Geacht College en Gemeenteraad van de gemeente Aalten,

Dale, 2 april 2023

Betreft: schriftelijke zienswijze op behandeling Akkoord van Groenlo 3.0 en daarbij behorende bijlages t.b.v. de beeldvormende raadsvergadering van 4 april 2023.

- De oorspronkelijke doelstelling van 2030 in de eerdere versies van het Akkoord was volkomen onrealistisch, daarom is het verschuiven van de deadline naar 2050 een goede zaak. Dit geeft de kans om ook realistische opties zoals waterstof en kernenergie uit te werken want we weten allemaal dat we het met zon en wind alleen niet gaan redden! Waarom wordt hieraan in het rapport van RoyalHaskoning DHV niet meer aandacht aan besteed er is nu immers meer tijd dus het oude argument dat e.e.a. te veel tijd kost is niet meer valide?

- Het akkoord van Groenlo is gestoeld op het intussen alweer gedateerde rapport uit 2021 van RoyalHaskoningDHV. In bijlage 1 van dit rapport wordt een feitelijke onderbouwing gegeven van de benodigde opwekking d.m.v. zon & wind. Nog afgezien van het gegoochel met eenheden bij de figuren waarvoor het voor de gemiddelde lezer al snel onbegrijpelijk wordt staan hier volkomen onrealistische aantallen windturbines en hectares zonnevelden genoemd. De totale oppervlakte van de 8 Achterhoekse gemeentes die deelnemen aan het Akkoord van Groenlo is ongeveer 1200 km^2. Globaal kan hiervan 20% worden afgetrokken i.v.m. bijvoorbeeld woonkernen, natuurgebied en water. Blijft theoretisch ongeveer 960 km^2 buitengebied over voor windturbines en zonnevelden (Nb: hier blijft overigens bijna niets van over als we de geluidscontouren daarop toepassen).

  2030 RES 2.0

  154 windturbines dichtheid: 960/154= 6,2 m.a.w. op elke 6,2 km^2 een windturbine!

  2050 ENERGIENEUTRAAL (als besparing van 26% gehaald wordt)

  267 windturbines dichtheid: 960/267= 3,6 m.a.w. op elke 3,6 km^2 een windturbine!

  2050 ENERGIENEUTRAAL (als besparing van 26% niet gehaald wordt, meest realistisch)

  325 windturbines dichtheid: 960/325= 2,9 m.a.w. op elke 2,9 km^2 een windturbine!

  Volkomen onrealistisch om te denken dat we de gehele Achterhoek met zijn unieke landschap van voor naar achter vol gaan zetten met windturbines (en zonneparken)!! Zelfs als we deze in clusters van 10 zouden neerzetten is 27 tot 32 van dergelijke windparken in de Achterhoek volkomen absurd!

- In het recente rapport van het onafhankelijke ingenieursbureau CE DELFT van februari 2023 (gevoegd) wordt gesteld dat:
  Om klimaatdoelen voor 2030 en 2050 te behalen is een forse toename van de productie van CO2-vrije energie noodzakelijk. Hernieuwbare elektriciteitsproductie op land, in de vorm van windmolens op land en zonneparken, dragen op dit moment flink bij aan het verduurzamen van de Nederlandse elektriciteitsproductie. ***Maar door de snelle uitrol van windparken op zee en zon op dak ontstaat de vraag of extra windmolens op land en zonneparken, boven op de doelstelling van 35 TWh vanuit de RES, noodzakelijk zijn voor het behalen van de klimaatdoelstellingen. Of dat de verhoogde klimaatdoelstelling voor 2030 en de klimaatdoelstelling voor 2050 ook behaald kunnen worden zonder verdere groei van deze energiebronnen.*** *Het doel van dit onderzoek is om een beeld te schetsen op welke wijze de 2030- en 2050-doelen gehaald kunnen worden, met en zonder extra wind op land en zonneparken. En om de afwegingen tussen de verschillende energiebronnen in kaart te brengen.* ***Voor 2050 kunnen de klimaatdoelstellingen ook gehaald worden zonder extra wind en zon op land.*** *Wind op zee en zon op dak (met of zonder kernenergie) in combinatie met regelbare waterstofcentrales en import van waterstof is voldoende. Er is dus ruimte om keuzes te maken tussen verschillende energiebronnen. Er zijn verschillende combinaties van energiebronnen denkbaar voor de invulling van de toekomstige energievraag, met elk zijn eigen maatschappelijke voor- en nadelen. Aangezien investeringen in duurzame energie voor een lange periode gedaan worden, is het wenselijk om hier snel keuzes in te maken. Voor 2030 geldt dat de tijd bepalend is welke technieken in de nog zeven resterende jaren gerealiseerd kunnen worden om de doelen (van het kabinet én van de EU) te halen. Een nog verdergaande versnelling van de uitrol van windparken op zee voor 2030 is niet realistisch. Daardoor zijn andere bronnen nodig om deze doelstelling te halen, of is het nodig de doelstelling naar achteren te verschuiven.*

  Het Achterhoekse landschap kan slechts 1 keer verpest worden! Neem de onderzoeksresultaten uit dit rapport mee voordat besloten wordt om klakkeloos meer wind op land te realiseren.

- De BBB is in alle provincies de grootste partij geworden, een nieuwe politieke realiteit. In het verkiezingsprogramma van de BBB staat dat men tegen windturbines op land is: *"Zon op het dak, geen windmolenparken en bij draagvlak kernenergie en aquathermie."*
  https://boerburgerbeweging.nl/gelderland/provinciale-staten/verkiezingsprogramma/
  Dit gaat gevolgen hebben voor het beleid, er gaat breder (kernenergie, waterstof, wind van zee) gekeken worden. Hoe gaat het akkoord van Groenlo hier aandacht aan besteden? Onderschrijft de fractie van BBB-HMV in Aalten het hierboven genoemde verkiezingsprogramma en de standpunten v.w.b. windturbines van de BBB en kan de Aaltense BBB-HMV hier duidelijkheid over geven aan de Aaltense kiezers?

- Wind van Zee is geen luchtfietserij. Zie het Volkskrant artikel van 30 maart "TenneT bouwt voor 23 miljard euro 'stekkerplatforms' in zee: 'één van de belangrijkste infrastructuurprojecten van de eeuw'" https://www.volkskrant.nl/a-b095fe10
  Wind op land (zeker in de Achterhoek) is niet efficiënt en kan alleen gerealiseerd worden met overheidssubsidie (lees belastinggeld). Wind van zee is veel efficiënter, rendabeler en betrouwbaarder en kan nu reeds zonder subsidie worden geproduceerd. De gemeente Aalten heeft intussen geïnvesteerd in een gezamenlijk zonnepark in een buurgemeente terwijl een tender voor zonnevelden in de eigen gemeente wordt afgewezen. Analoog

hieraan zou de gemeente Aalten kunnen overwegen om investeren in het t.o.v. de Achterhoek veel efficiënter opwekken van Wind op Zee om zodoende de doelstellingen te halen. Worden de mogelijkheden hiervan onderzocht?

- Aalten heeft recent besloten om geen zonneparken toe te staan op landbouwgrond (geen tenders uit te schrijven). Het akkoord van Groenlo stoelt op het rapport van RoyalHaskoning DHV waarin klip en klaar staat dat er 225 tot 1400 hectare zonneveld in de Achterhoek nodig is om aan de RES in 2030 en t.z.t. aan Energieneutraliteit in 2050 te voldoen. De grootse partij in de provincie, de BBB, wil ook geen zon op land maar alleen op dak. Nogmaals de vraag hoe u het akkoord van Groenlo kan ondertekenen terwijl u weet dat het onderzoek van RoyalHaskoning DHV waarop dit gebaseerd is politiek gezien volkomen onrealistisch is?

- Ik wil u bij deze nogmaals wijzen op de brandbrief (gevoegd) die de gezamenlijke Achterhoekse bewonersgroepen in februari hebben verstuurd.

M.vr.gr.

Mede namens het Platform Zon & Wind het Goor

Brandbrief – Stop windindustrie in de Achterhoek

22 februari 2023

Aan de kandidaten en politieke partijen die deelnemen aan de verkiezingen voor Provinciale Staten Gelderland 2023.

Als gezamenlijke Achterhoekse belangengroepen richten wij ons tot u met de oproep de uitrol van plannen voor nieuwe windparken in de Achterhoek een halt toe te roepen. Voor grote windturbines in onze directe leefomgeving is geen draagvlak onder de Achterhoekse bevolking. Bovendien past wind op land niet langer in het streven naar een eerlijk en verstandig energiebeleid. Nu de landelijke overheid heeft besloten dat de energieopwekking op zee voor een groot deel in de behoefte gaat voorzien, zijn nieuwe windparken op land strikt genomen niet langer nodig. Niet voor de energievoorziening en niet voor de klimaatdoelen. Wij roepen partijen op rigide uitgangspunten uit het verleden te herzien. Grote windturbines horen op de Noordzee, niet in de Achterhoek.

Achterhoek in de uitverkoop?

De meeste gemeenten in de Achterhoek hebben plannen, neergelegd in de Regionale Energie Strategie (RES) Achterhoek, om de komende jaren tientallen windturbines te laten plaatsen, waaronder extreem grote met een tiphoogte van 240 tot 280 meter. Na 2030 zou er nog een veelvoud bij komen. Resultaat: een lappendeken aan windturbines en zonneparken in de hele Achterhoek. Bestuurders zouden moeten voorkomen dat de Achterhoek op deze manier in de uitverkoop wordt gezet.

Waarom windturbines in de Achterhoek contraproductief zijn

1. Windturbines op land zorgen voor overproductie.
   Dit jaar komt er 4,5 gigawatt op zee te staan. In 2030 moet dat 21 gigawatt zijn en in 2050 70 gigawatt. Wanneer het waait kan de Noordzee ruimschoots aan alle vraag naar elektriciteit voldoen: het plaatsen van meer windturbines op land zorgt voor overproductie.
2. Windturbines op land zijn minder efficiënt.
   Op land maken windturbines veel minder draaiuren, ze zijn dus minder efficiënt. De Achterhoek is ook nog eens een van de meest windluwe regio's van Nederland. Voor de CO2-reductie zijn windturbines op land ook minder effectief: steenkool- of gascentrales moeten vaker bijspringen.
3. Wind op land kost miljarden aan overheidssubsidies.
   De afgelopen jaren zijn miljarden aan subsidie opgestreken door de exploitanten en deels naar het buitenland weggevloeid. Voor windenergie op zee wordt geen subsidie verstrekt.

Waarom wij een stop op nieuwe windparken willen

Achterhoekers voelen zich overrompeld door de plannen voor windturbines die door de overheid over hen worden uitgerold. Als belangenbehartigers weten we dat zij zich grote zorgen maken over hun welzijn. Uit onderzoek wordt steeds duidelijker dat gezondheidsschade door geluid, slagschaduw en laagfrequente trillingen vaker voorkomt dan werd aangenomen. Ook vrezen bewoners onomkeerbare schade aan landschap en natuur. Daarbij komt de financiële schade voor omwonenden en ondernemers, door onder meer de waardedaling van woningen en de aantasting van de toeristische en recreatieve waarde van het gebied. De bescherming tegen de risico's van windturbines laat veel te wensen over.

Meer draagvlak voor de regionale energiestrategie nodig

Draagvlak onder de Achterhoekse bevolking is cruciaal voor het slagen van de regionale energiestrategie. De voorkeur van burgers gaat overwegend uit naar "zon op dak en wind van zee". De landelijke politiek koerst steeds nadrukkelijker op wind op zee. Toch houden veel lokale bestuurders koste wat kost vast aan 'wat nu eenmaal is afgesproken in de RES'.

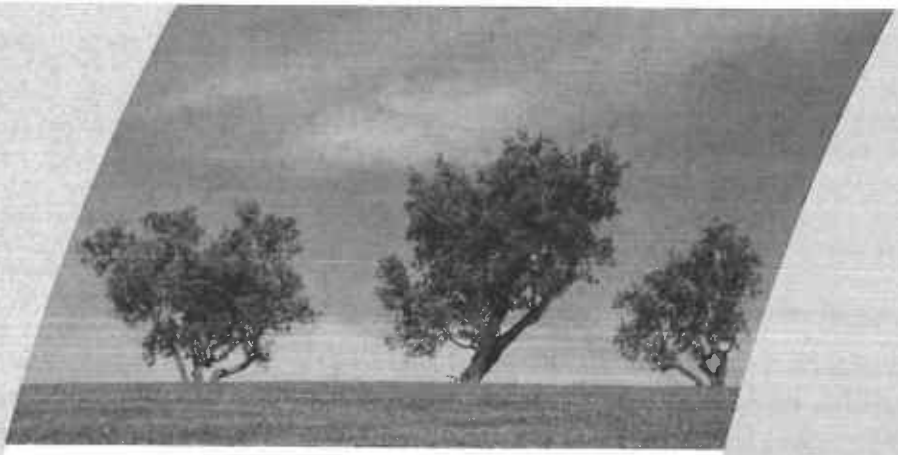
Als Achterhoekse bewonersgroepen is onze dringende oproep aan partijen die deelnemen aan de verkiezingen: zorg voor draagvlak, neem optimaal gebruik van de opwekcapaciteit van de Noordzee op in uw partijprogramma en vrijwaar de Achterhoek van onnodige windindustrie.

Prik de RES Achterhoek door, laat de wind eruit lopen!

Ondertekend door 11 belangengroepen uit 7 Achterhoekse gemeenten:

Aalten – Platform Zon en Wind in het Goor
Berkelland / Oost Gelre – Windkracht K
Bronckhorst – Hengelse Zand , Bronckhorst windturbinevrij , Windturbines Drempt, Tegenwind Keppel en Eldrik, Tegenwind Oude IJssel, Natuurlijk landschap Heidenhoek
Doetinchem – Werkgroep Geen Windturbines Hier
Lochem – Belangenvereniging Exel en Omstreken
Winterswijk – Stichting Behoud Nationaal Landschap Winterswijk

Contact



Nut en noodzaak extra wind op land in 2030 en 2050

Uiteenzetting mogelijke scenario's en afweging





CE Delft

Committed to the Environment

Nut en noodzaak extra wind op land in 2030 en 2050

Uiteenzetting mogelijke scenario's en afweging

Dit rapport is geschreven door:
Joeri Vendrik, Heleen Groenewegen, Frans Rooijers

Delft, CE Delft, februari 2023

Publicatienummer: 22.220235.197

Energievoorziening / Duurzame energie / Toekomst / Scenario's / Kosten / Baten / Locaties / Effecten / Klimaatneutraal

Opdrachtgever: Stichting Windalarm, Nederlandse Vereniging Omwonenden Windturbines (NLVOW)

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 meer dan 40 jaar werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	8
	1.1 Wat zijn de aanleiding en het doel van het onderzoek?	8
	1.2 Wat onderzoeken we?	9
	1.3 Leeswijzer	9
2	Wat zijn mogelijke scenario's voor een klimaatneutraal energiesysteem in 2050?	11
	2.1 Hoe groot is de potentie van de verschillende CO_2-vrije energiebronnen?	11
	2.2 Wat zijn mogelijke scenario's voor 2050?	13
	2.3 Wat is de impact van verschillende scenario's op energie-infrastructuur?	24
3	Wat zijn de effecten op de klimaatdoelstelling voor 2030?	27
	3.1 Hoeveel extra CO_2-vrije energie is nodig in 2030?	27
	3.2 Wat is de potentie van CO_2-vrije energiebronnen in 2030?	28
	3.3 Wat is het effect van de scenario's op het behalen van de klimaatdoelstelling voor 2030?	29
4	Wat is het effect op de maatschappelijke kosten?	31
	4.1 Wat verstaan we onder maatschappelijke kosten?	31
	4.2 Wat zijn de maatschappelijke kosten van verschillende energiebronnen?	32
	4.3 Wat zijn de totale maatschappelijke kosten voor de verschillende scenario's in 2050?	38
	4.4 Wat zijn de maatschappelijke kosten van CO_2-vrije energiebronnen in 2030?	41
5	Wat is het effect op de importbehoefte van Nederland?	43
	5.1 Wat zijn de afwegingen tussen zelf produceren en importeren van energie?	43
	5.2 Hoe groot is de importbehoefte bij elk scenario?	44
6	Gevoeligheidsanalyses	46
	6.1 Krimp energie-intensieve industrie in Nederland	48
	6.2 Krimp internationale scheeps- en luchtvaart in Nederland	51
	6.3 Meer vollasturen wind op zee en wind op land	52
	6.4 Grotere potentie wind op zee	54
	6.5 Uitstellen klimaatdoelstelling 2030 naar 2031	55
7	Conclusies	56
	7.1 Mogelijke scenario's klimaatneutraal energiesysteem 2050	56
	7.2 Haalbaarheid klimaatdoelstelling 2030	58
	7.3 Afwegingen	59
Literatuur		61

A Modellering energiescenario's 63
A.1 Werking model 63
A.2 Optimalisatie energieproductie 65

B Aannames kostenberekeningen 70
B.1 Externe kosten 70
B.2 Overige resultaten 73

C Resultaten scenario's 77
C.1 Resultaten scenario Internationale Sturing 77
C.2 Maatschappelijke kosten 79
C.3 Gevoeligheidsanalyses 81

Samenvatting

Nederland heeft de doelstelling om zijn uitstoot van broeikasgassen in 2030 met ten minste 55% terug te brengen ten opzichte van 1990. In 2050 moet Nederland helemaal klimaatneutraal zijn. In een klimaatneutraal energiesysteem wordt uitsluitend gebruik gemaakt van CO_2-vrije energiebronnen. Om deze doelen te behalen is een forse toename van de productie van CO_2-vrije energie noodzakelijk.

Hernieuwbare elektriciteitsproductie op land, in de vorm van windmolens op land en zonneparken, dragen flink bij aan het verduurzamen van de Nederlandse elektriciteitsproductie. Op dit moment wordt ruim 10% van de Nederlandse elektriciteitsvraag met deze bronnen geproduceerd (PBL, 2022). Maar door de snelle uitrol van windparken op zee en zon op dak ontstaat de vraag of extra windmolens op land en zonneparken, boven op de doelstelling van 35 TWh vanuit de RES, noodzakelijk zijn voor het behalen van de klimaatdoelstellingen. Of dat de verhoogde klimaatdoelstelling voor 2030 en de klimaatdoelstelling voor 2050 ook behaald kunnen worden zonder verdere groei van deze energiebronnen.

Het doel van dit onderzoek is om een beeld te schetsen op welke wijze de 2030- en 2050-doelen gehaald kunnen worden, met en zonder extra wind op land en zonneparken. En om de afwegingen tussen de verschillende energiebronnen in kaart te brengen.

Voor 2050 kunnen de klimaatdoelstellingen ook gehaald worden zonder extra wind en zon op land. Wind op zee en zon op dak (met of zonder kernenergie) in combinatie met regelbare waterstofcentrales en import van waterstof is voldoende. Er is dus ruimte om keuzes te maken tussen verschillende energiebronnen. Er zijn verschillende combinaties van energiebronnen denkbaar voor de invulling van de toekomstige energievraag, met elk zijn eigen maatschappelijke voor- en nadelen. Aangezien investeringen in duurzame energie voor een lange periode gedaan worden, is het wenselijk om hier snel keuzes in te maken.

Voor de doelstelling voor 2030 is het lastiger om te kiezen tussen verschillende bronnen, omdat er op korte termijn een sterke groei is van de vraag naar elektriciteit en de groei van wind op zee naar verwachting niet verder versneld kan worden en kerncentrales niet binnen deze termijn gerealiseerd kunnen worden. De keuze is daarom beperkt tot wind op land plus zon, maximaal zon op dak, indien mogelijk tijdelijk meer waterstof importeren en/of verschuiven van de doelstelling naar 2031, wanneer een extra hoeveelheid wind op zee ter beschikking komt.

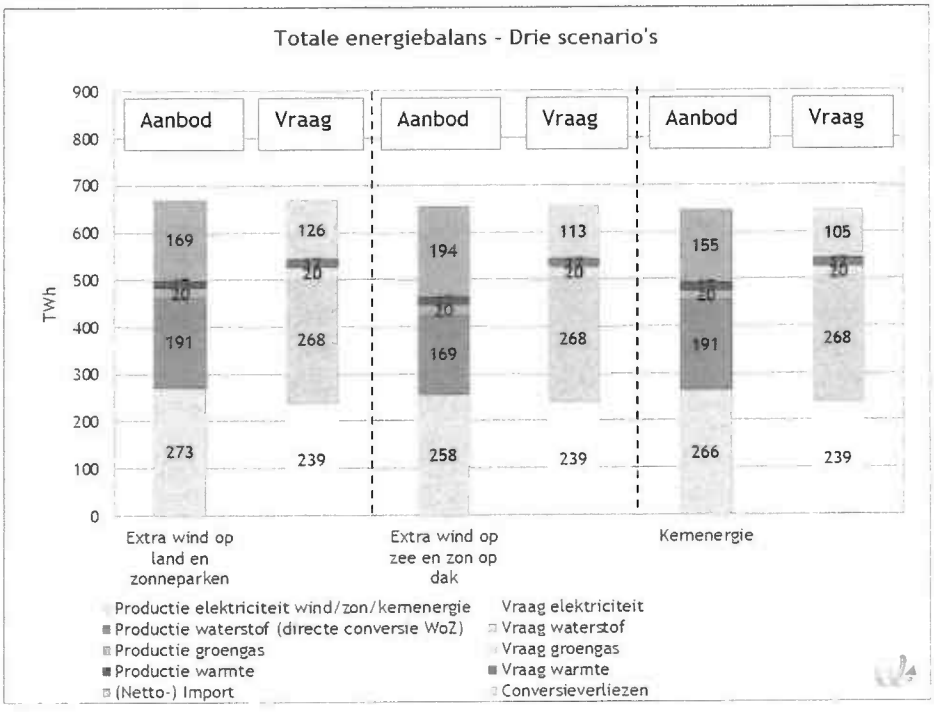
Scenario's voor 2050

Er zijn drie scenario's ontwikkeld die alle drie in 2050 aan de verwachte energievraag van circa 650 TWh voldoen:

1. **Extra windmolens op land en zonneparken.** Het opgestelde vermogen aan windmolens op land en zonneparken komt bovenop de RES-doelstelling van 35 TWh hernieuwbare opwek op land.
2. **Extra wind op zee en zon op dak.** Geen groei van het opgestelde vermogen aan windmolens op land en zonneparken na het behalen van de RES-doelstelling van 35 TWh hernieuwbare opwek op land. In plaats daarvan wordt maximaal ingezet op extra zon op dak en infrastructuur (binnen de grenzen van wat efficiënt gebruikt kan worden in het energiesysteem) en wordt een groter aandeel van de energie van windparken op zee gebruikt voor de elektriciteitsvoorziening; in plaats van productie van groene waterstof.

3. **Kernenergie.** Geen groei van het opgestelde vermogen aan windmolens en zonneparken na het behalen van de RES-doelstelling van 35 TWh hernieuwbare opwek op land. Er wordt in dit scenario ook niet maximaal ingezet op zon op dak. In plaats daarvan worden kerncentrales geplaatst.

De belangrijkste conclusies uit de scenario's zijn:
- Er zijn voldoende binnenlandse energiebronnen om aan de directe elektriciteitsvraag van 240 TWh te voldoen, voor elk van de scenario's. Door ongelijktijdigheid van vraag en aanbod zijn opslag van energie, conversie van overschotten in elektriciteit en productie met regelbare waterstofcentrales nodig.
- Naast elektriciteit is er in 2050 naar verwachting een forse vraag naar waterstof en synthetische brandstoffen (in totaal 270 TWh). Deze vraag komt voornamelijk vanuit internationale luchtvaart (50 TWh) en scheepvaart (150 TWh) en de industrie (50 TWh vanuit raffinage, kunstmest, chemie, staal en overige industrie). Deze brandstoffen kunnen deels in Nederland geproduceerd worden, maar er is ook import noodzakelijk. De hoeveelheid import verschilt per scenario.
- Het is niet efficiënt om meer dan 100 GW aan zon (op dak, infrastructuur of veld) in te passen in het energiesysteem. Extra productie kan amper gebruikt worden om de elektriciteitsvraag in te vullen, er ontstaan dan voornamelijk extra overschotten. Deze overschotten kunnen opgeslagen worden in batterijen of omgezet worden in waterstof, maar beide opties zijn bij zon erg duur. 100 GW aan zon kan naar verwachting volledig ingevuld worden met zon op daken en infrastructuur.
- Bij extra windmolens op land hoeft een kleiner aandeel van de windparken op zee gebruikt te worden voor elektriciteitslevering en kunnen op zee meer waterstof of synthetische brandstoffen gemaakt worden. In essentie komt het dus neer op een afweging tussen extra windmolens op land en meer import van synthetische brandstoffen. Door de extra windmolens bij het scenario *Extra wind op land en zonneparken,* is 25 TWh minder import nodig (ongeveer 4% van de totale energievraag). Hiervoor is 12 GW wind op land extra nodig (ongeveer 2.000 windmolens van 6 MW).



Behalen 2030-doelen

Om de klimaatdoelstellingen voor 2030 te halen, is naar verwachting ruim 40 TWh extra CO_2-vrije energieproductie nodig bovenop de huidige plannen voor 2030. Deze extra CO_2-vrije energie is nodig om extra elektrificatie te kunnen faciliteren en de verwachte verplichting vanuit de EU voor elke lidstaat om in 2030 50% van het industriële waterstofverbruik in het land te vergroenen.

Voor 2030 geldt dat de tijd bepalend is welke technieken in de nog zeven resterende jaren gerealiseerd kunnen worden om de doelen (van het kabinet én van de EU) te halen. Een nog verdergaande versnelling van de uitrol van windparken op zee voor 2030 is niet realistisch. Daardoor zijn andere bronnen nodig om deze doelstelling te halen, of is het nodig de doelstelling naar achteren te verschuiven.

De belangrijkste bronnen die deze extra energie kunnen leveren zijn zon op dak, zonneparken, wind op land en import van groene waterstof. In het illustratieve pakket van 'Alles uit de kast' is 10 TWh extra hernieuwbare opwek op land nodig (Werkgroep Extra Opgave, 2022). Voor de scenario's *Extra wind op zee en zon op dak* en *Kernenergie*, waarbij geen extra wind op land en zonneparken gerealiseerd worden, zou dit ingevuld moeten worden met extra grootschalige zon op dak. Om dit te kunnen realiseren is stimulering van extra zon op dak nodig. Hierbij ontstaan meer overschotten van elektriciteit.

Het is de verwachting dat niet alle benodigde groene waterstof in Nederland geproduceerd wordt. De verwachte elektriciteitsvraag voor elektrolysers is 14 TWh, uitgaande van de ambitie van 4 GW aan elektrolysers. De verwachte elektriciteitsvraag is dan ongeveer 180 TWh. In dat geval is 15 TWh extra CO_2-vrije elektriciteitsproductie in Nederland nodig in 2030. Er is in dat geval dus wel import van groene waterstof nodig om het doel van 50% groene waterstof te halen, terwijl de ontwikkeling van een mondiale markt voor groene waterstof voor 2030 onzeker is. Bij maximaal 4 GW elektrolysers in Nederland, zou in het illustratieve pakket van 'Alles uit de kast' niet per se extra wind en zon op land nodig zijn.

Maatschappelijke kosten

De scenario's zijn verschillend qua maatschappelijke kosten. Bij maatschappelijke kosten worden naast financiële kosten en baten (voor gebruiker of producent) ook externe kosten en baten (voor de gehele samenleving) meegenomen. De negatieve effecten van wind en zon op land op omwonenden vertalen zich in een daling van huizenprijzen van nabijgelegen woningen. Deze externe kosten zijn in grote mate afhankelijk van de locatie en de mate van clustering van de windmolens en zonneparken. Bij een grote mate van clustering in dunbevolkte gebieden zijn er veel minder externe kosten. Dit heeft vanuit maatschappelijke kostenperspectief dus de voorkeur.

In vergelijking met de totale productiekosten van elektriciteit zijn de daaraan gerelateerde externe kosten relatief beperkt. Maar als alleen naar verschillen in kosten tussen de scenario's gekeken wordt, dan spelen de externe kosten wel een significante rol. Het scenario *Extra wind op zee en zon op dak* lijkt de laagste totale maatschappelijke kosten voor energieproductie te hebben. Dit is in grote mate afhankelijk van het verschil in kosten tussen binnenlandse productie met windmolens op land en import van waterstof of synthetische brandstoffen. Het is de verwachting dat import van waterstof of synthetische brandstoffen goedkoper uitvalt dan binnenlandse productie. Alleen als de binnenlandse import van waterstofproducten of synthetische brandstoffen relatief duur wordt ten opzichte van binnenlandse productie, dan heeft het scenario *Extra wind op land en zonneparken* mogelijk iets lagere maatschappelijke kosten.

Importbehoefte

De keuze voor CO_2-vrije energiebronnen heeft ook impact op de importbehoefte van energie in Nederland. In elk van de scenario's zijn de binnenlandse bronnen voldoende om te voldoen aan de elektriciteitsvraag en ook de binnenlandse waterstofvraag, met name vanuit de industrie, kan hiermee gedekt worden. Er is echter onvoldoende binnenlandse productie van energie om ook de vraag naar synthetische brandstoffen voor de internationale lucht- en scheepvaart te dekken. Hier is in elk scenario import voor nodig.

In het scenario *Extra wind op zee en zon op* dak is Nederland meer afhankelijk van import van energie uit het buitenland (30% van de totale energievraag), doordat een kleiner aandeel van de binnenlandse CO_2-vrije bronnen benut worden. In de scenario's *Extra wind op land en zonneparken* en *Kernenergie* is importbehoefte van synthetische brandstoffen iets lager (25% van energie). Bij kernenergie is wel import van uranium noodzakelijk.

Gevoeligheidsanalyses

Er zijn verschillende mogelijke ontwikkelingen en politieke keuzes die niet meegenomen zijn in de scenario's en de doorrekeningen daarvan, maar die wel relevant zijn voor de afweging om wel of geen extra windmolens en zonneparken op land te plaatsen. Om de effecten van deze ontwikkelingen in te schatten, zijn gevoeligheidsanalyses uitgevoerd voor 2030 en 2050.

Er is onzekerheid over de totale potentie voor energieproductie met windmolens op de Noordzee. Mogelijk valt deze hoger uit dan aangenomen in de scenario's, doordat een hoger aantal vollasturen en een groter vermogen aan windmolens mogelijk is. Bij een hoger aantal vollasturen zou de productie van de geplande windmolens op zee (en op land) hoger uitvallen en zou richting 2030 minder extra CO_2-vrije energie nodig zijn (6 TWh minder).

Daarnaast kunnen maatschappelijke keuzes die leiden tot krimp van de omvang van de industrie en de omvang van de internationale lucht- en scheepvaart in Nederland zorgen voor een fors lagere energievraag in Nederland, met name naar waterstof en synthetische brandstoffen. Hierdoor is 14 TWh minder CO_2-vrije energie nodig in 2030. In het illustratieve pakket van alles uit de kast is dan geen extra hernieuwbare opwek op land nodig.

Tot slot is gekeken naar de effecten van het opschuiven van de verwachte doelstelling voor 50% groene waterstof in de industrie van 2030 naar 2031, aangezien in 2031 4 GW extra wind op zee beschikbaar komt. Bij het opschuiven van de doelstelling is minder extra CO_2-vrije energieproductie nodig in 2030 (18 TWh minder). Het uitstellen van de klimaatdoelstelling van 2030 naar 2031 is een keuze die Nederland niet zelf kan maken. Hiervoor moet Nederland afspraken maken Europese Unie, en of Nederland toestemming hiervoor krijgt is onzeker.

Daarnaast kunnen deze keuzes en ontwikkelingen ertoe leiden dat minder import noodzakelijk is in 2050, met name de keuzes die leiden tot een krimp van de energievraag in Nederland. De verschillen tussen de drie scenario's veranderen niet door deze maatschappelijke keuzes. Dit betekent dat het uitsluiten van wind op land altijd leidt tot meer importbehoefte.

Bij de maatschappelijke keuzes die effect hebben op krimp van bepaalde sectoren, spelen meer afwegingen dan alleen de effecten op de klimaatdoelstellingen en importbehoefte. Dit onderzoek gaat niet in op deze afwegingen, alleen van de effecten indien dit zou gebeuren.

1 Inleiding

1.1 Wat zijn de aanleiding en het doel van het onderzoek?

Nederland heeft de doelstelling om zijn uitstoot van broeikasgassen in 2030 met tenminste 55% terug te brengen ten opzichte van 1990. In 2050 moet Nederland helemaal klimaatneutraal zijn. Om deze doelen te behalen is een forse toename van de productie van CO_2-vrije energie noodzakelijk.

Hernieuwbare elektriciteitsproductie op land, in de vorm van windmolens op land en zonneparken, dragen op dit moment flink bij aan het verduurzamen van de Nederlandse elektriciteitsproductie. Dat komt mede omdat in het verleden met name is ingezet op wind op land door het historisch kostenvoordeel van wind op land. Maar door de snelle uitrol van windparken op zee en zon op dak ontstaat de vraag of extra windmolens op land en zonneparken, boven op de doelstelling van 35 TWh vanuit de RES, echt noodzakelijk zijn voor het behalen van de klimaatdoelstellingen. Of dat de verhoogde klimaatdoelstelling voor 2030 en de klimaatdoelstelling voor 2050 ook behaald kunnen worden zonder verdere groei van deze energiebronnen op land.

Het doel van dit onderzoek is om een beeld te schetsen op welke wijze de 2030- en 2050-doelen gehaald kunnen worden, met en zonder extra wind op land en zonneparken. In een klimaatneutraal energiesysteem wordt uitsluitend gebruik gemaakt van CO_2-vrije energiebronnen. Er zijn verschillende manieren waarop de toekomstige energievraag ingevuld kan worden. Daarom werken we verschillende scenario's uit voor 2030 en 2050.

Daarnaast brengen we de afwegingen tussen verschillende CO_2-vrije energiebronnen zoals wind op land, zonneparken, wind op zee, zon op dak of import van waterstof in kaart. Hiermee dient dit onderzoek als input voor verdere maatschappelijke en politieke discussie. De relevante punten van afweging zijn het effect op de klimaatdoelstelling voor 2030, effecten op de omgeving, maatschappelijke kosten, en importbehoefte.

De hoofdvraag die we in dit onderzoek beantwoorden, is:

Hoe kunnen de klimaatdoelen voor 2030 en 2050 behaald worden, met en zonder extra windmolens op land en zonneparken, en wat zijn de afwegingen tussen de verschillende CO_2-vrije energiebronnen?

