

Het energiesysteem van de toekomst: de II3050-scenario's

Integrale energiesysteemverkenning 2030-2050

6 april 2023

Netbeheer
Nederland

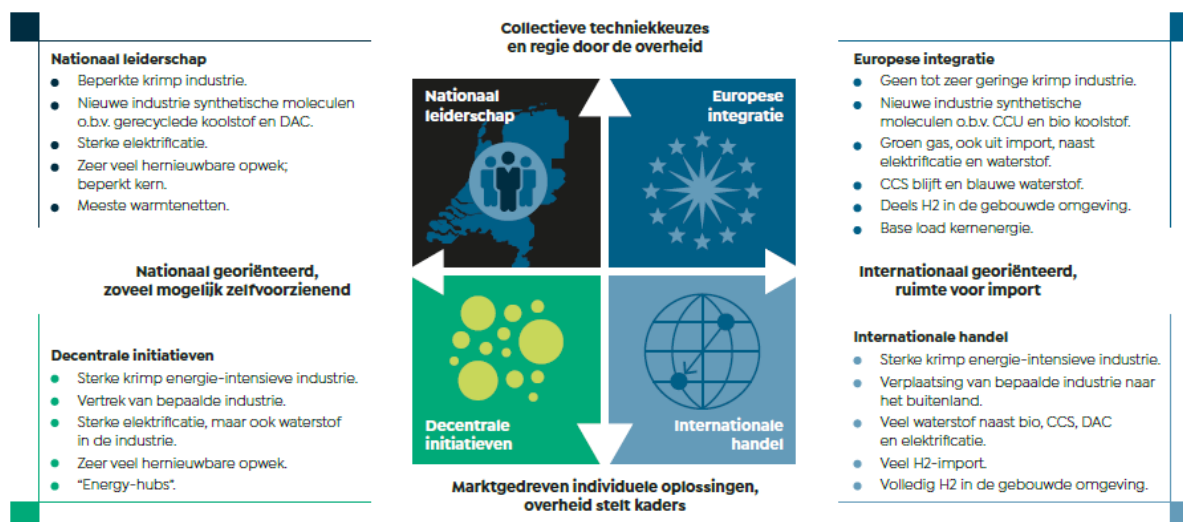


Samenvatting

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 gassen, elektriciteit en warmte moeten op de schop. De manier waarop verschilt sterk tussen de 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

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

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.

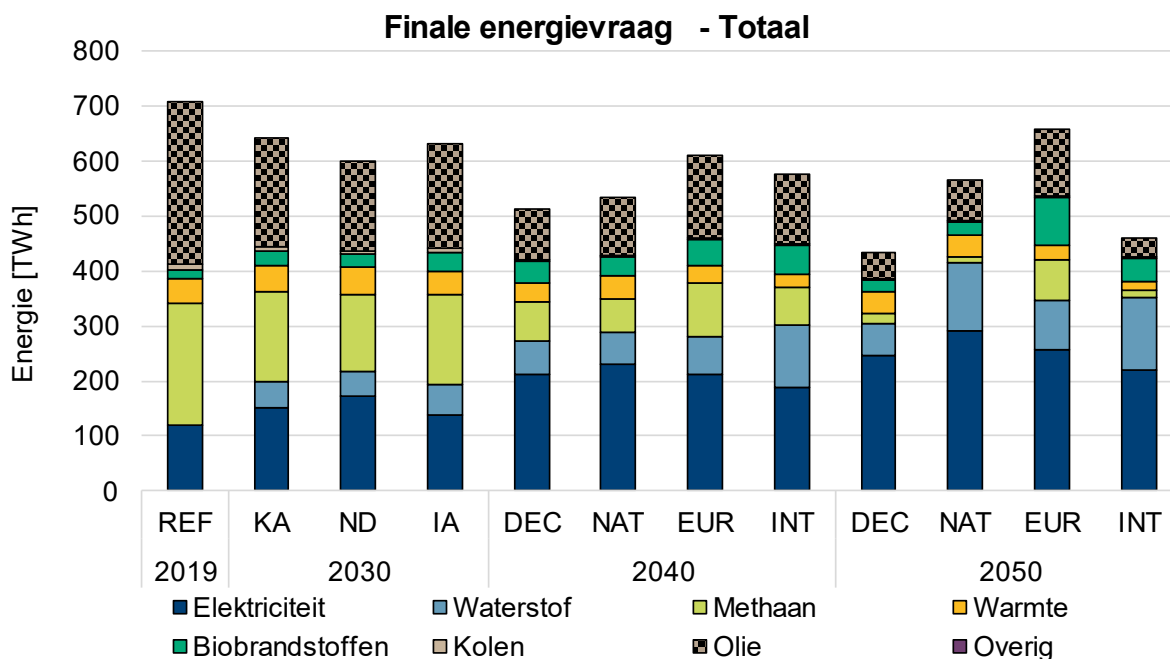
Er zijn veel onzekerheden in het verloop van de energietransitie. Deze onzekerheden zijn verwerkt in vier uiteenlopende scenario's. De vier scenario's kennen, ondanks hun verschillen, een aantal generieke conclusies en aanbevelingen die van belang zijn in alle scenario's. Er moet de komende jaren, in 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.

