

Het energiesysteem van de toekomst: de I13050-scenario's

Samenvatting

Integrale energiesysteemverkenning 2030-2050

7 april 2023

Netbeheer
Nederland



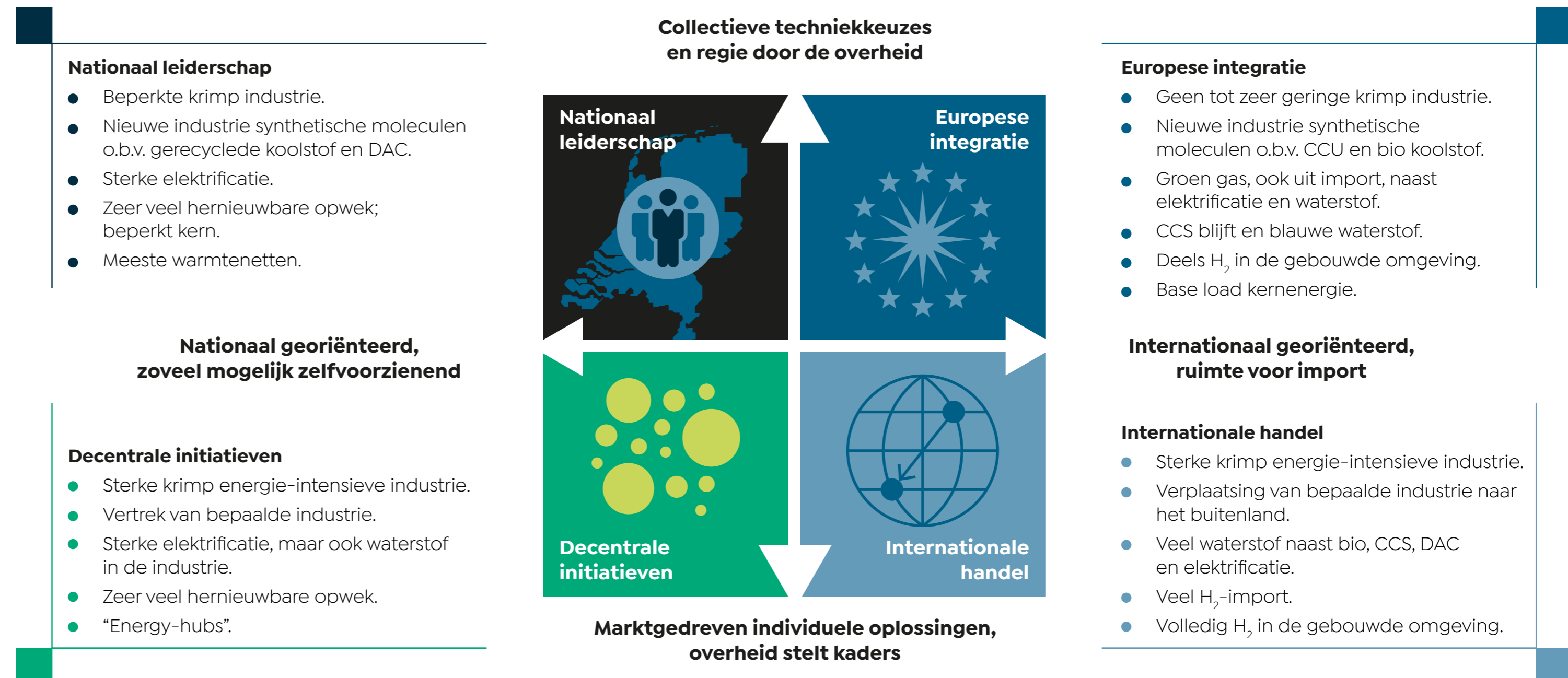
Samenvatting

Als tussenstap naar de tweede editie van de integrale infrastructuurverkenning 2030–2050 presenteren de gezamenlijke netbedrijven vier scenario's voor het energiesysteem in 2050, zodat iedereen daar gebruik van kan maken. De scenario's zijn mede tot stand gekomen dankzij de expertise van belanghebbenden.

In deze samenvatting worden de scenario's en de achterliggende keuzes toegelicht. De conclusies en aanbevelingen uit dit scenariorapport gaan nog niet in op de impact die de geschetste ontwikkelingen in de scenario's hebben op de energie-infrastructuur. Deze impact wordt met de consequenties voor kosten, ruimte, menskracht en materialen in het eindrapport geschetst. Het eindrapport van I13050 wordt eind 2023 opgeleverd.

In 2050 moet ons energiesysteem klimaatneutraal zijn. Er zijn verschillende routes voor deze transitie denkbaar, elk met een andere impact op de energie-infrastructuur. Een aantal belangrijke factoren onderscheiden deze routes van elkaar. Enerzijds is er de mate waarin de overheid stuurt en keuzes maakt of juist ruimte geeft aan (vrije) marktwerking binnen de energiemarkt. Anderzijds kan de energietransitie meer nationaal (landelijk of regionaal) of internationaal georganiseerd worden. Daarnaast is ook de keuze van het type energiedrager dat in de verschillende sectoren wordt ingezet van invloed op hoe het energiesysteem eruit komt te zien. De scenario's zijn opgebouwd uit een kruising van deze factoren. Dit levert de volgende vier scenario's op: Decentrale Initiatieven (DEC), Nationaal Leiderschap (NAT), Europese Integratie (EUR) en Internationale Handel (INT).

De vier scenario's werken toe naar een klimaatneutraal energiesysteem in 2050. Ze hebben daarom met elkaar gemeen dat ze ambitieus zijn. Ze vereisen een snelle afbouw van fossiele bronnen, een snelle groei van de productie van hernieuwbare energie en een transformatie van de industrie (energie en grondstoffen), mobiliteit, gebouwde omgeving en landbouw. Deze transformatie vergt systeemveranderingen. Aan de basis van deze systeemveranderingen staat de energie-infrastructuur. De netten voor gas, elektriciteit en warmte moeten op de schop. De manier waarop verschilt sterk tussen de scenario's.



Het energiesysteem van de toekomst: de I13050-scenario's

Om een beeld te krijgen van hoe deze ontwikkelingen de energienetten raken, maken de netbedrijven een tweede editie van de integrale energiesysteemverkenning (I13050).¹ In deze verkenning wordt de mogelijke impact van al deze factoren én andere fundamentele onzekerheden in kaart gebracht. Dit ondersteunt beleidsmakers bij het maken van keuzes en biedt een basis om met elkaar het gesprek te voeren over hoe we toewerken naar een klimaatneutraal 2050.

Er zijn veel onzekerheden in het verloop van de energietransitie. Deze onzekerheden zijn verwerkt in vier uiteenlopende scenario's. De vier scenario's kennen, ondanks hun verschillen, een aantal generieke conclusies en aanbevelingen die van belang zijn in alle scenario's. Er moet de komende jaren, in alle scenario's, een aantal fundamentele keuzes gemaakt worden om ervoor te zorgen dat het klimaatdoel voor 2050 niet uit het zicht raakt.

In de praktijk verlopen ontwikkelingen wellicht anders dan in de scenario's is geschetst. Maatschappelijke keuzes beïnvloeden het energiesysteem ook. Het is van belang deze ontwikkelingen en keuzes goed te blijven monitoren om met actuele inzichten naar het 'Energiesysteem van de Toekomst' toe te werken.