Om de hoofdvraag te beantwoorden, hebben we de volgende vier deelvragen geformuleerd:
1. Wat zijn mogelijke scenario's voor een klimaatneutraal energiesysteem in 2050?
2. Hoe kan het tussentijdse klimaatdoel voor 2030 behaald worden, met en zonder extra windmolens op land en zonneparken?
3. Wat zijn de maatschappelijke kosten van de verschillende scenario's?
4. Wat is het effect van de scenario's op de importbehoefte van Nederland?

Bij de afweging tussen CO_2-vrije energiebronnen spelen ook sociale overwegingen. Wind en zon op land kunnen zorgen voor verminderd draagvlak voor de energietransitie, aangezien ze door omwonenden als last worden ervaren. Dit geldt een stuk minder voor wind op zee, zon op daken en import van energie. Lokaal eigenaarschap van windmolens op land, zon op daken en zonneparken kan mogelijk ook sociale voordelen opleveren. Zo kan het bijdragen aan de gemeenschapszin van lokale gemeenschappen, voordelen opleveren voor lokale

economieën en bijdragen aan een eerlijkere verdeling van de opbrengsten van de energietransitie (Horstink, L. et al., 2019). Tegelijkertijd kan het bij onvoldoende draagvlak en rechtvaardige verdeling van lusten en lasten, ook leiden tot tweespalt in lokale gemeenschappen. De sociale aspecten zijn verder niet onderzocht in dit onderzoek.

1.2 Wat onderzoeken we?

Om de eerste deelvraag, *Wat zijn mogelijke scenario's voor een klimaatneutraal energiesysteem in 2050?*, te beantwoorden stellen we scenario's op voor een klimaatneutraal energiesysteem in 2050. We brengen de potentie van verschillende CO_2-vrije energiebronnen (inclusief import van CO_2-vrije energie) in kaart en stellen vervolgens drie scenario's op. We stellen scenario's op met extra windmolens en zonneparken op land en scenario's zonder extra zonneparken en windmolens op land. In elk van de scenario's gaan we uit van realisatie van de ambitie van 35 TWh hernieuwbare opwek op land vanuit de RES. Alle scenario's gaan uit van het halen van de doelstelling klimaatneutraal in 2050.

Vervolgens kijken we hoe het tussentijdse klimaatdoel om de uitstoot van broeikasgassen in 2030 met 55% terug te brengen ten opzichte van 1990 behaald kan worden, met en zonder extra windmolens op land en zonneparken.

Na het in kaart brengen op welke wijze de 2030- en 2050-doelen gehaald kunnen worden, brengen we de afwegingen in kaart. We werken de afwegingen uit voor de scenario's voor 2050.

We maken een inschatting van het effect van wind op land en zonneparken op de totale maatschappelijke kosten van het energiesysteem. We kijken hierbij niet alleen naar de directe kosten voor het energiesysteem (productiekosten en overige systeemkosten), maar ook naar de externe kosten van verschillende energiebronnen, die veroorzaakt worden door de effecten van de energiebronnen op de omgeving. We brengen de maatschappelijke kosten van verschillende energiebronnen en de totale maatschappelijke kosten van de scenario's in kaart. Hiermee beantwoorden we de vierde deelvraag: *Wat is het effect op de maatschappelijke kosten?*

Tot slot brengen we het effect van de verschillende scenario's op importbehoefte van energie van Nederland in kaart. Door niet alle binnenlandse CO_2-vrije energiebronnen in te zetten, moet Nederland mogelijk meer energie importeren. We bepalen de importbehoefte van energie van Nederland voor de verschillende scenario's en beantwoorden daarmee de vijfde deelvraag: *Wat is het effect op de importbehoefte van Nederland?*

We werken enkele gevoeligheidsanalyses uit om de effecten van mogelijke keuzes of ontwikkelingen, die niet meegenomen worden in onze scenario's, te bespreken. Dit gaat om krimp van de energie-intensieve industrie in Nederland, krimp van de internationale lucht- en scheepvaart, een hoger aantal vollasturen voor windmolens op land en op zee, een hogere potentie voor wind op zee en het opschuiven van de doelstelling van 2030 naar 2031.

1.3 Leeswijzer

Dit rapport bevat de volgende hoofdstukken:

- In *Hoofdstuk 2* beschrijven we de scenario's voor een klimaatneutraal energiesysteem in 2050.
- In *Hoofdstuk 3* bespreken we de effecten van de scenario's op het behalen van de klimaatdoelstelling voor 2030.

- In H*oofdstuk 4* bespreken we de maatschappelijke kosten van verschillende CO_2-vrije energiebronnen en vergelijken we de totale maatschappelijke kosten van de scenario's.
- In *Hoofdstuk* 5 bespreken we de importbehoefte van de verschillende scenario's.
- In *Hoofdstuk 6* werken we enkele gevoeligheidsanalyses uit.
- In *Hoofdstuk 7* volgen de conclusies.
- De Bijlagen bevatten uitgebreide omschrijvingen van de modellering van de energie-scenario's (Bijlage A), de kostenberekeningen (Bijlage B) en de resultaten van het scenario Internationale Sturing (Bijlage C).

2 Wat zijn mogelijke scenario's voor een klimaatneutraal energiesysteem in 2050?

In 2050 moet Nederland helemaal klimaatneutraal zijn. Om deze doelen te behalen moet meer CO_2-vrije energie geproduceerd worden. Hiervoor kunnen extra windmolens en zonneparken op land gebruikt worden, maar er zijn ook alternatieven.

In dit hoofdstuk brengen we de potentie van verschillende CO_2-vrije energiebronnen (inclusief import van CO_2-vrije energie) in kaart. Vervolgens stellen we verschillende scenario's op voor het energiesysteem 2050. We stellen scenario's op met extra windmolens en zonneparken op land en scenario's zonder extra zonneparken en windmolens op land. Alle scenario's gaan uit van het halen van de doelstellingen voor het terugbrengen van de uitstoot van broeikasgassen. Voor elk van de scenario's maken we een inschatting van de effecten op de benodigde energie-infrastructuur (inclusief energieopslag).

Voor het opstellen van de scenario's modelleren we het complete energiesysteem. In dit model bepalen we vraag en aanbod van alle energiedragers voor elk uur van het jaar. Zo maken we de wisselwerking tussen verschillende energiebronnen met verschillende productieprofielen inzichtelijk. We optimaliseren de omvang van de productie van de verschillende CO_2-vrij energiebronnen in de scenario's. Een uitgebreide omschrijving van de modellering van het energiesysteem is te vinden in Bijlage A.

2.1 Hoe groot is de potentie van de verschillende CO_2-vrije energiebronnen?

Om de klimaatdoelstellingen te halen moet voldoende CO_2-vrije energie beschikbaar zijn. Dit gaat met name om CO_2-vrije elektriciteit (voor direct gebruik of voor productie van waterstof), maar ook duurzame warmte en productie van groengas kunnen bijdragen aan het halen van de klimaatdoelstellingen. Door het gebruik van duurzame warmte en groengas, bijvoorbeeld in de gebouwde omgeving, is minder CO_2-vrije elektriciteit nodig. We hoeven in de toekomst niet alle CO_2-vrije energie zelf te produceren. Het zal naar verwachting in de toekomst mogelijk zijn om CO_2-vrije energie te importeren, waarschijnlijk in de vorm van waterstof of afgeleide producten van waterstof, zoals methanol, ammoniak of synthetische brandstoffen (bijvoorbeeld kerosine).

Tabel 1 geeft een overzicht van de belangrijkste CO_2-vrije energiebronnen en geeft een indicatie van het ruimtelijk potentieel voor deze bronnen[1]. De tabel laat zien dat er forse potentie is voor verschillende soorten zon-pv, al is het nog onzeker of al deze potentie (economisch) gerealiseerd kan worden.

[1] Er is niet onderzocht of dit potentieel ook economisch rendabel is. Het kan zijn dat sommige vormen van energieproductie erg duur zijn. Dit geldt met name voor bepaalde vormen van zon-pv.

Tabel 1 - Potentieel CO_2-vrije energiebronnen

Energiebron	Potentieel vermogen	Potentiële productie	Toelichting en bron
Wind op zee	70-100 GW	315-450 TWh	Het is de verwachting dat in ieder geval 60 tot 70 GW wind op zee haalbaar is (DNV.GL, 2020), maar uit recent onderzoek volgt dat mogelijk tot 100 GW wind op zee mogelijk is als ook natuurgebieden en militaire zones gebruikt worden (Taminiau & van der Zwaan, 2022). Bij de potentiële productie gaan we uit van 4.500 vollast-uren, zie kader hieronder.
Wind op land	30-60 GW	90-180 TWh	Dit is afhankelijk van hoe wind op land ingepast wordt. Bij opstellingen waar meer rekening gehouden wordt met de inpassing of koppeling met andere ruimtelijke opgaves is het potentieel naar verwachting 30 GW. Bij opstellingen waar hier minder rekening mee wordt gehouden 60 GW. (Generation.Energy & PosadMaxwan, 2020) Bij de potentiële productie gaan we uit van 3.000 vollast-uren, zie kader hieronder.
Zonneparken op land	2.900 GW	2.600 TWh	(Generation.Energy, 2021)
Zon op binnenwater	530 GW	500 TWh	(Generation.Energy, 2021)
Zon op dak/gevel woningen	100 GW	80 TWh	(Generation.Energy, 2021)
Zon op dak/gevel overige gebouwen	130 GW	100 TWh	(Generation.Energy, 2021)
Zon op infrastructuur	750 GW	650 TWh	Deze cijfers geven het totale ruimtelijk inpasbare potentieel voor zon op infrastructuur. Het is echter de verwachting dat het in de praktijk lastig zal zijn om al dit potentieel te realiseren. In de scenario's van Generation Energy wordt uitgegaan van maximale benutting van 7,7% van het potentieel voor zon op infra (58,5 GW/49 TWh). (Generation.Energy, 2021)
Zon op zee	6.400 GW	5.700 TWh	(Generation.Energy, 2021)
Kernenergie	8,3 GW	72 TWh	Binnen huidige aangewezen gebieden in Borssele en Maasvlakte. (Delft., C. & Pondera Consult, 2023)
Duurzame warmte (geothermie, rest-warmte)	32 TWh		Dit komt overeen met de productie van duurzame warmte in het klimaatneutrale 2050 scenario Regionale Sturing, waarin maximaal ingezet wordt op het gebruik van duurzame warmte. We nemen aan dat dit de maximale hoeveelheid duurzame warmte is die realistisch gezien ingezet kan worden. (Berenschot & Kalavasta, 2020)
Groengas	2 bcm/17,5 TWh		(CE Delft, 2020b)
Import groene water-stof	Totale omvang onbekend, maar vermoedelijk ruim voldoende voor energievraag Nederland		

Vollasturen wind op zee en wind op land
Windmolens produceren elektriciteit op momenten dat het waait. De hoeveel elektriciteit die geproduceerd kan worden per MW-windmolen wordt uitgedrukt in het aantal vollasturen. Het aantal vollasturen hangt onder meer af van de locatie van de windmolen (aan de kust waait het vaker dan in het binnenland) en van de techniek (hogere, nieuwe windmolens produceren meer per MW). In onze analyses gaan we uit van 3.000 vollasturen voor wind op land en 4.500 vollasturen voor wind op zee, conform de officiële berekeningen van het PBL. Er is echter discussie of het aantal vollasturen in de praktijk niet hoger ligt. We bespreken de effecten van meer vollasturen voor wind op zee en wind op land op de energiebalans in 2030 en 2050 in een gevoeligheidsanalyse in Paragraaf 6.2.

2.2 Wat zijn mogelijke scenario's voor 2050?

In deze paragraaf omschrijven we hoe een klimaatneutraal energiesysteem in 2050 eruit ziet, met en zonder extra windmolens en zonneparken op land. Eerst omschrijven we de verwachte ontwikkeling van de energievraag. Vervolgens beschrijven we hoe deze energievraag ingevuld kan worden, met verschillende scenario's. Tot slot tonen we de totale energiebalans voor elk van deze scenario's.

2.2.1 Hoe ontwikkelt de energievraag zich richting 2050?

Het energiesysteem moet in 2050 klimaatneutraal zijn. Dit betekent dat er uitsluitend gebruik gemaakt moet worden van CO_2-vrije energiebronnen (of dat de vrijgekomen CO_2 afgevangen wordt). Het is nog onzeker hoe een klimaatneutraal energiesysteem in 2050 eruit gaat zien. Sommige dingen zijn zeker, bijvoorbeeld dat elektrificatie in een groot deel van de sectoren de meest logische verduurzamingsoptie is en dat er daardoor fors meer elektriciteitsvraag gaat komen. Maar in sommige sectoren is het nog onduidelijk hoe de verduurzaming eruit gaat zien. Gaan we daar vooral inzetten op elektrificatie of gaat waterstof een grote rol spelen? Dit zijn vragen waar nu nog geen antwoord op is.
Daarom hanteren we twee scenario's voor de energievraag in 2050. Deze scenario's zijn gebaseerd op de klimaatneutrale scenario's van de integrale infrastructuurverkenning II3050 (Berenschot & Kalavasta, 2020). Elk van deze scenario's gaat uit van een klimaatneutraal energiesysteem in 2050, alleen de invulling hiervan verschilt.

Hieronder volgt een korte beschrijving van de twee scenario's die in dit onderzoek gebruikt worden:

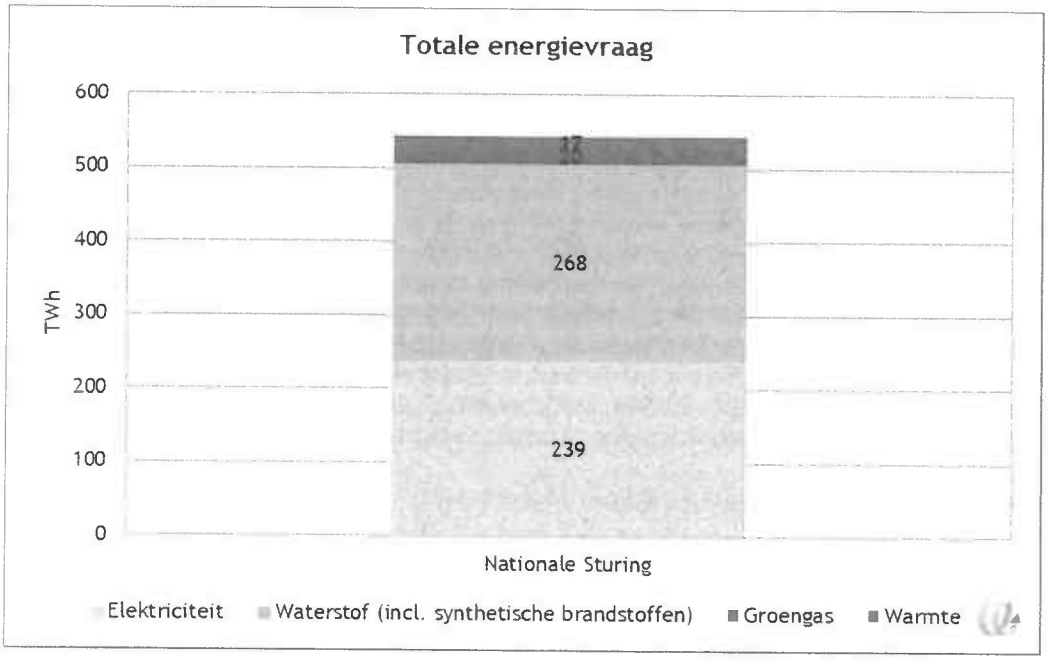
1. **Scenario Nationale Sturing.** De sturing van de energietransitie ligt grotendeels bij de rijksoverheid. Dit scenario gaat uit van met maximale elektrificatie in alle sectoren en een industrie, luchtvaart en scheepvaart die in omvang ongeveer gelijk blijven.
   Dit scenario komt overeen met het scenario Nationale Sturing van de integrale infrastructuurverkenning II3050 (Berenschot & Kalavasta, 2020).
2. **Scenario Internationale Sturing.** Dit scenario gaat uit van een volledig open internationale mondiale markt en krachtig klimaatbeleid op mondiaal niveau. Er is veel internationale handel. Dit leidt tot een groei van de energie-intensieve industrie.
   Dit scenario gaat uit van relatief veel gebruik van waterstof, naast substantiële elektrificatie, en een groei van de industrie, luchtvaart en scheepvaart. Dit scenario komt overeen met het scenario Internationale Sturing van de integrale infrastructuurverkenning II3050 (Berenschot & Kalavasta, 2020).

In het hoofdrapport werken we alleen het scenario Nationale Sturing uit. De resultaten voor het scenario Internationale Sturing zijn te vinden in Bijlage C.

Beide scenario's gaan uit van een gelijke omvang of groei van de meeste industriële sectoren in Nederland, met uitzondering van de raffinagesector en de kunstmestsector. In de scenario's is wel een krimp van die sectoren voorzien aangezien de vraag naar de producten van deze sectoren afneemt door verduurzaming. Maar de omvang van andere sectoren blijft gelijk of groeit. Deze scenario's nemen dus aan dat er geen industrie uit Nederland vertrekt. Dit is echter geen zekerheid. In de toekomst kan in sommige landen vermoedelijk een stuk goedkoper CO_2-vrije energie, zoals waterstof, geproduceerd worden dan in Nederland. Dit kan betekenen dat een deel van de energie-intensieve industrie in Nederland vertrekt naar die landen. We doen in Paragraaf 6.1 een gevoeligheidsanalyse om de effecten van krimp van de industrie in Nederland in te schatten.

Figuur 1 geeft de finale energievraag per energiedrager, inclusief gebruik van energiedragers als grondstof[2]. Het figuur laat zien dat het grootste deel van de energievraag komt van waterstof of producten afgeleid van waterstof, zoals synthetische brandstoffen (voor met name lucht- en scheepsvaart).

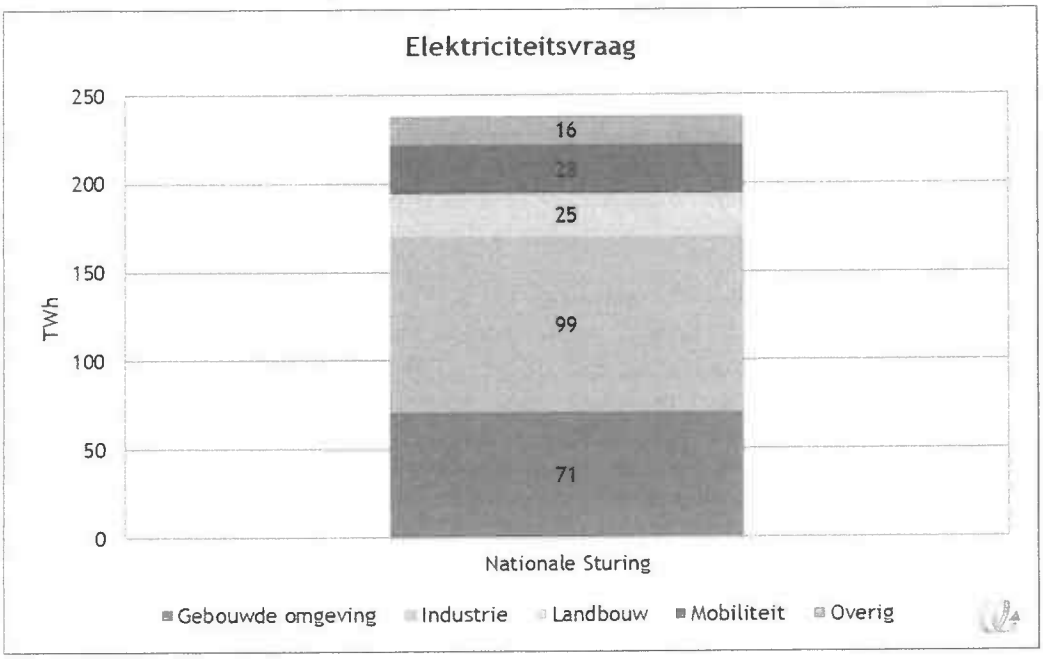
Figuur 1 - Totale energievraag scenario Nationale Sturing



Figuur 2 geeft een opsplitsing van de elektriciteitsvraag per sector, exclusief elektriciteitsvraag voor waterstofproductie met elektrolyse. Het grootste deel van de elektriciteitsvraag komt van de industrie, maar ook de gebouwde omgeving heeft een forse elektriciteitsvraag door het gebruik van warmtepompen.

[2] Bij de finale energievraag tellen we alleen de energie mee die door de eindgebruiker gebruikt wordt en niet de energievraag voor de productie van andere energiedragers, zoals de elektriciteitsvraag voor elektrolysers die waterstof produceren of de waterstofvraag voor waterstofcentrales die elektriciteit produceren. We maken geven de finale energievraag om dubbeltellingen te voorkomen. De energievraag voor het produceren van andere energiedragers en de energieverliezen nemen we wel mee in de modellering.

Figuur 2 - Totale elektriciteitsvraag scenario Nationale Sturing



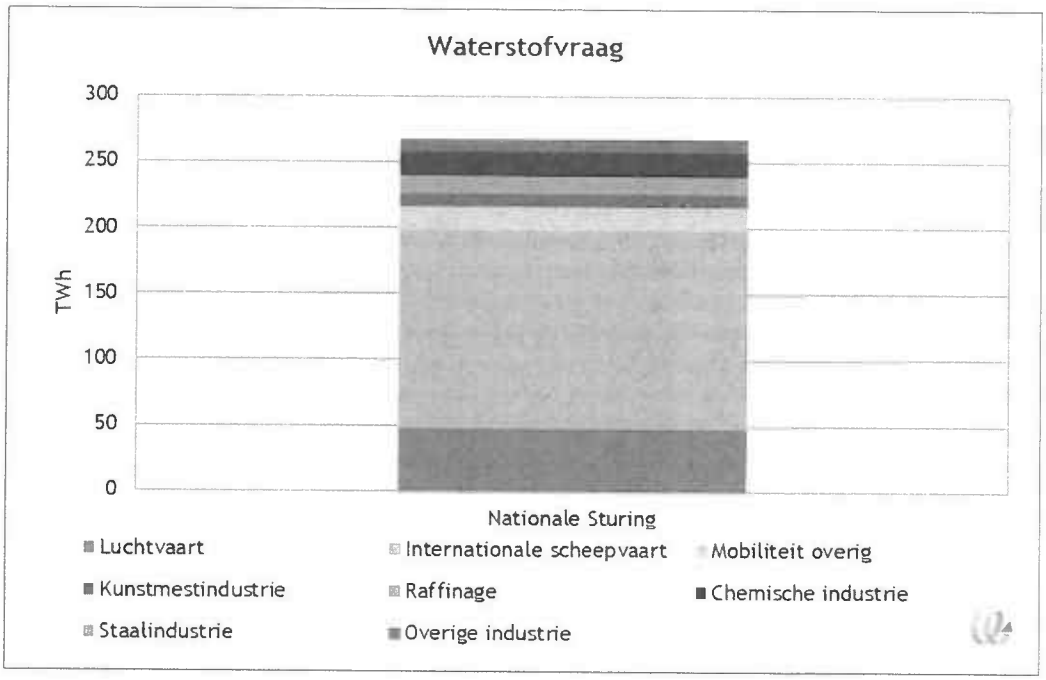
Figuur 3 en Tabel 2 geven een opsplitsing van de waterstofvraag per sector, exclusief de waterstofvraag voor elektriciteitsproductie met waterstofcentrales. Het grootste deel van de waterstofvraag in 2050, zo'n 75%, komt vanuit de internationale lucht- en scheepvaart. Deze waterstof wordt gebruikt voor de productie van synthetische brandstoffen zoals kerosine. De overige waterstofvraag komt vooral uit de industrie en dan met name vanuit de sectoren Raffinage, Chemie en Kunstmest (ook met krimp in de sectoren Raffinage en Kunstmest)[3].

Tabel 2 - Waterstofvraag scenario Nationale Sturing

Sector	Waterstofvraag (TWh)
Luchtvaart	47
Internationale scheepvaart	151
Mobiliteit overig	19
Kunstmestindustrie	9
Raffinage	14
Chemische industrie	17
Staalindustrie	0
Overige industrie	11
Totaal	**268**

[3] In het scenario wordt geen waterstofvraag aangenomen voor de staalindustrie, aangezien aangenomen wordt dat de verduurzaming van de staalindustrie via een andere verduurzamingsroute gaat. Tata Steel heeft ondertussen echter aangekondigd te kiezen voor groene waterstof. Hiermee wordt de waterstofvraag in 2050 onderschat. De verwachte waterstofvraag van Tata Steel is ongeveer 13 TWh (Noordzeekanaalgebied, 2022).

Figuur 3 - Totale waterstofvraag scenario Nationale Sturing



2.2.2 Hoe kan deze energievraag ingevuld worden?

De toekomstige energievraag moet ingevuld worden met CO_2-vrije energiedragers. Er zijn verschillende manieren waarop deze energievraag ingevuld kan worden. Er kunnen keuzes gemaakt worden in hoeverre deze energievraag ingevuld wordt met meer of minder binnenlandse productie, of voor import, en welke binnenlandse bronnen je dan wilt gebruiken.

We stellen drie scenario's op voor de invulling van de energievraag. In elk van de scenario's nemen we aan dat de ambitie van de RES voor 35 TWh hernieuwbare opwek op land gerealiseerd wordt. En in elk van de scenario's nemen we aan dat de ambitie van 70 GW wind op zee in 2050 gerealiseerd wordt[4]. Het is de verwachting dat een deel van deze windenergie gebruikt wordt voor de productie van waterstof. We maken een inschatting welk deel van de energie van windparken op zee nodig is voor het invullen van de elektriciteitsvraag. De rest van de windenergie wordt ingezet voor waterstofproductie.

We onderscheiden de volgende drie scenario's:

1. **Extra windmolens op land en zonneparken**. In deze variant gaan we uit van groei van het opgestelde vermogen aan windmolens op land en zonneparken bovenop de doelstelling van 35 TWh hernieuwbare opwek op land.
2. **Extra wind op zee en zon op dak.** In deze variant gaan we ervanuit dat er geen groei komt van het opgestelde vermogen aan windmolens op land en zonneparken na het behalen van de doelstelling van 35 TWh hernieuwbare opwek op land. In plaats daarvan wordt maximaal ingezet op zon op dak (binnen de grenzen van wat efficiënt gebruikt

[4] Dit betekent dat er minder waterstof geproduceerd kan worden met de windparken op zee als je een groter aandeel van deze energie nodig hebt voor de elektriciteitsvoorziening. Uit recent onderzoek volgt dat er mogelijk tot 100 GW wind op zee gerealiseerd kan worden (zie Paragraaf 2.1). De effecten hiervan bespreken we in een gevoeligheidsanalyse in Paragraaf 6.4.

kan worden in het energiesysteem) en wordt een groter aandeel van de energie van windparken op zee gebruikt voor de elektriciteitsvoorziening.

3. **Kernenergie.** In deze variant gaan we ervanuit dat er geen groei komt van het opgestelde vermogen aan windmolens en zonneparken na het behalen van de doelstelling van 35 TWh hernieuwbare opwek op land. Er wordt in dit scenario ook niet maximaal ingezet op zon op dak. In plaats daarvan worden kerncentrales geplaatst.

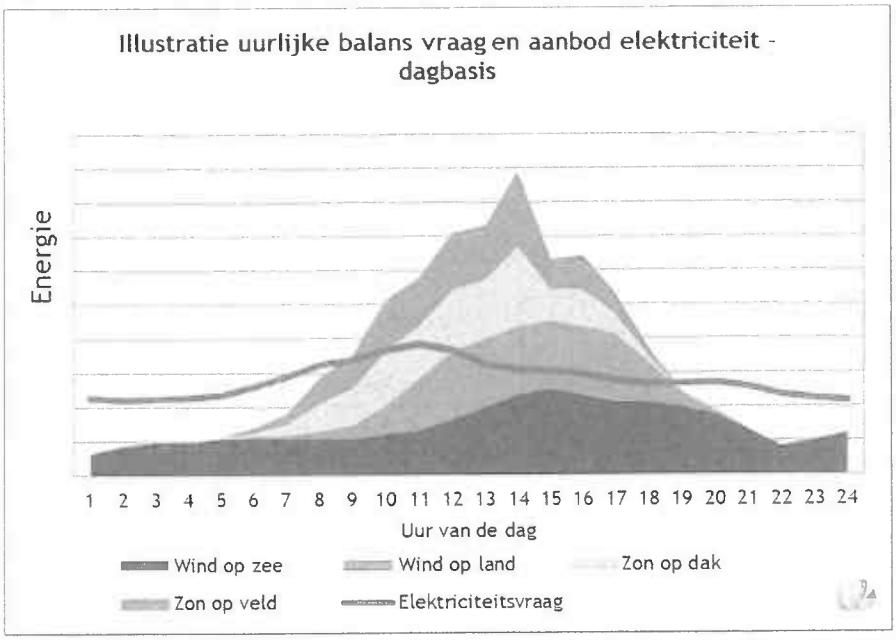
In elk van deze scenario's gaan we uit van zoveel mogelijk productie van elektriciteit met wind, zon en kernenergie (binnen de voorwaarden van de scenario's), totdat het niet meer efficiënt is om extra vermogen van deze bronnen toe te voegen omdat een groot deel van de extra productie dan niet meer direct gebruikt kan worden voor de invulling van de elektriciteitsvraag. Deze optimalisatie van de hoeveelheid wind, zon en kernenergie is te vinden in Bijlage A.

Nadat we de inzet van wind, zon en kernenergie voor elk scenario bepaald hebben, berekenen we het volledige energiesysteem met een jaarrondrekening op uurbasis (zie onderstaand kader). Een uitgebreide beschrijving van deze modellering is te vinden in Bijlage A.

Modellering energiesysteem

Het is niet voldoende om op jaarbasis evenveel hernieuwbare elektriciteit op te wekken als je gebruikt. Vraag en aanbod van elektriciteit moeten namelijk op elk moment in het jaar in evenwicht zijn. Dit betekent dat bijvoorbeeld 1 kWh wind niet gelijk staat aan 1 kWh zon. En wind op zee heeft ook een ander productiepatroon dan wind op land. De productiepatronen van de verschillende bronnen nemen we mee door middel van een jaarrondrekening op uurbasis. Figuur 4 geeft een illustratie van de balans tussen vraag en aanbod van elektriciteit voor een willekeurige dag in 2050.

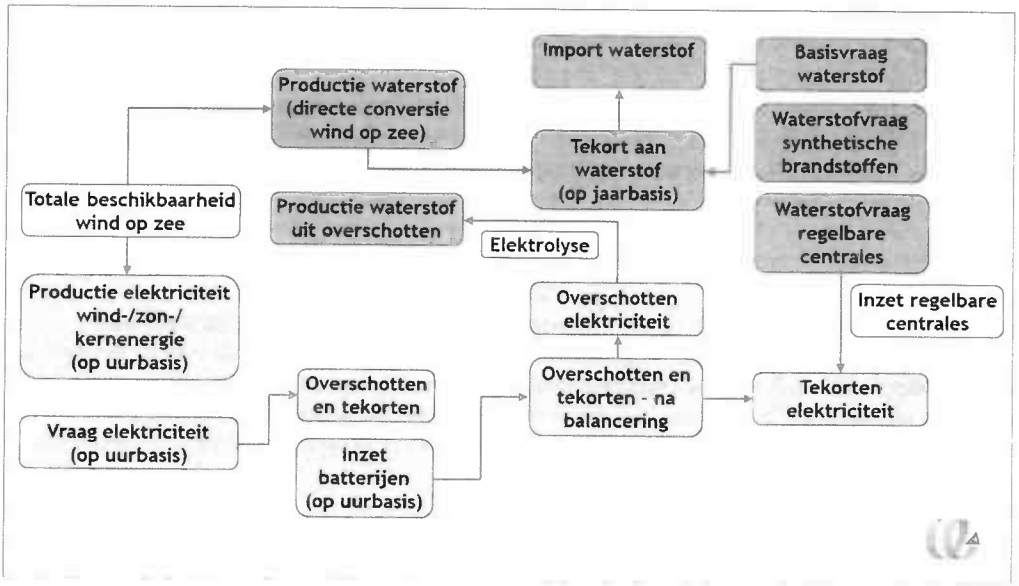
Figuur 4 - Illustratie uurlijkse balans vraag en aanbod elektriciteit voor willekeurige dag in het jaar



Voor elk scenario hebben we een zo optimaal mogelijke verdeling van de niet-regelbare CO_2-vrije bronnen bepaald. Vervolgens bepalen we de inzet van deze niet-regelbare CO_2-vrije bronnen op elk uur van het jaar en

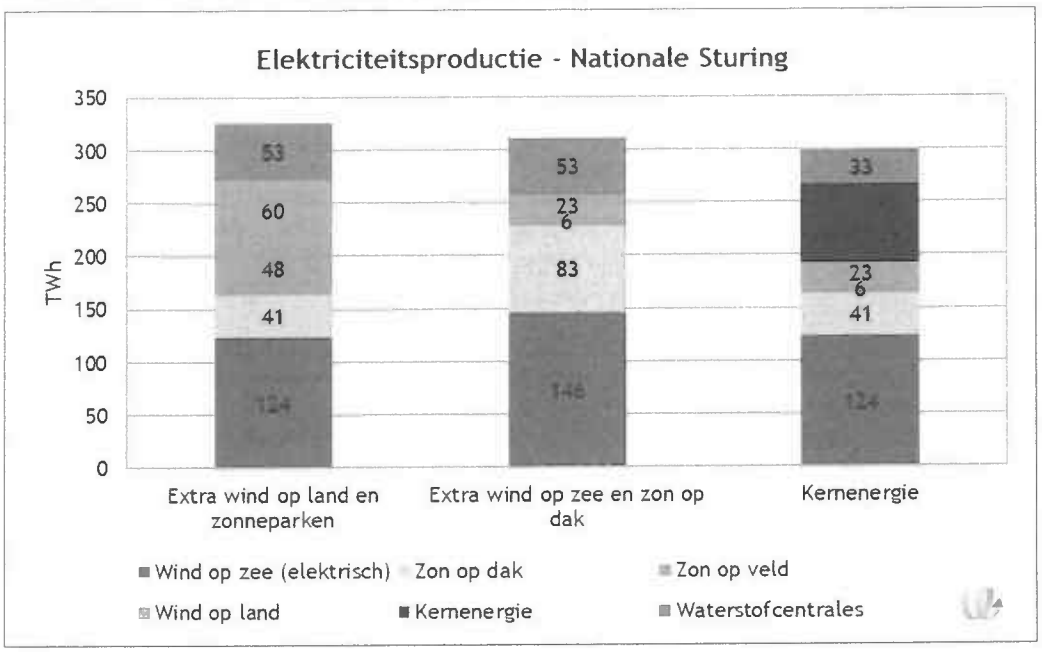
vergelijken we dit met de elektriciteitsvraag op dat uur. Batterijopslag wordt ingezet om op korte termijn (binnen een dag) vraag en aanbod van elektriciteit zo goed mogelijk te matchen, maar dat is niet voldoende. Op sommige uren hou je dan tekorten aan elektriciteit. In Figuur 4 gebeurt dit in de ochtend- en avonduren, als de totale productie onder de lijn van de elektriciteitsvraag blijft. De resterende tekorten aan elektriciteit, na inzet van batterijen, worden in 2050 ingevuld met regelbare waterstofcentrales. Overschotten van elektriciteit worden omgezet in waterstof middels elektrolyse. Deze waterstof wordt vervolgens weer omgezet door waterstofcentrales in elektriciteit ten tijde van tekorten. Figuur 4 zijn er in de middag overschotten van elektriciteit, als de totale productie boven de lijn van de elektriciteitsvraag uitkomt.

