijsbrieven van gemeenten een grove inschatting gemaakt van de gemiddelde of typische grondwaarde. Voor industrieclusters zijn goede grondprijzen slecht openbaar beschikbaar. Daarom hebben we voor cluster 6 en grote industrieclusters – die een hogere bodemwaarde kennen – een indicatieve opslag gehanteerd van respectievelijk 50 en 100%. In de praktijk kunnen grondprijzen sterk uiteenlopen. Zo kunnen stukken braakliggende grond zonder potentie voor bedrijvigheid of woningbouw wel degelijk interessant zijn voor bijvoorbeeld zonne-energie op land.

Landbouwgrond wordt vaak gepacht in plaats van gekocht; de jaarlijkse pachtinkomsten zijn daarom een goede afspiegeling van de gemiste opbrengst. De maatschappelijke kosten voor gebruik van landbouwgrond bepalen we door middel van landleasekosten zonne-energie, afgestemd met Holland Solar. De ondergrens (€ 5.000 per hectare per jaar) is gebaseerd op landleasekosten voor agri-pv; de bovengrens (€ 8.000) geldt voor conventionele zonne-energie. Deze bovengrens hebben we ook gebruikt voor de opportunity costs van grondgebruik voor windturbines.

Tabel 21 – Directe effecten: indicatie opportunity costs per type gebied

Type gebied	Opportunity costs	Omschrijving/toelichting
Bedrijventerrein en omgeving	€ 80 per m ²	Gemiddelde grondwaarde (bron: grove inschatting op basis van grondprijz-brieven gemeenten).
Cluster 6-industrie	€ 120 per m ²	Indicatieve grondwaarde; eigen inschatting.
Grote industrieclusters	€ 160 per m ²	Indicatieve grondwaarde; eigen inschatting.
Landbouw	€ 5.000-8.000 per hectare per jaar	Gemiddelde landleasekosten (bron: Holland Solar).

Type gebied	Opportunity costs	Omschrijving/toelichting
Woonwijken	Geen of beperkt	Alleen zonne-energie op dak, gevel of parkeerplaatsen, dus geen grondgebruik.
Natuurgebied	Geen of beperkt	Geen marktwaarde.
Verziltingsgronden of veenontginningsgebieden	Geen of beperkt	Lage agrarische of economische opbrengst door verzilting, veenoxidatie of marginale bodemkwaliteit; aanname dat deze niet voor bedrijvigheid of woningbouw geschikt zijn.
Brownfields of restlandschappen	Geen of beperkt	Hergebruik van ongebruikte of verontreinigde terreinen; alternatief gebruik waarschijnlijk niet rendabel.
Binnenwater	Geen of beperkt	Geen directe alternatieve opbrengst; aangenomen dat er geen verlies voor visserij of recreatie is.
Bestaande productielocaties	Geen of beperkt	Grond al in gebruik voor opwek of energie-infrastructuur; geen alternatief gebruik verloren.

Productiviteitswinst

Wanneer er sprake is van afnamecongestie en een archetype ervoor zorgt dat er extra netcapaciteit beschikbaar komt, kan dit in potentie voor substantiële baten zorgen. De baten kunnen ontstaan wanneer deze extra netcapaciteit de mogelijkheid biedt dat bestaande bedrijven zich kunnen uitbreiden of nieuwe bedrijven zich kunnen vestigen. De productiviteitswinst die hierdoor kan optreden, hebben we benaderd door de gemiddelde toegevoegde waarde (BBP) per eenheid elektriciteitsverbruik te vermenigvuldigen met het extra elektriciteitsverbruik dat mogelijk is.

Voor de toegevoegde waarde per eenheid elektriciteitsverbruik zijn we uitgegaan van het gemiddelde van de industriële sectoren (SBI C). We gebruiken hierbij twee scenario's: een conventioneel scenario op basis van de huidige situatie (€ 2.700 per MWh) en een toekomstgericht scenario (€ 8.200 per MWh). In het toekomstgerichte scenario wordt rekening gehouden met het feit dat verdere elektrificatie in de toekomst invloed zal hebben op de verhouding tussen elektriciteitsverbruik en het BBP (Ecorys, 2024). Hierbij is het belangrijk te vermelden dat de uiteindelijke maatschappelijke waarde sterk afhangt van het type sector dat de extra netcapaciteit kan benutten. Zo kent de basisindustrie een aanzienlijk lagere toegevoegde waarde per eenheid elektriciteitsverbruik in vergelijking met de maakindustrie (tot een factor 400 lager) (CE Delft, 2025a).

Merk verder op dat de bruto productiviteitswinst is gebaseerd op de gemiddelde toegevoegde waarde per eenheid elektriciteitsverbruik van de sector en dus niet één-op-één kan worden overgenomen als welvaartswinst in onze analyse. Niet voor elk bedrijf zal de mogelijkheid om extra elektriciteit te verbruiken leiden (direct) tot een toename van de

productie. Niet voor elk type bedrijf is de beschikbaarheid van elektriciteit in deze mate beperkend voor de productiviteit: voor (elektrische) productieprocessen is dit bijvoorbeeld heel anders dan voor panden met een kantoorfunctie. Daarnaast kan een productie-toename op een plek ervoor zorgen dat elders in het land minder zal worden geproduceerd, of zou deze additionele productie mogelijk ook door andere bedrijven verzorgd kunnen worden. De netto productiviteitswinst zal dus in veel gevallen lager uitvallen.