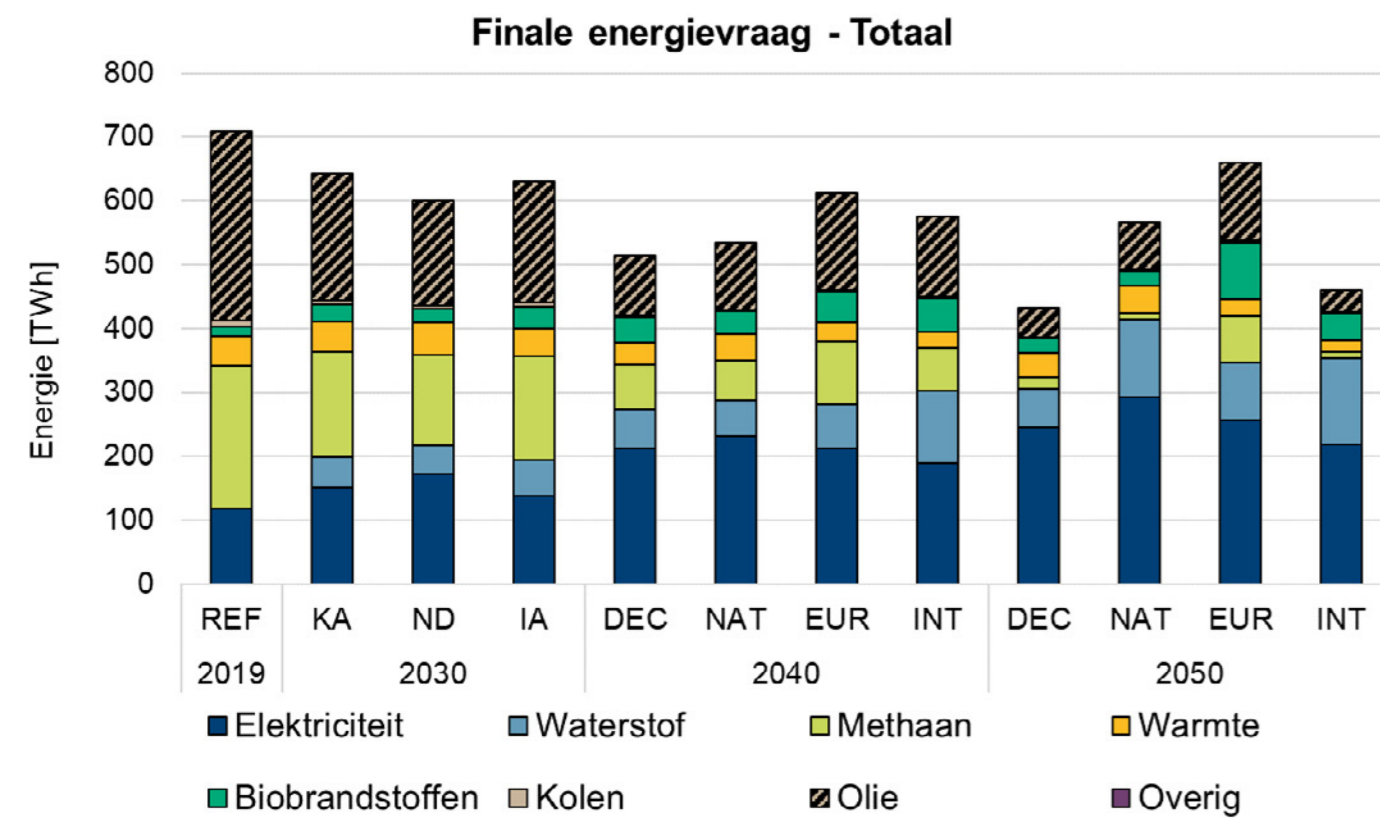
Deze samenvatting is opgedeeld in drie hoofdthema's. Gestart wordt met de ontwikkeling van de energievraag en het energieaanbod. Het tweede hoofdthema gaat in op de rol van flexibiliteit. Tot slot wordt de ontwikkeling van CO₂- en overige broeikasgasemissies en de rol van CO₂ binnen het energiesysteem van 2050 besproken. Elk hoofdthema sluit af met aanbevelingen en beleidsstukken waar deze aanbevelingen een logische plek voor inbedding hebben.

[Klik om snel naar het thema te gaan](#)

¹ Zie ook de rapportage met conclusies en aanbevelingen van de eerste editie van de I13050: [Netbeheer Nederland \(april 2021\)](#).

I De ontwikkeling van de energievraag en het energieaanbod

a. Energievraag



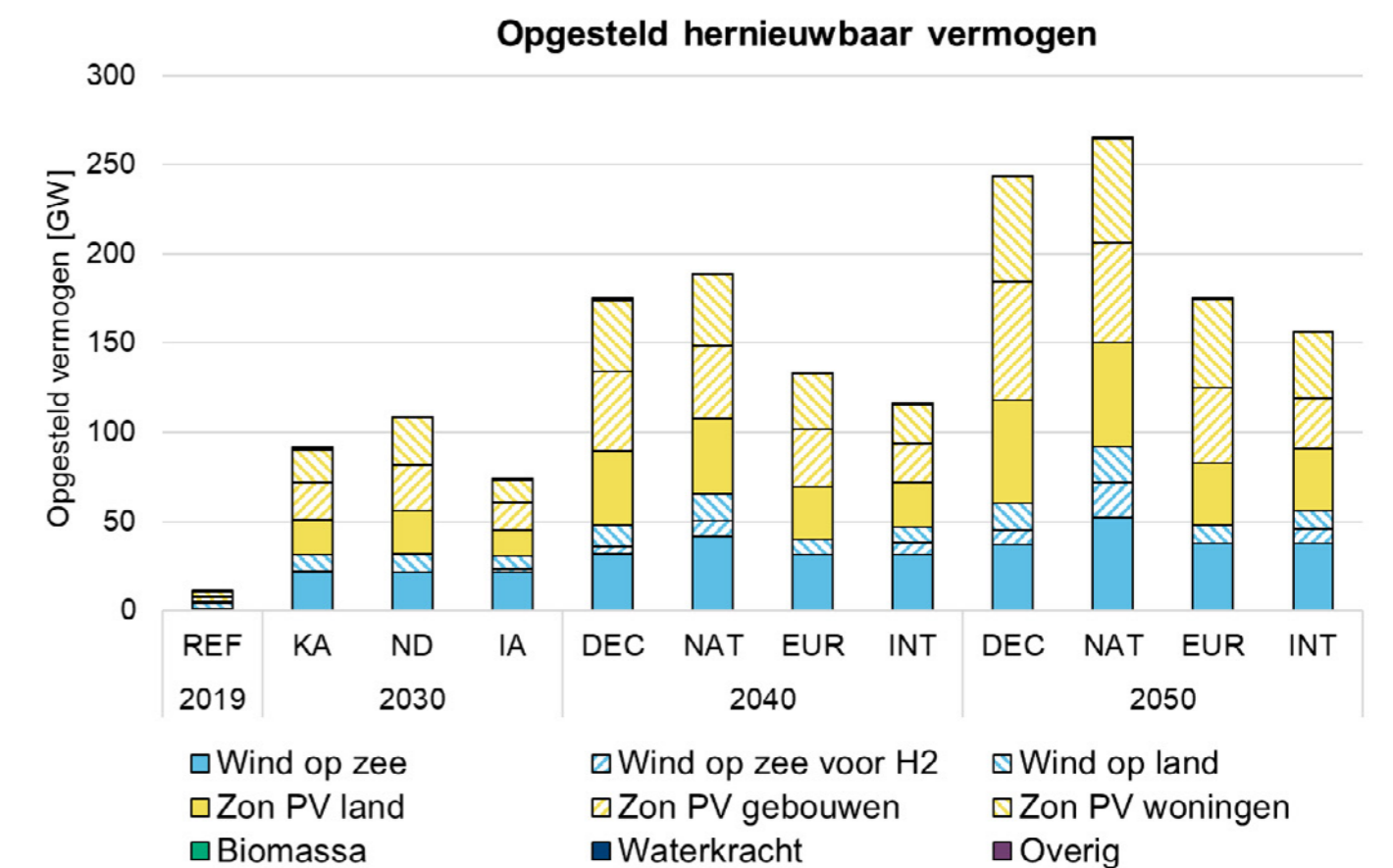
De totale energievraag neemt ten opzichte van nu met 7 tot 39% af in 2050. Dit komt door een stapeling van ontwikkelde technieken, energiebesparing en verhoogde efficiënties. Welke industrie in de toekomst naar Nederland komt en/of in Nederland blijft, heeft een grote impact op de benodigde hoeveelheid duurzame opwekking, flexibiliteitsmiddelen en infrastructuur en dus de wijze waarop we het klimaatneutrale energiesysteem tot aan 2050 vorm moeten geven. In de marktgedreven scenario's verplaatsen zeer energie-intensieve processen zich voor een deel naar regio's waar duurzame energie goedkoper is. In de scenario's met sterkere overheidsinterventies pakt dit anders uit en implementeren de industriebedrijven nieuwe processen.