Figuur 5 - Schematische weergave energiemodel elektriciteit en waterstof



Figuur 6 geeft een overzicht van de elektriciteitsproductie voor de scenario's. Tabel 3 geeft een overzicht van de achterliggende cijfers.

Figuur 6 - Elektriciteitsproductie scenario's Nationale Sturing



Tabel 3 - Opgesteld vermogen en productie elektriciteit scenario's Nationale Sturing

Techniek	Opgesteld vermogen (GW)			Productie (TWh)		
	Extra hernieuwbare opwek op land	Extra wind op zee en zon op dak	Kernenergie	Extra hernieuwbare opwek op land	Extra wind op zee en zon op dak	Kernenergie
Wind op zee (elektrisch)	27,5	32,5	27,5	124	146	124
Wind op land	20	7,5	7,5	60	23	23
Zon op dak/infra	50	100	50	41	83	41
Zon op veld	57	7	7	48	6	6
Kernenergie	0	0	8,3	0	0	72
Waterstofcentrales	34	34	26	53	53	33
Totaal				**326**	**311**	**299**

De belangrijkste bevindingen van de elektriciteitsproductie van de drie scenario's zijn:

- In elk van deze scenario's komt het grootste deel van de elektriciteitsproductie van windparken op zee. In elk scenario wordt 70 GW wind op zee gerealiseerd, maar in het scenario *Extra wind op zee en zon op dak* wordt een groter deel van deze energie gebruikt als elektriciteit (overig deel als waterstof).
- In het scenario *Extra wind op land en zonneparken* wordt 37 TWh (ruim 12 GW, 2.000 windmolens à 6 MW) extra wind op land geplaatst, bovenop de reeds geplande 23 TWh.
- In het scenario *Extra wind op land en zonneparken* wordt ongeveer 100 GW/90 TWh zon (op dak en op veld) gerealiseerd. Bij het scenario *Extra wind op zee en zon op dak* wordt ook ongeveer 90 TWh zon gerealiseerd, maar met een groter aandeel op dak of op infrastructuur. Er is meer potentie voor zonnepanelen (zie Tabel 1), maar meer zon kan niet efficiënt gebruikt worden in het energiesysteem. De extra zonneparken bij het

scenario *Extra wind op land en zonneparken* hebben een extra ruimtebeslag van circa 500 km^2 (50.000 hectare).
- Bij het scenario *Kernenergie* wordt het maximale potentieel voor kernenergie binnen de huidige aangewezen gebieden in Borssele en op de Maasvlakte (8 GW, 72 TWh) gerealiseerd.
- De inzet van waterstofcentrales wordt bepaald door de modellering van vraag en aanbod van elektriciteit op uurbasis.
- De totale productie is niet gelijk in alle scenario's. Dat komt doordat de elektriciteitsproductie niet op alle momenten in het jaar direct gebruikt kan worden voor de invulling van de elektriciteitsvraag (de overige productie kan wel gebruikt worden voor productie van waterstof). In het scenario *Kernenergie* kan het grootste deel van de elektriciteitsproductie direct gebruikt worden en is daardoor de minste elektriciteitsproductie nodig. In het scenario *Extra wind op land en zonneparken* kan de minste elektriciteit direct gebruiken en is in totaal de meeste elektriciteitsproductie nodig (15 TWh extra ten opzichte van het scenario *Extra wind op zee en zon op dak*). Dit komt doordat een systeem met meer wind op zee in plaats van wind op land (beiden in combinatie met zon) beter aansluit op de elektriciteitsvraag. Dit komt doordat wind op zee een meer gelijkmatig productiepatroon heeft en wind op zee en zon minder vaak tegelijk energie produceren dan wind op land en zon (CE Delft, 2021).

2.2.3 Hoe ziet de totale energiebalans er uit voor verschillende scenario's?

Elektriciteit

Vraag en aanbod van energie moeten in evenwicht zijn, op elk uur van het jaar en voor elke energiedrager. Bij elektriciteit kunnen vraag en aanbod in balans worden gebracht met opslag van batterijen, import en export van elektriciteit, curtailment en elektrolyse (bij overschotten van elektriciteit) en met waterstofcentrales (bij tekorten van elektriciteit).

Import en export van elektriciteit
Het Nederlandse elektriciteitsnet is verbonden met de elektriciteitsnetten van België, Duitsland, Denemarken, Noorwegen en het Verenigd Koninkrijk. Het is de verwachting dat de capaciteit voor uitwisseling van elektriciteit met het buitenland toeneemt. Uitwisseling van elektriciteit met het buitenland kan bijdragen aan het balanceren van vraag en aanbod van elektriciteit in Nederland. Het is niet de verwachting dat Nederland structureel elektriciteit zal importeren of exporteren. Hoe de uitwisseling van elektriciteit in 2050 eruit zal zien is afhankelijk van mondiale prijsontwikkelingen en ontwikkelingen in het buitenland en daarom lastig te voorspellen. Vanwege de onzekerheid, en aangezien er naar verwachting geen structurele netto import of export plaatsvindt, nemen we import en export van elektriciteit niet mee in de modellering.

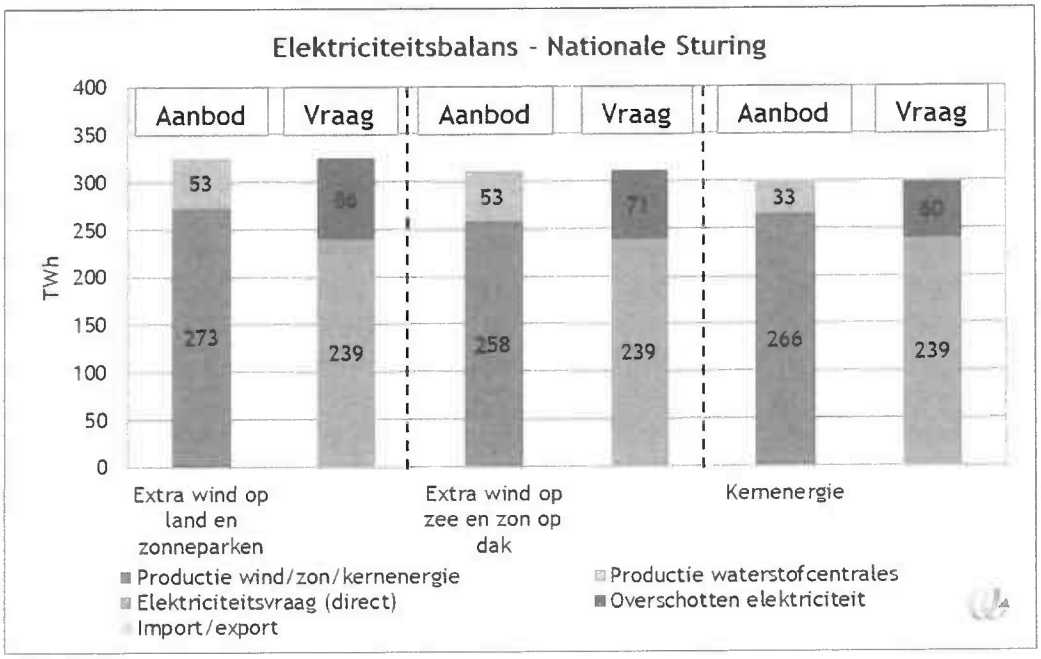
Figuur 7 geeft de elektriciteitsbalans op jaarbasis[5]. Het figuur laat zien dat er op jaarbasis zowel overschotten als tekorten van elektriciteit zijn. Bij de elektriciteitsbalans nemen we alleen de energie mee die ingevoed wordt op het elektriciteitsnet of die direct achter de meter gebruikt wordt in de vorm van elektriciteit. De productie van elektriciteit van windparken op zee, die direct omgezet wordt in waterstof, nemen we hierin niet mee.
Dit nemen we mee bij de waterstofbalans.

[5] Batterijen leveren netto geen bijdrage aan de elektriciteitsbalans op jaarbasis, aangezien ze de energie die ze opnemen op een later moment weer leveren (de verliezen worden buiten beschouwing gelaten). Daarom wordt opslag van batterijen niet meegenomen in de elektriciteitsbalans op jaarbasis. Opslag van batterijen wordt wel meegenomen voor de elektriciteitsbalans op uurbasis en heeft daarmee impact op de omvang van de overschotten van elektriciteit en de productie van waterstofcentrales.

De belangrijkste conclusies van de elektriciteitsbalans zijn:

- De omvang van de overschotten zijn het grootst bij het scenario *Extra wind op land en zonneparken*, aangezien daar minder productie direct gebruikt kan worden voor het invullen van de elektriciteitsvraag (zoals eerder besproken in Paragraaf 2.2.2). Daardoor is meer elektriciteitsproductie en meer opslag van elektriciteit met batterijen nodig.
- De totale elektriciteitsvraag ligt bij dit scenario 15 TWh hoger dan bij het scenario *Extra wind op zee en zon op dak* en 25 TWh hoger dan bij het scenario *Kernenergie*.
- De extra productie in het scenario *Extra wind op land en zonneparken* kan gebruikt worden voor de productie van waterstof, maar hierbij vinden wel conversieverliezen plaats.

Figuur 7 - Elektriciteitsbalans op jaarbasis



Waterstof

De waterstofvraag in 2050 komt vooral vanuit de internationale lucht- en scheepvaart. Deze waterstof wordt dan gebruikt voor de productie van synthetische brandstoffen, ongeveer 75%. Daarnaast wordt waterstofvraag voorzien vanuit de industrie en overige mobiliteit (zie Figuur 3).

Waterstof wordt geproduceerd door middel van elektrolyse[6]. We nemen twee vormen van elektrolyse mee: elektrolyse van overschotten van elektriciteit en directe elektrolyse van windenergie op zee (en transport naar land in de vorm van waterstof). Waterstof is nodig voor productie van elektriciteit van waterstofcentrales, productie van synthetische brand-

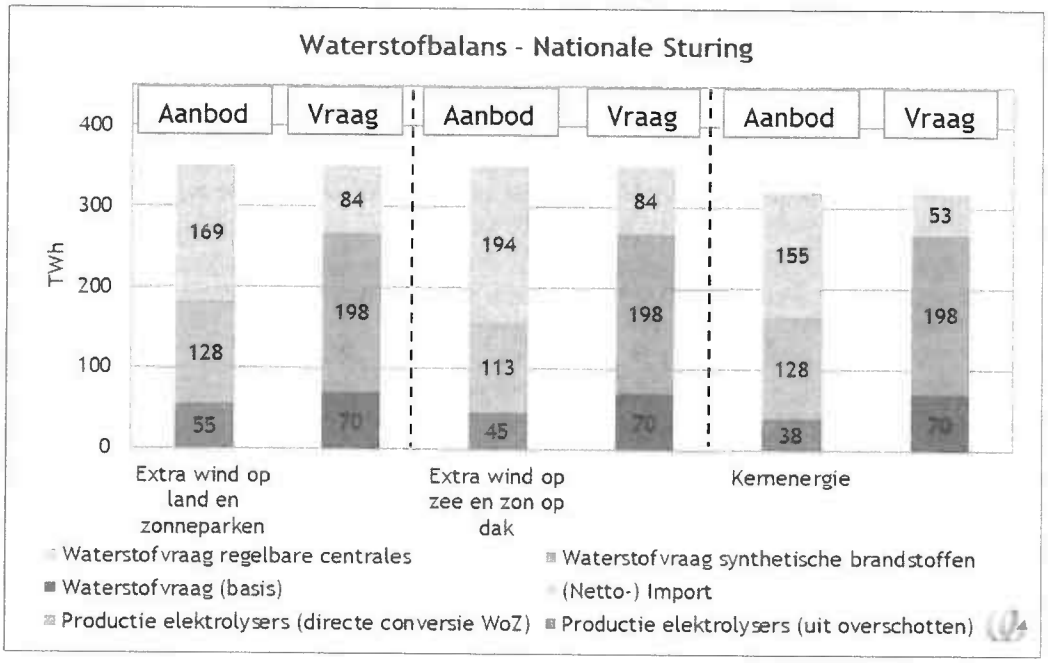
[6] We nemen aan dat er in 2050 alleen groene waterstof geproduceerd wordt, dus met elektrolyse van CO_2-vrije elektriciteit. In principe kan er in een klimaatneutraal energiesysteem ook blauwe waterstof geproduceerd worden, dus met aardgas en afvang van de CO_2-emissies. Maar dit nemen we niet mee, aangezien we het niet aannemelijk vinden dat dit in 2050 gebeurt.

stoffen voor de internationale lucht- en zeevaart en voor directe waterstofvraag (met name vanuit de industrie). Zie ook Tabel 2.

Ook voor waterstof moeten vraag en aanbod op elk uur in het jaar in evenwicht zijn. Bij waterstof kunnen vraag en aanbod in balans worden gebracht met waterstofopslag en import- en export. Waterstofopslag wordt ingezet voor de balancering van vraag en aanbod gedurende het jaar. Import van waterstof is noodzakelijk om tekorten van waterstof op te vangen, aangezien er onvoldoende waterstof geproduceerd kan worden in Nederland om de totale waterstofvraag (inclusief synthetische brandstoffen) in te vullen. Figuur 8 geeft een overzicht van de waterstofbalans voor de Nationale Sturing-scenario's.

De belangrijkste conclusies van de waterstofbalans zijn:
- In elk scenario is netto import van waterstof of synthetische brandstoffen nodig. In het scenario *Extra wind op zee en zon op dak* is de meeste import nodig. Dit komt doordat in dit scenario de totale energieproductie in Nederland het kleinst is. Door minder windmolens op land is extra wind op zee nodig voor het invullen van de elektriciteitsvraag en die energie kan dan niet meer gebruikt worden om waterstof en synthetische brandstoffen te produceren.
- De totale waterstofvraag (inclusief synthetische brandstoffen) is het laagst in het scenario *Kernenergie*, doordat er minder inzet van waterstofcentrales nodig is (zie Paragraaf 2.2.3 'Elektriciteit').

Figuur 8 - Waterstofbalans op jaarbasis



Totale energiebalans

Figuur 9 geeft een overzicht van de totale energiebalans op jaarbasis voor de Nationale Sturing-scenario's. Dit overzicht bevat de totale energievraag per energiedrager, de energieproductie per bron[7], de conversieverliezen en de (netto-)import.

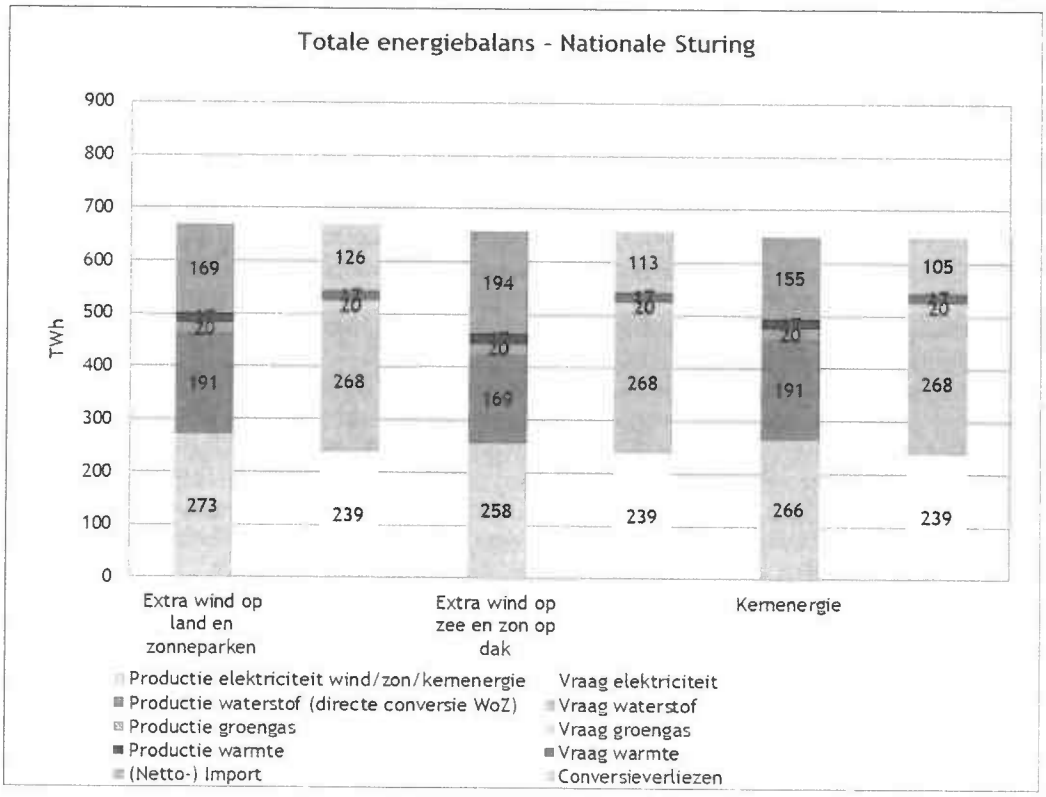
De belangrijkste conclusies voor de totale energiebalans zijn:

- De doorrekeningen van de scenario's zonder extra wind en zon op land laten zien dat het in principe mogelijk is om in 2050 een klimaatneutraal energiesysteem te hebben zonder extra windmolens en zonneparken, bovenop de doelstelling van 35 TWh hernieuwbare opwek op land. Het gat dat valt door het niet gebruiken van deze energiebronnen kan worden ingevuld met kernenergie of met extra import van energie (in de vorm van waterstof of synthetische brandstoffen). Het is de verwachting dat al deze opties haalbaar zijn voor 2050.
- De directe energievraag is gelijk voor elk scenario, maar bij het scenario *Extra wind op land en zonneparken* is meer productie nodig omdat er meer conversieverliezen zijn doordat minder energie direct gebruikt kan worden[8]. Dit komt doordat bij dit scenario vraag en aanbod van elektriciteit minder goed op elkaar aansluiten dan bij andere scenario's. In totaal is in het scenario *Extra wind op land en zonneparken* 650 TWh aan energieproductie nodig. Dit is 10 TWh meer productie dan bij het scenario *Extra wind op zee en zon op dak* en 20 TWh meer dan bij het scenario *Kernenergie*.
- De totale import, in de vorm van waterstof of synthetische brandstoffen, is het grootst bij het scenario *Extra wind op zee en zon op dak*. De totale import is 25 TWh meer dan bij het scenario *Extra wind op land en zonneparken* en 35 TWh meer dan bij het scenario *Kernenergie*.

7 In dit overzicht geven we de totale energieproductie van deze bronnen, inclusief de mogelijke conversie-verliezen als deze energie omgezet wordt in een andere energiedrager. Bij de productie van waterstof vanuit windparken op zee geven we dus de energiewaarde van de geproduceerde/gebruikte elektriciteit, niet de energiewaarde van de geproduceerde waterstof.

8 De conversieverliezen vinden plaats bij de omzetting van de ene energiedrager naar een andere energiedrager (bijvoorbeeld energieverliezen bij de omzetting van elektriciteit naar waterstof met elektrolysers). De energie-verliezen bij eindgebruikers zijn hierin niet meegenomen, deze vallen onder de directe energievraag.

Figuur 9 - Totale energiebalans op jaarbasis



2.3 Wat is de impact van verschillende scenario's op energie-infrastructuur?

In de toekomst zijn forse investeringen in energie-infrastructuur nodig om alle energie te kunnen transporteren van de productielocaties richting de afnemers. Er zijn forse uitbreidingen van het elektriciteitsnet nodig, zowel van de hoogspanningsnetten als van de regionale distributienetten, om de elektrificatie van de energievraag en de productie van hernieuwbare energie te kunnen faciliteren. De huidige aardgasinfrastructuur moet in de toekomst (gedeeltelijk) worden omgebouwd om waterstof te kunnen transporteren. Om de energie van windmolens van op zee naar land te brengen zijn gelijkstroomkabels (bij elektrische aanlanding) of buisleidingen (bij aanlanding in vorm van waterstof) nodig. Voor een robuust energiesysteem, waar op elk moment in het jaar de benodigde energie kan worden afgenomen, zijn in de toekomst daarnaast forse hoeveelheden opslag van energie (van zowel elektriciteit en waterstof) en conversie van energie (regelbare elektriciteitsproductie en elektrolyse) noodzakelijk. Ook dit beschouwen we als energie-infrastructuur.

In deze paragraaf bespreken we de effecten van de verschillende scenario's op de benodigde energie-infrastructuur. Hoeveel en welke nieuwe energie-infrastructuur nodig is in de toekomst, hangt af van de precieze invulling van het energiesysteem en verschilt tussen onze scenario's. Het is echter niet mogelijk om dit kwantitatief te bepalen. Dit hangt namelijk ook in grote mate af van de ruimtelijke uitwerking van de scenario's, dus waar komt hernieuwbare opwek op land terecht, plaats je windmolens en zonneparken op land verspreid door het land of cluster je het op enkele locaties, waar komt windenergie van zee aan land, waar plaats je je kerncentrales? En als je het effect op de energie-infrastructuur goed wilt inschatten is een detaildoorrekening nodig van netbeheerders.
Daarom bespreken we de effecten kwalitatief en in algemene zin. Het is niet mogelijk om de verschillende effecten tegen elkaar af te wegen, aangezien de omvang afhangt van de ruimtelijke uitwerking.

De belangrijkste effecten van de scenario's op de benodigde energie-infrastructuur zijn:

- Er is meer elektriciteitsinfrastructuur op zee nodig als meer wind op zee ingezet wordt voor de elektriciteitsvoorziening. Daartegenover staat dat er in dat geval minder waterstofinfrastructuur nodig is. Maar elektriciteitsinfrastructuur is een stuk duurder dan waterstofinfrastructuur, dus de totale kosten voor energie-infrastructuur op zee zijn in dat geval hoger. Dit geldt voor het scenario ***Extra wind op zee en zon op dak***.
  De kosten voor aanlanding van wind op zee worden meegenomen in de productiekosten.

- De verschillen tussen de productiescenario's hebben vooral impact op de benodigde elektriciteitsinfrastructuur op land. De effecten op de andere soorten energieinfrastructuur op land, zoals waterstofinfrastructuur, is beperkt.

- Er zijn uitbreidingen aan de elektriciteitsinfrastructuur op land nodig om nieuwe windmolens en zonneparken op land aan te sluiten. Mogelijk zijn er naast de aansluitingen van windmolens en zonneparken ook nog verdere uitbreidingen nodig. Hoeveel uitbreidingen nodig zijn, is zwaar afhankelijk van de ruimtelijke invulling van de extra windmolens en zonneparken. Hoe beter bij de keuze voor productielocaties rekening gehouden wordt met aansluiten bij de vraag en bij de reeds beschikbare capaciteit, hoe minder uitbreidingen van het elektriciteitsnet nodig zijn. Dit effect geldt voor het scenario ***Extra wind op land en zonneparken***.

- Zonnepanelen op daken of op infrastructuur zijn vaak relatief kleine projecten. Daarom worden deze aangesloten op het laagspanning- of middenspanningsnet, terwijl zonneparken aangesloten worden op het middenspanningsnet of direct op het hoogspanningsnet. Dit leidt tot fors meer belasting op deze lage spanningsniveaus. Hierdoor zijn significant meer uitbreidingen van de laagspannings- en middenspanningsnetten noodzakelijk, als er extra zonnepanelen op daken of op infrastructuur geplaatst worden, bovenop de uitbreidingen die nodig zijn door de toenemende elektriciteitsvraag van warmtepompen en elektrisch transport. De extra uitbreidingen kunnen beperkt worden door slimme koppeling tussen opwek en vraag, bijvoorbeeld met slim laden van auto's, en door met energieplanologie te sturen op locaties waar de minste netuitbreidingen nodig zijn, maar deze extra uitbreidingen kunnen niet helemaal voorkomen worden.
  Bij zonneparken zijn aansluitingen nodig, maar deze investeringen zijn kleiner dan de investeringen die nodig zijn bij extra zon op daken, aangezien het om grotere projecten gaat. Dit effect geldt voor het scenario *Extra wind op zee en zon op dak*.

- Ook als er geen extra windmolens op land en zonneparken bijkomen zijn forse uitbreidingen aan de elektriciteitsinfrastructuur nodig, voor het faciliteren van elektrificatie van de vraag. In algemene zin zijn echter minder uitbreidingen van het

elektriciteitsnet op land nodig wanneer elektriciteit geleverd wordt door grootschalige bronnen (zoals kernenergie, wind op zee of regelbare centrales) dan wanneer deze elektriciteit geleverd wordt door kleinere bronnen (zoals windmolens op land, zonneparken, zon op dak). Dit is wel afhankelijk van de locaties van grootschalige bronnen, aangezien inefficiënte locaties van grootschalige bronnen ervoor kunnen zorgen dat forse uitbreidingen aan het hoogspanningsnet nodig zijn (zie ook het volgende punt).

- Of uitbreidingen aan de elektriciteitsinfrastructuur nodig zijn bij de plaatsing van kerncentrales hangt af van de locaties van deze centrales. Als deze geplaatst worden op locaties waar al veel aanbod van elektriciteit is, zoals aanlandingslocaties van wind op zee, kan dit er toe leiden dat forse uitbreidingen van het hoogspanningsnet noodzakelijk zijn. Maar als kerncentrales geplaatst worden op locaties met weinig aanbod van en veel vraag naar elektriciteit, is dit naar verwachting niet het geval en is in totaal minder nieuwe elektriciteitsinfrastructuur nodig dan bij de scenario's zonder kernenergie. Het hangt dus van de locatiekeuze van kerncentrales af of er meer of minder nieuwe elektriciteitsinfrastructuur nodig is bij het scenario ***Kernenergie***.

- Bij het scenario ***Kernenergie*** sluit de vraag van elektriciteit op uurbasis het beste aan bij het aanbod van elektriciteit. Daarom is er bij deze scenario's het minste opslag en conversie van elektriciteit, met batterijen en elektrolysers, nodig. Bij het scenario ***Extra wind op land en zonneparken*** sluit de productie het minst goed aan bij de vraag en is de meeste opslag van elektriciteit nodig.

3 Wat zijn de effecten op de klimaatdoelstelling voor 2030?

Nederland heeft de doelstelling om zijn uitstoot van broeikasgassen in 2030 met 55% terug te brengen ten opzichte van 1990. We brengen in dit hoofdstuk de effecten van de scenario's op het behalen van de klimaatdoelstelling voor 2030 in kaart.

3.1 Hoeveel extra CO_2-vrije energie is nodig in 2030?

In het onderzoek 'Alles uit de kast - *een verkenning naar de opgaven voor het Nederlandse elektriciteitssysteem van 2030*', uitgevoerd voor de Werkgroep Extra Opgave van het Uitvoeringsoverleg Elektriciteit en gebaseerd op onderliggend onderzoek van TNO, (2022b), is onderzocht wat de verhoogde CO_2-reductiedoelstelling van 55% betekent voor de elektriciteitssector (Werkgroep Extra Opgave, 2022). Daarnaast komt er naar verwachting een verplichting vanuit de EU voor elke lidstaat om in 2030 50% van het industriële waterstofverbruik in het land te vergroenen[9]. Dit heeft voor Nederland een forse impact, aangezien Nederland een grote industriële waterstofvraag heeft in vergelijking met andere landen in de EU. De waterstofvraag in Nederland komt vooral vanuit de kunstmestindustrie, de chemie en de raffinagesector (CE Delft, 2022). Momenteel wordt deze waterstof voornamelijk geproduceerd met aardgas.

In het onderzoek van TNO is onderzocht wat de nieuwe klimaatdoelen voor 2030 betekenen voor de elektriciteitsvraag en hoeveel CO_2-vrije elektriciteitsproductie dan extra nodig is. Elektrificatie van de energievraag leidt namelijk alleen tot significante reductie van de CO_2-uitstoot als hier ook extra CO_2-vrije elektriciteitsproductie tegenover staat.

De huidige elektriciteitsvraag is ongeveer 120 TWh (PBL, 2021). Het is de verwachting dat de elektriciteitsvraag stijgt naar ruim 206 TWh als de verhoogde klimaatdoelstellingen gehaald worden. Hierbij zijn de directe elektriciteitsvraag en de groene-waterstofvraag opgeteld, vanwege de koppeling tussen de twee. De groene-waterstofvraag is omgerekend naar het equivalent aan elektriciteitsvraag. De verwachte directe elektriciteitsvraag is 167 TWh en de (naar elektriciteit omgerekende) groene-waterstofvraag 39 TWh. De additionele elektriciteitsvraag komt voornamelijk vanuit de industrie en mobiliteit (TNO, 2022b).

Om deze energievraag in te vullen is in 2030 206 TWh productie of import nodig[10]. Een deel van de elektriciteitsproductie wordt in 2030 naar verwachting nog gerealiseerd met aardgascentrales, maar aangezien hier CO_2 bij vrijkomt is het voor het behalen van de klimaatdoelstellingen noodzakelijk dat de productie van aardgascentrales niet te groot is. Op dit moment wordt een elektriciteitsproductie van 165 TWh voorzien voor 2030 (PBL, 2021), waarvan 35 TWh fossiele productie met gascentrales. Om de CO_2-uitstoot van de elektriciteitssector niet te laten toe nemen bij de toename van de elektriciteitsvraag en groene-waterstofvraag tot 206 TWh is ruim 40 TWh extra aanbod van CO_2-vrije energie noodzakelijk bovenop de huidige plannen en prognoses.

9 Deze verplichting en het percentage van de industriële waterstofvraag dat moet worden vergroend voor 2030 staat nog niet vast.

10 In de analyses wordt aangenomen dat Nederland in 2030 geen netto-importeur of exporteur van elektriciteit is. Wel wordt import van waterstof als mogelijkheid meegenomen.



Het is niet de verwachting dat de volledige vraag naar groene waterstof in Nederland geproduceerd wordt. De verwachte elektriciteitsvraag voor elektrolysers is 14 TWh, uitgaande van de ambitie van 4 GW aan elektrolysers[11]. De resterende groene-waterstofvraag (25 TWh) moet dan opgevangen worden met import of met directe productie van waterstof met windparken op zee. De verwachte elektriciteitsvraag is in dat geval ongeveer 180 TWh. In dat geval is 15 TWh extra CO_2-vrije elektriciteitsproductie in Nederland nodig.

3.2 Wat is de potentie van CO_2-vrije energiebronnen in 2030?

Tabel 4 geeft een overzicht van de potentie van verschillende bronnen voor 2030 en geeft een indicatie van de haalbaarheid van deze bronnen.

Tabel 4 - Potentie extra elektriciteitsaanbod 2030

Energiebron	Indicatie extra potentie in 2030 (TWh)[12]	Inschatting haalbaarheid
Productie elektriciteit met windparken op zee	0 in 2030 18 in 2031	Verdere groei van elektrische aanlanding wind op zee, bovenop de aangekondigde versnelling (17 GW in 2030) lijkt niet haalbaar. Het lijkt niet haalbaar om tijdig de benodigde elektriciteitsinfrastructuur (op land en op zee) hiervoor te realiseren. Wel komt in 2031 een forse hoeveelheid (4 GW, 18 TWh) extra wind op zee beschikbaar.
Productie waterstof met windparken op zee	9	Realisatie van windprojecten met offshore-waterstofproductie op GW-schaal is op dit moment nog niet mogelijk. Het lijkt technisch haalbaar voor 2030, maar hiervoor is veel innovatie en goede samenwerking tussen verschillende partijen nodig.
Wind op land	10-20	Doorlooptijd procedures en aanleg windmolens/zonneparken en met name benodigde energie-infrastructuur belemmeren uitrolsnelheid. Onzeker of het mogelijk is om extra wind of zon aan te sluiten op het elektriciteitsnet voor 2030 (Werkgroep Extra Opgave, 2022).
Zonneparken op land		
Zon op dak/gevel overige gebouwen		
Zon op binnenwater		
Zon op infrastructuur		
Zon op dak/gevel woningen	4	Met de huidige autonome groei wordt deze extra potentie naar verwachting gerealiseerd. Lijkt haalbaar, maar capaciteit van het elektriciteitsnet en een business case die positief blijft zijn aandachtspunten.
Zon op zee	-	Wordt op dit moment nog niet op grote schaal toegepast. Grootschalige beschikbaarheid in 2030 is daarom onzeker.
Kernenergie	0	Vanwege doorlooptijd niet haalbaar voor 2030.
Import van waterstof	23-58	Er is momenteel nog geen internationale markt voor groene waterstof en of dit voor 2030 grootschalig van de grond komt is onzeker (CE Delft, 2022). Duidelijkheid over de ontwikkeling van de vraag naar groene waterstof, bijvoorbeeld door de verplichting voor het

[11] Zie beslisnota bij Kamerbrief inzake voortgang waterstofbeleid. We rekenen met 3.500 draaiuren (TNO, 2022b).

[12] De potenties van waterstof worden omgerekend naar de vermeden elektriciteit die anders in zou worden gezet voor de productie van waterstof met elektrolyse. De potenties van de verschillende bronnen kunnen daardoor onderling vergeleken worden en ook vergeleken worden met de totale opgave van 41 TWh extra productie.

Energiebron	Indicatie extra potentie in 2030 (TWh)[12]	Inschatting haalbaarheid
		gebruik van groene waterstof in de industrie, kunnen de komst van een internationale markt versnellen.
Regelbare centrales	13	In het indicatieve scenario van 'Alles uit de kast' wordt uitgegaan van 13 TWh extra productie van regelbare centrales. Deze productie moet van CO_2-vrije centrales komen, anders leidt dit tot extra CO_2-uitstoot. Mogelijke vormen van CO_2-vrije centrales zijn centrales op groene of blauwe waterstof, centrales op biomassa, centrales op groengas of centrales op aardgas met CCS. Elke optie heeft zijn eigen (beleidsmatige, economische of technische) belemmeringen, maar is in principe haalbaar.