I – De ontwikkeling van de energievraag en het energieaanbod

a. Energievraag



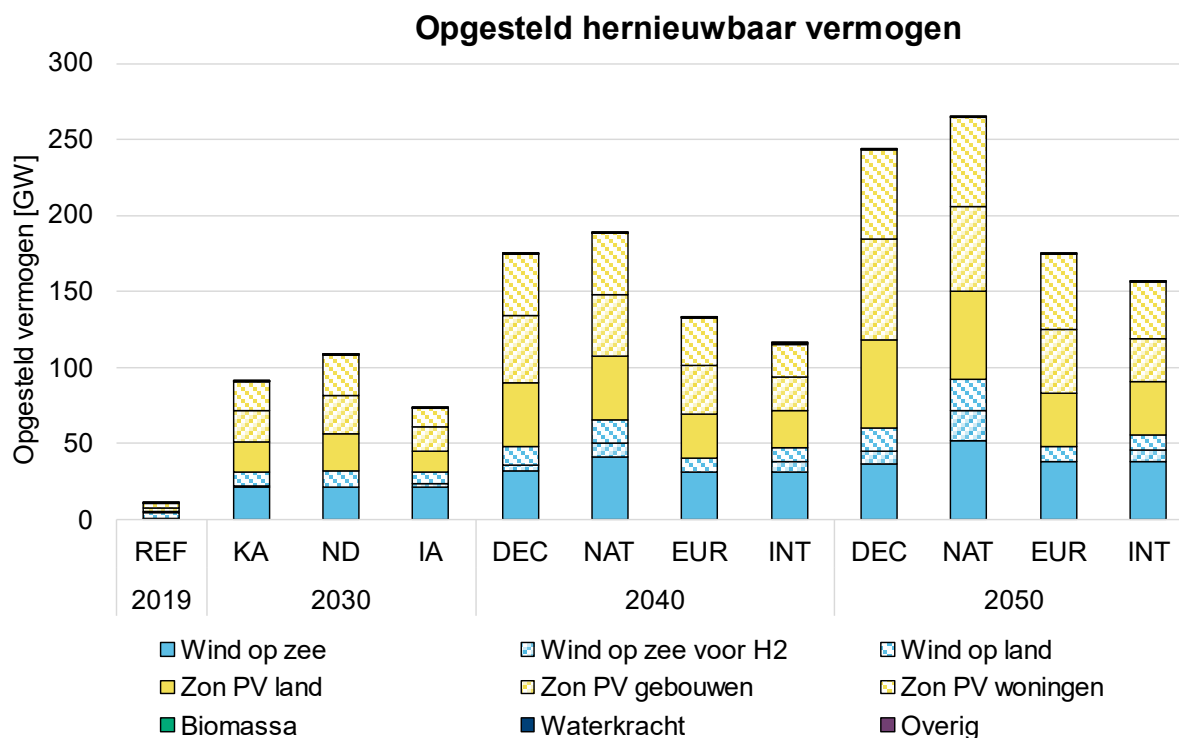
De totale energievraag neemt ten opzichte van nu met 7 tot 39% af in 2050. Dit komt door een stapeling van ontwikkelde technieken, energiebesparing en verhoogde efficiënties. Welke industrie in de toekomst naar Nederland komt en/of in Nederland blijft, heeft een grote impact op de benodigde hoeveelheid 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 gecombineerde 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 transities 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 is 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.

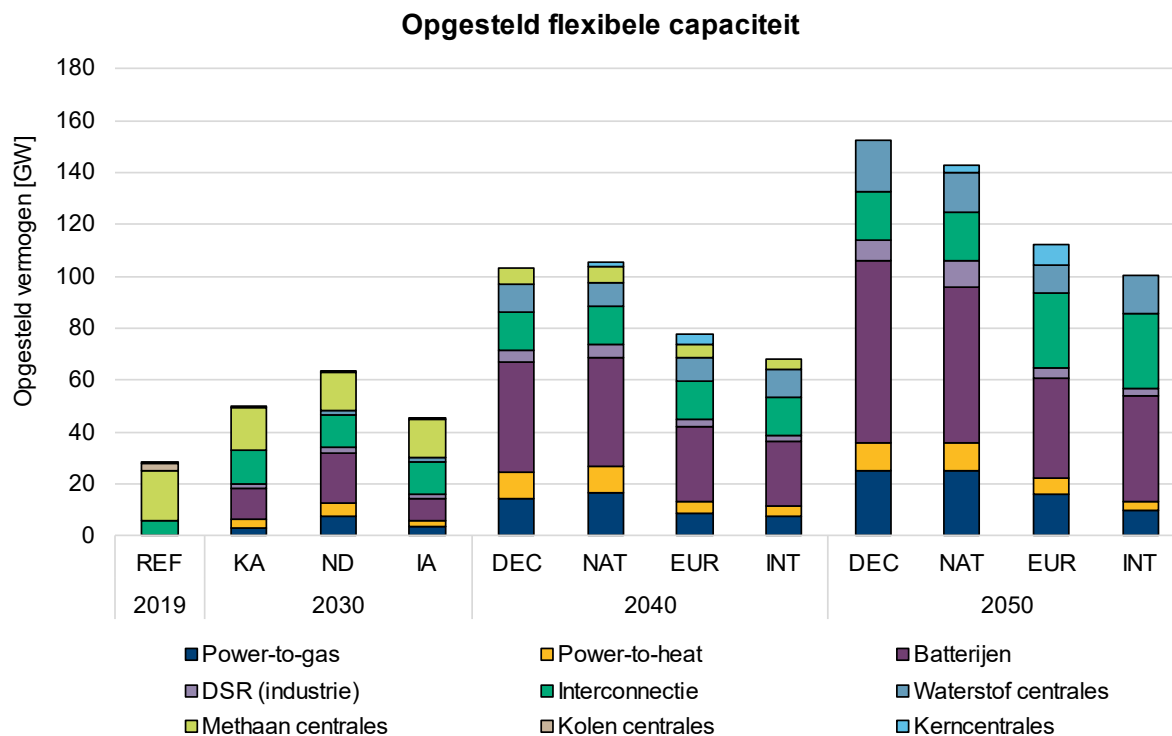
Deze keuzes raken ook het vraagstuk hoe ver wind op zee moet worden uitgebouwd. Willen we (over)productie aanwenden voor mogelijke extra nationale vraag, zoals de productie van groene moleculen voor de industrie in Nederland, of wordt er structureel geëxporteerd om te voorzien in de elektrische vraag 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 zoncapaciteit 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 energiehub 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 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 menigeen 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 (zie de tabel met toelichting op de volgende pagina) 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 tijdsschaal 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.