Indirecte effecten

De indirecte effecten vloeien voort uit de directe effecten van de projectalternatieven. Preciezer gesteld betreft dit de doorwerking van de directe effecten via transacties naar andere markten in de economie (zoals de arbeidsmarkt⁶⁷) en in dit geval de netkosten.

Tabel 22 – Scope directe effecten ⁶⁸

Effect	Beoordeling	Methode
Effect op netcongestie	Kwalitatief	Kwalitatieve analyse van mogelijke gevolgen van de archetypes op terugleverings- en afnamecongestie.
Benodigde netverzwaringen	Kwalitatief	Kwalitatieve analyse van de mogelijke gevolgen voor de benodigde netverzwaringen in de verschillende archetypes op basis van literatuur en eigen expertise.

Netcongestie

In de analyse van de archetypes in Paragraaf 4.3 lichten we op basis van eigen expertise en bestaande studies toe wat de wisselwerking kan zijn tussen de archetypes en verschillende typen congestiegebieden.

Netverzwaringen

Tabel 23 geeft een overzicht van de kengetallen die we hebben gebruikt voor het schatten van de netverzwarkosten. Indien netverzwaring plaatsvindt op lagere netvlakken, dienen ook hogere netvlakken verzwakt te worden. De resulterende jaarlasten voor ieder onderdeel zijn dus inclusief de jaarlasten voor de geassocieerde hogere netvlakken.

⁶⁷ In de praktijk is het welvaartseffect van werkgelegenheid in mkba's vaak beperkt. Aangezien de werkgelegenheidseffecten (per opgewekte eenheid elektriciteit) tussen de archetypes waarschijnlijk ook beperkt verschillen, nemen we dit effect niet mee.

⁶⁸ Belastingen, subsidies en winstmarges zijn geen onderdeel van een mkba, omdat dit een overdracht betreft tussen de overheid en bedrijven/particulieren. Ook netkosten – die gesocialiseerd worden – vallen niet onder een mkba.

Tabel 23 – Jaarlasten netverzwaring inclusief de jaarlasten voor de geassocieerde hogere netvlakken

Type	Kosten (€/kW/jaar)
EHS-/HS-station	9,2
HS-kabel	3,6
HS-/MS-station	7,4
MS-net	21,3
MS-/LS-station	27,2
LS-net	41,5

Bron: (CE Delft, 2025b).

Externe effecten

De externe (of maatschappelijke) effecten betreffen effecten die onbeoogd zijn door de gebruiker en niet zijn geïnternaliseerd in de kosten. Deze zijn vaak moeilijk in geld uit te drukken, omdat markten – en dus prijzen – ontbreken. Hieronder vallen effecten op milieu en ruimtelijke effecten voor de omwonenden.

Tabel 24 – Scope externe effecten

Effect	Beoordeling	Methode
Hinder voor omwonenden	Kwantitatief	Beoordeling hinder voor omwonenden door groot- en kleinschalige opwek (zonne-energie, windenergie) op basis van kengetallen uit de literatuur. Deze kengetallen geven uitdrukking aan de woningwaardedaling als gevolg van visuele hinder, geluidshinder en hinder door slagschaduw. De woningwaardedaling is een reflectie van het welvaartsverlies voor omwonenden.
CO ₂ -emissies (direct)	Kwalitatief	Een kwalitatieve analyse van vermeden directe emissies (vermeden inzet gascentrales) door verschillen in opwekprofielen.
CO ₂ -emissies (indirecte)	Kwantitatief	Beoordeling van de emissies elders in de keten die ontstaan bij de productie en transport van de assets (zonnepanelen, windturbines, batterijen) op basis van levenscyclusanalyses uitgevoerd voor eerdere mkba's en de CO ₂ -prijzen uit de WLO-scenario's .
Biodiversiteitsverlies door landgebruik	Kwantitatief	Beoordeling van het biodiversiteitsverlies dat ontstaat bij landgebruik op basis van het Handboek Milieuprijzen.
Draagvlak	Kwalitatief	Een kwalitatieve analyse van de factoren die invloed hebben op het draagvlak voor het energiesysteem (onder andere lokaal eigenaarschap).
Recreatie	Kwalitatief	Een kwalitatieve analyse van de factoren die invloed hebben op recreatie.

Hinder voor omwonenden

Door het realiseren van hernieuwbare opwek op land kan visuele hinder (windturbines en zonneparken), geluidshinder (windturbines) en hinder door slagschaduw (windturbines) ontstaan voor omwonenden. Dit monetariseren we op basis van kengetallen uit de literatuur die uitdrukking geven aan de woningwaardedaling als gevolg van deze hinder.

Zo is er een waardedaling zichtbaar voor woningen in Nederland tot 2,5 kilometer van een windturbine (Dröes & Koster, 2021). Deze daling is groter naarmate een windturbine dichter bij een woning staat en naarmate de windturbine hoger is. Voor windturbines met een minimale tiphoogte van 150 meter is binnen een straal van 2 kilometer een waardedaling van 5,4% te zien. Daarnaast wordt aangetoond dat met name de eerste turbine in de buurt van een woning effect heeft op de woningwaarde. De orde van grootte van deze effecten wordt bevestigd in ander onderzoek naar de invloed van windturbines op woningprijzen in Nederland (TNO, 2022). Er wordt aangetoond dat windturbines met een tiphoogte van meer dan 150 meter binnen een straal van 1 kilometer een gemiddelde waardedaling van 8% teweegbrengen, terwijl dat binnen 1 tot 2,5 kilometer 4,5% bedraagt. Als bandbreedte voor onze analyse hebben we daarom gekozen voor een minimum van 5,4% binnen een straal van 2 kilometer en een maximum van 5,9% binnen een straal van 2,5 kilometer. Het effect van zonneparken op woningwaardes wordt geschat op 2,6% binnen een straal van 1 kilometer (Dröes & Koster, 2021).