3.3 Wat is het effect van de scenario's op het behalen van de klimaatdoelstelling voor 2030?

De uitrol van extra CO_2-vrije energiebronnen richting 2030 moet in lijn zijn met het eindbeeld van een klimaatneutraal energiesysteem in 2050. Elk van de scenario's gaan uit van extra zon op dak en wind op zee in 2050, dus bij elk van de scenario's kan dit extra potentieel ingezet worden in 2030. In het scenario *Extra wind op land en zonneparken* kunnen extra windmolens en zonneparken op land bijdragen aan het halen van het klimaatdoel. In de scenario's *Extra wind op zee en zon op dak* en *Kernenergie* zit geen groei van het aantal windmolens en zonneparken op land en in die scenario's kunnen daardoor alleen extra windmolens op zee voor directe waterstofproductie, extra zon op dak of import van waterstof ingezet worden om het klimaatdoel voor 2030 te halen (kernenergie is niet haalbaar voor 2030).

Een verdere versnelling van de uitrol van windparken op zee voor 2030 is naar verwachting niet mogelijk, waardoor andere bronnen nodig zijn om deze doelstelling te halen. In het illustratieve pakket van 'Alles uit de kast' wordt 9 TWh ingevuld met productie van waterstof met windparken op zee, 4 TWh met extra kleinschalig zon-pv, 13 TWh met extra (CO_2-vrije) regelbare productie en 5 TWh met waterstofimport. Er is dan nog 10 TWh nodig om de benodigde 41 TWh extra aanbod van CO_2-vrije energie te behalen. Deze 10 TWh wordt in het illustratieve pakket ingevuld met grootschalige zon (op dak op of op land) of wind op land (Werkgroep Extra Opgave, 2022). Deze 10 TWh kan ook ingevuld worden met import van groene waterstof, maar het is onzeker of de mondiale markt voor groene waterstof in 2030 al van de grond gekomen is.

Voor het scenario *Extra wind op land en zonneparken* zou de 10 TWh hernieuwbare opwek op land uit het illustratieve pakket vanuit 'Alles uit de kast' ingevuld kunnen worden met een combinatie van zon op dak, zonneparken en wind op land. Bijvoorbeeld met 5 TWh zon op dak, 1 TWh zonneparken en 4 TWh wind op land. Voor de scenario's *Extra wind op zee en zon op dak* en *Kernenergie* zou de 10 TWh hernieuwbare opwek op land uit het illustratieve pakket ingevuld moeten worden met extra grootschalige zon op dak, aangezien er geen verdere toename van windmolens op land en zonneparken zit in deze scenario's.
Om 10 TWh extra grootschalige zon op dak te realiseren is extra stimulerend beleid nodig. Daarnaast is het uitdagend om 10 TWh extra grootschalige zon op dak voor 2030 in te passen in het elektriciteitsnet. Het is de verwachting dat de netbeheerders niet snel genoeg hun netten kunnen uitbreiden om dit te realiseren. Daarom zijn extra maatregelen nodig om dit mogelijk te maken, zoals het aansluiten van zonnepanelen op 50% van het paneelvermogen

(nu al een eis bij en het plaatsen van batterijen bij zonnepanelen. De problemen met de inpassing in het elektriciteitsnet spelen overigens ook bij zonneparken en wind op land.

Niet alle elektriciteitsproductie kan direct gebruik worden voor het invullen van de elektriciteitsvraag. Bij 10 TWh extra grootschalige zon op dak kan ongeveer 70% van deze elektriciteit direct gebruikt worden. Dit betekent dat tot 13 TW additionele opwek nodig is om 10 TWh elektriciteitsvraag in te vullen. Met opslag of elektrolyse kan een deel van de 3 TWh productie die niet direct gebruikt kan worden nog wel nuttig ingezet worden in het energiesysteem, maar hier staan kosten tegenover.

Er is slechts 15 TWh extra productie nodig als er alleen gekeken wordt naar de benodigde elektriciteit en aangenomen wordt dat slechts 14 TWh van de benodigde groene waterstof in Nederland gemaakt wordt omdat in 2030 nog onvoldoende elektrolysecapaciteit aanwezig is (zie analyse in Paragraaf 3.1). De resterende groene waterstof (25 TWh) moet dan geïmporteerd worden. De extra productie van kleinschalige zon-pv en regelbare centrales is dan voldoende. Er is in dat geval dus wel import van groene waterstof nodig om het doel van 50% groene waterstof te halen, terwijl het onzeker is of de mondiale markt voor groene waterstof voor 2030 al van de grond gekomen is.

Er zijn daarnaast enkele onzekerheden en politieke keuzes die impact hebben op benodigde hoeveelheid extra CO_2-vrije elektriciteitsproductie in 2030. Dit gaat onder meer om de onzekerheid rondom het aantal vollasturen van wind op land en wind op zee. Als deze hoger uitvallen dan nu aangenomen wordt in de aannames van het PBL, dan is minder extra CO_2-vrije productie nodig. Daarnaast is het een politieke keuze of alle energie-intensieve industrie in Nederland blijft en of de doelstelling uitgesteld wordt naar 2031. Deze keuzes kunnen zorgen dat minder CO_2-vrije energieproductie gerealiseerd hoeft te worden richting 2030. De effecten van deze onzekerheden en keuzes op de benodigde hoeveelheid CO_2-vrije elektriciteit in 2030 bespreken we in gevoeligheidsanalyses in Hoofdstuk 6.

4 Wat is het effect op de maatschappelijke kosten?

Kosten zijn een belangrijke afweging bij de keuze tussen verschillende energiebronnen. Hierbij zijn niet alleen de productiekosten zelf van belang, maar ook de maatschappelijke kosten van inpassing en het ruimtegebruik. Deze kosten, voor zover niet meegenomen in de prijs van hernieuwbare energie door de initiatiefnemer, zijn wel relevant voor een maatschappelijke afweging hoe de schaarse ruimte zo goed mogelijk aan te wenden voor een CO_2-vrije energievoorziening.

In dit hoofdstuk bespreken we wat we verstaan onder maatschappelijke kosten. Vervolgens brengen we de maatschappelijke kosten van de verschillende CO_2-vrije energiebronnen in kaart. Daarna brengen we de totale maatschappelijke kosten van de verschillende scenario's voor 2050 uit Hoofdstuk 2 in beeld. We geven daarnaast ook inzicht in de kosten voor de verschillende energiebronnen in 2030.

4.1 Wat verstaan we onder maatschappelijke kosten?

In dit onderzoek sluiten we aan bij het brede welvaartsbegrip uit de maatschappelijke kostenbatenanalyse (mkba). Een kenmerk van de mkba is dat naast financiële kosten en baten (voor gebruiker of producent) ook maatschappelijke kosten en baten (voor de gehele samenleving) worden meegenomen. Een voorbeeld betreft een investeerder die (zonder extra beleid) beperkt rekening houdt met de inpassing van de turbine op het uitzicht van omwonenden en toeristen.

Door middel van een mkba kunnen de huidige en de toekomstige voor- en nadelen van keuzes voor de samenleving als geheel zo objectief mogelijk (in euro's) in kaart worden gebracht. Een mkba wordt ingezet vanuit een ruime opvatting van het begrip welvaart. Het energiesysteem (van productie, transport tot opslag en distributie naar de eindgebruiker) levert de Nederlander de mogelijkheid goederen en diensten te produceren en consumeren, en daarmee voorziet het in economisch nut. Daarmee nemen we in principe de financiële effecten mee in alle schakels van het energiesysteem (productie, energienetten voor transport en distributie en opslag voor matching van vraag en aanbod), al ligt de focus op de kosten voor productie van energie. Naast het energiesysteem neemt een mkba ook immateriële zaken mee, die geen prijs op een markt hebben. Dit zijn bijvoorbeeld effecten op milieu, landschap, natuur en ruimtelijke kwaliteit.

We maken in dit onderzoek onderscheid in drie soorten kosten:
- **Directe kosten**. Dit zijn de kosten voor de exploitant. Het gaat hierbij met name om investeringskosten en exploitatiekosten voor energieproductie. Hieronder vallen ook kosten voor energie-infrastructuur.
- **Indirecte kosten.** Dit zijn kosten effecten die voortvloeien uit de directe effecten, preciezer gesteld: de doorwerking van directe effecten via transacties en anderszins naar andere actoren in de economie. Een voorbeeld van een indirect effect is de doorwerking op de arbeidsmarkt. De indirecte kosten nemen we niet mee in dit onderzoek.

- **Externe kosten.** Dit betreft de kosten die onbeoogd zijn door de gebruiker. Hieronder vallen effecten op milieu en ruimtelijke effecten voor de omwonenden. Deze zijn vaak moeilijk in geld uit te drukken omdat markten - en dus prijzen - ontbreken. Daar waar mogelijk worden externe kosten kwantitatief in beeld gebracht. Voor het inschatten van deze externe effecten is gebruik gemaakt van kengetallen uit literatuur.

De analyse in dit hoofdstuk betreft een quickscan van enkele significante maatschappelijke kosten en baten. We beogen hier niet een volledige mkba uit te voeren.

4.2 Wat zijn de maatschappelijke kosten van verschillende energiebronnen?

Hieronder bespreken we de directe kosten en de externe kosten van de verschillende energiebronnen die we bekijken in de scenario's.

4.2.1 Wat zijn de directe kosten?

De productiekosten van verschillende energiebronnen zijn de belangrijkste directe kosten. Bij de productie van energie kijken we naar de totale productiekosten van de verschillende energiebronnen en niet naar marktprijzen, aangezien we naar de kosten voor de samenleving als geheel kijken. Daarbij is opgenomen een redelijke (winst)vergoeding voor de inzet van kapitaal.

De productiekosten bestaan uit verschillende kostencomponenten. De belangrijkste componenten zijn de investeringskosten, de onderhoudskosten en de brandstofkosten. De verhouding tussen deze kostencomponenten verschilt erg per energiebron. Zo hebben windmolens en zonneparken relatief hoge investeringskosten en geen brandstofkosten, terwijl waterstofcentrales relatief lage investeringskosten hebben maar hoge brandstofkosten. Om de productiekosten van verschillende bronnen goed met elkaar te vergelijken maken we gebruik van de maatstaf Levelized Cost of Energy (LCoE). LCoE geeft de gestandaardiseerde kosten over de gehele levensduur per energie-output (bijvoorbeeld per kWh). Hierin worden dus zowel de vaste kosten (investeringskosten) en de variabele kosten (onderhoud en brandstof) gedurende de hele levensduur meegenomen.

Tabel 5 geeft een overzicht van de LCoE (voor productie of import) van verschillende energiebronnen, voor 2030 en 2050. We geven een range vanwege de onzekerheid van de ontwikkeling van deze kosten. Bij deze kosten nemen we ook de kosten voor energieinfrastructuur mee die direct toegeschreven worden aan een bepaalde energiebron en daarmee ook door de exploitant. Dit gaat bijvoorbeeld om het aanleggen van het elektriciteitsnet op zee, dat direct toegeschreven kan worden aan de uitrol van windparken op zee, of aansluitingen op het elektriciteitsnet van wind op land en zon.

Tabel 5 - LCoE verschillende energiebronnen in 2030 en 2050 (€ ct/kWh)

Energiebron	LCoE 2030	LCoE 2050	Bron 2030	Bron 2050
Wind op zee (excl. elektriciteitsnet op zee)	3-4	1,5-3	(Ecofys, 2018)	Aanname gelijke absolute daling als wind op land
Wind op zee (incl. elektriciteitsnet op zee)	4-5	2,5-4	Aanname kosten elektriciteitsnet op zee van 1 €ct/kWh (CE Delft, 2021).	
Wind op land[13]	4-6	2,5-4	(Ecofys, 2018)	Ondergrens: (IRENA, 2020) Bovengrens: aanname
Zonneparken	4-6	2,5-4		
Zon op dak of infrastructuur	3-6	2,5-4		
Kernenergie	N.v.t.	7-11,5	N.v.t.	Ondergrens: Bij WACC[14] van 6% (NAO, 2017) Bovengrens: Strike price voor Hinkley Point C in Engeland, bij WACC van 9% (Van Dorp, J., 2019)
Productie waterstof-centrales	Afhankelijk van kosten waterstof en draaiuren centrales. We gaan uit van investeringskosten van € 750/kW, een WACC van 5,8% en jaarlijkse O&M-kosten van 2% van de investeringskosten.		(CE Delft, 2020c)	
Waterstofproductie in Nederland	Afhankelijk van kosten wind op zee en draaiuren elektrolysers. We gaan uit van investeringskosten van € 700/kW in 2030 en € 375/kW in 2050 en vervanging van de cellen van elektrolysers na 40.000 uur.		(CE Delft, 2021)	
Waterstofimport (in vorm ammoniak of andere waterstof-verbinding)	6-12 (per kWh waterstof)	2,5-9 (per kWh waterstof)	Ondergrens: (CE Delft, 2018) Bovengrens: aanname	Ondergrens: (Netbeheer Nederland, 2021) Bovengrens: (Buck Consultants & CE Delft, 2021)

De kosten voor het energie-infrastructuur die niet direct gerelateerd zijn aan een bepaalde energiebron, en normaliter gesocialiseerd worden over alle netgebruikers, vallen ook onder de directe kosten. Deze kunnen we niet bepalen per energiebron, maar we geven in Paragraaf 4.3 wel een kwalitatieve inschatting van deze kosten voor de verschillende scenario's.

[13] Deze kosten hangen af van de locatie van de windmolens. Op windrijke locaties, bijvoorbeeld aan de kust, produceren dezelfde windmolens meer elektriciteit op jaarbasis en ligt de LCoE lager. We gaan uit van de kosten van windmolens die geplaatst worden op windrijke locaties.

[14] Weighted Average Costs of Capital. Dit zijn de gemiddelde kosten gerelateerd aan het benodigde kapitaal voor de investeringen.

4.2.2 Wat zijn de externe kosten?

De externe kosten zijn de kosten die niet gedragen worden door de producent of gebruiker van energie. Hieronder vallen effecten op milieu en ruimtelijke effecten voor de omwonenden. In deze paragraaf geven we een inschatting van de externe kosten van verschillende energiebronnen. Een deel van de externe kosten, bijvoorbeeld de effecten voor omwonenden, zijn op basis van wetenschappelijke literatuur te kwantificeren. Andere externe kosten zullen we alleen kwalitatief bespreken.

De schade gerelateerd aan de uitstoot van broeikasgassen valt ook onder de externe kosten. Maar deze nemen we niet mee, aangezien er geen verschil zit in de CO_2-uitstoot van broeikasgassen tussen de scenario's (het energiesysteem is klimaatneutraal in elk scenario).

Voor het compenseren en voorkomen van een groot aantal lokale milieu- en ruimtelijke effecten geldt dat hiervoor inpassingsmaatregelen verplicht zijn door milieuwetgeving en wetgeving ten aanzien van ruimtelijke ordening. In dat geval kan beargumenteerd worden dat de kosten ter preventie of compensatie van deze effecten in belangrijke mate onderdeel zijn van de directe kosten van de initiatiefnemer en dus niet meer onder externe kosten. Niet alle externe kosten worden gecompenseerd of voorkomen.

Hierna bespreken we de externe kosten van de belangrijkste CO_2-vrije elektriciteitsbronnen.

Wind op zee

Windparken op zee kunnen negatieve effecten hebben op de volgende aspecten:

- **Ecologie.** De bouw van windmolens op zee kan leiden tot een afname van de populaties van bepaalde soorten, zoals zeezoogdieren, trekvogels en vleermuizen (Decisio & Witteveen+Bos, 2018).
- **Scheepvaart.** Door de aanleg van windparken op zee is het mogelijk dat, afhankelijk van de gekozen locatie van de parken, schepen moeten omvaren. Dit kan leiden tot extra kosten. Daarnaast hebben windparken op zee impact op de veiligheid van de scheepsvaart, waardoor geïnvesteerd moet worden in extra veiligheidsmaatregelen (Decisio & Witteveen+Bos, 2018).
- **Visserij.** Een deel van de gebieden waar nieuwe windparken op zee kunnen komen, worden commercieel bevist. Het effect van windpark op zee op de visserij hangt af van het openstellen van de windparken voor sleepnetvisserij. Bij openstelling zal de sector in principe weinig (financieel) nadeel ondervinden (Decisio & Witteveen+Bos, 2018).
- **Overige effecten.** Naast de bovengenoemde effecten, zullen windparken op zee ook mogelijke effecten hebben op zandwinning en op mogelijke aanvliegroutes voor het bemensen van olie- en gasplatforms. Negatieve effecten zullen vermoedelijk te vermijden zijn door maatwerk rondom windparken op zee (Decisio & Witteveen+Bos, 2018).

In een onderzoek van Decisio en Witteveen+Bos naar de integrale kosten en baten van windenergie op zee zijn deze negatieve effecten op economische activiteiten op zee gekwantificeerd. De gemonetariseerde externe kosten worden ingeschat tussen de € 310 en € 775 miljoen, voor 7,5 GW windenergie op zee en een zichtperiode van 30 jaar. Dit zijn voornamelijk kosten voor de scheepvaart (€ 300-550 miljoen) en visserij (€ 10-225 miljoen) (Decisio & Witteveen+Bos, 2018). De externe kosten van windparken op zee komen overeen met een LCoE van 0,04 tot 0,1 eurocent/kWh. De directe kosten voor windenergie op zee liggen 2050 tussen de 2,5 en 4 eurocent/kWh . Dit betekent dat de externe kosten een fractie zijn van de totale kosten, tussen de 1 en 4%.



De externe kosten voor ecologie zijn niet gekwantificeerd. Om de effecten op ecologie te mitigeren kunnen maatregelen genomen worden, zoals het tijdelijk stilzetten van windmolens in perioden dat aanvaringen met trekvogels kunnen ontstaan. Dit soort maatregelen worden nu vaak al genomen door de exploitanten (Decisio, Witteveen+Bos, 2018). Daarmee zijn deze kosten, in ieder geval voor deel, geïnternaliseerd en worden ze meegenomen in directe kosten.
Een deel van de externe effecten op de ecologie, bijvoorbeeld op vogels die permanent gevestigd zijn in het gebied, worden niet gemitigeerd en de kosten hiervan worden ook niet geïnternaliseerd. De externe kosten hiervan zijn niet bekend.

De negatieve effecten op bijvoorbeeld toerisme of kustbewoners land zijn niet van belang in dit onderzoek, aangezien nieuwe windparken op zee op grotere afstand van de kust aangelegd worden.

Wind op land

Windmolens op land kunnen negatieve effecten hebben op omwonenden en op ecologie:
- **Effecten op omwonenden.** De belangrijkste effecten voor omwonenden van windparken zijn zichthinder, geluidshinder en hinder door slagschaduw. Als onderdeel van deze effecten kunnen omwonenden effecten op de gezondheid ervaren. De hinder van windturbines, met name van het geluid van windturbines, kan indirect gezondheidsklachten veroorzaken. Het RIVM beschouwt hinder en slaapverstoring als schadelijke gezondheidseffecten, in lijn met de definitie van gezondheid van het de World Health Organization (WHO)[15].
- **Ecologie.** Voor wind op land betreft de ecologische impact met name vogels en vleermuizen. Het gaat dan om de kans op aanvaring, barrièrewerking (omvliegen) en verstoring waardoor de omgeving ongeschikt wordt als verblijf- of broedplaats.

De negatieve effecten op omwonenden komen tot uitdrukking in een daling van de woningwaarde. De daling van deze woningwaarde geeft een inschatting van de externe kosten van de windmolens op land voor omwonenden. De totale externe kosten van windmolens op land zijn afhankelijk van de hoeveelheid woningen binnen 2,5 kilometer en daarmee van de locatie van de windmolens. De externe kosten van windmolens liggen een stuk lager in dunbevolkte gebieden. Aangezien met name de eerste windturbine effect heeft op de woningwaarde is het totale welvaartsverlies ook afhankelijk van de concentratie van windmolens[16]. Het totale welvaartsverlies zal bij een grote mate van clustering van de windmolens op land fors lager zijn dan bij spreiding van windmolens. Ook omdat de windmolens bij clustering geconcentreerd in dunbevolkte, windrijke gebieden geplaatst kunnen worden.

De externe kosten van windmolens op land voor omwonenden komen overeen met een LCoE van 0,6 tot 0,9 eurocent/kWh bij spreiding van de windmolens en 0,1 tot 0,2 eurocent per kWh bij clustering van de windmolens (in dunbevolkte, windrijke gebieden). De directe kosten voor windenergie op land zijn 2,5 tot 4 eurocent/kWh in 2050. Dit betekent dat de externe kosten bij spreiding aanzienlijk zijn, 15 tot 35% van de directe kosten. Bij clustering van windmolens zijn de externe kosten beperkter, 2 tot 7% van de directe kosten. Als

[15] Ook hier gaat dezelfde aanname op: bij goed geïnformeerde woningmarkteigenaren zit het effect in de woningprijs.

[16] Hierbij moet de kanttekening worden geplaatst dat in de literatuur niet wordt gekeken naar de grootte van een windpark. Het is immers niet 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. Om hier niet aan voorbij te gaan, hebben we bij clustering van windmolens gekozen voor een potentiële waardedaling van 10 tot 20% binnen een straal van 2,5 kilometer.

windmolens op minder gunstige locaties geplaatst worden. De externe kosten van windmolens in steden liggen vermoedelijk een stuk hoger. Hiervoor hebben we enkele casussen voor het plaatsen van windmolens in Amsterdam uitgewerkt. De externe kosten per kWh variëren fors tussen de verschillende casussen en zijn in grote mate afhankelijk van het aantal windmolens dat bij elkaar geplaatst wordt, aangezien alleen de eerste windmolen tot een significante daling van de woningwaarde leidt. Bij het plaatsen van een enkele windmolen liggen de externe kosten tussen de € 0,05 en € 0,20/kWh. Bij het plaatsen van vijf windmolens in minder druk gebied liggen deze tussen de 0,7 en 3 eurocent/kWh. De bovenstaande cijfers tonen aan hoe belangrijk het is om bij het plaatsen van windmolens op land rekening te houden met de effecten op de omgeving en de hieraan gerelateerde externe kosten. De berekening van deze externe kosten zijn te vinden in Bijlage B.1.1.

De externe kosten voor ecologie zijn niet gekwantificeerd. Windmolens op land hebben een negatief effect op vogels en vleermuizen. Hiervoor kunnen maatregelen genomen worden, zoals het tijdelijk stilzetten van windmolens in perioden dat aanvaringen met trekvogels kunnen ontstaan. Dit soort maatregelen worden in sommige gevallen al genomen door de exploitanten. Daarmee zijn ze al geïnternaliseerd en worden ze meegenomen in directe kosten. Een deel van de externe effecten op de ecologie, worden echter niet gemitigeerd en de kosten hiervan worden ook niet geïnternaliseerd. De externe kosten hiervan zijn niet bekend.

Zonneparken

Net als windmolens op land hebben ook zonneparken negatieve effecten op omwonenden en op de ecologie:

- **Effecten op omwonenden.** Bij zon-pv op land ervaren omwonenden en voorbijgangers negatieve effecten zoals de weerkaatsing van zonlicht en omgevingsgeluid. Ook kan zon op land als aantasting van het landschap worden ervaren. Functiecombinaties van zonneparken met recreatie kan negatieve effecten beperken (CE Delft, 2020a).
    - **Ecologie.** Voor zon-pv geldt dat de ecologische impact met name ligt in aantasting van de leefomgeving van broedplaatsen van vogels en landdieren en verlies van ondergrondse biodiversiteit. Daarnaast kan de bodemkwaliteit ook achteruitgaan. Bij een goede ecologische inpassing kan een verbetering van het leefgebied voor vogels plaatsvinden, en wordt de bodemkwaliteit verbeterd (CE Delft, 2020a).

De negatieve effecten op omwonenden komen ook bij zonneparken tot uitdrukking in een daling van de woningwaarde en geven een inschatting van de externe kosten van de windmolens op land voor omwonenden.

Ook bij zonneparken hangen de totale externe kosten voor omwonenden af van de locatie van de zonneparken en liggen de externe kosten lager bij clustering van zonneparken. De externe kosten van zonneparken voor omwonenden komen overeen met een LCoE van 0,6 eurocent/kWh bij spreiding van zonneparken en 0,01 tot 0,03 eurocent/kWh bij clustering van de zonneparken. De directe kosten voor zonneparken zijn 2,5 tot 4 eurocent/kWh in 2050. Dit betekent dat de externe kosten bij spreiding significant zijn, van 15 tot 20% de directe kosten. Bij clustering van zonneparken zijn de externe kosten beperkt, minder dan 1% van de directe kosten. De berekening van deze externe kosten zijn te vinden in Bijlage B.1.2.

De externe kosten voor ecologie zijn niet gekwantificeerd. In sommige gevallen worden al maatregelen genomen om negatieve effecten op ecologie te mitigeren, bijvoorbeeld door een goede ecologische inpassing. Daarmee zijn deze externe kosten al geïnternaliseerd en

worden ze meegenomen in directe kosten. Een deel van de externe effecten op de ecologie, worden echter niet gemitigeerd en de kosten hiervan worden ook niet geïnternaliseerd. De externe kosten hiervan zijn niet bekend.

Zon op dak en infrastructuur

De eigenaren van zonnepanelen op daken hebben vaak een positief gevoel over de zonnepanelen en hun esthetische bijdrage aan de woning. Zij krijgen opbrengsten uit deze panelen en het bezit van zonnepanelen kan zorgen voor een gevoel van status. De effecten van zonnepanelen op daken op de waarde van de eigen woning worden niet beschouwd als externe kosten of baten, aangezien deze voor eigen rekening van de eigenaar van de zonnepanelen zijn.

De zonnepanelen kunnen wel zorgen voor een negatieve visuele beleving van bewoners in aangrenzende woningen (CE Delft, 2020a). De effecten van zonnepanelen op daken op de woningwaarde van buren zouden wel als externe kosten gezien kunnen worden. Maar in de wetenschappelijke literatuur zijn geen aanwijzingen dat zonnepanelen op daken tot significante woningdaling van woningen in de buurt leidt. Zon op infrastructuur is vaak niet in de directe omgeving van woningen. Daarnaast heeft zon op dak weinig tot geen negatieve gevolgen voor natuur en biodiversiteit. Daarom nemen we aan dat er geen significante externe kosten zijn bij zon op dak en zon op infrastructuur.

Kernenergie

De belangrijkste (potentiële) effecten van kernenergie op de omgeving hebben betrekking op stralingsrisico en radioactief afval:

- **Stralingsrisico.** Een zwaar ongeval bij een kerncentrale kan in potentie resulteren in het vrijkomen van radioactieve splijtingsproducten ('radioactieve wolk'). Er kan dan sprake zijn van een radiologische noodsituatie. In een dergelijk geval kan het noodzakelijk zijn om de bevolking te beschermen door het nemen van beschermingsmaatregelen zoals schuilen, jodiumprofylaxe (innemen van jodiumtabletten), evacuatie en landbouwmaatregelen (onder andere graasverbod, ophokplicht of oogstverbod). Daarnaast is het als gevolg van neergeslagen radioactief materiaal noodzakelijk om woningen en bedrijven te verplaatsen (relocatie), om blootstelling aan in de omgeving neergeslagen radioactief materiaal als gevolg van een radioactieve lozing op langere termijn te voorkomen. Relocatie kan voor een onbepaalde, of voor een vastgestelde bepaalde tijd zijn, veelal in termijnen van jaren.
- **Radioactief afval.** Hoogradioactief afval dient vele duizenden jaren tot een kwart miljoen jaar veilig te worden opgeslagen. Na opwerking gaat het om circa 10.000 jaar totdat het stralingsniveau is gedaald zodat het niet meer gevaarlijk is. Voor laag- en middelradioactief afval is deze periode honderden tot duizenden jaren. Om veilig beheer van het radioactief afval te realiseren is het beleid gericht op het isoleren, beheersen en controleren (IBC-principe). Het huidige beleid betreft bovengrondse opslag tot het jaar 2100, wanneer besluitvorming moet plaatsvinden over eindberging.

Een deel van de externe kosten van kerncentrales, zoals de berging van kernafval, worden geïnternaliseerd en zijn daarom meegenomen in de directe kosten. Er zijn enkele externe effecten die niet geïnternaliseerd zijn. Dit gaat bijvoorbeeld het effect op de woningwaardes in de omgeving van kerncentrales en het risico op een kernramp. Er is vanuit de wetenschappelijke literatuur geen eenduidige conclusie over het effect van kerncentrales op de woningwaardes, aangezien er zowel negatieve effecten als positieve effecten gevonden worden. Vanwege de uiteenlopende resultaten achten wij dit niet bruikbaar voor ons onderzoek en nemen we aan dat kerncentrales geen effect hebben op de woningwaardes. Voor het inschatten van de externe kosten als gevolg van de nucleaire veiligheid, kan

gebruik worden gemaakt van een kans-maal-effect-methode. Het is echter erg lastig om een inschatting te maken van de kans op een dergelijk ongeval. Vanwege de zeer kleine statistische kansen op een kernongeval met grote schade zijn de externe effecten (verwachtingswaarde) zeer beperkt en zullen deze een beperkte rol spelen in totale maatschappelijke kosten, Daarom nemen we ook deze externe kosten niet mee.

Import waterstof

Geïmporteerde waterstof heeft geen significante effecten op de omgeving en leidt dus ook niet tot significante externe kosten op Nederlands grondgebied. Maar mogelijk zijn er wel externe kosten in de gebieden waar de waterstof geproduceerd wordt, door de windmolens en zonneparken die nodig zijn voor deze productie. Het is echter de verwachting dat we in de toekomst vooral waterstof zullen importeren die grootschalig geproduceerd wordt in zeer dunbevolkte gebieden, zoals woestijnen. Daarom is het de verwachting dat de externe kosten van geïmporteerde waterstof zeer beperkt zijn, zowel op Nederlands grondgebied als op de productielocatie.

4.3 Wat zijn de totale maatschappelijke kosten voor de verschillende scenario's in 2050?

In deze paragraaf bespreken we de totale maatschappelijke kosten van de verschillende scenario's. Hiervoor bepalen we de totale productiekosten (productie + import)[17] en, indien mogelijk, ook de totale externe kosten. De impact op het energiesysteem en externe effecten die niet gekwantificeerd kunnen worden bespreken we kwalitatief.

Er is nog veel onzekerheid over de ontwikkeling van de kostprijzen van energieproductie van verschillende bronnen (zie Tabel 5). Ook over de verhoudingen van de kostprijzen van verschillende energiebronnen is nog veel onzekerheid. Deels zijn de kosten van verschillende bronnen direct aan elkaar gerelateerd en gaan de kostendalingen hand in hand, zoals bij wind op land en wind op zee. Maar dit geldt niet voor alle energiebronnen. Als er op mondiaal niveau maximaal ingezet wordt op kernenergie zullen deze kosten flink dalen, terwijl de kosten van wind en zon in dat geval minder zullen dalen (en vice versa). En ook de verhouding tussen de kosten van eigen productie van waterstof en import van waterstofdragers en synthetische brandstoffen is nog erg onzeker. De daling van de productiekosten van waterstof zullen mondiaal in de pas lopen, maar hoe de hogere kosten van productie van waterstof in Nederland zich verhouden ten opzichte van de extra transportkosten bij geïmporteerde waterstofdragers of synthetische brandstoffen is onzeker.

Om de hiervoor genoemde onzekerheden te ondervangen maken we gebruik van drie prijsscenario's:

1. **Scenario A**. Ondergrens kosten wind en zon, bovengrens kosten kernenergie en import waterstofdragers/synthetische brandstoffen.
2. **Scenario B**. Gemiddelde prijs voor alle bronnen.
3. **Scenario C.** Bovengrens kosten wind en zon, ondergrens kosten kernenergie en import waterstofdragers/synthetische brandstoffen.

Tabel 6 geeft de prijzen voor elk van de drie scenario's:

[17] Hiervoor vermenigvuldigen we jaarlijkse productie per bron met de LCoE. Dit geeft een goede indicatie van de totale maatschappelijke kosten in een evenwichtssituatie. Voor een volledige mkba is een investeringsanalyse noodzakelijk, waarin een inschatting wordt gemaakt wanneer investeringen in energiebronnen gedaan worden, maar voor het doel van dit onderzoek geeft de gekozen benadering een accuraat genoeg beeld.

Tabel 6 - Kostprijzen per scenario per energiebron in 2050 (€ct/kWh)

Scenario	Wind op zee	Wind op land	Zon op dak	Kernenergie	Import waterstof/ synthetische brandstoffen
A	2	2,5	2,5	11,5	9
B	2,5	3	3	9,5	4,5
C	3	4	4	7	2,5

We brengen de totale maatschappelijke kosten van de productie en import van alle energiedragers in kaart. Deze brengen we in kaart voor de verschillende scenario's. Hier worden alleen de resultaten voor de Nationale Sturing-scenario's weergegeven. Bijlage B bevat een uitsplitsing voor de kosten voor productie van elektriciteit, de resultaten van de Internationale Sturing-scenario's en extra analyses.

Tabel 7 geeft een overzicht van de jaarlijkse maatschappelijke kosten voor de totale productie en import van energie voor de scenario's Nationale Sturing, voor de drie prijsscenario's. Hier kunnen de totale kosten direct vergeleken worden, aangezien het hier om het hele energiesysteem gaat en elk van deze scenario's een exact gelijke energievraag hebben.

Tabel 7 - Totale jaarlijkse maatschappelijke kosten productie en import energie scenario's Nationale Sturing (in € miljoen)

Energiebron	Extra wind op land en zonneparken			Extra wind op zee en zon op dak			Kernenergie		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Productie elektriciteit[18]	9.000	10.250	12.500	8.500	9.750	11.500	14.500	14.000	13.750
Productie waterstof[19]	9.500	10.500	11.500	8.250	9.250	10.000	9.000	10.000	11.000
Import waterstof	15.250	7.500	3.750	17.500	8.750	4.250	14.000	7.000	3.500
Productie groengas	750	1.000	1.250	750	1.000	1.250	750	1.000	1.250
Productie warmte	750	1.000	1.000	750	750	1.000	750	750	1.000
Totale productiekosten	**35.250**	**30.250**	**30.000**	**35.750**	**29.500**	**28.250**	**39.000**	**33.000**	**30.250**
Externe kosten (kwantitatief)	500	500	500	250	250	250	250	250	250
Totale kosten	**35.750**	**30.750**	**30.500**	**36.000**	**29.750**	**28.500**	**39.250**	**33.250**	**30.500**
Ecologie	Wisselende effecten op ecologie. Kunnen niet tegen elkaar afgewogen worden.								
Energie-infrastructuur	– Extra infrastructuur op land door extra windmolens en zonneparken op land.			– Veel uitbreidingen laag- en middenspanning door meer zon op dak (ten opzichte van zonnevelden).			– Weinig uitbreidingen laag- en middenspanning. – Mogelijk forse uitbreidingen hoog-		

[18] Dit is exclusief de kosten voor de waterstof die nodig is voor regelbare centrales, om dubbeltellingen te voorkomen. De kosten hiervoor worden meegenomen bij productie en import waterstof. De investeringskosten van regelbare centrales worden hier wel meegenomen.