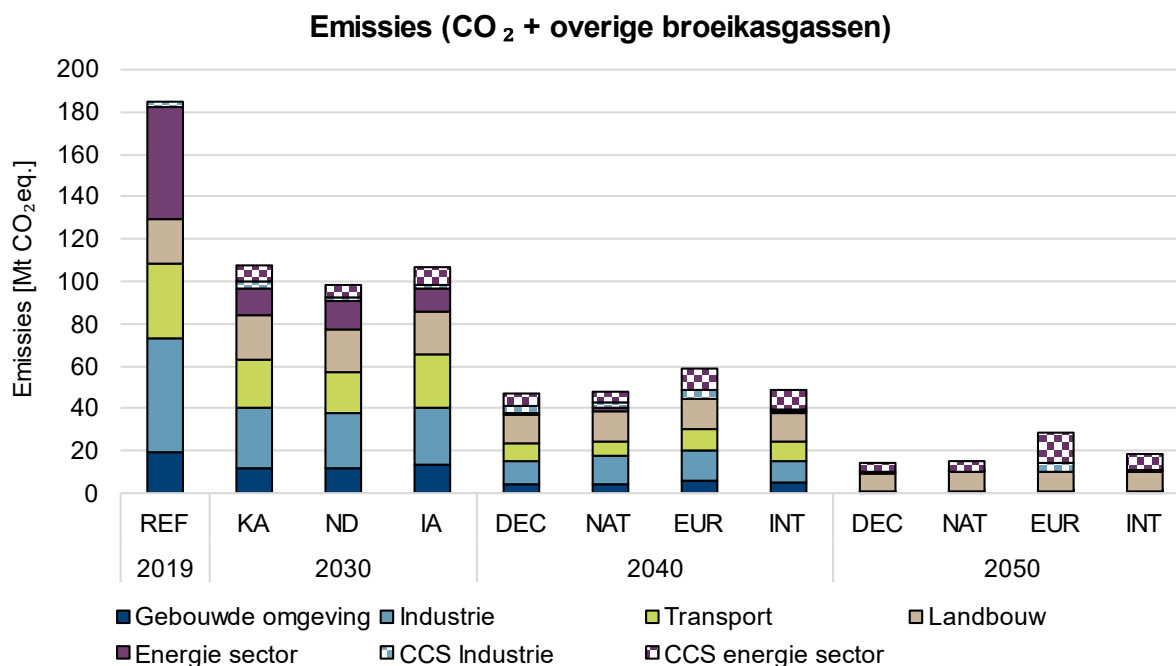
Aanbeveling 7: Zorg dat flexibiliteitsmiddelen bijdragen aan het in balans houden van het energiesysteem en het voorkomen van congestie op alle spanningsniveaus. Hierbij is het van belang dat de locatiekeuze, het aansluitniveau en de inzet van batterijen, elektrolyzers en andere flexibiliteitsmiddelen 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	
ELEKTRONEN	<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 vollasturen 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>
MOLECULEN	<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 seizoenen) 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>
WARMTE	<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>
<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.</p>	

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 IJ3050-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

Samenvatting	2
I – De ontwikkeling van de energievraag en het energieaanbod	3
II – Het belang van flexibiliteit in een klimaatneutraal energiesysteem	7
III – Ontwikkeling van broeikasgasemissies naar 2050	10
1. Inleiding	14
1.1 Achtergrond	14
1.2 Doel van II3050	14
1.3 Waarom een update van II3050?	15
1.4 Samenhang met IP2024 en II3050 eerste editie	16
1.5 Leeswijzer	17
2. Methode en procesbeschrijving	18
2.1 Totstandkoming van het onderzoek in werkpakketten	18
2.2 Scenariodefinitie en energiesysteemmodellering (WP1)	18
2.3 Stakeholderinput (WP2)	21
2.4 Verdieping transitie van de industrie (WP3)	22
2.5 Afstemming met aanpalende trajecten (WP 4)	23
2.6 Volgende stappen	24
3. Scenario's en verhaallijnen	25
3.1 Aanpak opstellen scenario's	25
3.2 Verhaallijnen II3050	26
3.2.1 Decentrale Initiatieven (DEC)	26
3.2.2 Nationaal Leiderschap (NAT)	27
3.2.3 Europese Integratie (EUR)	27
3.2.4 Internationale Handel (INT)	27
3.3 Het Energietransitiemodel	28
4. Uitkomsten en totaalbeeld energiesysteem 2050	29
4.1 Totaaloverzicht van scenario's	29
4.2 Eindgebruik van energie	33
4.3 Primaire energiebronnen	35
4.4 Energiedragers	36
4.4.1 Elektriciteit	36
4.4.2 Waterstof en waterstofdragers (ammoniak)	40
4.4.3 Methaan (aardgas en groen gas)	44
4.4.4 Warmte	46
4.4.5 Biogene brand- en grondstoffen	47
4.4.6 Synthetische brand- en grondstoffen	48
4.5 Flexibiliteitsanalyse	51
4.5.1 Elektronen	51
4.5.2 Moleculen	62
4.5.3 Warmte	66
4.6 Ontwikkeling uitstoot broeikasgassen	68
4.6.1 Ontwikkeling uitstoot broeikasgassen 1990-2020	68
4.6.2 Prognose ontwikkeling uitstoot CO ₂ -emissies	69
4.6.3 Prognose ontwikkeling uitstoot overige broeikasgassen	70
4.6.4 Totaalbeeld ontwikkeling broeikasgassen 2030-2050	71

4.7	CO ₂ -balans	72
5.	Sectorale invulling	75
5.1	Gebouwde omgeving	75
5.1.1	Huishoudens	76
5.1.2	Gebouwen (utiliteitsbouw)	79
5.2	Mobiliteit	81
5.2.1	Personenvervoer	82
5.2.2	Vrachtervervoer	86
5.2.3	Internationaal transport	90
5.3	Industrie	91
5.3.1	Methode	92
5.3.2	Scenario's voor de industrie	93
5.3.3	Invulling industrie	93
5.3.4	Resultaten per industriële sector	97
5.3.5	Nieuwe industrie: synthetische brandstoffen en grondstoffen	113
5.4	Landbouw en landgebruik	114
5.4.1	Landbouw (energievraag glastuinbouw)	114
5.4.2	Overige emissies landbouw en landgebruik	116
5.5	Elektriciteitsaanbod	117
6.	Regionalisering	120
6.1	Introductie	120
6.2	Aanpak per sector	120
6.3	Uitkomsten regionalisering	122
7.	Inzichten II3050 en vervolg	125
7.1	Inzichten en implicaties van de scenario's	125
7.2	Onzekerheden en dilemma's	129
7.3	Varianten voor nader onderzoek	137
	Bijlage A: Invloed van het weerjaar	141
	Bijlage B: Cijferbijlage	142
	Bijlage C: Afkortingen en begrippen	148
	Afkortingen	148
	Begrippen	150
	Bijlage D: ETM links	152
	Colofon	153
	Dankwoord	153

1. Inleiding

1.1 Achtergrond

De energie- en grondstoffentransitie vormt een grote maatschappelijke uitdaging. Vanuit een maatschappij die grotendeels gebaseerd is op fossiele energie, werken we aan een duurzame samenleving die geen broeikasgassen meer uitstoot of misschien wel netto broeikasgassen vastlegt. Deze transitie vergt ingrijpende veranderingen en betekent dat wij ons energiesysteem opnieuw vorm moeten geven.

Er zijn verschillende eindbeelden denkbaar voor hoe een toekomstig klimaatneutraal energiesysteem eruit kan komen te zien. Om deze verschillende routes te verkennen, hebben Alliander, Coteq, Enexis, Gasunie, Rendo, Stedin, TenneT en Westlandinfra (hierna: netbedrijven) de Integrale Energiesysteemverkenning 2030-2050 (hierna: I13050) uitgevoerd. Voor deze studie zijn externe experts, relevante brancheverenigingen en overheidsinstanties betrokken voor input en consultatie.