Alle scenario's gaan uit van een toename van de elektriciteitsvraag van 180-250% ten opzichte van 2019. Forse elektrificatie in vrijwel alle eindverbruikerssectoren zorgt deels voor een efficiënt en direct gebruik van de beschikbare hernieuwbare elektriciteitsproductie. De vraag naar

waterstof neemt in alle gevallen ook sterk toe. Waterstof wordt ingezet als brandstof en grondstof voor de industrie en gedeeltelijk voor zwaar transport. Daarnaast wordt waterstof gebruikt als flexibiliteitsvoorziening en na 2030 in twee van de vier scenario's voor (hybride) verwarming van gebouwen. De vraag naar biogene brand- en grondstoffen stijgt ook. Biobrandstoffen worden ingezet voor (zwaar) transport, bijvoorbeeld in de vorm van biodiesel. De vraag naar deze biobrandstoffen neemt tot en met 2040 toe voor het wegverkeer. In 2050 verschuift de vraag naar biokerosine voor de luchtvaart. Het wegverkeer is dan grotendeel elektrisch. Biograndstoffen, bijvoorbeeld bionafta, worden ingezet in de industrie en het gebruik stijgt richting 2050. De inzet hiervan is mede afhankelijk van de krimp of groei van industrieën die biograndstoffen gebruiken.

De vraag naar olie neemt af. Voor mobiliteit daalt het oliegebruik aanzienlijk omdat auto's en vrachtverkeer overstappen op elektriciteit en deels op waterstof. Binnen de industrie neemt het gebruik van pyrolyseolie sterk toe richting 2040. Het aanbod van afval geschikt voor chemische recycling tot pyrolyseolie is in Nederland niet voldoende, bijna alles moet worden geïmporteerd. Desondanks blijft chemische recycling een belangrijke rol vervullen ten behoeve van productie van plastics en kunststoffen en de productie van brandstoffen voor export. Ook de traditionele (methaan)aardgasvraag neemt sterk af en steenkool wordt vanaf 2030 niet meer ingezet voor elektriciteitsopwekking. Ook de vraag naar warmte daalt. De totale energievraag van de gebouwde omgeving (woningen en utiliteitsbouw) neemt gaandeweg af vanwege betere isolatie en energiebesparing in gebouwen. Het grootste deel van de energievraag van woningen is ten behoeve van verwarming. In 2050 wordt in deze vraag op verschillende manieren voorzien, waaronder door elektrische warmtepompen, lage- en hogetemperatuurwarmtenetten en, afhankelijk van het scenario, ook waterstof of groen gas. Doordat in hybride systemen verschillende gassen met elektriciteit worden gecombineerd, zijn de gasvolumes gering en heeft gas vooral als doel om de piekvraag op te vangen.

b. Energieaanbod



Het energieaanbod verandert in de komende jaren fors, van momenteel grotendeels fossiel (aardgas, olie en kolen) naar een nagenoeg volledig duurzame energiemix in 2050.

De meeste hernieuwbare elektriciteit wordt in 2050 opgewekt door de wind, zowel op land als op zee, met een opwekcapaciteit die varieert van 48 tot 92 GW. Windenergie levert 25-60% van het hernieuwbare elektriciteitsaanbod. Zon heeft met 100 tot 183 GW verreweg de grootste opwekcapaciteit in 2050 en produceert door de beperktere zonuren 10-20% van de hernieuwbare elektriciteit. In de scenario's is de aanname gedaan dat zon-PV-installaties op 40 tot 50% van het piekvermogen worden aangesloten. Het effect op het volumeverlies is hierdoor maar beperkt. Overdimensioneren van hernieuwbare opwekking zorgt ervoor dat het beschikbare aanbod een groter deel van het jaar voldoende is voor de vraag en zorgt daarnaast dat significant meer duurzame opwekking kan worden ingepast per aansluiting.

Het aanbod voor waterstof wordt initieel voor een groot deel ingevuld door import, stoomkrakers en restgassen van de industrie. Groenwaterstofproductie komt al voor 2030 op gang (4-8 GW in 2030) en groeit in de jaren daarna aanzienlijk (16-45 GW in 2050). Met de ontwikkeling van importfaciliteiten ontwikkelt Nederland zich tot een doorvoerland voor waterstof: in 2030 10 tot 40 TWh, in 2050 tussen de 50 en 150 TWh, hoofdzakelijk richting Duitsland. Voor import van buiten de EU wordt in eerste instantie gebruik gemaakt van scheepsvervoer, waarbij ammoniak en gecompriëerde waterstof een grote rol spelen. Op de wat langere termijn wordt ook (vloeibare) waterstof verscheept en zijn er pijpleiding-importen mogelijk.

In de transitieperiode 2030-2040 speelt aardgas nog een belangrijke rol vanwege leveringszekerheid zowel in Nederland als voor Noordwest-Europa. Richting 2050 worden de volumes aardgas echter zeer klein, behalve in het scenario Europese Integratie, waar het wordt gebruikt voor productie van blauwe waterstof. In 2040 wordt de meeste uitstoot van aardgas uit de industrie afgevangen.

De productie van groen gas groeit in alle scenario's, met een bandbreedte van 14 tot 80 TWh in 2050. Vanwege het kleinere aanbod is groen gas geen volledige vervanging van het huidige gebruik aan aardgas, maar het blijft in bepaalde sectoren een belangrijke rol spelen. Dit betreft de (hybride) inzet voor warmtevraag van een beperkt deel van de gebouwde omgeving en de industrie, waar geen alternatieven voor mogelijk zijn. Een deel van deze vraag kent een piekvraag in de winter, waardoor naast transport en distributie ook gasbergingen belangrijk blijven.

De transitie van vraag en aanbod die zijn uitgewerkt in de scenario's, komen neer op een metamorfose van het energiesysteem. Er is veel nieuwe infrastructuur nodig. Het is onvermijdelijk dat – gedurende de transitiefase – niet alle gevraagde capaciteit direct op alle plekken en in alle uren van het jaar beschikbaar is. Het aanpassen van de bestaande en de aanleg van nieuwe infrastructuur kost nu eenmaal tijd. Daarom is het belangrijk dat netbedrijven tijdig anticiperen op de ontwikkelingen van de

vraag en het aanbod van energie, door middel van deze scenario's. Alleen anticiperen is echter niet voldoende. Het is noodzakelijk de planbaarheid van al deze ontwikkelingen te vergroten.