[19] Dit is exclusief de kosten voor de elektriciteit die nodig is voor elektrolyse, om dubbeltellingen te voorkomen. De kosten hiervoor worden meegenomen bij productie elektriciteit. De investeringskosten van elektrolysers worden hier wel meegenomen.

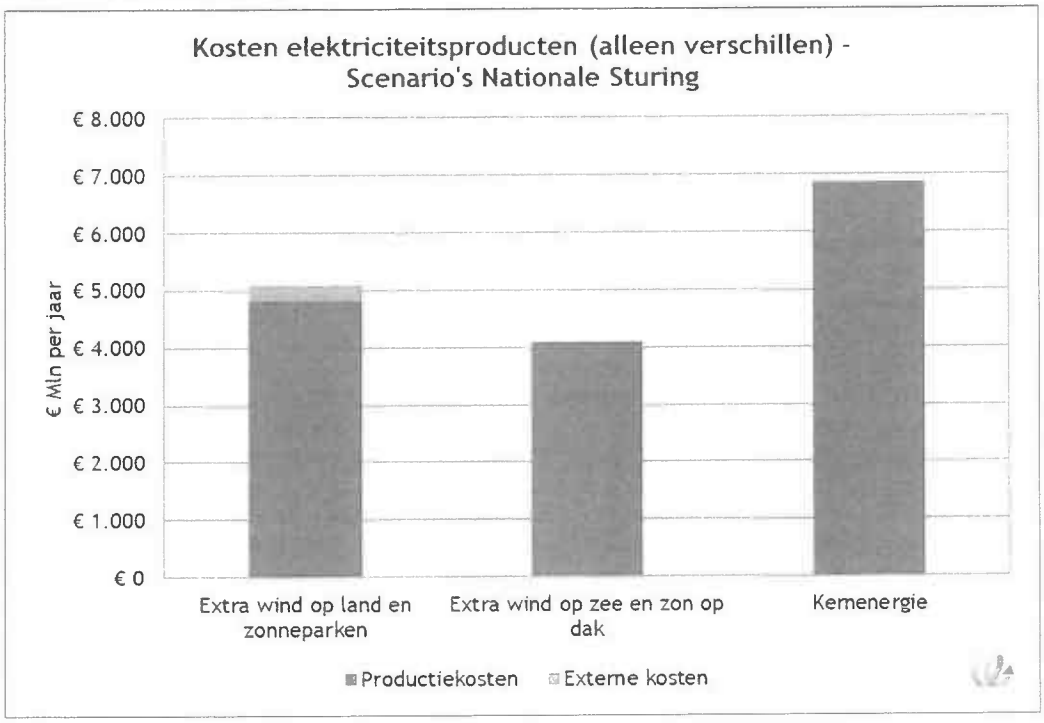


Energiebron	Extra wind op land en zonneparken			Extra wind op zee en zon op dak			Kernenergie		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
				- Extra infrastructuur op zee al geïnternaliseerd en opgenomen in kosten.			spanningsnet bij keuze inefficiënte locaties kerncentrales.		

Uit Tabel 7 kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- Bij gemiddelde prijzen (prijsscenario B) en bij lage prijzen voor kernenergie en waterstofimport (prijsscenario C) liggen de totale maatschappelijke kosten voor productie en import van energie het laagst bij het scenario *Extra wind op zee en zon op dak*. Dit komt doordat in dat scenario meer import van waterstof plaatsvindt en dat dit in deze scenario's relatief goedkoop is ten opzichte van binnenlandse productie.
- Bij lage prijzen voor wind en zon (prijsscenario A) liggen de totale maatschappelijke kosten voor productie en import van energie het laagst voor het scenario *Extra wind op land en zonneparken*. Dit komt doordat bij het scenario *Extra wind op land en zonneparken* meer energie in Nederland geproduceerd wordt en dit bij prijsscenario A relatief goedkoop is ten opzichte van import.
- De totale maatschappelijke kosten voor productie en import van energie zijn het hoogst voor het scenario *Kernenergie* bij elk van de prijsscenario's.
- De externe kosten zijn relatief beperkt ten opzichte van de productiekosten, voor elk van de scenario's.
- Bij prijsscenario B liggen de kosten van het scenario *Extra wind op land en zonneparken* ongeveer € 1 miljard per jaar hoger dan het scenario *Extra wind op zee en zon op dak*. Dit komt overeen met ongeveer 3% van de totale kosten. Kijken we naar de verschillen tussen de scenario's en dus de keuzes die gemaakt kunnen worden dan is het verschil een stuk groter (zie Figuur 10). Van het verschil wordt € 250 miljoen (25% als alleen de verschillen tussen de scenario's worden meegenomen) veroorzaakt door externe kosten.
- De kosten van de benodigde energie-infrastructuur en de externe kosten op ecologie kunnen niet kwantitatief meegenomen worden. Er kan voor beide kosten geen inschatting gemaakt worden in welk scenario de kosten het grootst zijn.

Figuur 10 - Maatschappelijke kosten productie + import energie-scenario's Nationale Sturing (alleen verschillen tussen scenario's)[20]



4.4 Wat zijn de maatschappelijke kosten van CO_2-vrije energiebronnen in 2030?

In deze paragraaf geven we een overzicht van de maatschappelijke kosten voor de verschillende bronnen van CO_2-vrije elektriciteit in 2030. De verwachte kostendaling van de verschillende bronnen kan een afweging zijn. Daarom geven we ook inzicht in de verwachte kosten in 2030.

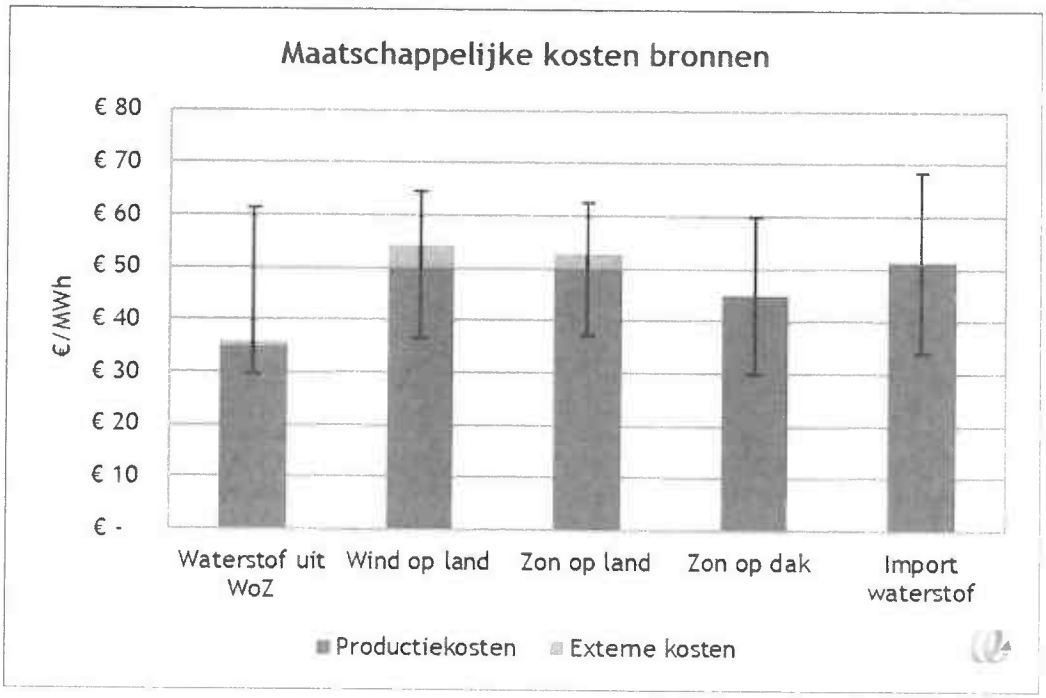
Figuur 11 geeft een overzicht van de maatschappelijke kosten (productiekosten + externe kosten) van de CO_2-vrije bronnen met de grootste additionele potentie voor 2030 (zie Tabel 4). In deze figuur is de productie van elektriciteit uit wind op zee niet meegenomen, aangezien er naar verwachting geen extra potentie is hiervoor bovenop de bestaande plannen richting 2030.

Bij productie van waterstof uit wind op zee en import van waterstof zijn de kosten teruggerekend naar de kosten van elektriciteit, met de aanname dat door deze waterstof minder elektriciteit nodig is voor productie van waterstof met andere bronnen (conform de methodologie van 'Alles uit de kast'). Bij de productie van waterstof uit wind op zee nemen we de extra kosten voor elektrolyse op zee niet mee, met de aanname dat deze

[20] Hier nemen we alleen de kosten voor het deel van de energieproductie dat verschilt tussen de scenario's. Zo heeft elk scenario minimaal 124 TWh wind op zee-productie, minimaal 40 TWh zon op dak, minimaal 6 TWh zon op veld, minimaal 23 TWh wind op land en minimaal 33 TWh productie van waterstofcentrales. Deze tellen we hier niet mee, aangezien juist de verschillen tussen de scenario's van belang zijn.

elektrolysers in plaats komen van elektrolysers op land[21]. Aangezien de één-op-één-vervanging van elektrolysers op zee onzeker is (zie voetnoot) nemen we deze kosten bij de bovengrens wel mee.

Figuur 11 - Maatschappelijke kosten CO_2-vrije energiebronnen in 2030



De figuur laat zien dat de kosten van productie van waterstof uit windparken op zee het laagst liggen, behalve als ook de kosten voor elektrolysers worden meegenomen (in de bovengrens). Dit komt doordat de productiekosten van wind op zee lager liggen dan van andere bronnen, zeker aangezien je bij directe productie van waterstof op zee minder transportkosten hebt. Verder liggen de maatschappelijke kosten van zon op dak lager dan de maatschappelijke kosten van wind en zon op land. Zowel de productiekosten als de externe kosten liggen lager. Het is nog onzeker of import van waterstof in 2030 duurder of goedkoper is dan productie van wind op land, zon op land en zon op dak.

Voor de maatschappelijke kosten in 2030 zijn ook de externe kosten van CO_2-uitstoot van belang, aangezien nog niet het hele energiesysteem klimaatneutraal is. Bij de analyses voor 2030 gaan we echter bij alle configuraties uit van het halen van de doelstelling van 55% reductie van de CO_2-uitstoot. Daarom worden deze niet meegenomen.

[21] Deze aanname gaat voorbij aan de productieprofielen van wind en zon. In de praktijk is het vanwege de volatiliteit van wind en zon nuttig om ook elektrolysers op land te hebben. Deze kunnen overschotten van elektriciteit omzetten in waterstof. Dat kunnen deze elektrolysers bij de windparken op zee niet. In de praktijk zijn deze dus niet direct inwisselbaar.

5 Wat is het effect op de import-behoefte van Nederland?

Nederland is op dit moment in hoge mate (ongeveer 65%) afhankelijk van import van energie in de vorm van olieproducten, aardgas en steenkolen. Met de opkomst van hernieuwbare energiebronnen kan Nederland richting 2050 een groter deel van zijn eigen energiebehoefte invullen, maar volledig zelfvoorzienend zijn op het gebied van energie is ook in 2050 niet mogelijk. In welke mate Nederland, en de EU, zelfvoorzienend wil zijn op het gebied van energie is een politieke keuze. In dit hoofdstuk brengen we de afweging tussen het zelf produceren en import van energie in kaart.

In welke mate Nederland zelfvoorzienend kan zijn is afhankelijk van welke binnenlandse energiebronnen gebruikt worden. Hoe meer binnenlandse bronnen gebruikt worden, hoe meer energie je in Nederland kan produceren en hoe minder import noodzakelijk is. Daarmee heeft de keuze om wel of geen extra windmolens en zonneparken op land te plaatsen na het realiseren van de doelstelling van 35 TWh hernieuwbare opwek op land impact op de importbehoefte. We maken een kwantitatieve inschatting van de import-behoefte in elk van de scenario's voor 2050.

5.1 Wat zijn de afwegingen tussen zelf produceren en importeren van energie?

Er zijn verschillende afwegingen tussen het zelf produceren of importeren van energie. Een belangrijk argument voor een grotere mate van zelfvoorzienend zijn is dat je dan minder afhankelijk bent van andere landen en daarmee een deel van je autonomie opgeeft. Dit kan een risico zijn bij een essentieel onderdeel van je economie als de energievoor-ziening. Dit risico wordt aangetoond door de huidige gascrisis in de EU door de oorlog van Rusland met Oekraïne. Hierbij is het wel belangrijk om hier de nuance aan te brengen dat de huidige crisis ontstaan is door de grote afhankelijkheid van Nederland van één land, namelijk Rusland. Het is de verwachting dat Nederland in de toekomst vooral waterstof of afgeleide producten van waterstof, zoals methanol of ammoniak, zal importeren. Deze producten kunnen overal op de wereld geproduceerd worden, aangezien het geen grondstof is, en kan geïmporteerd worden per schip. Met goed beleid kan je daarmee voorkomen dat je te afhankelijk wordt van één land en daarmee de risico's van importafhankelijk redu-ceren.

Het maximaal gebruikmaken van binnenlandse energiebronnen heeft een ruimtelijke neer-slag op Nederland, terwijl de beschikbare ruimte beperkt is. Daarnaast is het risico op effecten van binnenlandse energieproductie op omwonenden in Nederland aanwezig doordat we in zo'n dichtbevolkt land leven, wat kan leiden tot externe kosten (zie ook Hoofdstuk 4). Geïmporteerde waterstof zal vermoedelijk geproduceerd worden in grote, dunbevolkte gebieden waar voldoende ruimte is en de impact van de energieproductie op de omgeving een stuk lager is.

Geïmporteerde waterstof zal geproduceerd worden in specifieke gebieden waar tegen zeer lage kosten hernieuwbare energie geproduceerd kan worden, bijvoorbeeld in woestijnen waar het hele jaar door de zon schijnt en het mogelijk ook hard waait. De productiekosten voor waterstof zullen in die gebieden lager liggen dan in Nederland.

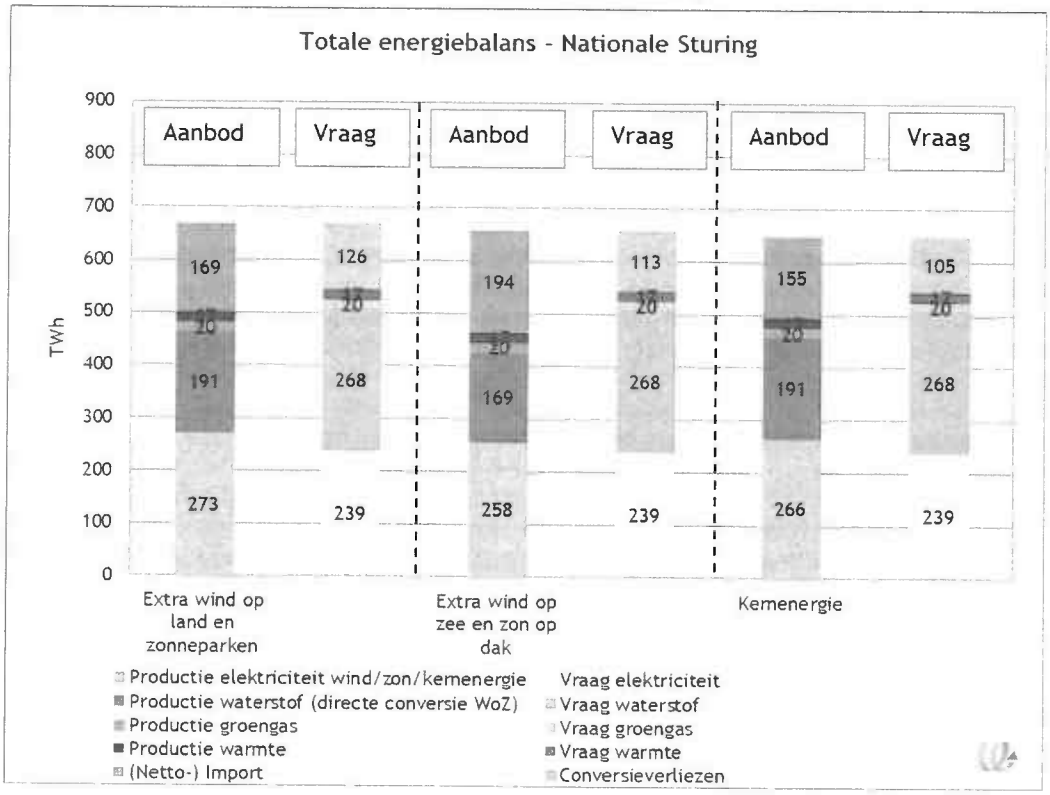
Daar staat tegenover dat van waterstof afgeleide (vloeibare) producten of synthetische brandstoffen getransporteerd moeten worden naar Nederland, wat kosten met zich meebrengt. Daardoor is het onzeker of import van waterstof tot lagere of hogere kosten leidt dan binnenlandse productie van waterstof (zie Hoofdstuk 4 voor de totale kosten van elk van de scenario's).

5.2 Hoe groot is de importbehoefte bij elk scenario?

Figuur 12 geeft een overzicht van de energiebalans voor de drie scenario's. In elk van de scenario's zijn de binnenlandse bronnen voldoende om te voldoen aan de elektriciteits-vraag, en ook de binnenlandse waterstofvraag, met name vanuit de industrie, kan hiermee gedekt worden. Er is echter onvoldoende binnenlandse productie van energie om ook de vraag naar synthetische brandstoffen voor de internationale lucht- en scheepvaart te dekken. Hier is in elk scenario import voor nodig.

De (netto-) import is het grootst bij het scenario *Extra wind op zee en zon op dak* aangezien in die scenario's een minder groot aandeel van de potentie voor binnenlandse productie van energie wordt aangeboord doordat er geen extra windmolens en zonneparken op land bij komen. In dat scenario wordt ongeveer 30% van de binnenlandse energievraag (inclusief conversieverliezen) ingevuld met import tegenover 25% bij het scenario *Extra Wind op land en zonneparken* waar de potentie voor extra windmolens op land wel wordt ingezet. Met inzet van kernenergie kan de importbehoefte van energie nog verder teruggebracht worden, al is in dat geval wel import van uranium noodzakelijk (dat is niet meegenomen in deze analyse).

Figuur 12 - Totale energiebalans op jaarbasis scenario's Nationale Sturing



De importbehoefte van Nederland is in grote mate afhankelijk van de ontwikkeling van de energievraag richting 2050 en het wel of niet blijven van de huidige energie-intensieve industrie en de internationale lucht- en scheepvaart. Daarnaast is het afhankelijk van de potentiële productie van windmolens (op zee). Deze zaken behandelen we in gevoeligheids-analyses in Hoofdstuk 6.



6 Gevoeligheidsanalyses

Er zijn verschillende mogelijke ontwikkelingen en politieke keuzes die niet meegenomen zijn in de scenario's en de doorrekeningen daarvan, maar die wel relevant zijn voor de afweging om wel of geen extra windmolens en zonneparken op land te plaatsen. Om de effecten van deze ontwikkelingen in te schatten voeren we gevoeligheidsanalyses uit.

Er zijn vijf mogelijke ontwikkelingen waarvoor we een gevoeligheidsanalyse uitvoeren:

1. **Krimp energie-intensieve industrie in Nederland**. Nederland heeft op dit moment een relatief grote energie-intensieve industrie in vergelijking met andere Europese landen. Dit komt door historisch gunstige condities, waaronder een eigen gasvoorraad en de haven van Rotterdam. Zo is Nederland één van de grootste kunstmestfabrikanten van de wereld en heeft Nederland een forse raffinagesector. Nederland voorziet met deze industrieën niet alleen in de binnenlandse vraag, er vindt ook een fors aandeel export plaats.

   Beide energievraagscenario's gaan uit van een gelijke omvang of groei van de industrie in Nederland[22] en nemen dus aan dat er geen industrie uit Nederland vertrekt. Dit is echter geen zekerheid. In de toekomst kan in sommige landen een stuk goedkoper CO_2-vrije energie, zoals waterstof, geproduceerd worden dan in Nederland. Dit kan betekenen dat een deel van de energie-intensieve industrie in Nederland vertrekt naar die landen, behalve als de Nederlandse overheid bewust de keuze maakt om actie te ondernemen om deze industrie hier te houden.

   De energie-intensieve industrie in Nederland houden of te laten vertrekken is een politieke keuze. Dit is een breder vraagstuk en hierin spelen niet alleen aspecten vanuit het energiesysteem. We gaan niet op de afwegingen bij deze politieke keuze in. We brengen alleen in kaart wat de effecten op het energiesysteem en het behalen van de klimaatdoelstellingen zijn als een deel van de energie-intensieve industrie, zoals de kunstmestindustrie, vertrekt uit Nederland.

2. Krimp brandstofbehoefte internationale scheeps- en luchtvaart in Nederland. Nederland heeft op dit moment een forse brandstofbehoefte voor de lucht- en scheepvaart. Voor scheepvaart worden grote hoeveelheden stookolie gebunkerd in de Nederlandse havens. De luchtvaart heeft een forse vraag naar kerosine, voornamelijk door de vluchtbewegingen bij Schiphol.

   Beide energievraagscenario's gaan uit van een groei van de omvang van de internationale scheeps- en luchtvaart. Dit leidt tot een forse energievraag voor synthetische brandstoffen. Een groei van deze sectoren is echter geen zekerheid, niet op mondiaal niveau en ook niet op nationaal niveau. Dit is afhankelijk van politieke keuzes en mondiale prijsontwikkelingen. Daarnaast is het de vraag of deze brandstoffen in de toekomst ook in Nederland getankt gaan worden, aangezien deze brandstoffen mogelijk goedkoper geproduceerd kunnen worden in andere landen.

   In deze gevoeligheidsanalyse brengen we in kaart wat de effecten op het energiesysteem en het behalen van de klimaatdoelstellingen zijn als de internationale scheeps-

[22] In de scenario's is wel een krimp van de raffinage- en kunstmestsector voorzien aangezien de vraag naar deze producten afneemt door verduurzaming. Maar de omvang van andere sectoren blijft gelijk of groeit.

en luchtvaart in Nederland krimpt. We gaan niet in op de afwegingen die spelen bij deze politieke keuze.

3. **Meer vollasturen wind op zee en wind op land**. Windmolens produceren elektriciteit op momenten dat het waait. Hoeveel elektriciteit geproduceerd kan worden per MW-windmolen wordt uitgedrukt in het aantal vollasturen. Het aantal vollasturen hangt onder meer af van de locatie van de windmolen (aan de kust waait het harder en vaker dan in het binnenland) en van de techniek (hogere, nieuwe windmolens produceren meer per MW). In onze analyses gaan we uit van 3.000 vollasturen voor wind op land en 4.500 vollasturen voor wind op zee, conform de officiële berekeningen van het PBL. Er zijn echter discussies of het aantal vollasturen in de praktijk niet hoger zal komen te liggen. Volgens de Nederlandse Vereniging Duurzame Energie (NVDE) en de Nederlandse Windenergie Associatie (NWEA) ligt het gemiddeld aantal vollasturen voor wind op land op 3.114 in 2030 en 3.863 uur in 2050 en voor wind op zee op 4.814 uur in 2030 en 4.902 in 2050[23]. Ook in een onderzoek naar de opbrengsten van het nieuwe windpark op zee Hollandse Kust noord wordt uitgegaan van een hoger aantal vollasturen, namelijk 4.800 (ECN, 2018). We brengen in kaart wat de effecten zijn als je rekent met dit hogere aantal vollasturen.

4. **Grotere potentie wind op zee.** We nemen in alle varianten aan dat de ambitie van 70 GW wind op zee in 2050 gerealiseerd wordt. Uit recent onderzoek volgt dat er mogelijk tot 100 GW wind op zee gerealiseerd kan worden (zie Paragraaf 2.1). We brengen in kaart wat de effecten zijn als 100 GW wind op zee gerealiseerd wordt in 2050.

5. **Uitstellen klimaatdoelstelling van 2030 naar 2031.** In 2031, een jaar na de klimaatdoelstelling van 2030, wordt een forse hoeveelheid extra wind op zee gerealiseerd, 4 GW extra wind. Het uitstellen van de klimaatdoelstelling betekent dat er in 2030 minder extra CO_2-vrije elektriciteitsproductie gerealiseerd hoeft te worden. Het uitstellen van de klimaatdoelstelling is een politieke keuze. We gaan niet op de afwegingen bij deze politieke keuze in. We brengen alleen de effecten op het behalen van de klimaatdoelstelling in kaart.

We kijken bij deze gevoeligheidsanalyses naar de effecten van de ontwikkelingen op het behalen van de klimaatdoelstellingen van 2030. Dit doen we voor de ontwikkelingen *Krimp industrie in Nederland* en *Meer vollasturen wind op zee en wind op land* en *Uitstellen klimaatdoelstelling van 2030 naar 2031*. De ontwikkeling *Grotere potentie wind op zee* is voor 2030 niet relevant.

Daarnaast brengen we de effecten van *Krimp industrie in Nederland, Meer vollasturen wind op zee en wind op land* en *Grotere potentie wind op zee* voor 2030 op de energiebalans en de importbehoefte van Nederland in 2050 in kaart. De effecten op de onderlinge verhouding van de maatschappelijke kosten zijn beperkt, dus deze laten we buiten beschouwing.

Elk van deze mogelijke ontwikkelingen en keuzes leidt tot een lagere importbehoefte in Nederland. Combinaties van deze ontwikkelingen en keuzes leiden tot een nog lagere importbehoefte en kunnen er in potentie zelfs toe leiden dat bijna geen import meer noodzakelijk is.

[23] Zie rekentool NWEA.

6.1 Krimp energie-intensieve industrie in Nederland

Nederland heeft op dit moment een relatief grote energie-intensieve industrie in vergelijking met andere Europese landen. Dit komt door historisch gunstige condities, waaronder een eigen gasvoorraad en de haven van Rotterdam. Beide energievraagscenario's gaan uit van een gelijke omvang of groei van de industrie in Nederland. Dit is echter geen zekerheid. In de toekomst kan in sommige landen een stuk goedkoper CO_2-vrije energie, zoals waterstof, geproduceerd worden dan in Nederland.

In deze gevoeligheidsanalyse bekijken we de effecten van krimp van de energie-intensieve industrie in Nederland. Dat kan door bewust beleid, maar ook doordat in andere landen goedkopere energie beschikbaar is. We gaan niet in op de afwegingen rondom krimp van de energie-intensieve industrie, we kijken alleen naar de effecten indien dit zou gebeuren.

Voor 2030 kijken we naar de effecten als de kunstmestindustrie verdwijnt uit Nederland. Voor 2050 kijken we naar de effecten als de kunstmestindustrie en de raffinagesector volledig verdwijnen en de omvang van de staal- en metaalindustrie en de chemie halveert. We bekijken dit ten opzichte van de basisscenario's voor 2030 en 2050. Voor het basisscenario voor 2050 is al een krimp aangenomen voor de kunstmestsector en raffinagesector. Tabel 8 geeft een overzicht van de aannames.

Tabel 8 - Aannames krimp energie-intensieve industrie

Sector	Omvang 2030 (t.o.v. basisscenario)	Omvang 2050 (t.o.v. basisscenario)
Kunstmest	0%	0%
Raffinage	100%	0%
Chemie	100%	50%
Staal en overige metalen	100%	50%
Voedsel	100%	100%
Overig	100%	100%

2030

De totale waterstofvraag in Nederland is op dit moment ongeveer 50 TWh. Hiervan komt ongeveer een derde, 16 TWh, van de kunstmestindustrie (CE Delft, 2022). De elektriciteitsvraag van de kunstmestindustrie is relatief beperkt (zie cijfers 2050) en laten we buiten beschouwing.

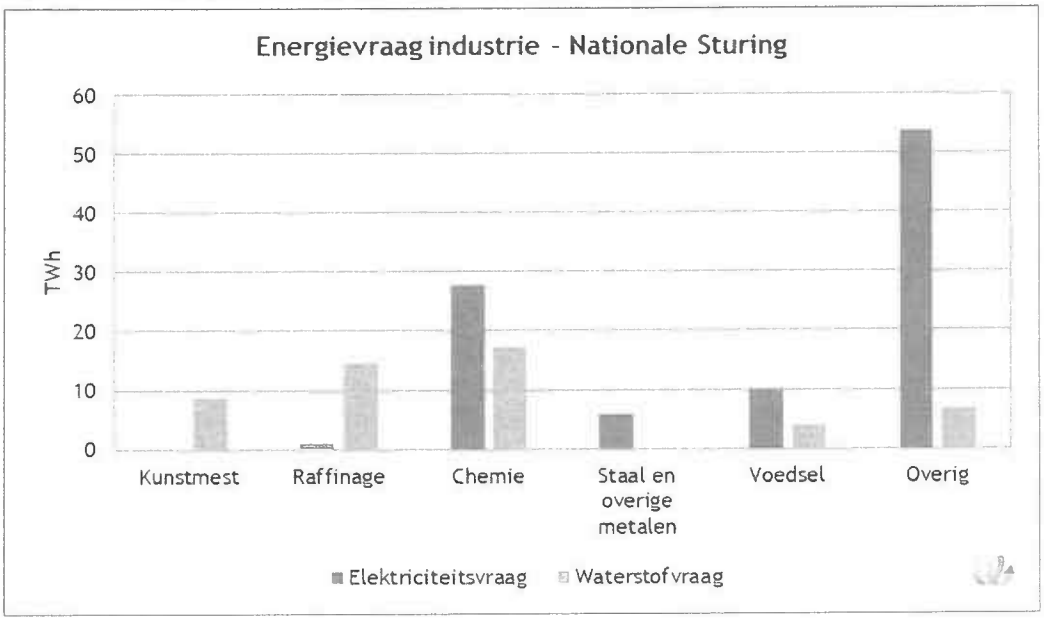
In de cijfers voor de elektriciteitsvraag in 2030, vanuit het rapport 'Alles uit de kast', is 39 TWh elektriciteitsvraag voor de productie van waterstof middels elektrolyse opgenomen. Deze waterstof is noodzakelijk om te voldoen aan de voorgestelde herziening van de Europese Renewable Energy Directive (RED III), waarin eisen worden gesteld aan het gebruik van Renewable Fuels of Non-Biological Origin in de industrie en mobiliteitssector. In het huidige voorstel staat de doelstelling dat 50% van het waterstofgebruik in de industrie groen moet zijn (CE Delft, 2022). Als de waterstofvraag in Nederland afneemt, door het vertrek van de kunstmestindustrie, neemt ook de hoeveelheid groene waterstof die geproduceerd of geïmporteerd moet worden af. Bij een vertrek van de kunstmestindustrie is 8 TWh minder groene waterstof nodig om de doelstelling voor 50% groene waterstof te halen (16 TWh vraag en doelstelling 50% groen).

We nemen aan dat bij 8 TWh minder waterstofvraag ook 8 TWh minder waterstof binnenlands geproduceerd wordt[24]. Hierdoor neemt de verwachte vraag naar elektriciteit en groene waterstof met 14 TWh af[25]. Deze komt dan uit op 192 TWh, in plaats van 206 TWh. In dat geval zou slechts 27 TWh extra CO_2-vrije energieproductie nodig zijn om de klimaatdoelstellingen voor de elektriciteitssector te halen, in plaats van 41 TWh bij het blijven van de kunstmestindustrie in Nederland. In dat geval zou, bij het illustratieve pakket van 'Alles uit de kast' geen extra hernieuwbare opwek op land nodig zijn

2050

De volgende figuren geven een uitsplitsing van de energievraag van de industrie in 2050. In Bijlage 0 zijn ook de effecten op het scenario Internationale Sturing te vinden, met een grotere omvang van de industrie. In deze scenario's wordt al aangenomen dat de kunstmestindustrie en raffinagesector fors zullen krimpen door een afname van de vraag naar hun producten.

Figuur 13 - Uitsplitsing energievraag industrie scenario Nationale Sturing



Het grootste deel van de elektriciteitsvraag komt van de overige industrie (bijvoorbeeld papier- of maakindustrie). De waterstofvraag komt voor een groot deel van de kunstmestindustrie, de raffinagesector en de chemie.

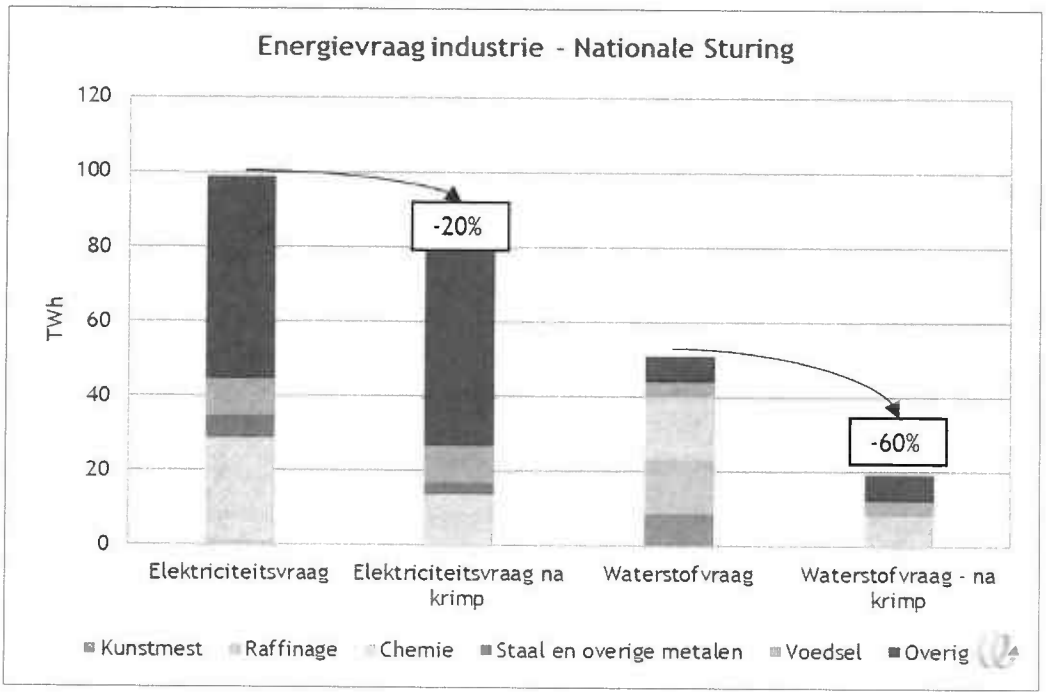
De volgende figuren geven een overzicht van de effecten van krimp van de energie-intensieve industrie in Nederland op de energievraag van de industrie. De elektriciteitsvraag

[24] In de praktijk hangt de productie van groene waterstof ook af van het aantal uur met overschotten aan elektriciteit. Maar als meer waterstof geproduceerd wordt kan deze gebruikt worden voor inzet in regelbare centrales of hoeft minder waterstof geïmporteerd te worden.