Door de grote verscheidenheid aan invalshoeken, zienswijzen en expertise op basis waarvan de scenario's zijn vormgegeven, zijn deze van grote waarde voor alle partijen die werken in de energiesector. Wij moedigen iedereen die werkzaam is in de energietransitie aan, om zoveel mogelijk gebruik te maken van deze kennis en onderliggende data. Om deze reden wordt deze scenariostudie als tussenrapportage gepubliceerd.

Deze scenariostudie wordt gevolgd door een eindrapport later dit jaar, waarin de netbedrijven de gevolgen van de scenario's lokaal analyseren en definiëren welke impact die hebben op de energie-infrastructuur. Deze verdiepingsslag kan leiden tot een lichte bijstelling van de resultaten.

De verschillende routes naar klimaatneutraal in 2050 hebben 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, mobiliteit, gebouwde omgeving en landbouwsector. Deze transformatie vergt systeemveranderingen. En dat gaat verder dan alleen het energie- en grondstoffensysteem. Om de uitstoot van broeikasgassen een halt toe te roepen, zijn ook maatschappelijke veranderingen nodig, die invloed hebben op hoe wij wonen, reizen, eten, consumeren en hoe onze leefomgeving eruitziet.

Deze transitie vraagt tevens om innovaties en moeilijke keuzes. Niet alle fossiele kapitaalgoederen kunnen hun technische levensduur uitzitten. Een deel moet eerder worden afgeschreven of omgebouwd, zodat ze bijdragen aan een duurzaam energiesysteem. Dit alles leidt tot een grondige en ongekende verbouwing van het energiesysteem.

Aan de basis van het energiesysteem staat de energie-infrastructuur. De netten voor gas, elektriciteit en warmte moeten dan ook op de schop. Om zich een beeld te vormen van hoe deze ontwikkelingen de energienetten raken, maken de netbedrijven een Integrale Infrastructuurverkenning voor de periode 2030 tot 2050 (I13050). In deze verkenning wordt de mogelijke impact van al deze factoren in kaart gebracht.

1.2 Doel van I13050

Het doel van I13050 is duidelijk te maken welke keuzes gemaakt moeten worden om uiterlijk in 2050 tot een *klimaatneutraal energiesysteem* te komen. Daarnaast geeft de verkenning inzicht in welke energie-infrastructuur en flexibiliteitsmiddelen op de lange termijn nodig kunnen zijn, tegen de achtergrond van vooraf omschreven

scenario's. De scenario's dienen om de onzekerheid te vangen die inherent is aan het voorspellen van toekomstige ontwikkelingen én om de netbedrijven in staat te stellen voor uiteenlopende maar realistische toekomstbeelden de noodzaak van investeringen te toetsen.

II3050 vormt een integrale beschouwing. De verkenning bestaat uit verschillende scenario's, omdat een gedetailleerde voorspelling op langere termijn niet mogelijk is. De II3050-scenario's geven daarom uiteenlopende mogelijke ontwikkelingen van het toekomstige energiesysteem weer. De gekozen scenario's, bedoeld als 'realistische uitersten' van het toekomstige energiesysteem, zijn ontwikkeld door de netwerkbedrijven. De nadruk in de verkenning ligt daarom op de aannames met grote effecten voor de energie-infrastructuur, zoals elektrificatie, duurzame gassen en warmtenetten.

De scenario's zijn opgesteld met de volgende nationale klimaatdoelstellingen in het achterhoofd:

- De recente aankondiging van het kabinet om het Klimaatakkoord voor 2030 aan te scherpen van 49% naar ten minste netto 55% minder uitstoot (bron: Coalitieakkoord 2021-2025).
- De ambities van het kabinet voor 2035 en 2040, te weten 70% respectievelijk 80% minder uitstoot.
- Het streven om in 2050 een reductie te behalen van minimaal 95%² in de uitstoot en een volledig klimaatneutraal energiesysteem inclusief een volledig klimaatneutrale elektriciteitsproductie in 2050, in lijn met de doelen van de Europese Klimaatwet³.

De Tweede Kamer heeft recent besloten de Klimaatwet aan te scherpen tot netto klimaatneutraliteit voor Nederland in 2050 met een amendement voor het realiseren van negatieve emissies binnen Nederland ná 2050. Dit is niet meegenomen als doelstelling van deze studie.⁴ Over deze motie is op 14 februari 2023 gestemd. Genoemde aanscherping betekent mogelijk dat er negatieve emissies gerealiseerd moeten worden indien er restemissies buiten het energiesysteem blijven. De eventuele uitwerking hiervan is geen onderdeel van deze editie van II3050.

De scenario's maken over een tijdshorizon tot en met 2050 inzichtelijk hoe het energiesysteem in de energietransitie verandert. Dit kan beleidsmakers ondersteunen bij het maken van keuzes. Ook helpen de dilemma's die voortkomen uit de verschillende aannames, het juiste gesprek te voeren met verschillende interne en externe partijen.

1.3 Waarom een update van II3050?

Sinds de publicatie van de eerste editie van de Integrale Infrastructuurverkenning 2030-2050 (II3050) in april 2021 hebben in een kort tijdsbestek een flink aantal ontwikkelingen plaatsgevonden die de transitie beïnvloeden. De volgende ontwikkelingen zijn meegenomen bij de update van de II3050-scenario's:

1. Een wereld in verandering

- De EU heeft de Green Deal gepresenteerd met het Fit for 55-programma.
- Er is een coalitieakkoord gesloten, met daarin aangekondigd een extra ambitieus beleidsprogramma voor CO₂-emissiereductie in Nederland.
- Het politieke besluit is genomen om Borssele langer open te houden en om nieuwe kerncentrales te bouwen.
- Het Rijk is voornemens om in 2030 10 GW extra wind op zee te ontwikkelen en aan te landen.

² <https://wetten.overheid.nl/BWBR0042394/2022-03-02>

³ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/NL/TXT/HTML/?uri=CELEX:32021R1119&from=EN#d1e1072-1-1>

⁴ <https://www.tweedekamer.nl/kamerstukken/wetsvoorstellen/detail?id=2022Z14805&dossier=36169>

- De overheid heeft met het Nationaal Plan Energiesysteem (NPE) – een van de aanbevelingen van de eerste editie van I13050 – een overkoepelend beleidsprogramma ingericht dat moet helpen de ontwikkeling van het klimaatneutrale energiesysteem te versnellen.
- De industrie heeft per cluster plannen gemaakt voor verduurzaming (cluster-energiestrategieën, CES) die een nationaal programma voor de energietransitie van de industrie (PIDI) voeden.
- De oorlog op het Europese continent heeft een schokgolf teweeggebracht. Voor het energiesysteem is het beseft ontstaan hoe groot het belang van voorzienings- en leveringszekerheid is en wat het kan betekenen als de beschikbaarheid van (fossiele) energie niet gegarandeerd is.