De studies beschrijven verder hoe met name de eerste windturbine effect heeft op de woningwaarde. Hoe meer windturbines erbij geplaatst worden, hoe lager het additionele welvaartsverlies is per turbine. Zoals eerder beschreven in Pondera Consult & CE Delft (2023) is clustering van hernieuwbare opwek daarmee vanuit maatschappelijk perspectief gunstiger dan spreiding. Hierbij moet de kanttekening worden geplaatst dat bovengenoemde onderzoeken niet hebben gekeken naar de grootte van een windpark. Het is immers ondenkbaar dat de externe kosten hoger zijn wanneer er een groot windpark voor de deur staat dan wanneer dit er slechts één of enkele windturbines zijn.

Aangezien we voor de archetypes geen exacte locaties hebben bepaald, hebben we gebruikgemaakt van kengetallen voor de woningdichtheid van verschillende typen gebieden. Tabel 25 geeft hiervan een overzicht; Tekstkader 16 beschrijft hoe deze kengetallen zijn bepaald en hoe ze geïnterpreteerd moeten worden. Aangezien het voor de hand ligt dat er voor windturbines wordt gezocht naar locaties in dichter bevolkte gebieden, hebben we ervoor gekozen in onze analyses rekening te houden met het 1^e kwartiel (dat wil zeggen 25% van de data is lager of gelijk aan deze waarde). Rekenen met het minimum zou in veel gevallen tot een onderschatting leiden, terwijl rekenen met het gemiddelde of de mediaan waarschijnlijk voor een overschatting zou zorgen. Omdat we werken met archetypes, blijft dit een versimpelde weergave; in de praktijk kan de situatie per locatie sterk verschillen.

Voor de waarde van een woning zijn we uitgegaan van de gemiddelde WOZ-waarde van een particuliere woning in 2025: € 398.000.⁶⁹ Ook dit kan per locatie sterk verschillen, bijvoorbeeld wanneer woningen in de Randstad worden vergeleken met woningen in ruraal gebied. Voor het doel van deze studie (inschatten externe kosten van hinder) kan beargumenteerd worden dat het gemiddelde een goed uitgangspunt is voor het welvaartsverlies van de gemiddelde Nederlander.

Tabel 25 – Woningdichtheid (woningen per km²) per gebiedstype

Gebied	1e kwartiel*	Gemiddelde	Mediaan	Min.	Max.
Grote industrieclusters	59	122	93	0	373
Cluster 6	27	194	77	1	626
Mobiliteitshubs	134	195	245	22	317
Overige bedrijventerreinen	36	192	109	20	800
Landbouwgebied	42	132	75	0	847
Brownfields of restlandschappen	28	105	64	0	776
Bestaande productielocaties	44	175	72	2	1.019

Bron: Analyse Generation.Energy o.b.v. [500x500 vierkant statistiek van CBS](#) (zie Tekstkader 16).

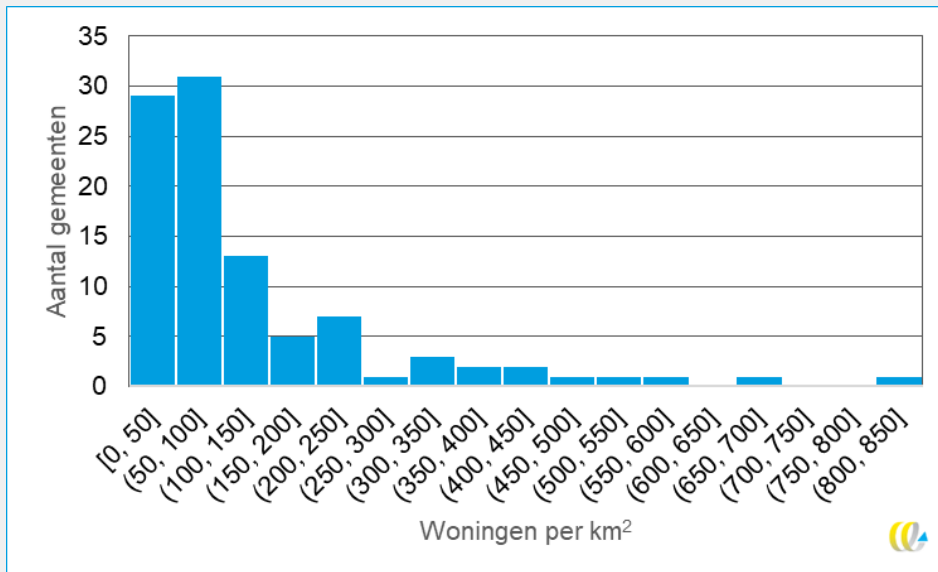
* Uitgangspunt voor analyse.