[25] Uitgaande van een efficiëntie van elektrolysers van 57%, conform 'Alles uit de kast' (TNO, 2022b).

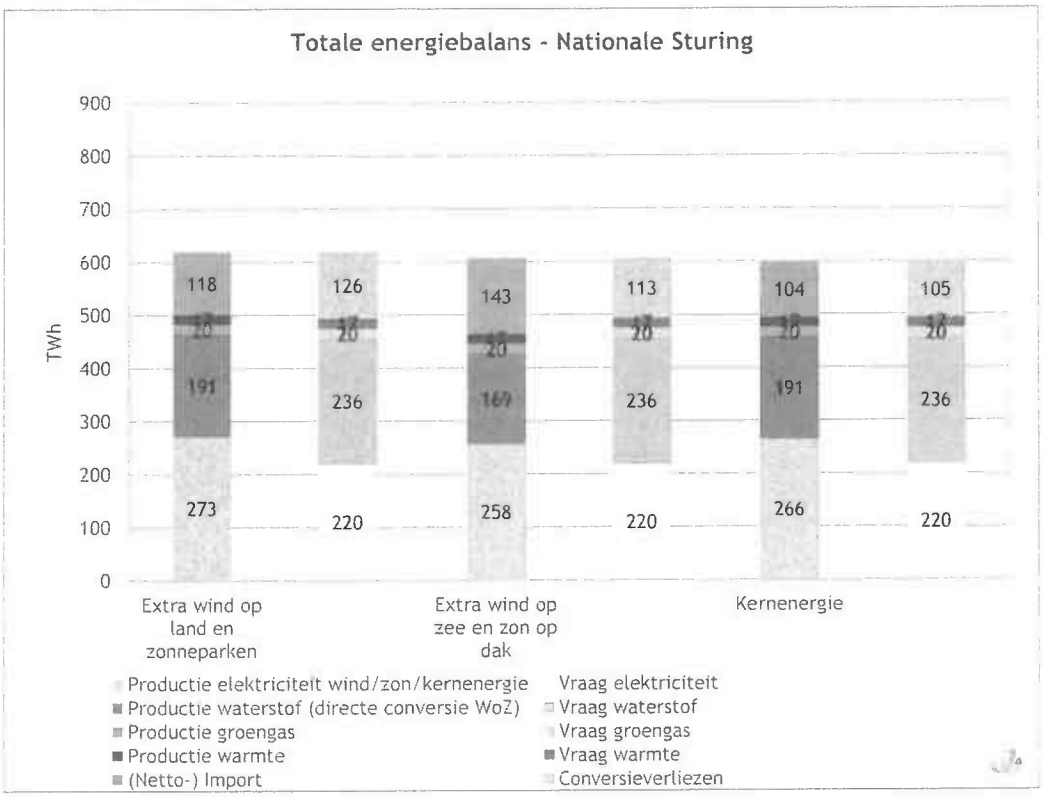
van de industrie neemt hierdoor 20% af. De waterstofvraag van de industrie neemt door krimp van de energie-intensieve industrie in Nederland met 60% af.

Figuur 14 - Effecten krimp energie-intensieve industrie



Figuur 15 geeft een overzicht van de energiebalans bij een krimp van de energie-intensieve industrie. Ten opzichte van de reguliere scenario's, met een grotere energievraag van de industrie, is vanzelfsprekend minder import nodig. Met een krimp van de energie-intensieve industrie is tussen de 17,5% (bij scenario *Kernenergie*) en 25% (bij scenario *Extra wind op zee en zon op dak*) import nodig. Zonder krimp van de energie-intensieve industrie ligt de importbehoefte tussen de 25 en 30%. De importbehoefte neemt dus iets af hierdoor.
Het verschil tussen de scenario's verandert weinig.

Figuur 15 - Totale energiebalans op jaarbasis - krimp industrie



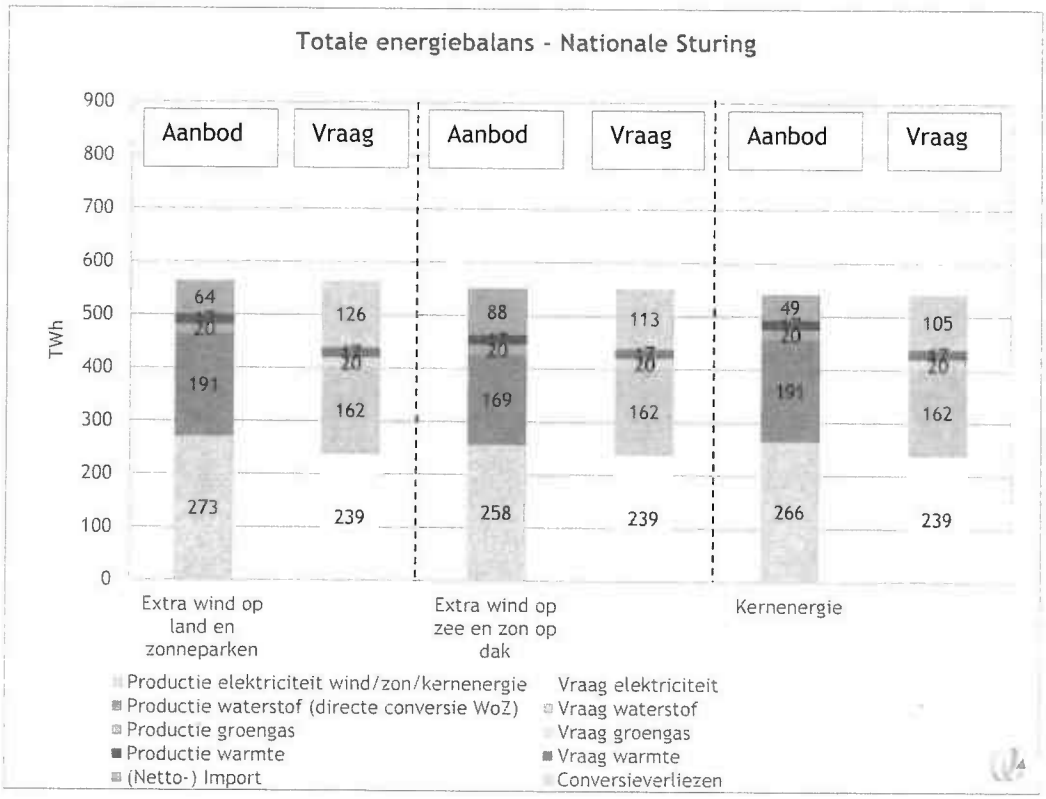
6.2 Krimp internationale scheeps- en luchtvaart in Nederland

Nederland heeft op dit moment een forse brandstofbehoefte voor de lucht- en scheepvaart. Voor scheepvaart worden grote hoeveelheden stookolie gebunkerd in de Nederlandse havens. De luchtvaart heeft een forse vraag naar kerosine, voornamelijk door de vluchtbewegingen bij Schiphol. Beide energievraagscenario's gaan uit van een groei van de omvang van de brandstofvraag van internationale scheeps- en luchtvaart. Dit leidt tot een forse energievraag voor synthetische brandstoffen. Een groei van deze sectoren is echter geen zekerheid, niet op mondiaal niveau en ook niet op nationaal niveau. Daarnaast is het de vraag of deze brandstoffen in de toekomst ook in Nederland getankt gaan worden, aangezien deze brandstoffen elders mogelijk goedkoper geproduceerd kunnen worden.

In deze gevoeligheidsanalyse bekijken we de effecten van krimp van de internationale scheeps- en luchtvaart in Nederland. We gaan uit van een krimp van de omvang van deze beide sectoren van 50%. Een krimp van de energievraag van deze sectoren kan ook komen doordat brandstoffen in andere landen getankt worden.

Bij een krimp van beide sectoren neemt de vraag naar synthetische brandstoffen fors af ten opzichte van het referentiescenario. Figuur 17 geeft een overzicht van de energiebalans bij een krimp van de internationale scheeps- en luchtvaart in Nederland. Ten opzichte van de reguliere scenario's is vanzelfsprekend minder import nodig. Er is tussen de 10% (bij scenario *Kernenergie*) en 15% (bij scenario *Extra wind op zee en zon op dak*) import nodig. Zonder krimp van de internationale scheeps- en luchtvaart ligt de importbehoefte tussen de 25 en 30%.

Figuur 16 - Totale energiebalans op jaarbasis - krimp internationale scheeps- en luchtvaart



Als de internationale scheeps- en luchtvaart verdwijnt (of deze energievraag niet meegeteld wordt bij de importbehoefte) is er in elk van de scenario's geen (netto-) import van energie nodig in Nederland. Bij het vraagscenario Internationale Sturing is er dan nog wel een klein aandeel import van energie nodig, voor de verduurzaming van de industrie.

6.3 Meer vollasturen wind op zee en wind op land

2030

Met meer vollasturen van wind op zee en wind op land produceren de bestaande en geplande windmolens meer elektriciteit dan geprognotiseerd door het PBL in de KEV (PBL, 2021). Uitgaande van het aantal vollasturen van de rekentool van NWEA (gemiddeld 3.114 vollasturen voor wind op land en 4.814 voor wind op zee) ligt de productie van wind op zee in 2030 op 82 TWh (ten opzichte van 77 TWh in de KEV) en van wind op land op 23,5 TWh (ten opzichte van 22,5 TWh in de KEV).

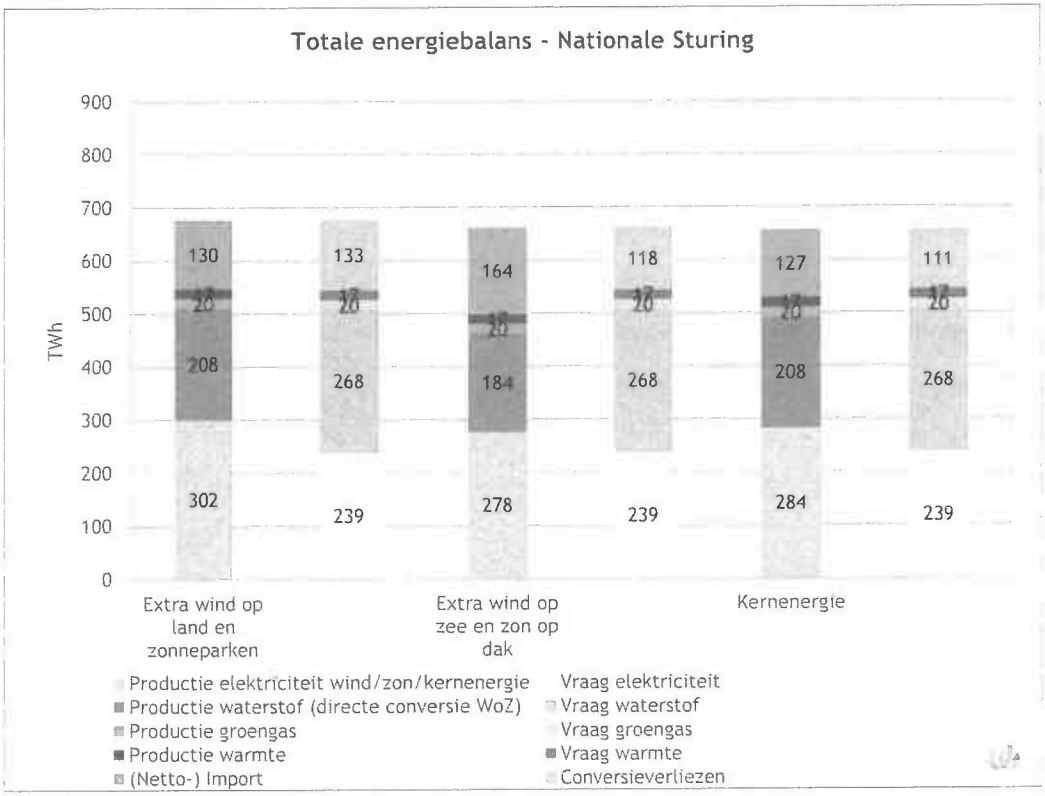
Dit betekent dat de gezamenlijke productie van wind op zee en wind op land in dat geval 6 TWh hoger ligt en dat de opgave voor extra CO_2-vrije productie in 2030 ook lager ligt, op 35 TWh in plaats van 41 TWh. In dat geval zou, bij het illustratieve pakket van 'Alles uit de kast', slechts 4 TWh extra hernieuwbare opwek op land nodig zijn in plaats van 10 TWh. Deze 4 TWh kan, zoals ook voorzien in het illustratief scenario van 'Alles uit Kast', worden ingevuld door extra zon op grote daken.

2050

Als de windmolens op zee en land meer vollasturen hebben kan meer energie geproduceerd worden in Nederland. Hierdoor kan meer waterstof in Nederland geproduceerd worden, om de directe waterstofvraag en de vraag naar synthetische brandstoffen in te vullen[26].

Figuur 17 geeft een overzicht van de energiebalans bij extra vollasturen voor wind op zee en wind op land in 2050 (4.902 vollasturen volgens rekentool NWEA). Ten opzichte van de reguliere scenario's is minder import nodig. Met het hogere aantal vollasturen voor wind op land en wind op zee is tussen de 20% (bij scenario's *Kernenergie* en *Extra wind op land en zonneparken*) en 25% (bij scenario *Extra wind op zee en zon op dak*) import nodig. Met het oorspronkelijke aantal vollasturen ligt de importbehoefte tussen de 25 en 30%. De importbehoefte neemt dus significant af met meer vollasturen van wind op zee en wind op land. Het verschil tussen de scenario's verandert niet significant.

Figuur 17 - Totale energiebalans op jaarbasis - extra vollasturen windmolens



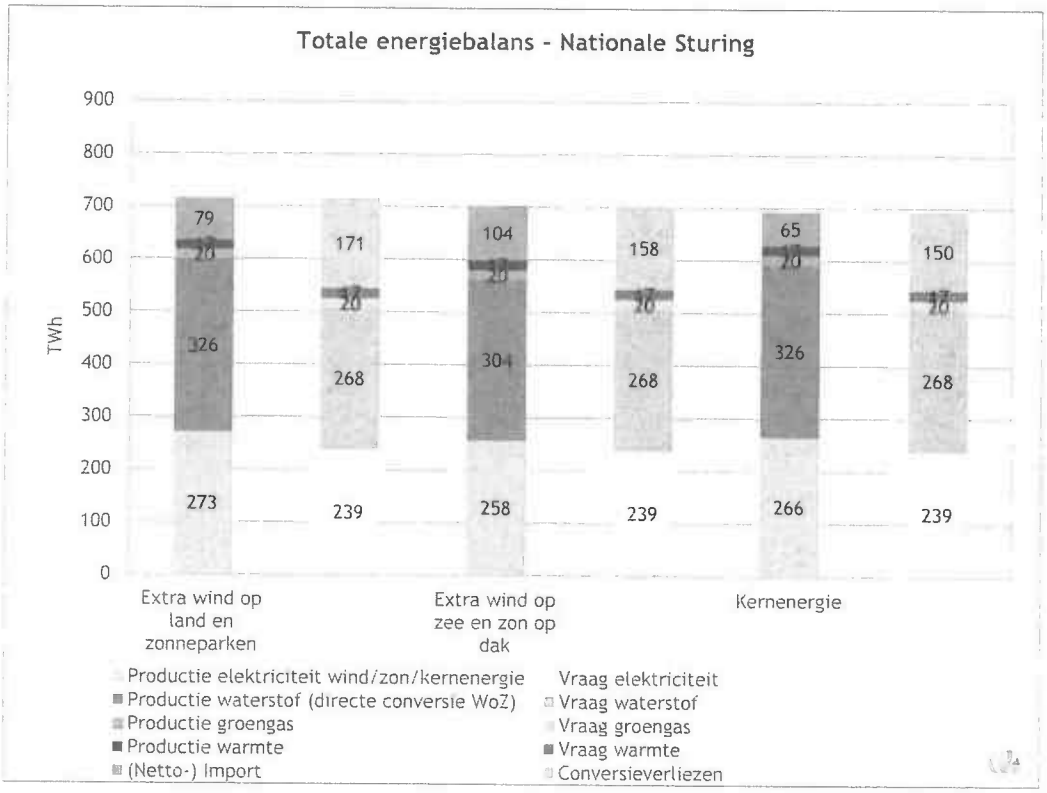
[26] Ook in de scenario's met minder vollasturen kan voldoende elektriciteit geproduceerd worden om aan de binnenlandse vraag te voorzien in Nederland. De extra productie wordt daarom volledig ingezet voor de productie van waterstof.

6.4 Grotere potentie wind op zee

Met meer windmolens op zee kan meer energie geproduceerd worden in Nederland. De extra windmolens kunnen gebruikt worden om waterstof te produceren om de directe waterstofvraag en de vraag naar synthetische brandstoffen in te vullen[27].

Figuur 18 geeft een overzicht van de energiebalans bij 100 GW wind op zee in 2050, voor de Nationale Sturing-scenario's. Ten opzichte van de reguliere scenario's, met 70 GW wind op zee, is vanzelfsprekend minder import nodig. Met 100 GW wind op zee is tussen de 10% (bij scenario *Kernenergie*) en 15% (bij scenario *Extra wind op zee en zon op dak*) import nodig. Bij 70 GW wind op zee ligt de importbehoefte tussen de 25 en 30%. De import-behoefte neemt dus flink af door extra wind op zee. Het verschil tussen de scenario's verandert amper hierdoor.

Figuur 18 - Totale energiebalans op jaarbasis scenario's Nationale Sturing - extra wind op zee



27 Ook in de scenario's met 70 GW wind op zee kan voldoende elektriciteit geproduceerd worden om aan de binnenlandse vraag te voorzien in Nederland. De extra productie wordt daarom volledig ingezet voor de productie van waterstof.

6.5 Uitstellen klimaatdoelstelling 2030 naar 2031

Windparken op zee kunnen in 2050 voldoende elektriciteit produceren voor een klimaatneutraal energiesysteem, ook zonder extra wind op land en zonneparken (scenario *Extra wind op zee en zon op dak)*. Maar de uitrolsnelheid van windparken op zee is een beperkende factor bij het halen van de te verwachten klimaatdoelen voor 2030. Het is naar verwachting niet mogelijk om meer dan de geplande 17 GW wind op zee te realiseren in 2030. Echter, in 2031, een jaar na de klimaatdoelstelling van 2030, wordt een forse hoeveelheid extra wind op zee gerealiseerd, 4 GW extra. Dit leidt tot 18 TWh extra CO_2-vrije elektriciteitsproductie, wat een aanzienlijke bijdrage kan leveren aan de opgave voor extra CO_2-vrije elektriciteit. Als de doelstelling voor 50% groene waterstof in de industrie uitgesteld wordt van 2030 naar 2031, en deze extra productie van windparken op zee meegerekend wordt, dan is slechts 23 TWh extra CO_2-vrije energieproductie nodig. In dat geval zou, bij het illustratieve pakket van 'Alles uit de kast', geen extra wind op land en zonneparken nodig zijn.

Door de klimaatdoelstelling een jaar op te schuiven kan tijd gewonnen worden, waardoor er meer ruimte is om een keuze te maken voor een mix aan CO_2-vrije energiebronnen in 2050. Zo wordt het door het uitstellen van de klimaatdoelstelling makkelijker om te kiezen voor de scenario's *Extra wind op zee en zon op dak* of *Kernenergie*.

Het uitstellen van de doelstelling van 50% groene waterstof van 2030 naar 2031 is een keuze die Nederland niet zelf kan maken. Op dit moment vinden nog onderhandelingen plaats over de hoogte van de groene waterstof doelstelling binnen de EU (naar verwachting 50 %) en het specifieke doel en tijdspad voor Nederland. Het kan een politieke keuze zijn om uitstel aan te vragen, maar deze keuze kan niet alleen door Nederland gemaakt worden. Voor uitstel is overleg nodig met de Europese Commissie. Of Nederland deze toestemming krijgt is onzeker.

Bij de keuze van het uitstellen van de klimaatdoelstelling moet ook in acht worden genomen dat de elektrificatie van de energievraag na 2030 doorzet. De binnenlandse elektriciteitsvraag zal door verdere verduurzaming van de vraag ook fors toenemen richting 2050, van 206 TWh in 2030 tot 450-500 TWh in 2050 (inclusief vraag elektriciteit voor binnenlandse productie waterstof, zie energiebalansen in Paragraaf 2.2.3). Dit komt overeen met een toename van de elektriciteitsvraag van ongeveer 15 TWh per jaar.

7 Conclusies

Het doel van dit onderzoek is om een beeld te schetsen op welke wijze het Nederlandse energiesysteem klimaatneutraal kan worden in 2050 en van de afwegingen tussen verschillende CO_2-vrije energiebronnen zoals wind op land, zonneparken, wind op zee, zon op dak of import van waterstof. De hoofdvraag die hieruit volgt is:

Hoe kunnen de klimaatdoelen voor 2030 en 2050 behaald worden, met en zonder extra windmolens op land en zonneparken, en wat zijn de afwegingen tussen de verschillende CO_2-vrije energiebronnen?

In de voorgaande hoofdstukken zijn we ingegaan op de verschillende deelvragen die gesteld zijn in de inleiding (zie Hoofdstuk 1) om deze hoofdvraag te beantwoorden. Hieronder geven we een overzicht van de belangrijkste conclusies van deze hoofdstukken.

7.1 Mogelijke scenario's klimaatneutraal energiesysteem 2050

In 2050 moet de Nederlandse energievoorziening klimaatneutraal zijn. Dit betekent dat er uitsluitend gebruik gemaakt moet worden van CO_2-vrije energiebronnen.

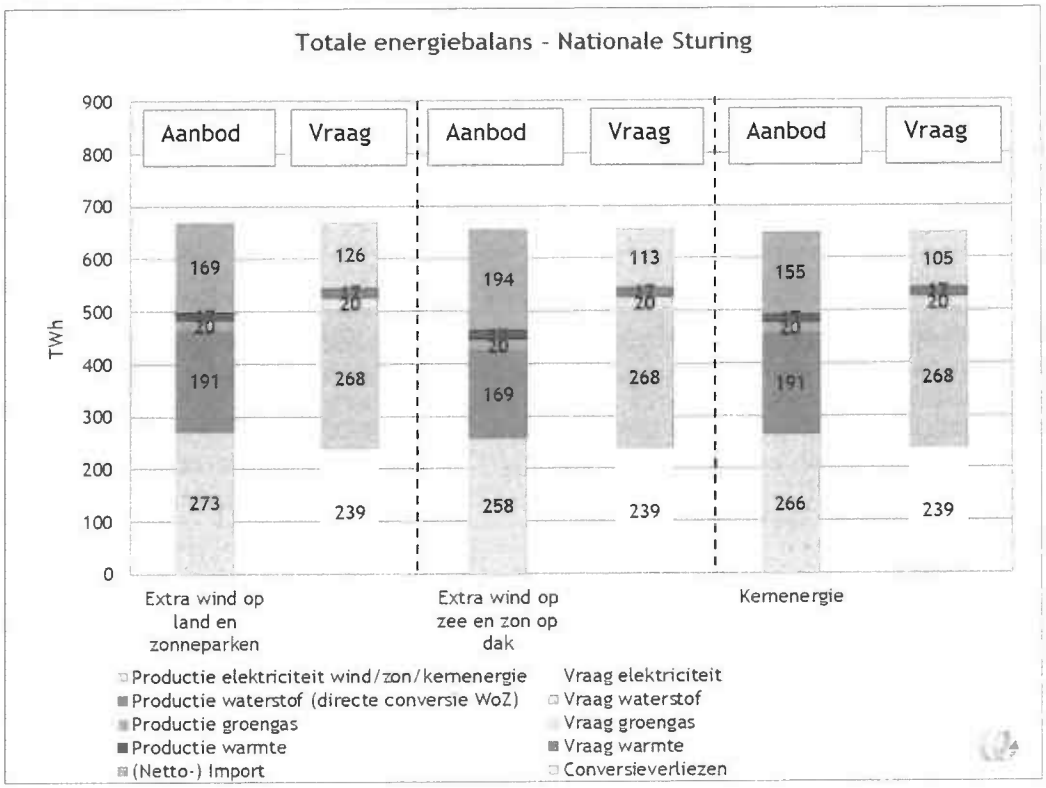
We stellen drie scenario's op voor de invulling van de energievraag. In elk van de varianten nemen we aan dat de ambitie van de RES voor 35 TWh hernieuwbare opwek op land gerealiseerd wordt. En in elk van de scenario's nemen we aan dat de ambitie van 70 GW wind op zee in 2050 gerealiseerd wordt. Maar verder verschillen de scenario's.

We onderscheiden de volgende drie scenario's:

1. **Extra windmolens op land en zonneparken.** In deze variant gaan we uit van groei van het opgestelde vermogen aan windmolens op land en zonneparken bovenop de doelstelling van 35 TWh hernieuwbare opwek op land.
2. **Extra wind op zee en zon op dak.** In deze variant gaan we ervanuit dat er geen groei komt van het opgestelde vermogen aan windmolens op land en zonneparken na het behalen van de doelstelling van 35 TWh hernieuwbare opwek op land. In plaats daarvan wordt extra zon op dak ontwikkeld en wordt een groter aandeel van de energie van windparken op zee gebruikt voor de elektriciteitsvoorziening.
3. **Kernenergie.** In deze variant gaan we ervanuit dat er geen groei komt van het opgestelde vermogen aan windmolens en zonneparken na het behalen van de doelstelling van 35 TWh hernieuwbare opwek op land. In plaats daarvan worden kerncentrales geplaatst.

In elk van deze scenario's gaan we uit van zoveel mogelijk productie van elektriciteit met wind-, zon- en kernenergie (binnen de voorwaarden van de scenario's), totdat het niet meer efficiënt is om extra vermogen van deze bronnen toe te voegen omdat een groot deel van de extra productie dan niet meer direct gebruikt kan worden voor de invulling van de elektriciteitsvraag. Zo is het bijvoorbeeld niet efficiënt om meer dan 100 GW (90 TWh) zon te realiseren tot 2050, ook al is er meer potentie. Daarnaast is het niet efficiënt om alle energie van de 70 GW aan wind op zee als elektriciteit aan land te brengen.

Figuur 19 - Totale energiebalans op jaarbasis scenario's Nationale Sturing



Figuur 19 geeft een overzicht van de energiebalans voor elk van de scenario's.
De belangrijkste conclusies zijn:

- Er zijn voldoende binnenlandse energiebronnen om te voorzien in de eigen elektriciteitsvoorziening voor elk van de scenario's. Door ongelijktijdigheid van vraag en aanbod zijn opslag van energie, conversie van overschotten in elektriciteit en productie met regelbare waterstofcentrales nodig.
- Er zijn echter niet voldoende binnenlandse energiebronnen om de totale binnenlandse energievraag in te vullen. In elk van de scenario's is import van energie nodig, vermoedelijk in vorm van waterstof of afgeleide producten van waterstof, zoals methanol of ammoniak. De omvang van de import verschilt per scenario. Het is de verwachting dat elk van de scenario's haalbaar is.
- Het is niet efficiënt om meer dan 100 GW aan zon (op dak, infrastructuur of veld) in te passen in het energiesysteem. Extra productie kan amper gebruikt worden om de elektriciteitsvraag in te vullen; er ontstaan dan voornamelijk extra overschotten. Deze overschotten kunnen opgeslagen worden in batterijen of omgezet worden in waterstof, maar beide opties zijn bij zon erg duur. 100 GW aan zon kan naar verwachting volledig ingevuld worden met zon op daken en infrastructuur.
- Bij extra windmolens op land hoeft een kleiner aandeel van de windparken op zee gebruikt te worden voor elektriciteitslevering en kunnen op zee meer waterstof of synthetische brandstoffen gemaakt worden. In essentie komt het dus neer op een afweging tussen windmolens op land en extra import van synthetische brandstoffen.
- De wijze van invulling van de toekomstige energievraag heeft ook effect op de benodigde energie-infrastructuur. Hoeveel en welke nieuwe energie-infrastructuur nodig is in de toekomst hangt af van de precieze invulling van het energiesysteem en is niet

kwantitatief in te schatten voor de scenario's. Dit hangt namelijk ook in grote mate af van de ruimtelijke uitwerking van de scenario. Er kunnen wel enkele algemene conclusies getrokken worden. Zoals dat er meer elektriciteitsinfrastructuur op zee nodig is als meer wind op zee ingezet wordt voor de elektriciteitsvoorziening, dat uitbreidingen van de elektriciteitsinfrastructuur op land nodig zijn om nieuwe windmolens en zonneparken op land aan te sluiten en dat er extra uitbreidingen aan laag- en middenspanningsnetten nodig zijn als er extra zonnepanelen op daken of op infrastructuur geplaatst worden.

7.2 Haalbaarheid klimaatdoelstelling 2030

Nederland heeft de doelstelling om zijn uitstoot van broeikasgassen in 2030 met tenminste 55% terug te brengen ten opzichte van 1990. Om deze doelstelling te halen is forse elektrificatie van de energievraag nodig. Maar elektrificatie van de energievraag leidt alleen tot significante reductie van de CO_2-uitstoot als hier ook extra CO_2-vrije elektriciteitsproductie tegenover staat. In het onderzoek 'Alles uit de kast' is onderzocht (Werkgroep Extra Opgave, 2022) hoeveel CO_2-vrije elektriciteit en groene waterstof nodig is om de doelstelling van 55% reductie te kunnen halen.

Uit dit onderzoek volgt dat naar verwachting ruim 40 TWh extra CO_2-vrije energie nodig is, bovenop de huidige plannen voor 2030. Een verdere versnelling van de uitrol van windparken op zee voor 2030 is naar verwachting niet mogelijk, waardoor andere bronnen nodig zijn om deze doelstelling te halen. Deze extra energie moet dus geleverd worden door andere bronnen. De belangrijkste bronnen zijn zon op dak, zonneparken, wind op land, waterstofproductie bij windparken op zee, import van waterstof of ombouw van gascentrales. In het illustratieve pakket van 'Alles uit de kast' wordt 9 TWh ingevuld met productie van waterstof met windparken op zee, 4 TWh met extra kleinschalig zon-pv, 13 TWh met extra (CO_2-vrije) regelbare productie en 5 TWh met waterstofimport. Er is dan nog 10 TWh nodig om de benodigde 41 TWh extra aanbod van CO_2-vrije energie te behalen.

Deze 10 TWh wordt in het illustratieve pakket ingevuld met grootschalige zon (op dak op of op land) of wind op land (Werkgroep Extra Opgave, 2022). Deze 10 TWh kan ook ingevuld worden met import van groene waterstof, maar het is onzeker of de mondiale markt voor groene waterstof in 2030 al van de grond gekomen is. Tegelijkertijd is het niet de verwachting dat al deze groene waterstof in Nederland geproduceerd wordt. De verwachte elektriciteitsvraag voor elektrolysers is 14 TWh, uitgaande van de ambitie van 4 GW aan elektrolysers[28] in plaats van de 7,5 GW die nodig is bij het illustratieve pakker van Alles uit de kast. De verwachte elektriciteitsvraag is dan ongeveer 180 TWh. In dat geval is 15 TWh extra CO_2-vrije elektriciteitsproductie in Nederland nodig. De resterende vraag naar groene waterstof moet dan opgevangen worden met import. In dat geval zou in het illustratieve pakket van 'Alles uit de kast' geen extra wind en zon op land nodig zijn.

In de scenario's *Extra wind op zee en zon op dak* en *Kernenergie* zou de 10 TWh grootschalige zon (op dak op of op land) of wind op land uit het illustratieve pakket vanuit 'Alles uit de kast' (met 7,5 GW elektrolysecapaciteit) ingevuld moeten worden met extra grootschalige zon op dak. Om dit te kunnen realiseren is additioneel stimulerend beleid nodig. Daarnaast zijn extra maatregelen nodig om inpassing in het elektriciteitsnet mogelijk te maken, zoals het aansluiten van zonnepanelen op 50% van het paneelvermogen (nu al een eis bij en het plaatsen van batterijen bij zonnepanelen. Als gekozen wordt om deze

[28] Zie beslisnota bij Kamerbrief inzake voortgang waterstofbeleid. We rekenen met 3.500 draaiuren (TNO, 2022b).



additionele productie in te vullen met alleen zon dan kan 70% van deze productie gebruikt worden voor het invullen van de elektriciteitsvraag, de rest is overschot. Bij een combinatie van wind op land en zon kan een iets groter aandeel van de additionele productie gebruikt worden voor het invullen van de elektriciteitsvraag, ongeveer 75%.

Er zijn enkele onzekerheden en politieke keuzes die impact hebben op benodigde hoeveelheid extra CO_2-vrije elektriciteitsproductie in 2030. Dit gaat onder meer om de onzekerheid rondom het aantal vollasturen van wind op land en wind op zee. Als deze hoger uitvallen dan nu aangenomen wordt in de berekeningen van het PBL, dan is minder extra CO_2-vrije energieproductie nodig (6 TWh minder). Daarnaast is het een politieke keuze of alle energie-intensieve industrie in Nederland blijft en of de doelstelling uitgesteld wordt naar 2031. Deze keuzes kunnen zorgen dat minder CO_2-vrije energieproductie gerealiseerd hoeft te worden richting 2030. Indien de kunstmestindustrie uit Nederland vertrekt, is 28 TWh minder CO_2-vrije energieproductie nodig en bij het uitstellen van de doelstelling naar 2031 is 18 TWh minder CO_2-vrije energieproductie nodig.

7.3 Afwegingen

7.3.1 Maatschappelijke kosten

De negatieve effecten van wind en zon op land op omwonenden vertalen zich in een daling van huizenprijzen van nabijgelegen woningen. Deze externe kosten zijn in grote mate afhankelijk van de locatie en de mate van clustering van de windmolens en zonneparken. Bij een grote mate van clustering in dunbevolkte gebieden is sprake van veel minder externe kosten. Dit heeft vanuit maatschappelijk kostenperspectief dus de voorkeur. Door de externe kosten van wind en zon op land zijn de externe kosten het hoogst voor het scenario *Extra wind op land en zonneparken*. In vergelijking met de totale productiekosten zijn de externe kosten relatief beperkt. Het gaat dan om enkele procenten.

Als je naar de totale maatschappelijke kosten van energieproductie kijkt, dan lijkt het scenario *Extra wind op zee en zon op dak* het goedkoopst uit te vallen. Maar dit is in grote mate afhankelijk van het verschil in kosten tussen binnenlandse productie met windmolens op land en import van waterstof. Er is nog veel onzekerheid over de ontwikkeling van de prijs van transport van geïmporteerde waterstof. Als binnenlandse productie van energie relatief goedkoop wordt ten opzichte van import van waterstof of synthetische brandstoffen, dan heeft het scenario *Extra wind op land en zonneparken* iets lagere maatschappelijke kosten.