Ter voorbereiding op deze sterk uiteenlopende verwachtingen, zijn er keuzes nodig. Keuzes over maatschappelijke en ruimtelijke inrichting. Keuzes over het soort, de timing en de omvang van technieken die worden gestimuleerd of verplicht. De wijze waarop deze technieken door individuele netgebruikers worden ingezet, is cruciaal voor de ontwikkeling van het energiesysteem.

De verwachte transitie van de energievraag en het energieaanbod resulteert in vijf aanbevelingen:

AANBEVELING 1 Bepaal welke energiedrager op welke locatie, op welk moment beschikbaar moet zijn en voor wie. Overheden, marktpartijen en netbedrijven maken deze keuzes samen. Dit in de wetenschap dat de toekomst inherent onzeker is en we niet de hele transitie al kunnen plannen. Te bepalen is hoe de energievraag voor clusters, industrieën, woonwijken wordt ingevuld en waar, wanneer, welke duurzame energiedrager (elektriciteit, waterstof, groen gas of warmte) moet komen. Betrek bij het maken van keuzes de ontwikkeling en de leveringszekerheid van de energiedragers. Snelheid in het bepalen van deze keuzes is noodzakelijk om marktpartijen, inwoners en netbedrijven handelingsperspectief te geven.

Maak deze keuzes in het NPE voor het nationale niveau en in de provinciale energievisies voor het regionale niveau. Leg verplichtingen op aan gemeentes dat ook zij keuzes maken. De huidige aanpak van de Transitievisies Warmte en de Wijk Uitvoeringsplannen leidt onvoldoende tot snelheid bij het maken van deze keuzes. Essentieel is dat de keuzes een bindend karakter krijgen om effectief te zijn voor afwegingen die marktpartijen en huishoudens maken, en voor netplanning door netbedrijven. Maak keuzes bindend door ze in te bedden in nationale en provinciale vergunningverleningen en planologie van gemeentes.

Zorg dat deze inbedding doorwerkt in de opgave en financiering van netbedrijven. Tot slot moeten er voorwaarden gesteld worden aan het landelijk stimuleringsbeleid zoals SDE++, zodat de SDE++ beter stuurt op het combineren van vraag bij opwek en beter gebruik maakt van de vrije ruimte in het elektriciteitsnet.

AANBEVELING 2 Bepaal welke energie-intensieve basisindustrie in het klimaatneutrale Nederland van 2050 past. Het vestigingsklimaat, industriebeleid en maatwerkafspraken zijn mede van belang voor wat de energie-intensieve industrie in de vijf clusters doet: investeren en nieuwe processen implementeren óf (gedeeltelijk) uit Nederland vertrekken. Sterkere overheidsinterventies (subsidies, normering, etc.) kunnen leiden tot het behoud van energie-intensieve processen in Nederland. Omdat de energie-intensieve basisindustrie verantwoordelijk is voor bijna de helft van de energievraag in Nederland, heeft dit grote consequenties voor de benodigde hoeveelheid duurzame opwek, flexibiliteitsmiddelen en infrastructuur. Als dit tijdig gerealiseerd moet worden, dan moeten er nu keuzes gemaakt worden over de toekomst van deze industrieën. Zonder gericht beleid is de planbaarheid gering en wordt de transitie vertraagd.

Een duidelijke koers is eveneens nodig voor het zesde cluster – dit zijn de middelgrote industriebedrijven die deels geïsoleerd en deels in regionale clusters door Nederland verspreid zijn. In de toekomstige ontwikkelrichting van de regionale energiesystemen moet het perspectief voor deze bedrijvigheid en de bijbehorende energievoorziening gepland worden, zodat netbedrijven gericht en tijdig de juiste infrastructuur kunnen aanleggen.

Deze keuzes raken ook het vraagstuk hoe ver wind op zee moet worden uitgebouwd. Willen we (over)productie aanwenden voor mogelijke extra nationale vraag, zoals de productie van groene moleculen voor de industrie in Nederland, of wordt er structureel geëxporteerd om te voorzien in de elektrische vraag van buurlanden?

AANBEVELING 3 Maak beleid voor de verdere ontwikkeling van duurzame opwek inclusief eisen aan locatiekeuzes en aansluitvermogens, curtailment en flexibel gedrag, zodat de netinpassing efficiënter kan worden ontwikkeld. Het doel moet zijn om een snelle doorontwikkeling van duurzame opwek mogelijk te maken. Tegelijkertijd willen we het energiesysteem als geheel zo efficiënt en de inpassingskosten zo laag mogelijk houden. Het is nodig de opwekcapaciteit in verhouding tot de netaansluiting voor alle spanningsniveaus over te dimensioneren. Niet alleen de grootschalige zonneprojecten maar ook voor zon op daken van de kleinverbruikers en windparken. Denk hierbij aan dezelfde aansluitvoorwaarden op uiteindelijk 40% van het maximale vermogen voor nieuwe opwekking uit zon en accepteer dat individuele omvormers terug moeten regelen bij erg zonnig weer en een lage energievraag. Door wind en zon te combineren, kan ook veel meer hernieuwbare energie worden opgewekt en ingepast. De SDE++ stuurt nu alleen aan op aansluiten op 50% voor nieuwe zonneparken. Wij adviseren nadrukkelijk om contracten met bestaande zonnecapaciteit ook aan te passen, zodat ook daar een aftopping van 40-50% plaatsvindt.

AANBEVELING 4 Leg vast in wet- en regelgeving dat niet iedereen altijd en overal de capaciteit kan aanvragen of uitbreiden.