2. Verwerken van feedback op I13050 eerste editie en aanpalende beleidstrajecten

Op de eerste editie van de I13050-scenario's is feedback gekomen. Deze punten zijn verwerkt in de tweede editie van de verkenning:

- Verdiepen op marktsectoren en planvormende trajecten. Te denken valt aan provinciale systeemstudies, sectorale plannen zoals de Nationale Agenda Laadinfrastructuur (NAL), Regionale Energie Strategieën (RES), Cluster Energie Strategieën (CES), Transitievisies Warmte (TVW), Verkenning aanlanding wind op zee (VAWOZ), Nationaal Waterstof Programma (NWP), etc.
- Loslaten van de vooraf bepaalde algemene groei- of krimpverwachting voor industrie, mobiliteit en de overige sectoren, als bepalend onderscheid voor de scenario's. In plaats daarvan is specifieke input verwerkt in de scenario's.
- Verdiepen op flexibiliteit: zicht krijgen op meerdere manieren om de uurlijkse onbalans van energievraag en -aanbod op te lossen met behulp van flexibiliteitsmiddelen.
- Frisse blik (externe experts) aan boord halen. Dit om de scenarioverhaallijnen van de netbeheerders uit te dagen en tunnelvisie te voorkomen.
- Beter betrekken van stakeholders: input van sectorvertegenwoordigers beter meenemen en ruimte creëren voor discussie over tussentijdse resultaten.
- Verdieping industrie: beter onderbouwde modellering van de transitie van de industrie door het ophalen van specifieke input bij de industrie (G14) en clusters (C6).

3. Actualisatie van de investeringsplannen van de netbeheerders (IP2024-scenario's)

De netbeheerders hebben scenario's geactualiseerd voor de periode 2025-2035 ten behoeve van hun investeringsplannen. De IP2024-scenario's vormen het vertrekpunt voor deze I13050:

- Door aan te sluiten op de IP2024-scenario's ontstaat zicht op hoe de transitie richting 2050 eruit zou kunnen zien. Met behulp van de IP2024-scenario's is een prognose gemaakt van de ontwikkeling van het energiesysteem. De periode 2030, 2035 en 2040 vormt een cruciale fase voor het maken van tijdige systeemkeuzes en de programmering van 'infrastructuurontwikkelpaden'.
- De regionalisatie van de scenario's zijn geüpdatet om zo goed mogelijk aan te sluiten bij de verschillende planvormingstrajecten en de werkwijze die de bedrijven nu hanteren voor het integraal programmeren. Voor de investeringsplannen van netinfrastructuur spelen inzichten in de lokale context en ontwikkelingen een steeds grotere rol.

1.4 Samenhang met IP2024 en I13050 eerste editie

Samenhang van deze studie met eerdere verkenningen naar transitie energiesysteem

In 2017 heeft Netbeheer Nederland een eerste verkenning gedaan naar wat verschillende mogelijke energietransitieroutes betekenen voor de maatschappij en voor de infrastructuur.⁵ In 2020-2021 is deze verkenning geüpdatet en verbreed: I13050. I13050 bevat een integrale blik op het hele energiesysteem en veel partijen gebruiken de eerste editie van I13050 voor eigen visie- en planvorming. Als gevolg van de snelle

⁵ Netbeheer Nederland, 2017, Net voor de Toekomst

ontwikkelingen in de energietransitie, Europese en mondiale veranderingen en nieuwe inzichten is II3050 toe aan een update. Deze editie kijkt, nog meer dan de vorige, naar de transitie van het gehele energiesysteem en heeft daarom als ondertitel Integrale Energiesysteemverkenning meegekregen.

Samenhang en verschillen tussen II3050 en investeringsplannen

De II3050 en andere energiesysteemverkenningen of energiesysteemvisies zijn in beginsel geen basis voor investeringen in infrastructuur. Er is altijd verder onderzoek nodig in het kader van de investeringsplannen (IP) om tot de juiste infrastructuurkeuzes te komen. De focus voor de verkenning in II3050 ligt dan ook op het onderzoeken en doordenken van mogelijke ontwikkelingen op de langere termijn. De verkenningen bieden perspectief en houvast om investeringsplannen uit het investeringsplanproces te toetsen aan de scenarioruimte. Toetsing van de korte termijn investeringsplannen aan de lange termijn ontwikkelpaden levert onderbouwing voor de toekomstvastheid. II3050 onderzoekt hoe groot de toekomstige opgave voor de infrastructuur is onder verschillende aannames én welke ontwikkelrichtingen mogelijk zijn. De opgedane inzichten uit deze verkenning dragen bij aan de opgave van netbeheerders om ook op de langere termijn een betrouwbaar energiesysteem te garanderen.

1.5 Leeswijzer

Deze rapportage beschrijft de scenario's van II3050 en geeft een toelichting op de wijze van totstandkoming, de uitgangspunten, de inhoud en kwantitatieve uitwerking ervan. Tevens staan we uitgebreid stil bij een aantal vraagstukken waar we in het werkproces tegenaan zijn gelopen en de implicaties hiervan.

In hoofdstuk 2 komen de methode en het gevolgde proces aan bod. Hoofdstuk 3 bevat de uitgewerkte scenario's en de verhaallijnen waarbinnen deze tot stand kunnen komen. In hoofdstuk 4 staan de uitkomsten voor het totale energiesysteem benoemd plus de verschillen tussen de scenario's. Hoofdstuk 5 bespreekt de uitkomsten per sector. Hoofdstuk 6 beschrijft de gevolgde regionalisering, om de uitkomsten te kunnen vertalen naar effecten op de netten van de individuele netbeheerders. Tot slot benoemt hoofdstuk 7 de voornamelijkste inzichten, implicaties en dilemma's van de scenario's en geeft het een overzicht van de voorgenomen varianten die in de volgende fase van dit traject onderzocht worden. In de bijlage van dit rapport is een lijst van begrippen en afkortingen opgenomen. Daarnaast is in de bijlage ook een toelichting op de invloed van het weerjaar en een overzicht van belangrijke kengetallen gegeven.