7.3.2 Importbehoefte

Als er gekozen wordt om geen wind op land en zonneparken meer te realiseren, bovenop de ambitie van de RES, dan heeft dit impact op de importbehoefte van energie in Nederland. In elk scenario is import van energie nodig, maar de importbehoefte is het grootst in het scenario *Extra wind op zee en zon op dak*. In het scenario *Extra wind op zee en zon op dak*, waar geen extra wind en zon op land gerealiseerd worden, is de importbehoefte bij het vraagscenario Nationale Sturing 30%. In het scenario *Extra wind op land en zonneparken* is de importbehoefte 25%. Met inzet van kernenergie kan de importbehoefte van energie nog verder teruggebracht worden, al is in dat geval wel import van uranium noodzakelijk (dat is niet meegenomen in deze analyse).

De omvang van de importbehoefte is afhankelijk van de energievraag en de binnenlandse productie, maar ook van bepaalde ontwikkelingen en politieke keuzes. In een gevoeligheids-



analyse hebben we gekeken naar de effecten van het aantal vollasturen van wind op land en wind op zee, krimp van de energie-intensieve industrie en een grotere potentie van wind op zee op de importbehoefte. Tabel 9 geeft een overzicht van de importafhankelijkheid bij elk van de gevoeligheidsanalyses, als aandeel van de totale energievraag.

Tabel 9 - Aandeel importafhankelijkheid energievraag 2050

Gevoeligheidsscenario	Extra wind op land en zonneparken	Extra wind op zee en zon op dak	Kernenergie
Basisscenario	25%	30%	25%
Krimp energie-intensieve industrie	20%	25%	17,5%
Krimp internationale scheeps- en luchtvaart	10%	15%	10%
Meer vollasturen wind op zee en wind op land	20%	25%	20%
Grotere potentie wind op zee	10%	15%	10%

Elk van deze ontwikkelingen verlagen de importbehoefte, maar in elk geval blijft Nederland deels afhankelijkheid van import. En de verschillen tussen de drie scenario's (*Extra wind op land en zonneparken, Extra wind op zee en zon op dak* en *Kernenergie)* veranderen hierdoor niet. Dit betekent dat het uitsluiten van wind en zon op land altijd leidt tot meer import-behoefte.

7.3.3 Overige afwegingen

Bij de afweging tussen CO_2-vrije energiebronnen spelen ook sociale overweging. Wind en zon op land kunnen zorgen voor verminderd draagvlak voor de energietransitie, aangezien ze door omwonenden als last worden ervaren. Dit geldt een stuk minder voor wind op zee, zon op daken en import van energie. Lokaal eigenaarschap van windmolens op land, zon op daken en zonneparken kan mogelijk ook sociale voordelen opleveren. Zo kan het mogelijk bijdragen aan de gemeenschapszin van lokale gemeenschappen, voordelen opleveren voor lokale economieën en bijdragen aan een eerlijkere verdeling van de opbrengsten van de energietransitie (Horstink, L. et al., 2019). Tegelijkertijd kan het ook, bij onvoldoende draagvlak en rechtvaardige verdeling van lusten en lasten, leiden tot tweespalt in lokale gemeenschappen. De sociale aspecten zijn verder niet onderzocht in dit onderzoek.



Literatuur

Berenschot & Kalavasta, 2020.*Klimaatneutrale Energiescenario's 2050 : Scenariostudie ten behoeve van de integrale infrastructuurverkenning 2030-2050,* Utrecht: Berenschot.

Buck Consultants & CE Delft, 2021.*Potential for Hydrogen hub Schelde-Delta region.*

CE Delft, 2018.*Waterstofroutes Nederland : Blauw, groen en import,* Delft: CE Delft.

CE Delft, 2020a.*Kosten zontoepassingen: Methode om private en maatschappelijke kosten te vergelijken,* Delft: CE Delft.

CE Delft, 2020b.*Potentieel van lokale biomassa en invoedlocaties van groengas : Een verkenning voor 2030,* Delft: CE Delft.

CE Delft, 2020c.*Verkenning ontwikkeling CO2-vrije flexibele energietechnieken,* Delft: CE Delft.

CE Delft.2021.Windenergie voor elektrificatie: Bij welke elektriciteitsprijzen gaat het elektrificatiepotentieel in de industrie maximaal benut worden?, Windenergie voor elektrificatie.

CE Delft, 2022.*50% green hydrogen for Dutch industry : Analysis of consequences draft RED3,* Delft: CE Delft.

Decisio & Witteveen+Bos, 2018.*Integrale kosten-batenstudie vervolgroutekaart windenergie op zee,* Amsterdam: Decisio.

Delft., C. & Pondera Consult, 2023.*Integrale Effectenanalyse Programma Energiehoofdstructuur.*

Dröes, M. I. & Koster, H. R. A., 2021. Wind turbines, solar farms, and house prices. *Energy Policy,* 155, 112327.

ECN, 2018.*Scoping analysis of the potential yield of the Hollandse Kust (noord) wind farm and the influence on the existing wind farms in the proximity,* Petten: ECN.

Ecofys, 2018.*Kostprijs van zon-pv en wind in 2030*: Ecofys.

EFTI & Decisio, 2016.*Toeristisch-economische potentie windparken gemeente Emmen ; Onderzoek naar de impact van windparklocaties op het toerisme*: European Tourism Futures Institute (EFTI) ; Decisio.

Generation.Energy.2021.Ruimtelijk potentieel van zonnestroom in Nederland", TKI Urban Energy www.topsectorenergie.nl - Ruimtelijk potentieel van zonnestroom in Nederland.pdf.

Generation.Energy & PosadMaxwan, 2020.*Ruimtelijke uitwerking Energiescenario's,* Den Haag: PosadMaxwan.

Horstink, L., Luz, G., Soares, M. & Ng, K.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 15-5-2019 www.ec.europa.eu/research/participants/documents/.

IRENA.2020. *Webinar Wind and Solar* [Online] www.irena.org mei 2021.

NAO, 2017.*Hinkley Point C,* London: National Audit Office (NAO).

Netbeheer Nederland.2021.Het Energiesysteem van de Toekomst: Integrale Infrastructuurverkenning 2030 - 2050, Netbeheer Nederland www.netbeheernederland.nl/Toekomstscenario's.pdf.

PBL, 2021.*Klimaat- en energieverkenning (KEV) 2021,* Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving (PBL).

PBL, 2022.*Klimaat- en Energieverkenning (KEV) 2022,* Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving (PBL).

Quintel.2021.Energy Transition Model, www.pro.energytransitionmodel.com.

TNO, 2022a.*De verwachte impact van windturbines op huizenprijzen in Nederland. Een ruimtelijke analyse voor de periode 2020-2030,* Den Haag: TNO.

TNO, 2022b.*Extra opgave elektriciteitsvoorziening 2030,* Amsterdam: TNO.

Van Dorp, J.2019.The Hinkley Point C case: is nuclear energy expensive?, 23 decmber 2019, www.medium.com/generation-atomic/the-hinkley-point-c-case-is-nuclear-energy-expensive.

Werkgroep Extra Opgave.2022.Alles uit de kast : Een verkenning naar de opgaven voor het Nederlandse elektriciteitssysteem van 2030, Uitvoeringsoverleg Elektriciteit, www.open.overheid.nl/rapport-alles-uit-de-kast-eindrapportage-werkgroep-extra-opgave.pdf.

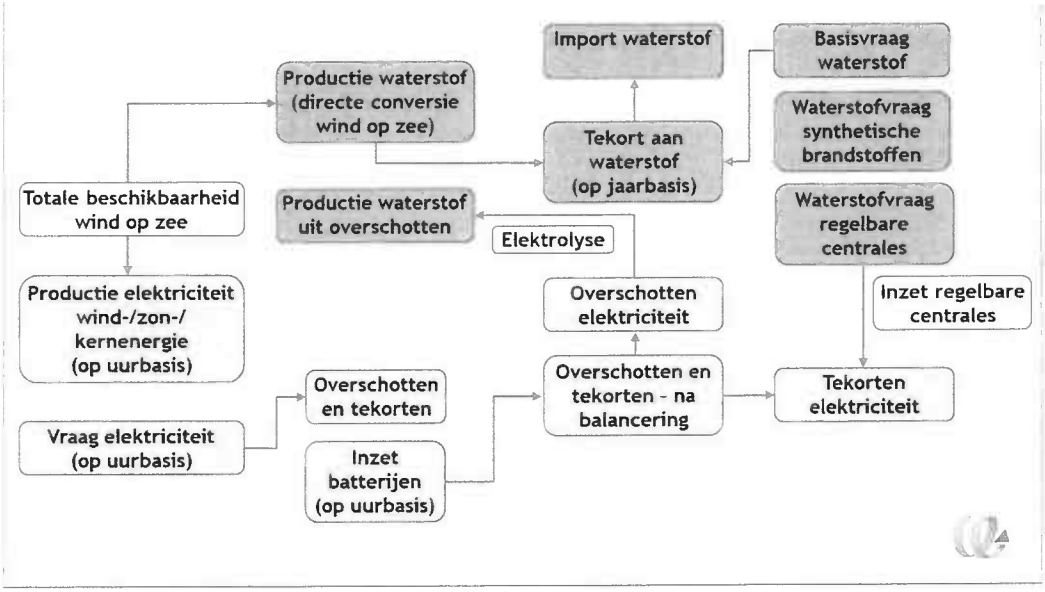
A Modellering energiescenario's

In deze bijlage gaan we uitgebreid in op de modellering van de energiescenario's. We geven een beschrijving van de werking van het model. Vervolgens gaan we in op de aannames rondom energievraag en bespreken we de optimalisatie van energieproductie.

A.1 Werking model

Figuur 20 geeft een schematische weergave van de modellering van de elektriciteitsvoorziening en de waterstofvoorziening. De elektriciteitsvoorziening rekenen we door op uurbasis. Dit is noodzakelijk om de ongelijktijdigheid van vraag en productie en de effecten daarvan op de inzet van waterstofcentrales en elektrolysers goed mee te nemen. Bij waterstof is er ook ongelijktijdigheid tussen vraag en aanbod, maar het is de verwachting dat daar vraag en aanbod gebalanceerd kan worden met waterstofopslag, zonder dat dit grote effecten heeft op de energiebalans (alleen kleine energieverliezen bij opslag). Daarom is het daar niet noodzakelijk om een doorrekening op uurbasis te maken.

Figuur 20 - Schematische weergave energiemodel elektriciteit en waterstof



Het doel van het model is om de inzet van verschillende productiebronnen voor het invullen van de energievraag te bepalen. Het model balanceert vraag en aanbod van elektriciteit op uurbasis en vraag en aanbod van waterstof op jaarbasis.

Het model heeft enkele inputs:

- De vraag naar elektriciteit (op uurbasis) en waterstof op jaarbasis is een input voor het model, uit het ETM[29] (Quintel Intelligence, 2022). De uurlijkse elektriciteitsvraag is gebaseerd op het weerjaar 2015. Het gaat hier om de directe vraag naar elektriciteit en waterstof. De vraag naar waterstof voor elektriciteitsproductie (met regelbare centrales) en de vraag naar elektriciteit voor waterstofproductie (met elektrolyse) worden berekend in het model en zijn afhankelijk van de productie.
- Vermogens van niet-regelbare elektriciteitsproductie (wind op zee, wind op land, zon op dak/infra, zonneparken, kernenergie).
- Productieprofielen voor alle niet-regelbare bronnen, uit het ETM (Quintel Intelligence, 2022). Deze productieprofielen zijn ook gebaseerd op het weerjaar 2015.
- Het totale beschikbare vermogen voor wind op zee.

Hierna geven we een omschrijving van de stappen die doorlopen worden in het model:

- Op basis van de vermogens van niet-regelbare elektriciteitsproductie en de productieprofielen van al deze bronnen , wordt de productie van niet-regelbare elektriciteitsbronnen per uur berekend. Dit wordt gecombineerd met de elektriciteitsproductie per uur. Per uur wordt zo berekend of er overschotten of tekorten van elektriciteit zijn en wat de omvang daarvan is.
- Op basis van de uurlijkse tekorten en overschotten wordt een inschatting gemaakt de inzet van batterijen, op uurbasis. Deze batterijen vlakken de overschotten en tekorten van elektriciteit af, maar kunnen niet alle overschotten en tekorten uitbalanceren.
- Op basis van de overschotten en tekorten per uur, na balancering met batterijen, wordt een inschatting gemaakt van de overschotten en tekorten van elektriciteit op jaarbasis.
- De overschotten van elektriciteit worden omgezet in waterstof. Dit wordt meegenomen als aanbod aan de waterstofkant van het model. Hier gaat een deel van de energie verloren. We gaan uit van een efficiëntie van 67%, conform II3050 (Netbeheer Nederland, 2021).
- De tekorten van elektriciteit moeten worden ingevuld met productie van waterstofvraag. Dit wordt meegenomen als vraag aan de waterstofkant van het model. Hier gaat een deel van de energie verloren. We gaan uit van een efficiëntie van 73%, conform II3050 (Netbeheer Nederland, 2021).
- Bij de inputs is bepaald welk vermogen aan windparken op zee ingezet wordt voor productie van elektriciteit. De rest van de windenergie wordt ingezet voor waterstofproductie. Op basis van het totale beschikbare vermogen voor wind op zee en het vermogen wind op zee voor elektriciteitsproductie wordt bepaald hoeveel vermogen wind op zee ingezet wordt voor waterstofproductie op zee. Hier gaat een deel van de energie verloren. We gaan uit van een efficiëntie van 67%, conform II3050 (Netbeheer Nederland, 2021).
- Vervolgens wordt de energiebalans van waterstof opgemaakt. Het verschil tussen de vraag naar waterstof (directe vraag en vraag waterstofcentrales) en het aanbod van waterstof (elektrolyse met overschotten elektriciteit en directe conversie van wind op zee). Het verschil tussen de vraag en aanbod van waterstof wordt ingevuld met import.

Daarnaast bepalen we in het model de vraag en het aanbod van groengas en warmte. Hiervoor nemen we direct de cijfers vanuit het ETM over (Quintel, 2021).

[29] Energietransitiemodel.



A.2 Optimalisatie energieproductie

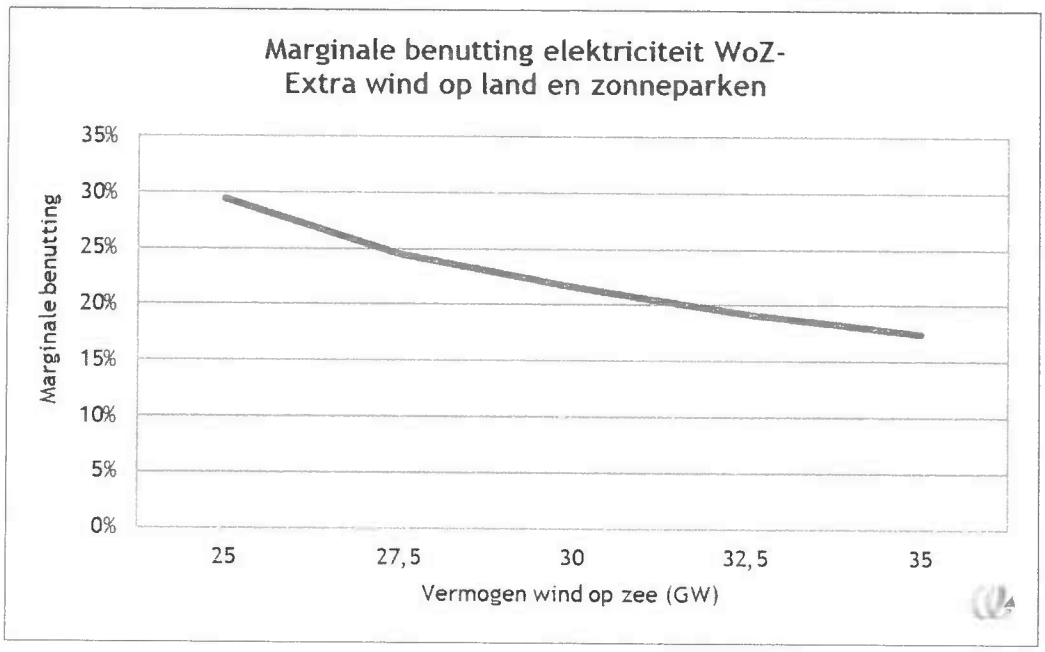
Bij het energiemodel, omschreven in de vorige paragraaf, zijn de vermogens van niet-regelbare elektriciteitsproductie een input. Bij een inefficiënte verdeling tussen de verschillende bronnen kan een groot deel van de elektriciteit niet direct gebruikt worden. Om realistische en efficiënte scenario's te modelleren, hebben we een optimalisatie gedaan voor de vermogens van verschillende bronnen, en dan met de vermogens voor wind (op land en op zee) en zon. De optimalisaties worden hieronder beschreven.
Bij de optimalisatie van verschillende bronnen kijken we naar de **marginale benutting** van de elektriciteitsproductie. Bij de marginale benutting bepalen we welk deel van het laatste kWh-elektriciteitsproduct (de marginale productie) direct gebruikt kan worden voor invulling van de elektriciteitsvraag. Het overige deel van de additionele productie is overschot en kan worden weggegooid, opgeslagen in batterijen of omgezet worden in waterstof.

A.2.1 Nationale Sturing

Bij de Nationale Sturing-scenario's gaan we uit van zoveel mogelijk productie van elektriciteit met wind, zon en kernenergie, totdat het niet meer efficiënt is om extra vermogen van deze bronnen toe te voegen (omdat een groot deel van de extra productie dan niet meer direct gebruikt kan worden voor de invulling van de elektriciteitsvraag).

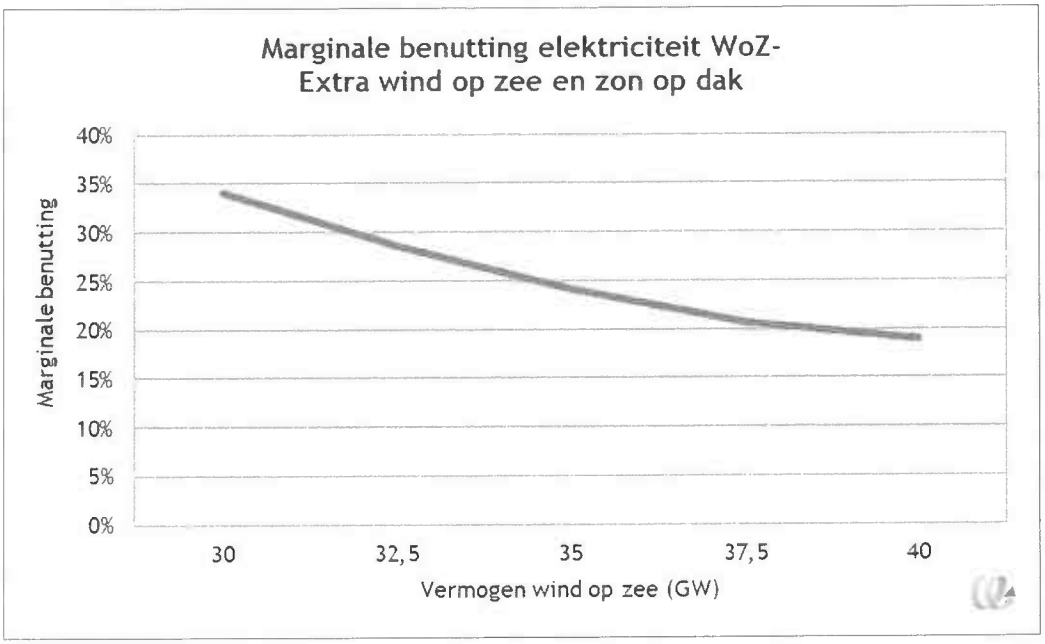
Voor het Nationale Sturing-scenario *Extra wind op land en zonneparken* nemen we voor zon op dak (49 GW), zon op veld (57 GW) en wind op land (20 GW) de aannames van het oorspronkelijke scenario van II3050 over (Berenschot & Kalavasta, 2020). Vervolgens kijken we hoeveel wind op zee hierbij nog efficiënt ingezet kan worden voor de productie van elektriciteit, met een minimum van 21 GW (plannen tot 2031). Figuur 21 geeft de marginale benutting van de productie (welk deel van de extra productie kan gebruikt worden voor invulling van elektriciteitsvraag) bij een toenemend vermogen aan wind op zee. Het figuur laat zien dat de marginale benutting afneemt bij een toenemend vermogen. We gaan in het scenario *Extra wind op land en zonneparken* uit van een vermogen van wind op zee van 27,5 GW, aangezien het totale opgestelde vermogen van wind op land en wind op zee samen dan gelijk is aan de piekvraag in het jaar. Bij een hoger vermogen van wind op zee daalt de marginale benutting tot onder de 25%.

Figuur 21 - Marginale benutting elektriciteit wind op zee, scenario Nationale Sturing *Extra wind op land en zonneparken*

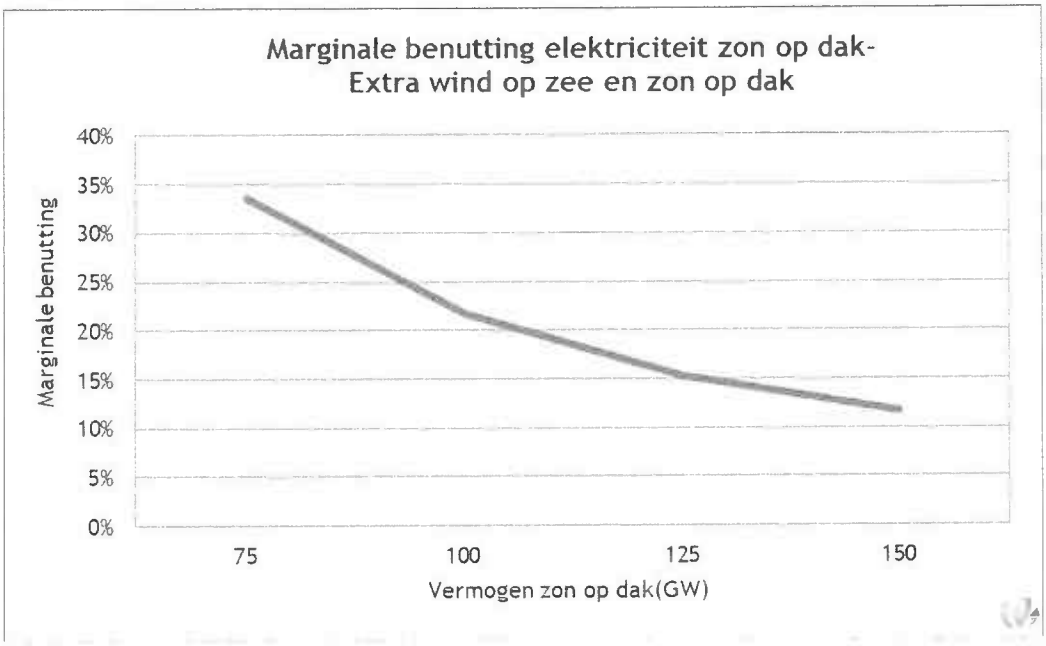


Voor het Nationale Sturing-scenario *Extra wind op zee en zon op dak* gaan we uit van de huidige prognoses voor zon op veld (7 GW) en wind op land (7,5 GW). Vervolgens onderzoeken we hoeveel wind op zee en zon op dak hierbij nog efficiënt ingezet kan worden voor de productie van elektriciteit. Voor zon op dak (57 GW) en wind op zee (27,5 GW) nemen we de vermogens van het scenario *Extra wind op land en zonneparken* als ondergrens, aangezien we in dit scenario uitgaan van extra wind op zee en zon op dak. Eerst hebben we bepaald hoeveel wind op zee nuttig gebruikt kan worden. We bepalen eerst hoeveel wind op zee nuttig toegevoegd kan worden (Figuur 22). We gaan uit van 32,5 GW wind op zee, aangezien bij een hoger vermogen de marginale benutting tot onder de 25% daalt. Vervolgens bepalen we, bij een vermogen wind op zee hoeveel zon op dak nuttig toegevoegd kan worden (Figuur 23). We gaan uit van 100 GW zon op dak, aangezien bij een hoger vermogen de marginale benutting tot onder de 20% daalt.

Figuur 22 - Marginale benutting elektriciteit wind op zee, scenario Nationale Sturing *Extra wind op zee en zon op dak*



Figuur 23 - Marginale benutting elektriciteit zon op dak scenario Nationale Sturing *Extra wind op zee en zon op dak*



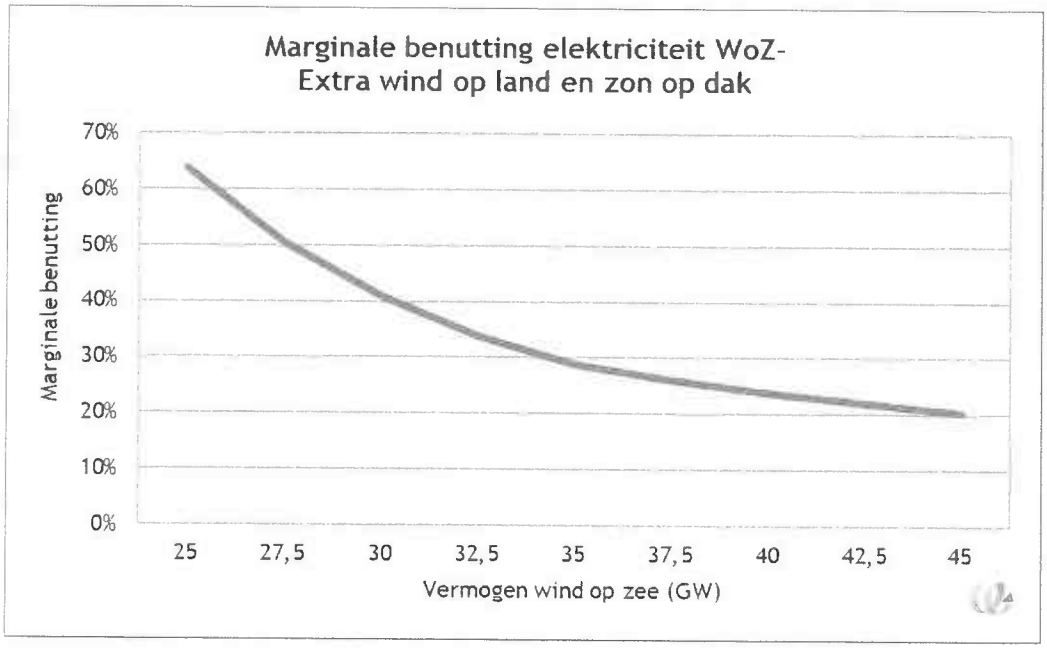
Bij het scenario *Kernenergie* gaan we ook uit gaan we uit van de huidige prognoses voor zon op veld (7 GW) en wind op land (7,5 GW). Voor zon op dak en wind op zee sluiten we aan bij het scenario *Extra wind op land en zonneparken.* We gaan uit van 8,3 GW kernenergie (maximale potentie binnen huidige reserveringen).

A.2.2 Internationale Sturing

Bij de Internationale Sturing-scenario's nemen we aan dat een aanzienlijk deel van de elektriciteit geproduceerd wordt met waterstofcentrales die gebruik maken van geïmporteerde waterstof. Dit betekent dat in deze scenario's niet het maximale potentieel voor wind, zon en kernenergie, dat efficiënt gebruikt kan worden, benut wordt.

Voor het Internationale Sturing-scenario *Extra wind op land en zonneparken* nemen we voor zon op dak (18 GW), zon op veld (34 GW) en wind op 10 GW) de aannames van het oorspronkelijke scenario van II3050 over (Berenschot & Kalavasta, 2020). Vervolgens kijken we hoeveel wind op zee hierbij nog efficiënt ingezet kan worden voor de productie van elektriciteit, met een minimum van 21 GW (plannen tot 2031). Figuur 24 geeft de marginale benutting van de productie (welk deel van de extra productie kan gebruikt worden voor invulling van elektriciteitsvraag) bij een toenemend vermogen aan wind op zee. Het figuur laat zien dat de marginale benutting afneemt bij een toenemend vermogen. We gaan in het scenario *Extra wind op land en zonneparken* uit van een vermogen van wind op zee van 37,5 GW, aangezien het totale opgestelde vermogen van wind op land en wind op zee samen dan gelijk is aan de piekvraag in het jaar. Bij een hoger vermogen van wind op zee daalt de marginale benutting tot onder de 25%.

Figuur 24 - Marginale benutting elektriciteit wind op zee, scenario Internationale Sturing *Extra wind op land en zonneparken*



Bij het Internationale Sturing-scenario *Extra wind op zee* gaan we uit van de huidige prognoses voor zon op veld (7 GW) en wind op land (7,5 GW). In dit scenario gaan we, ten op-

zichte van het scenario *Extra wind op land en zonneparken*, uit van inwisseling van wind op land door wind op zee en vervanging van zon op veld door zon op dak, aangezien in deze scenario's niet het maximale potentieel voor wind, zon en kernenergie benut wordt.
We gaan uit van 2,5 GW wind op zee extra ten opzichte van het scenario *Extra wind op land en zonneparken*, aangezien er 2,5 GW wind op land minder is. We gaan uit van een 27 GW zon op dak extra, aangezien er 27 GW zon op land minder is.

Bij het scenario *Kernenergie* gaan we uit van de huidige prognoses voor zon op veld (7 GW) en wind op land (7,5 GW). Voor zon op dak en wind op zee sluiten we aan bij het scenario *Extra wind op land en zonneparken*. We gaan uit van 3,3 GW kernenergie (huidige plannen kabinet).

B Aannames kostenberekeningen

B.1 Externe kosten

B.1.1 Wind op land

De totale externe kosten van windmolens op land zijn afhankelijk van de hoeveelheid woningen binnen 2,5 kilometer en daarmee van de locatie van de windmolens. De externe kosten van windmolens liggen een stuk lager in dunbevolkte gebieden. Aangezien met name de eerste windturbine effect heeft op de woningwaarde is het totale welvaartsverlies ook afhankelijk van de concentratie van windmolens. Daarom hebben we onderscheid gemaakt tussen spreiding en clustering van windmolens. Voor de berekening van de externe kosten zijn we uitgegaan van de specifieke situatie die bekeken is in de Integrale Effectenanalyse van het Programma Energiehoofdstructuur.

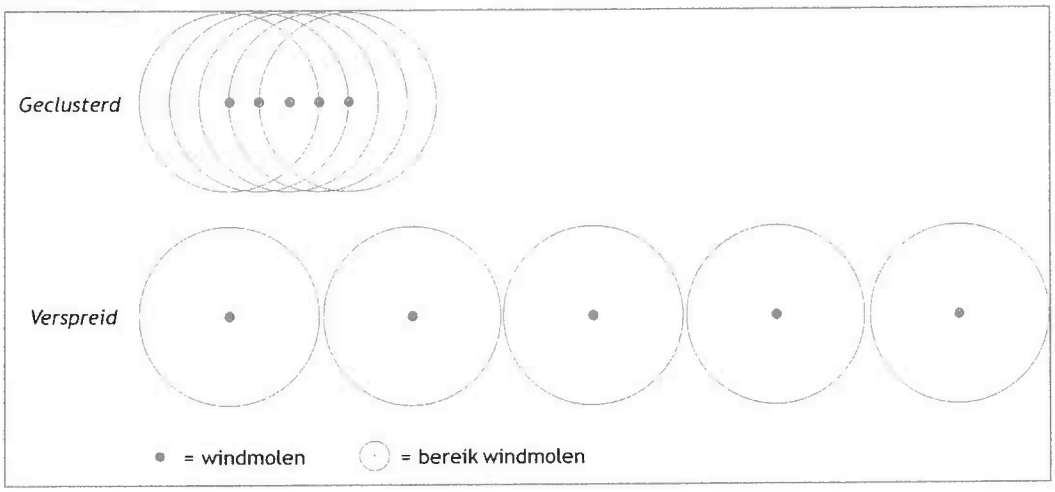
De literatuur biedt voldoende kengetallen om de effecten op omwonenden te bepalen. Zo is er een waardedaling zichtbaar voor woningen in Nederland tot 2,5 kilometer van een windmolen (Dröes, M. I. & Koster, H. R. A., 2021). Deze daling is groter naarmate een windturbine dichter bij een woning staat en naarmate de windturbine hoger is. Voor windmolens 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 windmolens op woningprijzen in Nederland (TNO, 2022a). Er wordt aangetoond dat windmolens 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.

Aangezien met name de eerste windturbine effect heeft op de woningwaarde zal het totale welvaartsverlies bij spreiding van hernieuwbare opwek groter zijn. Deze aanname is in lijn met EFTI & Decisio, (2016), die aangeven dat de landschappelijke het kleinst is bij concentratie van turbines.

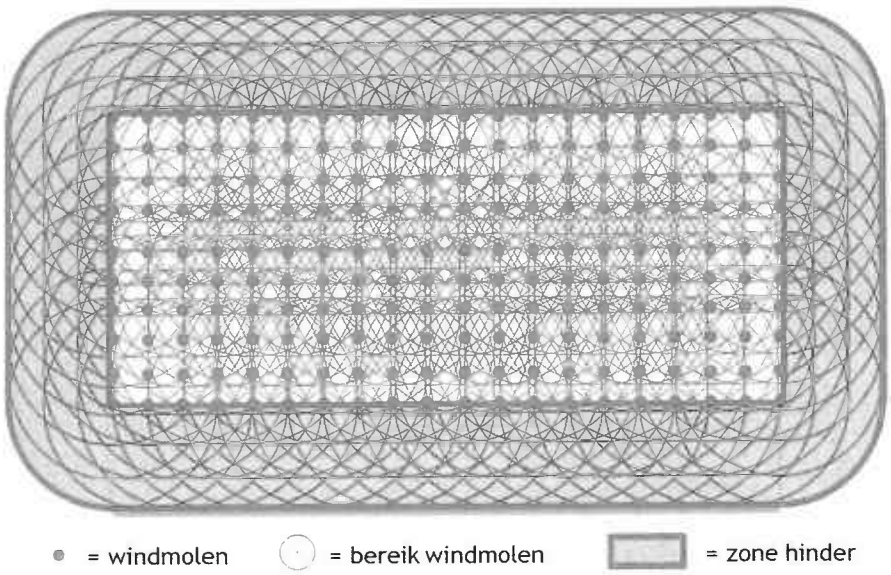
Hierbij moet de kanttekening worden geplaatst dat bovengenoemde onderzoeken niet hebben gekeken naar de grootte van een windpark. Het is immers niet ondenkbaar dat de externe kosten hoger zijn wanneer er een groot windpark voor de deur staat dan wanneer dit er slechts één of enkele windturbines zijn. Om hier niet aan voorbij te gaan, hebben we bij clustering van windmolens gekozen voor een potentiële waardedaling van 10 tot 20% binnen een straal van 2,5 kilometer.