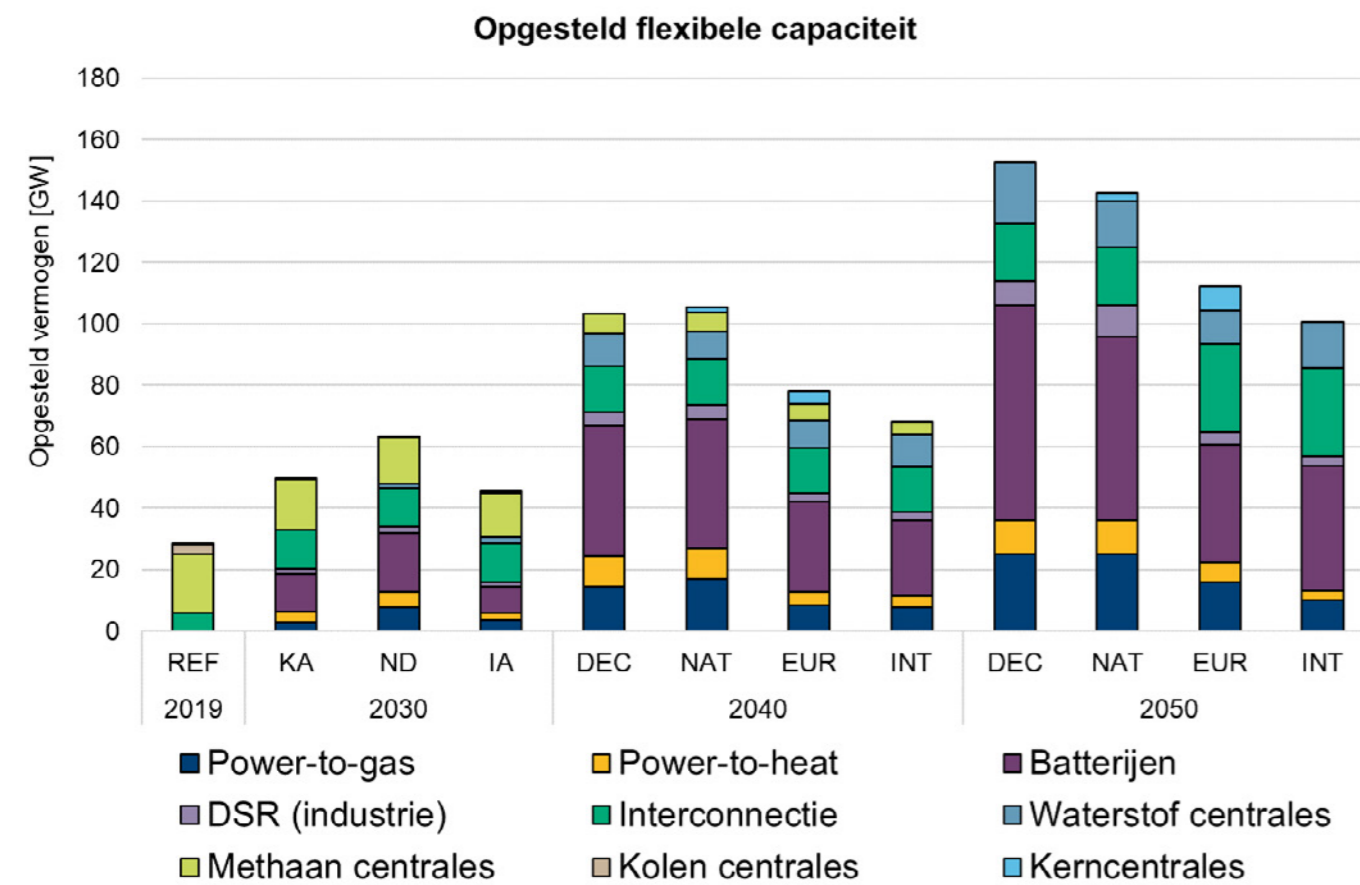
Netbedrijven maken daarin transparant op basis waarvan deze keuze wordt gemaakt. De 'koperen plaat'-gedachte moet losgelaten worden vanwege knellende fysieke en financiële grenzen van het systeem binnen de klimaatdoelen. Dit heeft bijvoorbeeld effect op welke partijen voor de elektrische, waterstof- of warmteroute kunnen gaan. Dat kan niet altijd, noch overal. En: als partijen zich flexibel kunnen gedragen, dan is méér mogelijk. De reden van deze aanbeveling is primair dat de netbedrijven verwachten dat de samenleving (burgers en bedrijven) de kosten van infrastructuur en ruimtebeslag van een volledig vrij keuzemenu van energiedragers altijd én overal niet kunnen of willen dragen. Maar er zijn ook knellende beperkingen in uitvoeringscapaciteit, de korte doorlooptijd tot de klimaatdoelen, de beschikbare fysieke ruimte en de natuurruimte. Kortom, publieke partijen moeten bepalen binnen welke ruimte de markt een kostenefficiënt systeem zal moeten creëren.

AANBEVELING 5 Bepaal welke positie Nederland in internationale context wil innemen op energiedragers. Nederland is momenteel een energiehubs van betekenis door onze ligging, infrastructuur, havens, opslag en doorvoer. Nederland levert hiermee een bijdrage aan een betaalbare en betrouwbare energievoorziening van Noordwest-Europa. De rol van fossiele dragers wordt snel kleiner. Als Nederland deze positie wil behouden in de transitie naar het toekomstige energiesysteem, dan vraagt dit nu al om keuzes om de nieuwe ketens, in samenwerking met Duitsland en de Noordzeelanden, tijdig te ontwikkelen. Voor het ontwikkelen van de importketen voor waterstof zijn partnerships in de hele wereld nodig. Naast de waterstofketen gaat het ook om transportnetten voor elektriciteit/ interconnectie en CO₂, zodat CCS ook mogelijk wordt voor buurlanden. Dit heeft consequenties voor infrastructuur maar ook voor ruimtebeslag voor infrastructuur.

Gevraagd is stevig en goed doordacht beleid dat op rijksniveau de ontwikkeling van de verschillende samenhangende en gebalanceerde energieketens (productie, import, transport, conversie en opslag) vormgeeft. Er is een raakvlak met het vraagstuk hoe ver wind op zee moet worden uitgebouwd en hoe eventuele overproductie wordt aangewend (aanbeveling 2).



II Het belang van flexibiliteit in een klimaatneutraal energiesysteem



Ons energiesysteem krijgt richting 2050 een geheel andere dynamiek. De toenemende rol van weersafhankelijke energiebronnen (wind- en zonne-energie) zorgt voor grote schommelingen in het energieaanbod. Dit kan bijvoorbeeld gedurende de dag (een wolk) alsook tussen seizoenen (weinig wind in winterweken). Daarnaast is er een toenemende geografische onbalans tussen het aanbod en de vraag van energiedragers. De toekomstige energie wordt vaak op heel andere locaties opgewekt dan de locatie van traditionele centrales, namelijk van grote windparken op zee tot verspreide zonnepanelen in de haarvaten van het regionale net. Dit brengt nieuwe uitdagingen met zich mee.

Ook de toekomstige vraag is anders. De verduurzaming van industrie, gebouwde omgeving en mobiliteit leidt tot grote veranderingen in de energievraag. De gevraagde energie en de aangeboden energie van de verschillende energiedragers zijn op de meeste momenten niet perfect in balans. Dit verschil in vraag en aanbod vereist een flexibel energiesysteem dat beter moet meebewegen met het aanbod in plaats van de vraag, omdat de wind en de zon nu eenmaal niet aangestuurd kunnen

worden. Dit heeft impact op de wijze waarop onze maatschappij met energie moet omgaan en dat geldt zowel voor consumenten als voor grootverbruikers. Deze transitie is reeds ingezet en vergt al tegen 2030 omvangrijke maatregelen om vraag en aanbod met elkaar in balans te kunnen houden. Deze veranderingen komen dan ook sneller op ons af dan menigeneen zich realiseert.

- De flexibiliteit om elektrische tekorten op te vangen, moet groeien van zo'n 3 TWh per jaar in 2019 naar gemiddeld 90 TWh [86 – 100] in 2050. De grote uitdaging zit in de avondvraagpieken en in koude winterperiodes, als de energievraag groot is en het duurzame aanbod gering.
- De flexibiliteit om elektrische overschotten op te vangen, groeit zelfs van zo'n 5 TWh in 2019 naar gemiddeld 225 TWh [186 – 273] in 2050. De grote uitdaging is om deze overschotten op een kostenefficiënte manier te gebruiken zodat energieverliezen verminderen.

Voor deze uitdagingen moet een (zeer) grote capaciteit aan nieuwe flexibiliteitsmiddelen ontwikkeld en gerealiseerd worden. Flexibiliteit kan in de transitie naar een duurzaam energiesysteem, afhankelijk van de manier van organisatie ervan, zelfs een disruptieve rol spelen. De benodigde hoeveelheid én de juiste vorm van flexibiliteit op de juiste plek en de juiste inzet van flexibiliteit kan de energietransitie tot een succes of tot een mislukking maken. Dit vereist ook inzet van flexibiliteitsmiddelen die nu nog amper bestaan. De verschillende mogelijke vormen van flexibiliteit moeten verder ontwikkeld gaan worden en er moet gezorgd worden dat nieuwe vormen van flexibiliteit op tijd beschikbaar komen.

Het gaat hier om flexibiliteit binnen het elektriciteitssysteem, maar ook om systeemintegratie met andere energiedragers, waaronder conversies van en naar energiedragers zoals waterstof en warmte, of hybride toepassingen van elektriciteit en gassen. Dit is een langetermijnvraagstuk, waarbij gekeken moet worden naar de leveringszekerheid op de tijdschaal van seizoenen.