In het najaar volgt het eindrapport van de tweede versie van II3050, waarin onder andere de impact en mogelijke knelpunten van de scenario's op de energie-infrastructuur en de verdere implicaties daarvan op ruimte, kosten en maakbaarheid worden beschreven.

2. Methode en procesbeschrijving

2.1 Totstandkoming van het onderzoek in werkpakketten

Na de publicatie van de eerste versie van II3050 in april 2021 hebben de gezamenlijke netbedrijven een programma uitgewerkt voor een vervolgcyclus op de verkenning. Voor het uitwerken van de update van de verkenning – II3050 tweede editie – is een aantal inhoudelijke verbeterpunten voorzien, waaronder het uitwerken van de ontwikkelpaden van het energiesysteem, flexibiliteit en infrastructuur via de steekjaren (2030-2035-) 2040-2050, de ruimtelijke alternatieven en het nauw samenwerken met Rijksprogramma's. Tevens wordt voor elk van de opties de impact op kosten, ruimte en uitvoerbaarheid inzichtelijk gemaakt.

Om dit te bereiken, zijn de volgende werkpakketten opgesteld:

WP1: Scenariodefinitie en energiesysteemmodellering. Update van de Klimaatneutrale Energiescenario's 2050 (Berenschot & Kalavasta, 2020; Netbeheer Nederland, 2021). Deze update is primair door de scenariowerkgroep van Netbeheer Nederland uitgevoerd, een werkgroep waarin de scenarioverantwoordelijken (strategen en analisten) van de verschillende netbedrijven deelnamen, gebruikmakend van de input uit de andere werkpakketten.

WP2: Stakeholderinput. In dit werkpakket is de externe inbreng voor de scenario's georganiseerd en gefaciliteerd door onafhankelijke deskundige adviesbureaus. Doel is dat de verschillende stakeholders (markt- en overheidspartijen) input leveren op de actualisatie, dus hierover meedenken, zodat de geüpdatete scenarioverhaallijnen en -uitwerkingen voldoende worden gedragen. De II3050-scenario's zijn relevant voor een groot aantal partijen. De insteek is dus input ophalen, challengen en verwerken, en vervolgens ook tussentijdse resultaten bij stakeholders toetsen en valideren.

WP3: Verdieping transitie van de industrie. De intensieve industrie is geraadpleegd over de verwachte en mogelijke koers van verduurzaming van deze sector. Hiermee is de modellering van de transitie van de industrie nader onderbouwd.

WP4: Afstemming met aanpalende trajecten zoals het Nationaal Plan Energiesysteem, het Expertteam Energiesysteem 2050, de Trajectverkenning Klimaatneutraal van het PBL en de klimaatneutrale scenario's van TNO. Hiermee is geleerd van elkaars inzichten en zijn de scenario's verrijkt.

Onderstaand zijn voor de verschillende werkpakketten de stappen en het gevolgde proces globaal beschreven.

2.2 Scenariodefinitie en energiesysteemmodellering (WP1)

Het eerste werkpakket richtte zich op het herzien en actualiseren van de scenario's uit II3050 eerste editie, wat heeft geleid tot diverse bijstellingen. Het inhoudelijke werk is uitgevoerd door de scenariowerkgroep van Netbeheer Nederland, bestaande uit scenario-experts en strategen van de verschillende bedrijven.

In het eerste halfjaar van 2022 lag de focus op de eindbeelden voor 2050. Deze eindbeelden zijn vastgesteld in juli 2022. Vanuit dezelfde scenario werkgroep zijn in december 2022 de scenario's vastgesteld voor het IP2024, die ook in de II3050 worden gehanteerd (2025, 2030, 2035). In de periode december-januari 2023 is vervolgens het jaar 2040 gedefinieerd voor de scenario's van II3050.

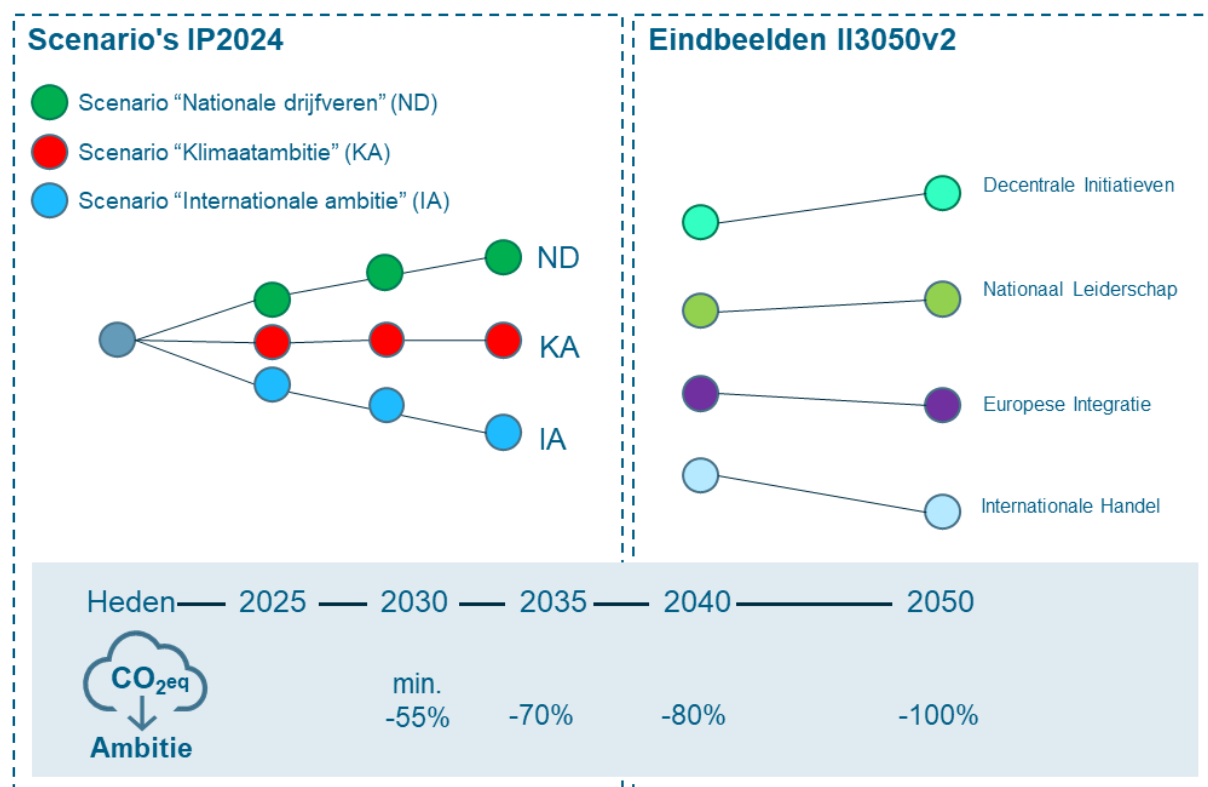
Belangrijkste werkzaamheden:

- Herijken van de verhaallijnen per sector voor 2050. Hiertoe zijn sectorale ontwikkelingen gecombineerd met de opgehaalde stakeholderinput en vertaald naar scenario's.
- Kwantificering van vraag en aanbod voor de verschillende sectoren, inclusief de ontwikkelpaden. Hierbij zijn bronnen gebruikt zoals routekaarten, technische rapporten, energiesysteemstudies en stakeholderinput. Dit resulteerde in grote wijzigingen.
- Uitwerken van de scenario's in het Energietransitiemodel (ETM).
- Controle op consistentie en energiesysteemanalyse voor de vier belangrijkste ketens (elektriciteit waterstof, methaan en warmte), waarbij vraag en aanbod in balans zijn gebracht.
- Doorontwikkelen van de regionalisatiemethodiek zoals opgesteld voor de eerste versie van II3050. Door regionalisatie worden de landelijke scenario's geografisch verspreid. Hierdoor kan de lokale energievraag en –aanbod gekoppeld worden aan specifieke assets zoals stations.

Samenhang scenario's IP2024 en II3050

De vier eindbeelden van de tweede versie van II3050 (jaren 2040 en 2050) vloeien voort uit de drie IP2024-scenario's (jaren 2025, 2030 en 2035):

- Het IP-scenario Nationale Drijfveren (ND) ligt hierbij op een logisch transitiepad met de eindbeelden Decentrale Initiatieven (DEC) en/of Nationaal Leiderschap (NAT).
- Het IP-scenario Internationale Ambitie (IA) ligt op het pad richting de eindbeelden Europese Integratie (EUR) en/of Internationale Handel (INT).
- Het IP-scenario Klimaatambitie (KA) ligt in het midden en kan nog door ontwikkelen tot alle vier de eindbeelden in II3050.



Figuur 1. Samenhang tussen de scenario's voor IP2024 en de eindbeelden voor de tweede versie van II3050.

De vier eindbeelden in de tweede versie van II3050 hebben bewust een grote bandbreedte: elk toekomstbeeld hanteert fundamenteel andere uitgangspunten voor de wijze waarop de energievoorziening zich ontwikkelt binnen realistische kaders. Op deze manier beogen we een zo breed mogelijk scala aan mogelijke toekomstige ontwikkelingen af te dekken en dus 'het speelveld' te verkennen.

Eisen aan de scenario's

De scenario's beschrijven voor 2050 verschillende realistische uitersten voor het klimaatneutrale energiesysteem. Elk scenario heeft een andere verwachte impact op de energie-infrastructuur. De scenario's zijn dus niet 'de' voorspelling van 'de' toekomst, maar mogelijke toekomstige ontwikkelingen. Voor de actualisatie is een aantal uitgangspunten en wensen voor de update gedefinieerd (zie ook paragraaf 1.3: Waarom een update). Deze vormen het vertrekpunt om de scenario's vast te stellen.

Realisme en relevantie

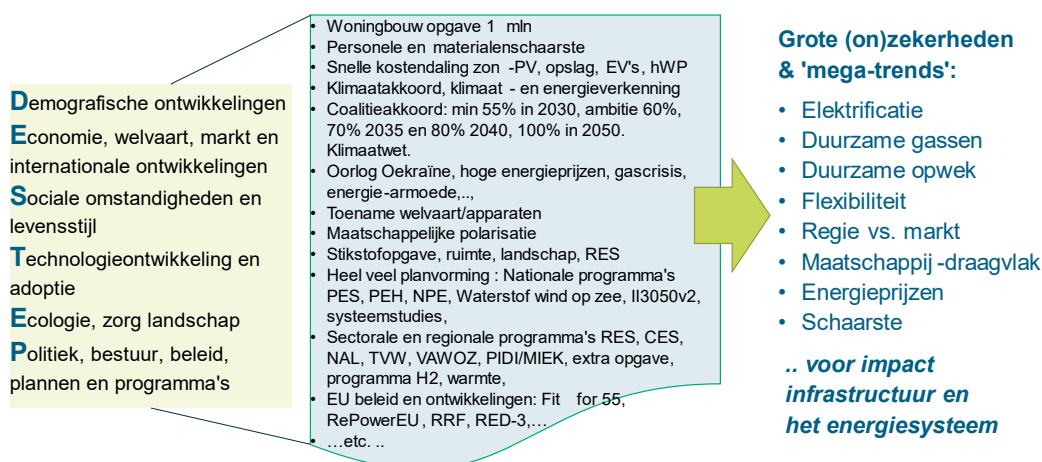
Het doel van II3050 is om inzicht te bieden in de ontwikkelroutes naar een klimaatneutraal energie- en grondstoffensysteem. Daarvoor moeten de scenario's relevant, realistisch en voorstelbaar zijn. Relevantie en realisme worden onder andere bereikt door veel ruimte te geven aan ontwikkelingen die een hoge mate van zekerheid kennen. Tegelijkertijd hebben we per definitie te maken met onzekerheid – we proberen immers een verborgen toekomst te voorspellen. Technieken die mogelijk een fundamentele impact hebben op de transitie, zijn eveneens in de scenario's opgenomen. Sommige ontwikkelingen zijn echter zeer onzeker en daarom in verschillende mate of slechts in een deel van de scenario's meegenomen. Waar nodig wordt hiervan een variantanalyse gemaakt om hun impact op de transitie te kunnen duiden. Technieken die nog zo innovatief zijn dat ze anno 2022 alleen op lab-schaal bestaan (lage TRL), zijn buiten beschouwing gelaten in de scenario's. Deze technieken kunnen waarschijnlijk onvoldoende snel opgeschaald worden om veel bij te dragen aan de transitie. Mogelijk worden deze technieken na 2050 wel relevant.