Tekstkader 16 – Methodiek bepalen woningdichtheid per gebiedstype

Het gemiddelde aantal woningen per km² per gebiedstype is bepaald op basis van een GIS-analyse. Hierbij is gebruikgemaakt van de laagste mogelijke ruimte voor windenergie op land uit de potentieanalyse wind-energie op land (met de strengste normen). Uit deze laag zijn de gebieden geselecteerd waar geen provinciale beperkingen gelden en waar voldoende ruimte is om een project met drie windturbines te realiseren. Deze geselecteerde gebieden zijn vervolgens verdeeld naar gebiedstype, waardoor een set van specifieke locaties ontstaat waar windenergie op land daadwerkelijk kan worden ontwikkeld, gerelateerd aan de gebiedstypen. Vervolgens is rond ieder geselecteerd gebied binnen een buffer van 2,5 km berekend (gebaseerd op de zone waarbinnen windturbines woningwaardedalingen veroorzaken) wat het gemiddeld aantal woningen per km² op basis van de dataset 500x500 meter statistiek van CBS, waarin het aantal woningen per 0,25 km² is opgenomen. Op basis hiervan is voor alle gemeenten (en dus voor alle gebiedstypen) het gemiddelde aantal woningen per km² bepaald. Figuur 60 illustreert hoe de verdeling van de woningdichtheid over gemeenten eruitziet. In dit voorbeeld zien we dat voor het gros van de gemeenten waarbinnen er (volgens de hierboven geschetste voorwaarden) ruimte is voor windturbines, de woningdichtheid lager is dan 100 woningen per km² en dat er een aantal gemeenten is waarvoor de woningdichtheid aanzienlijk hoger ligt. Dit kunnen bijvoorbeeld gemeenten zijn waarvan het landbouwgebied dat geschikt is voor windturbines relatief dicht bij een woonkern ligt.

⁶⁹ [CBS Statline - Gemiddelde WOZ-waarde van woningen; eigendom, regio](#)

Figuur 60 – Voorbeeld: verdeling woningdichtheid landbouwgebied voor 98 gemeenten



CO₂-emissies

In onze analyse maken we onderscheid tussen directe en indirecte CO₂-emissies:

- Verschillen in vermeden **directe emissies** (vermeden inzet van gascentrales) zullen tussen archetypes vooral ontstaan door verschil in opwekprofielen. De energetische doorrekening van de archetypen doen we echter niet op basis van uurlijkse opwekprofielen. De verschillen in directe emissies tussen archetypes zullen we daarom kwalitatief beoordelen.
 - Tussen de archetypes zullen wel verschillen zijn in de **indirecte emissies** die ontstaan in de keten – bij de productie en het vervoer van de assets. Tabel 27 geeft een overzicht van de kengetallen die we hebben gebruikt.

Voor het bepalen van de CO₂-effecten in mkba's schrijft de Algemene Leidraad Mkba voor de efficiënte CO₂-milieuprijzen uit de WLO te gebruiken (CPB & PBL, 2025). De efficiënte CO₂-prijzen zijn gebaseerd op de zogeheten preventiekostenbenadering.⁷⁰ Tabel 26 geeft een overzicht van de prijzen per ton voor 2025-2050, uitgedrukt in prijspeil 2024 en inclusief btw.⁷¹

⁷⁰ Conceptueel geven preventiekosten voor elk jaar de waardering (schaduw prijzen) weer van de doelstelling om broeikasgassen kostenefficiënt terug te dringen conform het betreffende WLO-scenario. Anders gezegd: geven de efficiënte CO₂-prijzen de prijs weer van de broeikasgasreductiedoelstellingen.

⁷¹ Aangezien de milieuprijzen voor andere stoffen (meestal) gebaseerd zijn op betalingsbereidheid, en de betalingsbereidheid inclusief btw wordt gemeten, wordt voor de CO₂-waardering in de mkba-richtlijnen aangeraden te rekenen met een gemiddeld btw-tarief van 18,2%. Dit hebben we toegepast in de gehanteerde CO₂-prijzen in dit onderzoek.

Tabel 26 – CO₂-prijzen op basis van het gemiddelde van [WLO-scenario's](#) 'Laag Snel' en 'Hoog Vertraagd'

	2025	2030	2035	2040	2045	2050
CO ₂ -prijs (€ ₂₀₂₄ per ton)	291	324	363	405	453	506

Tabel 27 – Emissiefactoren ketenemissies assets

Asset	Waarde	Eenheid	Bron
Zonne-energie, gemiddeld	1,00	tCO ₂ -eq./kW	(Copper8, 2025), (IEA, 2024)
Windenergie op land	0,67	tCO ₂ -eq./kW	(CE Delft, 2025b)
Batterij (Li-ion LiMn2O4 car battery)	0,08	tCO ₂ -eq./kWh	(CE Delft, 2025b)

Biodiversiteitsverlies door landgebruik

Bij het plaatsen van een zonnepark of windturbines kunnen er negatieve effecten op de biodiversiteit ontstaan. Zo kan een park ten koste gaan van leefgebied van verschillende soorten vogels, kan er verlies van ondergrondse biodiversiteit ontstaan, en kan de bodemkwaliteit achteruitgaan. In een literatuurstudie worden deze invloeden beschreven, en worden de verschillen geschetst tussen verschillende mate van ecologische inpassing van een zonnepark (University of Groningen et al., 2018). Over het algemeen wordt geconcludeerd dat bij een veld dat vol wordt geplaatst met panelen een verlies voor leefgebied van vogels optreedt, en dat de bodemkwaliteit achteruitgaat. Daarentegen kan er bij een goede ecologische inpassing een verbetering van het leefgebied voor vogels plaatsvinden, en wordt de bodemkwaliteit verbeterd.