De effecten van verschillende flexibiliteitsvarianten en weersomstandigheden wordt nader onderzocht in de tweede fase van I13050 en komen terug in het eindrapport. Vooruitlopend daarop doen we de volgende aanbevelingen op het gebied van een CO₂-neutrale flexibiliteitsvoorziening:

AANBEVELING 6 **Bouw flexibiliteit in het energiesysteem door stimulering, opschaling en innovatie.** *Deze flexibiliteit is al in 2030 nodig en moet daarom in de komende jaren met beleid gestimuleerd worden (met als randvoorwaarde aanbeveling 7). Onvoldoende en niet tijdige beschikbaarheid van flexibiliteitsmiddelen leidt bij tekorten tot risico's voor sterk oplopende prijzen en voorzieningszekerheid. Overaanbod heeft als gevolg dat overschotten niet worden benut als de elektriciteitsvraag al volledig is voorzien en is productie van hernieuwbare elektriciteit niet rendabel.*

AANBEVELING 7 **Zorg dat flexibiliteitsmiddelen bijdragen aan het in balans houden van het energiesysteem en het voorkomen van congestie op alle spanningsniveaus.** *Hierbij is het van belang dat de locatiekeuze, het aansluitniveau en de inzet van batterijen, elektrolyzers en andere flexibiliteitsmiddelen worden afgestemd op een efficiënt gebruik van het energienet. De prikkels om dat ook zo te bewerkstelligen, ontbreken momenteel echter nog. Zorg er met passende incentives voor dat de inzet van de nieuwe vormen van flexibiliteit netcongestie oplost in plaats van verergert. Flexibiliteit vereist niet alleen een landelijk kader, ook op regionaal niveau is een nieuw kader nodig vanwege een andere vraag- en aanbodbalans op de lagere netvlakken.*

AANBEVELING 8 **Versnel beleid voor het ontwikkelen van waterstofopslag in zoutcavernes en ontwikkel beleid voor de strategische opslag van gassen.** *Opslag om het waterstofsysteem in balans te houden is essentieel, anders is het niet goed mogelijk voor elektrolyzers om zich flexibel te gedragen op hernieuwbare elektriciteit en om waterstofcentrales te kunnen inzetten als back-up voor zon en wind. Zoutcavernes voor waterstof zijn al voor 2030 nodig en groei na 2030 moet gelijk oplopen met de ontwikkeling van het waterstofgebruik en infrastructuur. In het toekomstig energiesysteem is daarnaast ook strategische opslag van gassen nodig om tekorten vanwege jaren van misoogst van duurzame energie, (gedeeltelijk) niet beschikbare importvolumes en volledige uitval van de grootste importlocatie te kunnen opvangen. Dit beleid moet beschikbaar zijn in 2030.*

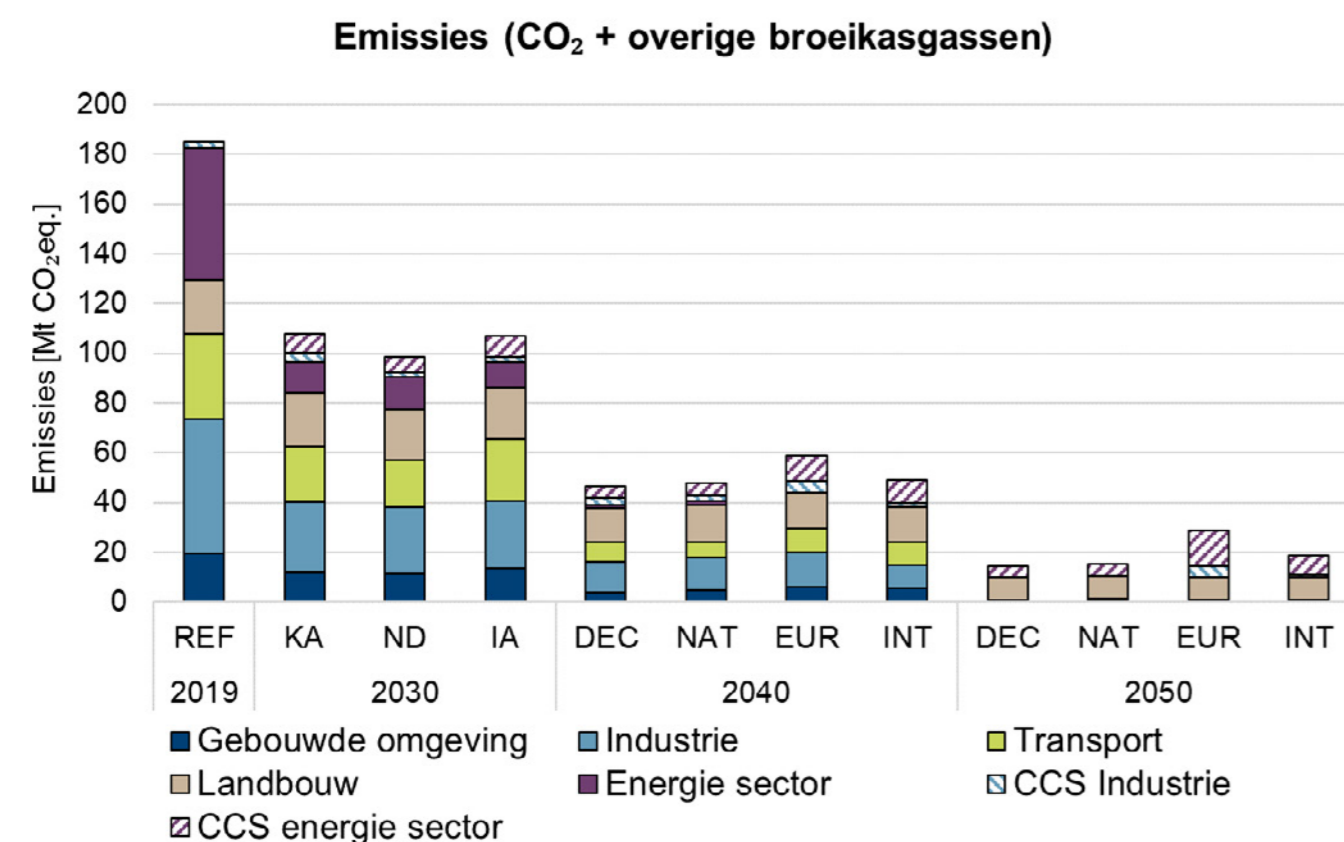
AANBEVELING 9 **Intensiveer de samenwerking met Europa.** *Dit is essentieel voor de toekomstige leveringszekerheid en zorgt voor een betere inpassing van duurzame energie. Blijf de energietransitie in Europa afstemmen, ten behoeve van de interconnectoren, waterstof, gastransport en het net op zee. Zorg ook voor een snelle uitwerking van Europees beleid naar nationale doelen en harmoniseer eveneens Europees de regels voor het berekenen van CO₂-reductie, zodat er geen onlogische activiteiten plaatsvinden tussen buurlanden. Denk hierbij bijvoorbeeld aan het afbreken en bouwen van kerncentrales (zie voor het samenwerken met het buitenland ook aanbeveling 5).*