In de analyse is de grootte van windparken als startpunt genomen. Hierbij is uitgegaan van een gemiddeld indirect ruimtegebruik van 12 MW per km^2. Figuur 25 illustreert het verschil in impact bij clustering en spreiding. Figuur 26 toont aan hoe de impactzone van een windpark is benaderd. Een overzicht van de totale externe kosten is te zien in Tabel 10. Voor de berekening van de totale externe kosten is ingeschat hoeveel woningen binnen 2 en 2,5 km van de windmolens staan.

Figuur 25 - Illustratie impact clustering en spreiding van vijf windmolens



Figuur 26 - Illustratie impact windpark



Tabel 10 - Overzicht externe kosten windmolens

	Spreiding windmolens		Clustering windmolens	
	Laag	Hoog	Laag	Hoog
Totaal (mln €)	13.230	17.395	1.095	2.737
LCoE (€ ct/kWh)	0,6	0,6	0,1	0,2

Naast externe kosten voor omwonenden kan er door recreanten ook welvaartsverlies worden ervaren als gevolg van hinder die hun beleving beïnvloed. De literatuur biedt geen kwantitatieve studies naar de effecten hiervan. Wel volgt uit de kwalitatieve analyse van

EFTI & Decisio, (2016) dat bij een goede inpassing de effecten van windmolenparken op toerisme beperkt zijn. De effecten op natuur en biodiversiteit zijn ook afhankelijk van de locatie van windmolens. Door de toepassing van clustering worden minder windturbines en in of nabij ecologisch gevoelige gebieden en Nationale Landschappen. Deze effecten kunnen niet gekwantificeerd worden.

Wind op land in stedelijke omgeving randstad

We hebben ook onderzocht hoe groot de externe kosten zijn van wind op land in stedelijk gebied in de randstad. Hiervoor hebben we enkele specifieke casussen bekeken voor nieuwe windmolens in Amsterdam.

De methodiek die hierboven gehanteerd is voor het bepalen van de externe kosten van windmolens gaat uit van een verband tussen de relatieve woningwaardedaling en de afstand tot de windmolen, waarbij de relatieve woningwaardedaling afneemt bij een grotere afstand tot een afstand van 2,5 kilometer. Dit gaat uit van de aanname dat elke woning binnen 2,5 kilometer visuele hinder ondervindt van deze windmolens. Maar dit gaat niet op voor de stedelijke omgeving. De visuele hinder, en daarmee de externe kosten, nemen steeds verder af naarmate er meer rijen woningen tussen een woning en de windmolen komen. Dit is niet meegenomen in de onderzoeken naar de daling van de woningwaarde als gevolg van windmolens. Die onderzoeken gaan uit van zicht op de windmolen. Daarom is deze methodiek niet direct toepasbaar op de situatie van windmolens in de stedelijke omgeving.

Uit geografische analyses van de specifieke casus die we bekeken hebben volgt dat vooral woningen binnen 1 kilometer van de windmolen mogelijk zicht hebben op de windmolens en daarmee visuele hinder ondervinden. Woningen op een grotere afstand dan 1 kilometer van de windmolens liggen achter andere woningen, gebouwen of snelwegen en ondervinden daarmee amper hinder van de windmolens. Daarom rekenen we alleen externe kosten toe aan woningen binnen een straal van 1 kilometer. Binnen 1 kilometer hebben niet alle woningen zicht op de windmolen. We schatten in dat tussen de 20 en 80% van de woningen binnen 1 kilometer visuele hinder ondervinden. Binnen 1 kilometer daalt de woningwaarde van deze woningen naar verwachting met ongeveer 8% (TNO, 2022a).

We hebben twee casussen uitgewerkt, op verschillende locaties en met een verschillend aantal windmolens dat geplaatst wordt.

In de eerste casus die we uitgewerkt hebben; het plaatsen van drie windmolens bij de Noorder IJ-plas, gaat het om ongeveer 3.500 woningen binnen 1 kilometer, waarvan 700 tot 2.800 woningen visuele hinder ondervinden. Uitgaande van een woningwaarde tussen de € 300.000 en 350.000 (goedkopere woningen in stedelijk gebied in de randstad) leidt dit tot externe kosten tussen de 1 en 4 eurocent/kWh.

Bij een tweede casus, het plaatsen van één windmolen bij het sciencepark liggen de externe kosten per kWh het hoogst. Dit komt doordat er veel woningen in de buurt liggen (ruim 5.700 binnen een kilometer) en slechts één windmolen geplaatst wordt. De externe kosten bij deze casus liggen naar verwachting tussen de 5 en 20 eurocent/kWh.

Deze analyses laten zien dat de externe kosten erg verschillen, ook binnen de stad. Vanuit het perspectief van externe kosten heeft het de voorkeur om te kiezen voor locaties met zo min mogelijk woningen in de buurt en indien gekozen wordt voor het plaatsen van de windmolens, om meerdere windmolens bij elkaar te plaatsen.

B.1.2 Zon op veld

Het effect van zonneparken op woningwaardes wordt geschat op 2,6% binnen een straal van 1 kilometer (Dröes, M. I. & Koster, H. R. A., 2021). Bij spreiding van deze zonneparken nemen we aan dat de opwek volledig is verspreid over 333 zonneparken, waardoor er meer omwonenden hinder ondervinden van deze zonneparken. Bij de realisatie van de gecluster-de zonneparken zal het welvaartsverlies lager zijn (de illustraties in Figuur 25 en Figuur 26 zijn hier ook op van toepassing). In lijn met de analyse voor windparken is er echter voor gekozen om uit te gaan van een hogere impact bij zonparken van grote schaal, zoals bij clustering. In dat geval hebben we aangenomen dat de woningwaardedaling binnen een straal van 1 kilometer 5 tot 10% bedraagt. De totale externe kosten zijn te zien in Tabel 10. Hier zijn aannames gemaakt over het aantal woningen binnen een straal van 1 km van de zonneparken.

Tabel 11 - Overzicht externe kosten zonneparken

	Spreiding zonneparken		Clustering zonneparken	
	Laag	Hoog	Laag	Hoog
Totaal (mln €)	5.546	5.546	141	282
LCoE (€ ct/kWh)	0,6	0,6	0,01	0,03

B.2 Overige resultaten

B.2.1 Kosten productie elektriciteit

Tabel 12 geeft een overzicht van de kosten voor productie van elektriciteit voor de scenario's Nationale Sturing, voor de drie prijsscenario's. We geven de totale kosten voor de productie van elektriciteit. Maar de productie van elektriciteit verschilt tussen de energiescenario's, aangezien een wisselend deel van de productie direct gebruikt kan worden en de overige productie omgezet wordt in waterstof. Aangezien ook de over-schotten van elektriciteit waarde hebben, deze kunnen worden gebruikt voor elektrolyse, geven we in Tabel 12 ook de gemiddelde productiekosten voor elektriciteit.

De totale productiekosten voor het scenario *Extra wind op zee en zon op dak* liggen het laagst bij alle drie de prijsscenario's. De kosten voor elektriciteitsproductie liggen het hoogst bij het scenario *Kernenergie* bij de prijsscenario's A en B en het hoogst bij het scenario *Extra wind op land en zonneparken* bij prijsscenario C.

Dit beeld verandert iets als gekeken wordt naar de productiekosten per eenheid geproduceerde energie[30]. Dan zijn de productiekosten het laagst bij het scenario *Extra wind op land en zonneparken* voor prijsscenario A. Bij de andere prijsscenario's zijn de kosten nog steeds het laagst voor het scenario *Extra wind op zee en zon op dak*. De verschillen tussen de scenario's *Extra wind op land en zonneparken* en *Extra wind op zee en zon op dak* zijn klein. Bovenstaande conclusies gelden ook bij de scenario's Internationale Sturing.

[30] De totale productie is niet gelijk in elk van de scenario's. De scenario's *Extra hernieuwbare opwek op land* heeft meer overschotten van elektriciteit dan de overige scenario's (het scenario *Kernenergie* heeft de minste overschotten). Deze overschotten kunnen echter ook gebruikt worden om waterstof te produceren en zijn daarom niet waardeloos. Daarom geven de productiekosten per eenheid geproduceerde energie een eerlijker beeld van de verhouding tussen de scenario's.

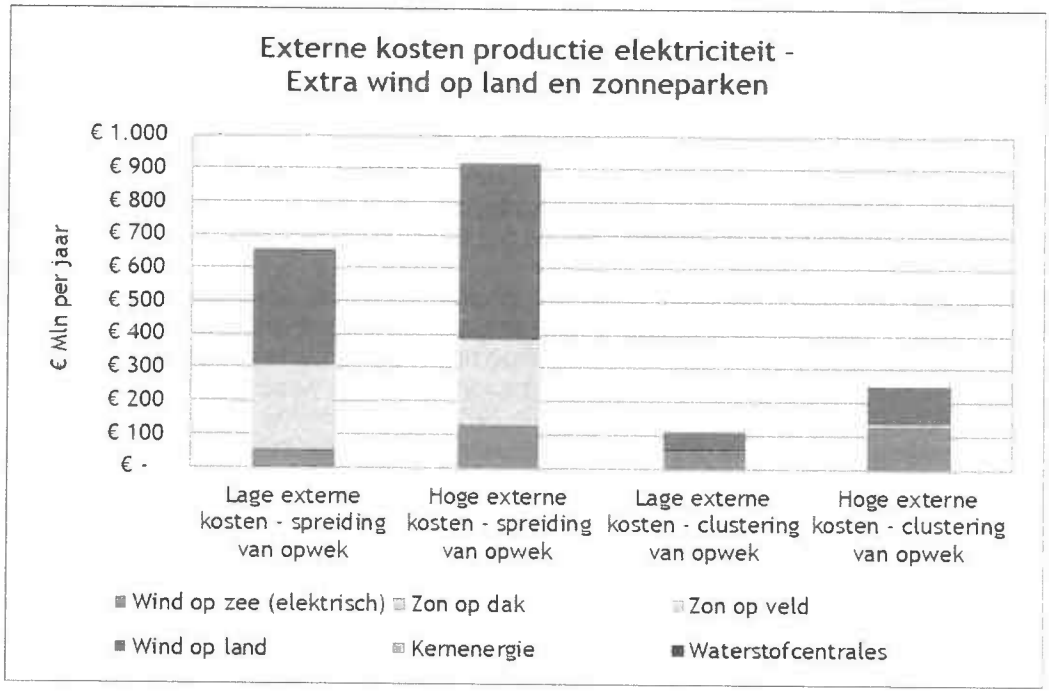
Tabel 12 - Jaarlijkse kosten productie elektriciteit scenario's Nationale Sturing (in €mln)

Energiebron	Extra hernieuwbare opwek op land			Extra wind op zee en zon op dak			Kernenergie		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Wind op zee (elektrisch)	2.500	3.100	3.700	2.900	3.700	4.400	2.500	3.100	3.700
Zon op dak	1.000	1.200	1.700	2.100	2.500	3.300	1.000	1.200	1.700
Zon op veld	1.200	1.500	1.900	200	200	200	200	200	200
Wind op land	1.500	1.800	2.400	600	700	900	600	700	900
Kernenergie	0	0	0	0	0	0	8.200	6.900	5.100
Waterstofcentrales	9.000	7.500	6.900	9.200	7.400	6.600	6.000	5.100	4.700
Totale productiekosten	**15.200**	**15.100**	**16.600**	**14.900**	**14.400**	**15.500**	**18.400**	**17.100**	**16.300**
Gemiddelde productiekosten (€/kWh)	**4,7**	**4,6**	**5,1**	**4,8**	**4,6**	**5,0**	**6,2**	**5,7**	**5,4**

B.2.2 Totale externe kosten

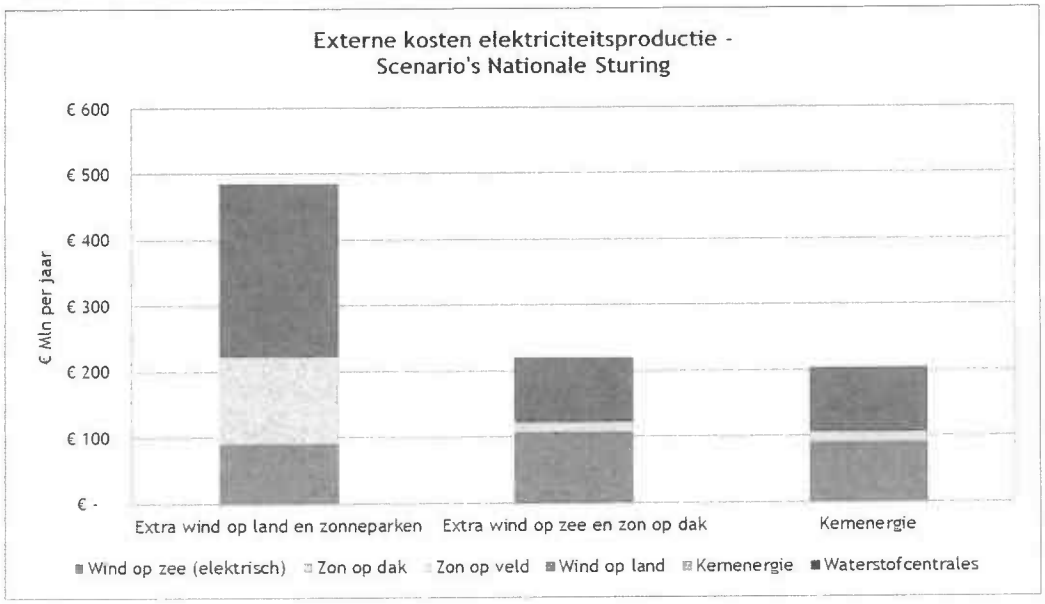
De totale externe kosten zijn afhankelijk van de exacte productielocaties en de mate van clustering van de opwek. Daarnaast is er een behoorlijke mate van onzekerheid over de omvang van de externe kosten. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 27. Dit figuur geeft een overzicht van de externe kosten van één energiescenario, bij spreiding of clustering van hernieuwbare opwek op land en met een lage of hoge inschatting van de externe kosten. De omvang van de externe kosten varieert voor dit specifieke energiescenario tussen de € 100 miljoen en 900 miljoen per jaar. Dit figuur toont wederom aan hoe belangrijk het is om bij het plaatsen van hernieuwbare opwek op land rekening te houden met de effecten op de omgeving.

Figuur 27 - Illustratie onzekerheid omvang externe kosten



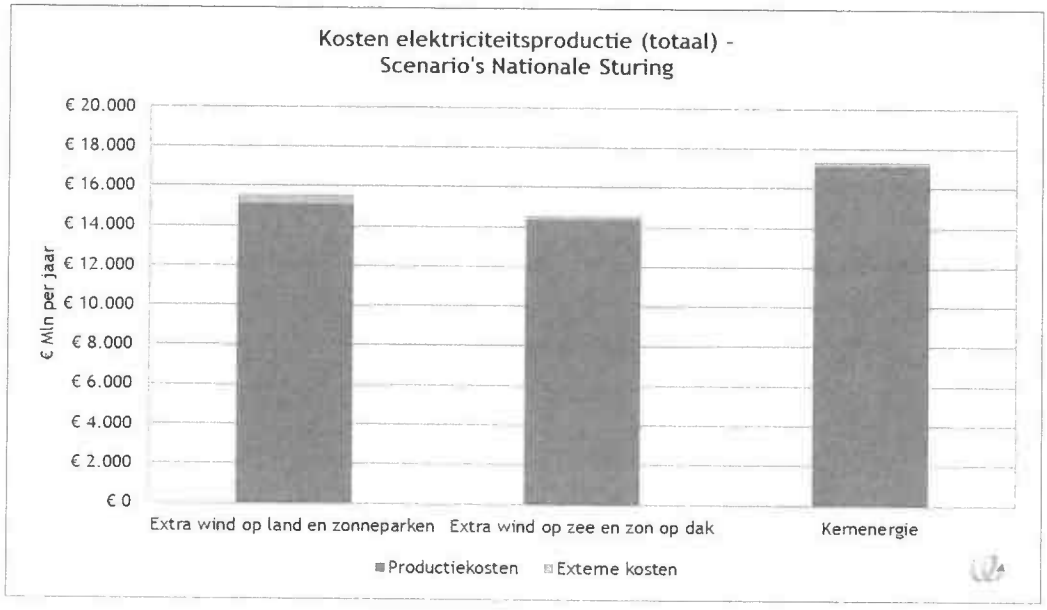
De omvang van de externe kosten varieert per scenario. Figuur 28 toont de externe kosten voor de drie Nationale Sturing-scenario's. We gaan hierbij uit van het gemiddelde van de externe kosten (gemiddelde van spreiding en clustering opwek en gemiddelde hoogte externe kosten). Het figuur laat zien dat de externe kosten het hoogst zijn bij het scenario *Extra wind op land en zonneparken*. Dit komt doordat de externe kosten van windmolens en zonneparken op land een stuk hoger liggen dan de externe kosten van zonnepanelen op daken/infrastructuur, wind op zee en kernenergie. Het verschil tussen de scenario's zal kleiner zijn als windmolens en zonneparken op land geclusterd worden in dunbevolkte gebieden.

Figuur 28 - Externe kosten elektriciteitsproductie



Figuur 29 geeft een overzicht van de totale kosten voor elektriciteitsproductie voor de scenario's Nationale Sturing, bij prijsscenario B (gemiddeld). Dit figuur laat zien dat de externe kosten beperkt zijn ten opzichte van de totale productiekosten. Ook als de externe kosten meegenomen wordt blijft de conclusie staan dat de kosten het laagst zijn bij het scenario *Extra wind op zee en zon op dak*, voor elk van de prijsscenario's, al moet wederom de opmerking gemaakt worden dat deze kosten niet direct vergeleken kunnen worden aangezien de totale productie van elektriciteit niet gelijk is en dit effect heeft op de kosten van productie van waterstof.

Figuur 29 - Jaarlijkse maatschappelijke kosten elektriciteitsproductie scenario's Nationale Sturing, bij gemiddelde prijzen



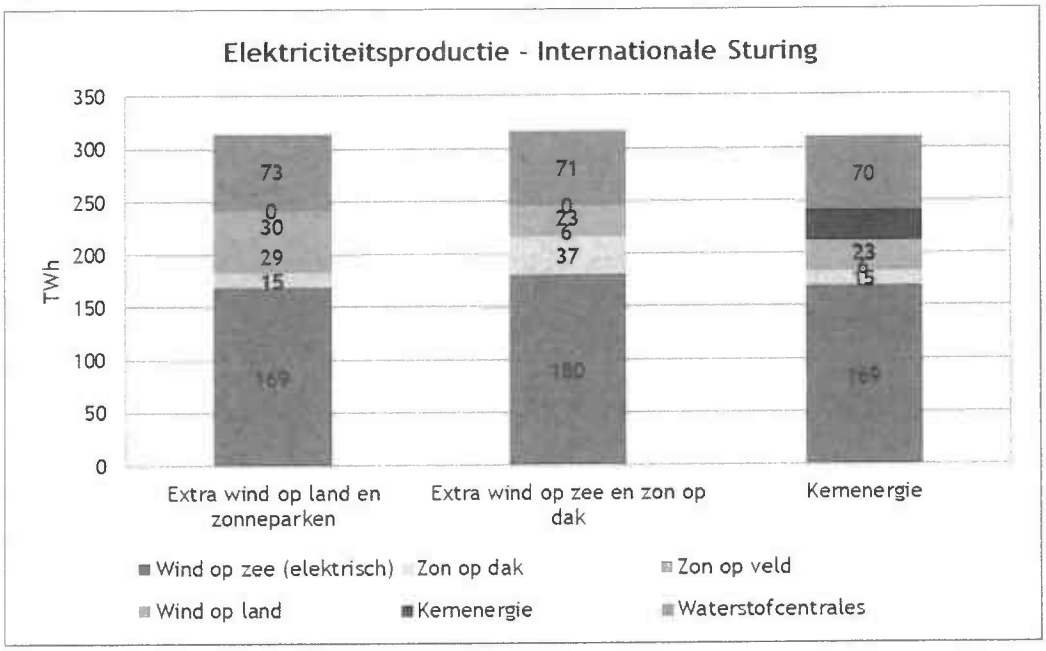
C Resultaten scenario's

C.1 Resultaten scenario Internationale Sturing

C.1.1 Energiescenario

Figuur 30 geeft een overzicht van de elektriciteitsproductie voor de drie Internationale Sturing-scenario's. In elk van deze scenario's gaan we ervan uit dat een aanzienlijk deel van de elektriciteit geproduceerd wordt met waterstofcentrales die gebruikmaken van geïmporteerde waterstof. Dit betekent dat in deze scenario's niet het maximale potentieel voor wind, zon en kernenergie, dat efficiënt gebruikt kan worden, benut wordt.

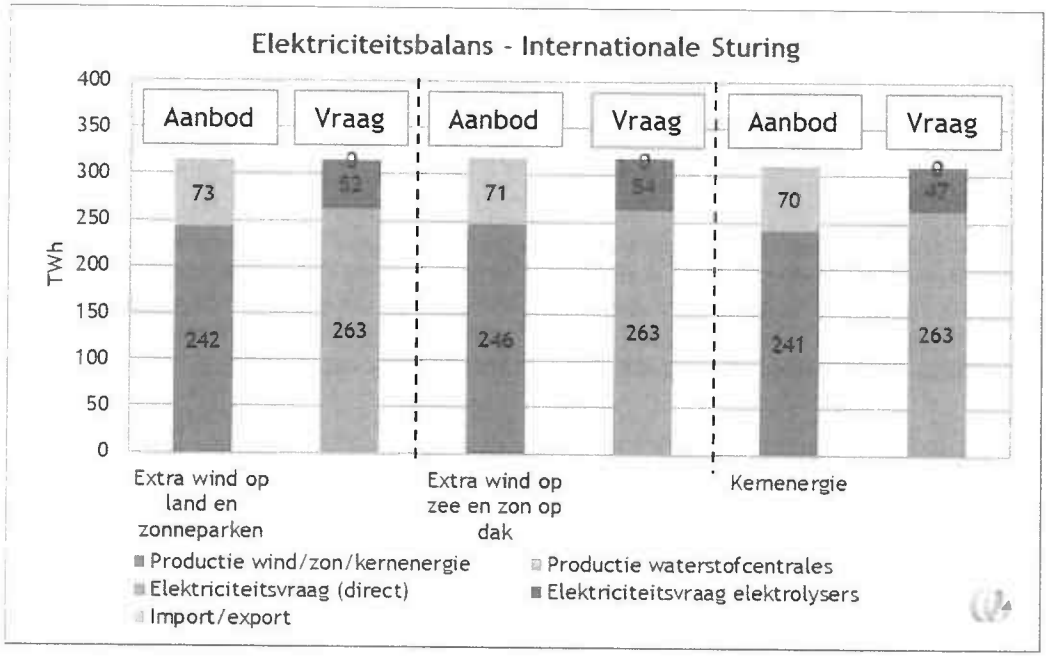
Figuur 30 - Elektriciteitsproductie scenario's Internationale Sturing



Ook in deze scenario's wordt het grootste gedeelte van de elektriciteitsproductie van windparken op zee. De totale productie van elektriciteit is in elk van deze scenario's ongeveer gelijk.

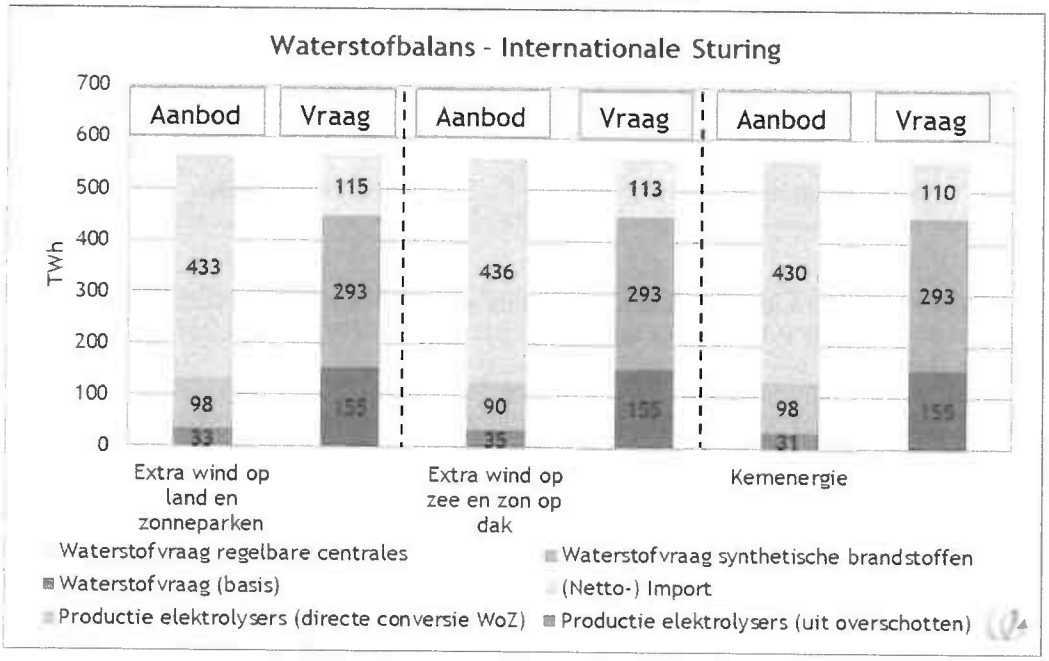
Figuur 31 geeft de elektriciteitsbalans op jaarbasis voor de scenario's Internationale Sturing. De omvang van de overschotten is het grootst bij het scenario *Extra wind op zee en zon op dak*, maar de verschillen tussen de scenario's zijn klein. De tekorten van elektriciteit, die ingevuld moeten worden met waterstofcentrales, zijn bij alle scenario's ongeveer even groot.

Figuur 31 - Elektriciteitsbalans op jaarbasis scenario's Internationale Sturing



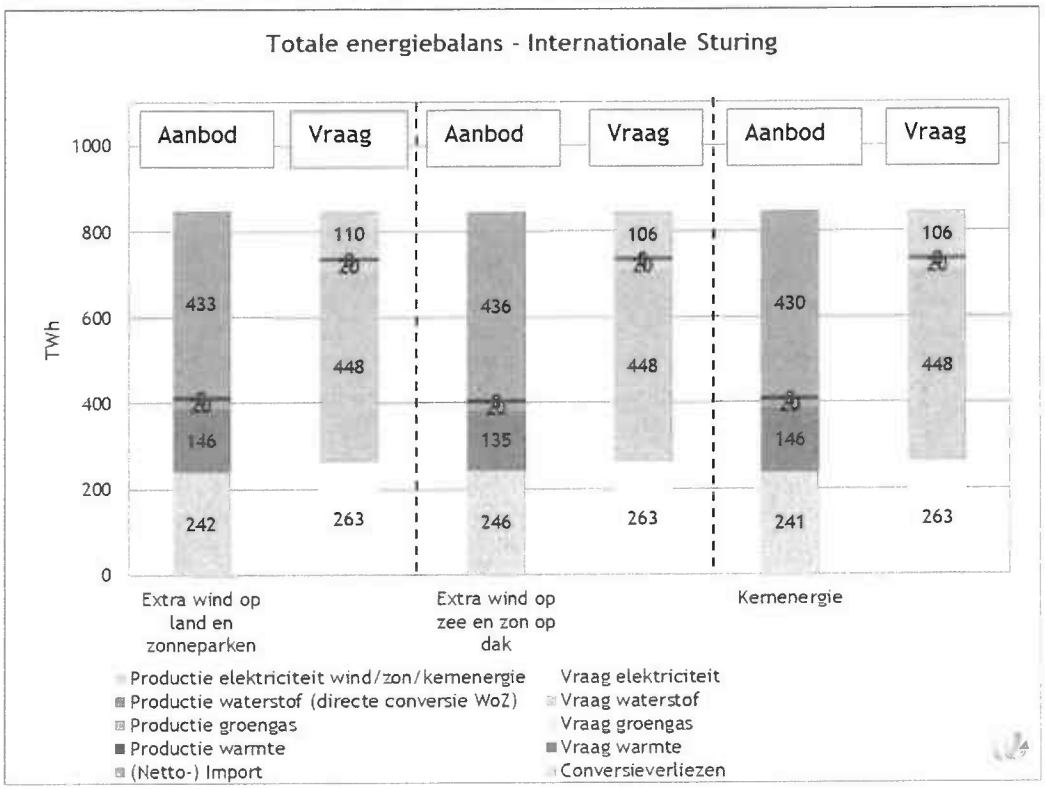
Figuur 32 geeft een overzicht van de waterstofbalans voor de Internationale Sturing-scenario's. De figuren laten zien dat er in elk scenario forse import van waterstof nodig is. Er zitten weinig verschillen tussen de scenario's.

Figuur 32 - Waterstofbalans op jaarbasis scenario's Internationale Sturing



Figuur 33 geeft een overzicht van de energiebalans voor de scenario's Internationale Sturing. De conversieverliezen zijn het hoogst bij het scenario *Extra wind op land en zonneparken* en de import is het grootst bij het scenario *Extra wind op zee en zon op dak*, maar de onderlinge verschillen zijn klein.

Figuur 33 - Totale energiebalans op jaarbasis scenario's Internationale Sturing



C.2 Maatschappelijke kosten

Tabel 13 - Jaarlijkse kosten productie elektriciteit scenario's Internationale Sturing (in € mln)

Energiebron	Extra hernieuwbare opwek op land			Extra wind op zee en zon op dak			Kernenergie		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Wind op zee (elektrisch)	3.400	4.200	5.100	3.600	4.500	5.400	3.400	4.200	5.100
Zon op dak	400	400	600	900	1.100	1.500	400	400	600
Zon op veld	700	900	1.100	200	200	200	200	200	200
Wind op land	800	900	1.200	600	700	900	600	700	900
Kernenergie	0	0	0	0	0	0	3.300	2.700	2.000
Waterstofcentrales	10.200	11.000	€11.900	10.100	10.900	11.800	9.700	10.500	11.300
Totale productiekosten	**15.400**	**17.500**	**19.900**	**15.300**	**17.400**	**19.800**	**17.400**	**18.800**	**20.200**
Gemiddelde productie-kosten (€/kWh)	**4,9**	**4,6**	**6,3**	**4,8**	**5,5**	**6,2**	**5,6**	**6,0**	**6,5**

Tabel 14 - Jaarlijkse maatschappelijke kosten productie en import energie scenario's Internationale Sturing (in € mln)

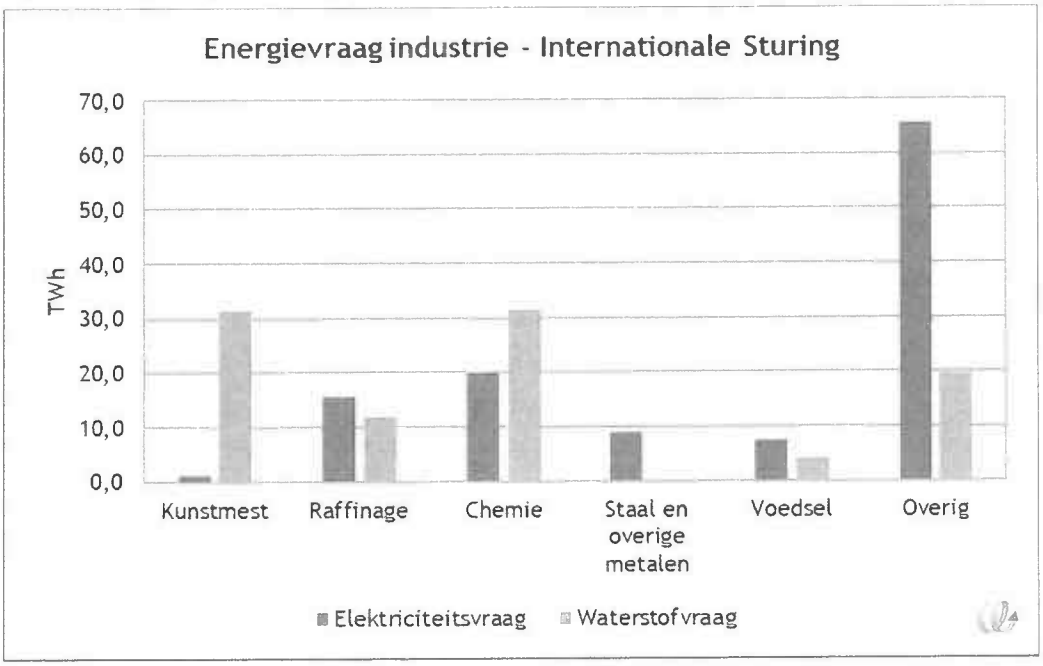
Energiebron	Extra hernieuwbare opwek op land			Extra wind op zee en zon op dak			Kernenergie		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Productie elektriciteit[31]	8.500	9.500	11.000	8.500	9.750	11.250	10.750	11.250	11.750
Productie waterstof[32]	7.000	7.750	8.500	6.500	7.250	8.000	7.000	7.750	8.500
Import waterstof	39.000	19.500	9.750	39.250	19.750	9.750	38.750	19.500	9.750
Productie groengas	750	1.000	1.250	750	1.000	1.250	750	1.000	1.250
Productie warmte	250	500	500	250	500	500	250	500	500
Totale productiekosten	**55.500**	**38.250**	**31.000**	**55.500**	**38.000**	**30.500**	**€57.500**	**39.500**	**31.500**
Externe kosten (kwantitatief)	250	250	250	250	250	250	250	250	250
Totale kosten	**55.750**	**38.500**	**31.500**	**55.750**	**38.250**	**30.750**	**57.750**	**39.750**	**31.750**
Ecologie	Wisselende effecten op ecologie. Kunnen niet tegen elkaar afgewogen worden.								
Energie-infrastructuur	– Extra infrastructuur op land door extra windmolens en zonneparken op land			– Veel uitbreidingen laag- en middenspanning door meer zon op dak (ten opzichte van zonnevelden) – Extra infrastructuur op zee al geïnternaliseerd en opgenomen in kosten			– Weinig uitbreidingen laag- en middenspanning. – Mogelijk forse uitbreidingen hoogspanningsnet bij keuze inefficiënte locaties kerncentrales		

[31] Dit is exclusief de kosten voor de waterstof die nodig is voor regelbare centrales, om dubbeltellingen te voorkomen. De kosten hiervoor worden meegenomen bij productie en import waterstof. De investeringskosten van regelbare centrales worden hier wel meegenomen.

[32] Dit is exclusief de kosten voor de elektriciteit die nodig is voor elektrolyse, om dubbeltellingen te voorkomen. De kosten hiervoor worden meegenomen bij productie elektriciteit. De investeringskosten van elektrolysers s worden hier wel meegenomen.

C.3 Gevoeligheidsanalyses

Figuur 34 - Uitsplitsing energievraag industrie scenario Internationale Sturing



Figuur 35 - Effecten krimp energie-intensieve industrie