In ander onderzoek wordt opgemerkt dat het van de bestaande staat van de biodiversiteit afhangt of het plaatsen van een zonnepark een negatieve of positieve impact heeft (TNO, 2018). Het effect kan over het algemeen positief zijn als de grond oorspronkelijk weinig natuurwaarde had, zoals intensieve landbouwgrond, bouwpercelen en stukken grond langs infrastructuur. Daar staat tegenover dat de impact op biodiversiteit negatief kan zijn als de grond oorspronkelijk een hoge natuurwaarde had. Zonneparken kunnen daarom, indien goed ingericht, beter zijn voor biodiversiteit dan de meeste landbouwgrond.

Ondanks de redelijke beschikbaarheid van literatuur over (mogelijk) effecten van hernieuwbare opwek op biodiversiteit, zijn deze effecten niet heel hard onderbouwd. Om deze effecten toch een waardering te kunnen geven in de maatschappelijke kosten en baten zonne-energie en windenergie, gebruiken we het Handboek Milieuprijzen (CE Delft, 2023c). Hierin is een berekening gemaakt voor een gemiddelde economische waardering van biodiversiteit in Nederland (zie Tabel 28). Dit is gebaseerd op verschillende onderzoeken en resulteert in een bandbreedte van waardering van biodiversiteit. Ecologische effecten hebben we dus beperkt meegenomen vanwege de scope van deze studie en het feit dat deze effecten sterk situatie- en locatieafhankelijk zijn, terwijl we (fictieve) archetypes hebben onderzocht. Deze gekwantificeerde externe kosten door

biodiversiteitsverlies zijn dus een beperkte weergave en zijn waarschijnlijk een onderschatting van de totale ecologische effecten.

Tabel 28 – Milieuprijzen biodiversiteitsverlies door landgebruik, €/m²/jaar

Gebiedstype	Onder	Centraal	Boven
Gemiddelde voor NL	€ 0,08	€ 0,11	€ 0,14
wv bos	€ 0,04	€ 0,05	€ 0,07
wv graslandschap	€ 0,07	€ 0,09	€ 0,12
wv landbouw, eenjarige gewassen	€ 0,12	€ 0,17	€ 0,22
wv landbouw, meerjarige gewassen	€ 0,09	€ 0,12	€ 0,16
wv gemengde landbouw	€ 0,04	€ 0,06	€ 0,07
wv overig (stedelijk, parklandschap)	€ 0,09	€ 0,13	€ 0,16
Midpointkarakterisatiefactor: m ² -a crop-eq.	€ 0,12	€ 0,17	€ 0,22

Bron: [Handboek Milieuprijzen](#).

Draagvlak

Het maatschappelijk draagvlak is een belangrijk aandachtspunt bij de verdere ontwikkeling van hernieuwbare opwek op land. In deze analyse is daarom gekeken naar de mate waarin verschillende archetypen naar verwachting lokaal draagvlak genieten.

Uit de literatuur blijkt dat de acceptatie van hernieuwbare energieprojecten door burgers en andere betrokkenen door meerdere factoren wordt beïnvloed. Negatieve effecten zoals visuele hinder, geluid en het beslag op schaarse ruimte kunnen het draagvlak verminderen, terwijl ontwerpkeuzes en inpassing juist kunnen bijdragen aan acceptatie. Visuele hinder kan bijvoorbeeld worden beperkt door de juiste landschappelijke inpassing, zoals het toepassen van groenstructuren rond zonneparken; hinder door slagschaduw kan beperkt worden door stilstandvoorziening. Daarnaast speelt multifunctioneel ruimtegebruik een belangrijke rol. Oplossingen waarbij de primaire functie van een locatie behouden blijft of wordt gecombineerd met energieopwek – zoals bij agri-pv of bij zonne-energie op daken, gevels en parkeerplaatsen – worden doorgaans positiever beoordeeld. Ook hergebruik van locaties, zoals bij repowering of het bijplaatsen van zonne-energie bij bestaande windparken, kan bijdragen aan een hogere acceptatie. Verder kan het koppelen van opwek aan nabijgelegen elektriciteitsvraag, bijvoorbeeld bij bedrijven of industrieclusters, het draagvlak vergroten, omdat de relatie tussen productie en gebruik voor burgers en bedrijven beter zichtbaar en begrijpelijk is (M. Enserink et al., 2022).

Tabel 29 geeft een indicatieve beoordeling van het mogelijke draagvlak per archetype. Deze beoordeling is gebaseerd op een *ongewogen* optelling van de positieve en negatieve beoordelingen, wat betekent dat de uitkomst tot op zekere hoogte arbitrair is. Desondanks sluiten de resultaten grotendeels aan bij bestaande beleidskaders, zoals de voorkeursvolgorde zon. Archetypen zoals zonne-energie op daken, gevels en

parkeerplaatsen komen het meest positief naar voren, gevolgd door onder meer agri-pv, repowering, het bijplaatsen van zonne-energie bij windenergie en opwek op onbenutte of minder waardevolle terreinen. Grootschalige zonne-energie op land en windturbines in de nabijheid van woningen scoren daarentegen minder gunstig, vooral vanwege de grotere ruimtelijke impact en hinder voor omwonenden.