FLEXIBILITEITSMIDDELEN

<p>Elektronen</p>	<p>Interconnectie (exchange). Het vergroten van de interconnectiecapaciteit tussen landen geeft de mogelijkheid om op elkaar terug te vallen bij tekorten en overschotten. Naarmate productiemiddelen en vraagprofielen tussen landen sterker van elkaar verschillen, is er een grotere flexibiliteitspotentie. Denk hierbij aan een tijdzoneverschil, een ander klimaat of een andere lokale duurzame opwektechnologie. In de scenario's worden tot en met 2050 de interconnectoren sterk uitgebreid naar 19-29 GW en voor een groot deel van het jaar gebruikt voor import en export van elektriciteit. Er wordt op jaarbasis zo'n 40-60 TWh geïmporteerd en 60-90 TWh geëxporteerd.</p> <p>Vraagsturing. Sommige industrie kan bij vraagpieken afschakelen, door middel van marktwerking of met een contract. Mogelijkheden zijn het stoppen of juist extra opstarten van (delen van) het industriële proces, door hybride oplossingen die kunnen overschakelen naar een andere energiedrager of door eigen buffers van de industrie die de energievraag tijdelijk kunnen overnemen of juist gevuld kunnen worden met een extra energievraag. Het aantal aangenomen vollaasturen bedraagt 300 tot 600 uur en 2-4 TWh.</p> <p>Batterijopslag wordt een cruciale bouwsteen van het CO₂-vrije energiesysteem om de (meer)dagelijkse overschotten en tekorten op nationale en regionale schaal te vereffenen. Op lokale schaal vindt deze vereffening mogelijk gedeeltelijk plaats. Richting 2050 voorzien de scenario's in 40-70 GW capaciteit aan batterijopslag, aanzienlijk meer dan in de eerste editie van I13050. Batterijen hebben relatief weinig opslagvolume en maken een relatief groot aantal cycli. Batterijen geplaatst 'achter de meter' bij hernieuwbare opwek bieden aanvullend de mogelijkheid om nog meer hernieuwbare energie op het systeem aan te sluiten met minder inzet van aftoppen. Dan zijn er echter wel beperkingen aan de marktgedreven inzet.</p>	<p>Aanbodsturing (curtailment) is een flexibiliteitsmiddel dat door de energiemarkt of een netbedrijf kan worden ingezet. Het gaat om het minder invoeden van hernieuwbare productie op basis van een marktprijsprikkel of op basis van aansturing vanuit een netsignaal. Het kan incidenteel om grote capaciteit gaan, maar de energieverliezen blijven in de scenario's beperkt tot 5-13 TWh. De precieze hoeveelheid die uiteindelijk afgeschakeld moet worden is pas beschikbaar na uitvoeren van de netberekeningen.</p> <p>Elektriciteitscentrales blijven ondanks de andere flexmiddelen belangrijk voor het opvangen van tekorten. In 2050 is het beschikbare conventioneel regelbaar vermogen gebaseerd op waterstofcentrales en kerncentrales, die zorgen dat aan de elektriciteitsvraag kan worden voldaan als er te weinig duurzame opwek is. In twee scenario's wordt rekening gehouden met kernenergie (3-8 GW, dat zijn 2-6 nieuwe grote kerncentrales). De benodigde hoeveelheid regelbaar vermogen van centrales ligt in een gemiddeld weerjaar in deze scenario's tussen de 15 en de 20 GW. Voor een extremer weerjaar en bij minder sterke ontwikkelingen van andere flexmiddelen is meer regelbaar vermogen nodig. Dit wordt nog nader onderzocht in het eindrapport.</p> <p>Conversies worden enerzijds toegepast als flexibiliteitsmiddel bij elektrische overschotten, anderzijds om aan de vraag naar groene waterstof en hernieuwbare warmte te voldoen (zie hieronder).</p>
<p>Moleculen</p>	<p>Conversies waterstof. Een deel van het aanbod hernieuwbare elektriciteit wordt omgezet naar waterstof, deels om aan de vraag naar duurzame moleculen te kunnen voldoen, en deels om overaanbod duurzaam om te zetten en op te slaan voor de lange termijn (tijdsschaal seizoenen en meer), voor gebruik bij tekortsituaties. In sommige scenario's is een deel van de elektrolyzers direct verbonden aan windparken maar voor het grootste deel zijn ze flexibel. In de scenario's groeit het opgesteld vermogen elektrolyse tot 16-45 GW.</p> <p>Waterstofopslag. Voor langere-termijnopslag (weken tot seizoen) zijn grote volumes aan ondergrondse opslag nodig om het energiesysteem in balans te houden. Aanvullend is strategische opslag nodig om een aantal slechte weerjaren na elkaar, of het (deels) wegvallen van importstromen en uitval van volledige importlocaties te kunnen opvangen. Na 2030 dient het opslagvolume snel te groeien, omdat meer waterstof door flexibele elektrolyzers wordt geproduceerd en afgestemd moet worden op de vraag naar waterstof.</p>	<p>Methaanopslag. Daarnaast is ook opslag van methaan nodig om flexibiliteit te kunnen leveren voor de vraag. De totale hoeveelheid capaciteit voor CO₂-vrij regelbaar vermogen en het totaal benodigde volume aan seizoensopslag (waterstof én methaan) zijn voor alle scenario's ongeveer gelijk.</p>
<p>Warmte</p>	<p>Conversie naar warmte. Waar nu aardgas of restgassen gebruikt worden voor de warmtevoorziening, is in de toekomst elektriciteit één van de bronnen voor duurzame warmte. Power-to-heat speelt ook een rol als flexibiliteitsmiddel. Richting 2050 groeit het opgesteld vermogen industriële flexibele power-to-heat tot 6-11 GW.</p>	<p>Warmteopslag. Warmtenetten kennen een piekvraag die moet worden ingevuld. Warmteopslag voor de korte termijn en voor de lange termijn is nodig om de piekvraag zonder gasketels of elektrische bijstook te kunnen verzorgen.</p>

Disclaimer: bovenstaande technologieën en opties zijn deels complementair aan elkaar maar kennen tevens een sterke wisselwerking. Er is voor een deel uitruil tussen deze opties mogelijk. Deze scenariostudie geeft om die reden geen advies over de precieze hoeveelheid flexmiddelen die wenselijk is vanuit leveringszekerheidsperspectief.

III Ontwikkeling van broeikasgasemissies naar 2050



De uitstoot van broeikasgassen is in de afgelopen dertig jaar (1990-2020) met 25,5% afgenomen.

De Klimaat- en Energie Verkenning 2022 laat zien dat het vastgestelde en het voorgenomen beleid nog onvoldoende is om de huidige ambities voor 2030 te realiseren. De I13050-scenario's gaan ervan uit dat de emissiereductiedoelstellingen worden gehaald. Om deze doelstellingen te halen, vereisen de scenario's dus aanvullende inzet bovenop het bestaande en voorgenomen klimaatbeleid. De scenario's bereiken 55 tot 60% reductie in 2030 en komen uit op een klimaatneutraal energiesysteem en CO₂-neutrale elektriciteitsproductie in 2050.

In de periode tot 2030 wordt de grootste emissiereductie in de industrie verwacht door toepassing van CCS. Tussen 2030 en 2040 komt de reductie voornamelijk door gebruik van elektriciteit en waterstof. Voor de periode na 2040 zijn de ontwikkelingen binnen de industrie van groot belang. Bij verdere krimp en afbouw van industriële activiteiten neemt

de koolstofbehoefte van de industrie af. Bij opschaling van productie van synthetische koolstofhoudende moleculen groeit de behoefte aan circulaire CO₂ als grondstof voor de industrie.

Afvang van CO₂ speelt in alle scenario's een belangrijke rol. In de scenario's Decentrale Initiatieven en Nationaal Leiderschap wordt CCS vooral als een transitiemaatregel ingezet. In de andere scenario's blijft CO₂-afvang ook in 2050 belangrijk voor het realiseren van negatieve emissies via de opslag van koolstof uit Nederland en omliggende landen (CCS), of voor het verkrijgen van grondstof voor synthetische producten (CCU). Dit betreft deels biogene koolstof of CO₂ uit de atmosfeer.