In deze beoordeling zijn participatie en lokaal eigenaarschap niet expliciet meegenomen, terwijl deze factoren in de praktijk wel een belangrijke rol kunnen spelen bij het vergroten van draagvlak. Het betrekken van omwonenden en andere belanghebbenden in het besluitvormingsproces, het bieden van financiële participatiemogelijkheden, compensatie of betrokkenheid bij beheer kan de negatieve beleving van projecten deels verzachten (M. Enserink et al., 2022). Lokaal eigenaarschap van windturbines en zonneprojecten kan daarnaast sociale voordelen opleveren, zoals het versterken van de gemeenschapszin, het creëren van lokale economische baten en een eerlijkere verdeling van de opbrengsten van de energietransitie. Tegelijkertijd kan het bij onvoldoende draagvlak en rechtvaardige verdeling van lusten en lasten ook leiden tot tweespalt in lokale gemeenschappen (Horstink et al., 2019).

Tabel 29 – Indicatieve beoordeling draagvlak

Archetype	Hinder	Ruimtegebruik	Mogelijkheden landschappelijke inpassing	Hergebruik of multifunctioneel ruimtegebruik	Lokale vraagvoorziening	Overige baten (landbouw, natuurherstel)	Draagvlak
Hernieuwbaar in grote industrieclusters – zonne-energie op land	–	--	+		+		–
Hernieuwbaar in grote industrieclusters – zonne-energie op dak				+	+		++
Hernieuwbaar in grote industrieclusters – windenergie op land	--	–			+		--
Hernieuwbaar bij cluster 6-industrie – zonne-energie op land	–	--	+		+		–
Hernieuwbaar bij cluster 6-industrie – zonne-energie op dak				+	+		++
Hernieuwbaar bij cluster 6-industrie – windenergie op land	--	–			+		–
Hernieuwbaar bij mobiliteitshubs – zonne-energie op land	–	--	+		+		–
Hernieuwbaar bij mobiliteitshubs – zonne-energie op dak				+	+		++
Hernieuwbaar bij mobiliteitshubs – windenergie op land	--	–			+		--
Zonne-energie op daken van mkb en maatschappelijk vastgoed (individueel)				+	+		++
Windturbines bij bedrijventerreinen (collectief)	--	–			+		--
Windturbines en zonnepark bij bedrijventerreinen (collectief)	–	--			+		--
Zonne-energie op dak woningen				+	+		++



Archetype	Hinder	Ruimtegebruik	Mogelijkheden landschappelijke inpassing	Hergebruik of multifunctioneel ruimtegebruik	Lokale vraagvoorziening	Overige baten (landbouw, natuurherstel)	Draagvlak
Zonne-energie op gevels				+	+		++
Erfmolens					+		+
Zonne-energie bij parkeerplaatsen (solar carports)				+	+		++
Verticale agri-pv	–	–	+	+		+	+
Zonvolgende agri-pv	–	–	+	+		+	+
Zonnepark als functie voor ecologie en natuurherstel	–	--	+	+		+	+/-
Zonne-energie op water	–	–					--
Windturbines op verziltingsgronden of veenontginningsgebieden	--	–		+			--
Zonnepark op verziltingsgronden of veenontginningsgebieden	--	--	+	+			--
Zonne-energie op brownfields of restlandschappen (zoals infrastructuur)	–	–	+	+			+/-
Windenergie op brownfields of restlandschappen (zoals infrastructuur)	--	–		+			--
Zonneweide op landbouwgrond	–	--	+				--
Windturbines op landbouwgrond	--	–					--
Repowering – zonne-energie		–	+	+			+
Repowering – windenergie	–			+			+/-
Bijplaatsen opwek bij bestaand project op dezelfde aansluiting – zonne-energie		–	+	+			+

E Detailuitwerking ontwikkelpaden

E.1 Detailaannames kwantitatieve uitwerking ontwikkelpaden

Tabel 30 – Aannames benutting potentie archetypen

	Type opwek	Ruimtelijke potentie ⁷²	Deel potentie benut in ontwikkelpad		
			Optimale netinpassing	Minimaliseren ruimtegebruik	Optimalisatie maatschappelijke kosten
Zonne-energie of windenergie bij vraag/decentrale oplossingen					
Hernieuwbaar in grote industrieclusters	Zonne-energie op land	3.700 MW (inclusief omliggend gebied)	100%	0%	0%
	Zonne-energie op dak	3.100 MW	100%	100%	100%
	Windenergie op land	400 MW (inclusief omliggend gebied)	100%	100%	100%
Hernieuwbaar bij cluster 6-industrie	Zonne-energie op land	1.400 MW (met beper- king, inclusief omliggend gebied)	100%	0%	0%
	Zonne-energie op dak	2.200 MW	100%	100%	100%

⁷² Ondergrens met harde en zachte beperkingen, zie Paragraaf 4.1.1.



	Type opwek	Ruimtelijke potentie ⁷²	Deel potentie benut in ontwikkelpad		
			Optimale netinpassing	Minimaliseren ruimtegebruik	Optimalisatie maatschappelijke kosten
	Windenergie op land	0 MW (inclusief omliggend gebied)	100%	100%	100%
Hernieuwbaar bij mobiliteitshubs	Zonne-energie op land	1.700 MW (inclusief omliggend gebied)	100%	0%	0%
	Zonne-energie op dak	8.000 MW	100%	100%	100%
	Windenergie op land	50 MW (inclusief omliggend gebied)	100%	100%	100%
Zonne-energie op daken van mkb en maatschappelijk vastgoed (individueel)	Zonne-energie op dak	8.400 MW	18%	100%	18%
Windturbines (evt.+zon) bij bedrijventerreinen (collectief)	Windenergie op land	100 MW	100%	100%	100%
	Zonne-energie op land	1.600 MW	0%	0%	0%
	Zonne-energie op dak	12.500 MW	18%	100%	18%
Zonne-energie op dak woningen	Zonne-energie op dak	57.000 MW	32%	100%	32%
Zonne-energie op gevels		64.000 MW	0%	0%	0%
Erfmolens		6.500 MW	4%	19%	0%
Zonne-energie bij parkeerplaatsen (solar carports)		10.200 MW	3%	100%	0%
Losse wind- of zonneparken					
Verticale & zonnvolgende agri-pv	Zonne-energie op land	255.000 MW	0%	0%	10%
Zonneparken als functie voor ecologie en natuurherstel	Zonne-energie op land	30.000 MW	0%	0%	100%
Zonne-energie op water	Zonne-energie op land	52.000 MW	0%	0%	0%



	Type opwek	Ruimtelijke potentie ⁷²	Deel potentie benut in ontwikkelpad		
			Optimale netinpassing	Minimaliseren ruimtegebruik	Optimalisatie maatschappelijke kosten
Windparken op verziltingsgronden of veenontginningsgebieden	Windenergie op land	12.000 MW	0%	0%	100%
Zonne-energie op brownfields of rest-landschappen (zoals infrastructuur)	Zonne-energie op land	103.000 MW	0%	0%	0%
Zonneweide en/of windturbines op landbouwgrond	Zonne-energie op land	255.000 MW	0%	0%	0%
	Windenergie op land	36.000 MW	0%	0%	
Extra hernieuwbare opwek bij bestaande opwek					
Repowering	Zonne-energie op land	6.000 MW	100%	80%	100%
	Windenergie op land	6.900 MW	100%	100%	100%
Bijplaatsen opwek bij bestaand project op zelfde aansluiting	Zonne-energie op land	14.200 MW	0%	100%	100%
	Windenergie op land	50 MW	0%	100%	100%

E.2 Cijfers elektriciteitsvraag per sector

De cijfers voor de vraagpiek per sector zijn gebruikt om te bepalen hoeveel hernieuwbare opwek op land ingepast kan worden bij dimensionering op de piek. Hiervoor zijn de energiehoeveelheden en vraagprofielen van de Netbeheer Nederland-scenario's gebruikt (Netbeheer Nederland, 2025b). De onderstaande tabel geeft het overzicht van de vraagpiek per sector.

Tabel 31 – Vraagpiek elektriciteitsvraag per sector (2040 Koersvaste Middenweg)

	Koersvaste Middenweg 2040
Grote industrieclusters	10,5 GW
Cluster 6-industrie	5,2 GW
Mobiliteit (exclusief thuisladen)	12,7 GW
Utiliteiten	6,3 GW
Woningen (inclusief thuisladen)	14,8 GW
Landbouw	2,5 GW

Bron: (Netbeheer Nederland, 2025b).



F Data figuren

Deze bijlage geeft een overzicht van de data achter de figuren van het hoofdrapport, voor figuren waarbij de data niet weergegeven wordt in de figuren zelf.

F.1 Samenvatting

Tabel 32 – Data achter Figuur 1, in GW

	Huidig	Potentie	Optimale netinpassing	Minimaliseren ruimtegebruik	Optimalisatie mkba	No-regrets
Geplande projecten	0	0	5	5	5	5
Zonne-energie op dak woningen	12	69	30	69	30	30
Zonne-energie op dak bedrijven	11	55	28	55	28	28
Zonne-energie op gevels	0	64	0	0	0	0
Zonne-energie op land bij vraag	2	10	8	2	2	2
Zonne-energie op land los	4	401	4	2	60	2
Bijplaatsen zonne-energie bij windenergie	1	15	1	15	15	1



Tabel 33 – Data achter Figuur 2, in GW

	Huidig	Potentie	Optimale netinpassing	Minimaliseren ruimtegebruik	Optimalisatie mkba	No-regrets
Geplande projecten	0	0	1	1	1	1
Windenergie op land bij vraag	3	3	3	3	3	3
Windenergie op land los	4	44	4	4	14	4
Bijplaatsen wind-energie bij zonne-energie	0	0	0	0	0	0
Erfmolens	0	7	0	1	0	0

F.2 Hoofdstuk 2

Tabel 34 – Data achter Figuur 8, in TWh

	Benutting extra hernieuwbare opwek op land
Meer flexibele vraag	43
Minder inzet regelbare centrales	13
Afname netto-import elektriciteit	21
Curtailement hernieuwbare opwek	2

Tabel 35 – Data achter Figuur 10, in TWh

	Benutting extra hernieuwbare opwek op land
Meer flexibele vraag	33
Minder inzet regelbare centrales	24
Afname netto-import elektriciteit	23
Curtailement hernieuwbare opwek	1