De veertien industriebedrijven met de grootste broeikasgasemissie (samen verantwoordelijk voor 60% van de industriële broeikasgasemissies) verwachten rond 2040 ver te zijn met de reductie van hun scope 1-emissies. De uitstoot van deze veertien industriebedrijven is dan gedaald tot 3,1 - 4,7 Mton, ofwel een reductie van zo'n 85% ten opzichte van de emissies in 2019. Deze industrieën verwachten vanwege productie en deels export van producten en brandstoffen nog wel significante hoeveelheden fossiele koolstof in de keten te brengen. Daarmee is er in alle gevallen sprake van aanzienlijke scope 3-emissies. Dit betreft producten die op grote schaal in Nederland worden gemaakt en later in de keten of in andere landen tot emissies leiden.

Een ander relevant punt is het realiseren van negatieve CO₂-emissies. In 2050 is het energiesysteem klimaatneutraal, maar vinden binnen Nederland naar verwachting nog voor 9 Mton aan emissies plaats van broeikasgassen (methaan en lachgas) vanuit de sectoren landbouw en landgebruik (oxidatie van veenweides). De scenario's bevatten geen maatregelen om deze restemissies binnen het energiesysteem te compenseren.

De verwachte ontwikkeling van de broeikasgasuitstoot leidt tot de volgende aanbevelingen:

AANBEVELING 10 Voorkom dat meerdere sectoren zich rijk rekenen met dezelfde beperkt beschikbare energiedragers.

Maak altijd de consequenties duidelijk voor alle energiedragers en het hele energiesysteem bij het ontwikkelen van een politieke visie en meerjarenprogrammering voor de klimaatopgave. Beschouw in samenhang de energiedragers en energiehoeveelheden die nodig zijn voor de transitie binnen de sectoren (industrie, gebouwde omgeving, mobiliteit, landbouw) en voor de energieketens (elektriciteit, waterstof, methaan, koolstof). Kijk hierbij ook over landsgrenzen heen, zodat internationale ontwikkelingen hierin worden meegenomen. De klimaatopgave is breder dan alleen het energiesysteem.

AANBEVELING 11 Ontwikkel beleid voor de koolstofketen en bepaal hoe Nederland en Europa om willen gaan met ketenemissies bij import en export van producten.

Dit hangt samen met welke (koolstof) intensieve industrie een plaats heeft richting het klimaatneutrale Nederland van 2050. Houd er bij toekomstig beleid rekening mee dat de grondstoffentransitie, op basis van fossiel aardgas en kolen naar niet-fossiele bronnen, een verandering betekent. In plaats van een overschot van fossiele koolstofmoleculen (CO₂) ontstaat een tekort aan biogene koolstofmoleculen en CO₂ uit de atmosfeer. In beleid moet geregeld worden hoe aan deze vraag kan worden voldaan (import of eigen productie). Daarnaast is het ook belangrijk om beleid te ontwikkelen voor de indirecte en buitenlandse emissies die toegerekend kunnen worden aan het Nederlandse systeem in de koolstofketen: de scope 3-emissies. Dit wil zeggen dat er bij import van grondstoffen, brandstoffen en (tussen)producten rekening gehouden moet worden met de emissies bij de productie in het buitenland. Daarnaast betekent het bij export dat

er rekening moet worden gehouden met emissies die voortkomen uit verwerking en/of verbranding ervan in het buitenland. Dit maakt helder hoe groot de bijdrage van Nederland aan de oplossing van het mondiale klimaatvraagstuk is.

AANBEVELING 12 Laat de energiesector de restemissies van andere sectoren niet opvangen, aangezien de extreem snelle verduurzaming van het energiesysteem nu al tegen de grenzen van het uitvoerbare aanloopt en versnelling niet mogelijk is. Om de emissies van broeikasgassen naar nul te reduceren, zijn grote veranderingen nodig. Wanneer andere sectoren zoals industrie, gebouwde omgeving, mobiliteit en landbouw en landgebruik niet snel genoeg of een onvoldoende bijdrage leveren, is de reflex om de (deel)opgave van de energiesector te vergroten. Zorg daarom voor een maatregelenpakket voor iedere sector om bij te sturen bij de jaarlijkse KEV, zonder daarbij andere sectoren te belasten.

Relevante wet- en regelgeving, Kamerbrieven, rapportages, beleidsnota's en beleidsdoorlichtingen met beoogde aanbieding aan de Tweede Kamer in 2023

Op 24 januari 2023 hebben de bewindspersonen van het ministerie van Economische Zaken en Klimaat een integrale planningsbrief aangeboden aan de Tweede Kamer, waarin zij aangeven welke stukken zij verwachten in 2023 aan de Kamer te sturen. Hierbij gaat het om wet- en regelgeving, Kamerbrieven, rapportages, beleidsnota's en beleidsdoorlichtingen. Op basis van deze integrale planningsbrief heeft Netbeheer Nederland gekeken welke (toekomstige) Kamerstukken een relatie hebben tot bovenstaande aanbevelingen. Deze relatie is weergegeven in de volgende tabel:

Aanbeveling	Relevante Kamerstukken
1	Nationaal Programma Energiesysteem (NPE)
2	NPE en Rapportage Kamer Voortgang Strategisch en Groen industriebeleid en/of Kamerbrief maatwerkpaak
3	Zonnebrief, SDE++, Normering Zonneladder, Ontwerp Programma Energiehoofdstructuur, aanvullende voorwaarden aan SDE++
4	Energiewet
5	NPE en Programma Energie Hoofdstructuur
6	NPE en Programma Energie Hoofdstructuur
7	Routekaart energieopslag of Evaluatie SDE++ en vooruitblik richting 2050
8	NPE en Kamerbrief Ombouw Gascentrales
9	NPE of Kamerbrief Energiediplomatie of inzet Energieraden
10	NPE en Kamerbrief regie op versnellen MIEK-projecten, Instrumenten opschaling hernieuwbare waterstof
11	NPE en Rapportage Kamer Voortgang Strategisch en Groen industriebeleid en/of Kamerbrief maatwerkpaak
12	IBO Klimaat, aangescherpte monitoring en conclusies op basis van de KEV



Colofon

**Voorzitter en coördinatie
werkgroep Integrale
Energiesysteemverkenning
2030-2050:**

Marijke Kellner (Gasunie)
Rob Martens (Netbeheer Nederland)
Maarten Afman (Alliander)

**I13050 scenariowerkgroep
en iNET werkgroep:**

Bineke Visman (Alliander)	Marleen Selten (Netbeheer Nederland)
Robbert Cornelissen (Coteg)	Anne Loes Kokhuis (Netbeheer Nederland)
Elke Klaassen (Enexis)	Fabian Kruiper (Rendo)
Raoul Bernards (Enexis)	Michel Bijlsma (Stedin)
Adriaan de Bakker (Gasunie)	Jan Warnaars (Stedin)
Kees Alberts (Gasunie)	Arjan van Voorden (Stedin)
Kristina Lauxen (Gasunie)	Wouter Terlouw (Stedin)
Michiel den Haan (Gasunie)	Julia Peerenboom (TenneT)
Martijn Douwes (Gasunie)	Tim Gaßmann (TenneT)
Pieter Boersma (Gasunie)	Martin Wevers (TenneT)
Luuk Klinkert (Gasunie)	Aafke Huijbens (Westland Infra)
Jarig Steringa (Gasunie)	