F.3 Hoofdstuk 5

Tabel 36 – Data achter Figuur 26, in GW

	Huidig	Minimaliseren ruimtegebruik
Geplande projecten	0	5
Zonne-energie op dak woningen	12	69
Zonne-energie op dak bedrijven	11	55
Zonne-energie op gevels	0	0
Zonne-energie op land bij vraag	2	2
Zonne-energie op land los	4	2
Bijplaatsen zonne-energie bij windenergie	1	15

Tabel 37 – Data achter Figuur 27, in GW

	Huidig	Minimaliseren ruimtegebruik
Geplande projecten	0	1
Windenergie op land bij vraag	3	3
Windenergie op land los	4	4
Bijplaatsen windenergie bij zonne-energie	0	0
Erfmolens	0	1

Tabel 38 – Data achter Figuur 28, in GW

	Huidig	Optimale netinpassing
Geplande projecten	0	5
Zonne-energie op dak woningen bij bestaande vraag	12	13
Zonne-energie op dak bedrijven bij bestaande vraag	11	21
Zonne-energie op gevels	0	0
Zonne-energie op land bij vraag	2	7
Zonne-energie op land los	4	4
Bijplaatsen zonne-energie bij windenergie	1	1
Zonne-energie op dak woningen bij toekomstige vraag	0	17
Zonne-energie op dak bedrijven bij toekomstige vraag	0	8
Zonne-energie op land bij toekomstige vraag	0	1



Tabel 39 – Data achter Figuur 29, in GW

	Huidig	Optimale netinpassing
Geplande projecten	0	1
Windenergie op land bij vraag	3	3
Windenergie op land los	4	4
Bijplaatsen windenergie bij zonne-energie	0	0
Erfmolens	0	0,3

Tabel 40 – Data achter Figuur 30, in GW

	Huidig	Optimalisatie mkba
Geplande projecten	0	5
Zonne-energie op dak woningen	12	30
Zonne-energie op dak bedrijven	11	28
Zonne-energie op gevels	0	0
Zonne-energie op land bij vraag	2	2
Zonne-energie op land los	4	60
Bijplaatsen zonne-energie bij windenergie	1	15

Tabel 41 – Data achter Figuur 31, in GW

	Huidig	Optimalisatie mkba
Geplande projecten	0	1
Windenergie op land bij vraag	3	3
Windenergie op land los	4	14
Bijplaatsen windenergie bij zonne-energie	0	0
Erfmolens	0	0

Figuur 32 komt overeen met Figuur 1. Figuur 34 komt overeen met Figuur 2.



Tabel 42 – Data achter Figuur 35

	Drenthe	Flevo-land	Fries-land	Gelder-land	Gro-ningen	Lim-burg	Noord-Brabant	Noord-Holland	Over-ijssel	Utrecht	Zee-land	Zuid-Holland
Zonne-energie op dak woningen	2,2	1,1	2,8	7,8	2,3	4,9	10,0	7,2	4,5	3,5	1,6	9,1
Zonne-energie op dak bedrijven	1,4	1,1	2,0	5,4	0,7	3,8	8,6	6,0	3,5	2,4	1,7	7,3
Zonne-energie op gevels	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Zonne-energie op land bij vraag	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Zonne-energie op land los	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Bijplaatsen zonne-energie bij windenergie	0,9	7,5	0,0	0,0	1,0	0,1	0,3	3,1	0,1	0,0	0,6	0,6

	Drenthe	Flevo-land	Fries-land	Gelder-land	Gro-ningen	Lim-burg	Noord-Brabant	Noord-Holland	Over-ijssel	Utrecht	Zee-land	Zuid-Holland
Zonne-energie op dak woningen	0,7	0,4	0,9	2,5	0,7	1,5	3,2	2,3	1,4	1,1	0,5	2,9
Zonne-energie op dak bedrijven	0,5	0,3	0,6	1,8	0,3	1,7	3,8	2,3	1,3	0,9	0,7	2,6
Zonne-energie op gevels	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Zonne-energie op land bij vraag	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Zonne-energie op land los	4,7	1,7	5,1	8,0	4,2	6,6	5,0	6,7	5,7	1,3	3,7	3,5
Bijplaatsen zonne-energie bij windenergie	0,9	7,5	0,0	0,0	1,0	0,1	0,3	3,1	0,1	0,0	0,6	0,6



Tabel 43 – Data achter Figuur 36

	Drenthe	Flevo-land	Fries-land	Gelder-land	Gro-ningen	Lim-burg	Noord-Brabant	Noord-Holland	Over-ijssel	Utrecht	Zee-land	Zuid-Holland
Windenergie op land bij vraag	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1
Windenergie op land los	0,2	0,1	3,4	0,2	3,3	0,0	0,0	0,9	0,4	0,6	0,3	0,8
Bijplaatsen windenergie bij zonne-energie	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Erasmus	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 44 – Data achter Figuur 37

	Drenthe	Flevo-land	Fries-land	Gelder-land	Gro-ningen	Lim-burg	Noord-Brabant	Noord-Holland	Over-ijssel	Utrecht	Zee-land	Zuid-Holland
Windenergie op land bij vraag	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1
Windenergie op land los	0,8	0,5	2,2	0,5	2,2	0,3	0,7	0,7	0,6	0,5	0,4	0,7
Bijplaatsen windenergie bij zonne-energie	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Erasmus	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

F.4 Hoofdstuk 6

Figuur 38 komt overeen met Figuur 1. Figuur 39 komt overeen met Figuur 2.