Zekerheden en onzekerheden

Voor de gestructureerde beschouwing van de verschillende mogelijke ontwikkelingen is gebruik gemaakt van het zogenaamde DESTEP-scenarioraamwerk. Binnen dit raamwerk worden externe onzekerheden meegenomen op het gebied van demografische ontwikkelingen, economische ontwikkelingen (inclusief markt- en internationale ontwikkelingen), sociale omstandigheden (en levensstijl), technologische ontwikkelingen (en technologie-adoptie), ecologische omstandigheden, politieke, bestuurlijke en beleidsonzekerheden (inclusief de plannen en programma's voor de energietransitie). De grootste verschillen in de verhaallijnen van de scenario's liggen op de terreinen markt- en internationale ontwikkelingen, technologische ontwikkelingen, en beleids-/bestuurlijke ontwikkelingen. Figuur 2 toont het DESTEP-scenarioraamwerk dat is gehanteerd bij het uitwerken van de relatieve zekerheden en onzekerheden.

Transitiepad

Het tijdvenster dat in de scenario's wordt uitgewerkt, is de periode tot en met 2050, omdat we in deze verkenning geïnteresseerd zijn in de verschillende visies of ontwikkelroutes voor een klimaatneutraal energiesysteem in 2050. Deze datum sluit aan bij de ambities van de Klimaatwet.



Figuur 2. Het DESTEP-scenario dat is gehanteerd bij het uitwerken van de relatieve zekerheden en onzekerheden bij de scenario's.

2.3 Stakeholderinput (WP2)

Voor II3050 is het aan boord halen van inzichten van 'buiten' belangrijk. De scenario's moeten immers het speelveld van de belangrijkste ontwikkelingen in het energiesysteem bevatten, en dat dient een gedeelde visie te zijn. Daarom is een uitvoerig proces van stakeholderconsultatie en -participatie doorlopen, ondersteund door onafhankelijke consultants van Berenschot en Kalavasta. In dit proces zijn marktpartijen, overheden, toezichthouders en kennisinstellingen betrokken.

Het proces omvatte de volgende stappen:

- Organiseren van vijf klankbordgroep bijeenkomsten.
- Organiseren van zes 'sectortafels': rondetafelgesprekken met sectorspecialisten en branchevertegenwoordigers (plus schriftelijke inbreng).
- Interviews met vijf deskundigen (Donald Pols, Laetitia Ouillet, Jilles van den Beukel, Marjan Minnesma en Sjak Lomme) die nog niet bij II3050 betrokken waren.
- Vastleggen en documenteren van de ontvangen input, adviseren richting de scenariowerkgroep en terugkoppelen aan de stakeholdergroep.

"Zelfvoorzienendheid moet geen focus zijn; richt je op een gediversifieerde energiemix, zowel landen als bronnen." – Donald Pols

"Welke zekerheid hebben netbeheerders dat industrie blijft? Afspraken maken over eventuele kosten van infra bij vertrek na investering is verstandig." – Jilles van den Beukel

"De scenario's zijn zeer techno-optimistisch. Ze houden geen rekening met eventuele tegenslagen op het gebied van technologische vooruitgang/innovatie." – Laetitia Ouillet

De rolverdeling voor het ophalen van stakeholderinput zag er als volgt uit:

- Bureau Berenschot was verantwoordelijk voor het voorbereiden en faciliteren van de klankbordgroep bijeenkomsten over de scenario's, de sectortafelgesprekken en gerichte interviews met deskundigen. De bijeenkomsten werden door Netbeheer Nederland voorgezeten.
- Bureau Kalavasta was verantwoordelijk voor het vormgeven van een bottom-up proces voor de scenario-ontwikkeling voor de industrie, gericht op de veertien grootste industriebedrijven, de zes industrieclusters, de decentrale industrie en de afvalverwerking. Dit proces is nader beschreven in paragraaf 5.3.
- De scenariowerkgroep van Netbeheer Nederland heeft de regie over het scenario-ontwikkelingsproces (zoals beschreven in WP1) en besluit over de meegenomen aannames in de scenario's. De werkgroep heeft de ontvangen input verwerkt in de scenario's of transparant inzicht gegeven in de argumenten voor afwijkende aannames.

Deze aanpak is gevolgd om de kwaliteit, robuustheid en het draagvlak voor de scenario's te vergroten. Zo winnen de verdere analyse- en conclusiestappen aan waarde.

2.4 Verdieping transitie van de industrie (WP3)

De aanpak voor de industriesector verschilt van die voor de andere sectoren en tevens van de werkwijze I13050 eerste editie, zowel wat betreft het proces als de doorrekening. De scenario's voor de industrie zijn gemaakt met behulp van het Carbon Transition Model (CTM). Dit openbare model bevat alle individuele bedrijven die aan het ETS-systeem deelnemen plus een aggregatie van de overige bedrijven binnen elke subsector. Het model gebruikt een raamwerk van zeven basisroutes waarmee emissies gereduceerd kunnen worden. De scenario's uit het CTM zijn gekoppeld aan de bredere I13050 ETM-scenario's die het overkoepelende energiesysteem beschrijven.

De input van (vertegenwoordigers van) industriële bedrijven is gebruikt om deze scenario's op te stellen. Daarbij is de volgende driedeling van de industrie gehanteerd:

1. De G14 ofwel de veertien industriële bedrijven in Nederland met de grootste broeikasgasuitstoot.
2. De overige bedrijven in elk van de zes industrieclusters in Nederland.
3. De nieuwe industrie die in Nederland kan ontstaan voor de productie van gerecyclede, biogene en synthetische producten.

Hieronder staat het proces om tot de scenario's te komen voor elk van deze drie categorieën weergegeven.

G14

De scenario's voor de G14 zijn in een individueel proces met elk bedrijf afzonderlijk tot stand gekomen. Na een algemene kick-off is per bedrijf in een drietal gesprekken en een data-uitvraag gekomen tot passende parameters in het CTM. Deze gesprekken waren vertrouwelijk en de keuzes van de bedrijven kunnen daarom niet ingezien worden. De geaggregeerde resultaten worden op sectorniveau doorgegeven aan het ETM. Op sectorniveau kunnen de scenario's daardoor wel beschreven worden.

Clusters

Voor de clusters is een data-uitvraag gedeeld met alle niet-G14-bedrijven en besproken met vertegenwoordigers. Het bleek echter niet voor alle clusters mogelijk om deze data tijdig binnen de planning aan te leveren. Vandaar dat besloten is zelf een inschatting te maken van het energieverbruik van de clusters, waarbij sectorspecifieke

verduurzamingspaden zijn verondersteld.⁶ De netbedrijven gaan met de clusters in gesprek hoe dit in toekomstige processen beter kan.

Nieuwe industrie

Voor de nieuwe industrie op het gebied van gerecyclede, biogene en synthetische producten is gesproken met de G14, TNO en vertegenwoordigers van bedrijven die hierin actief zijn. Op basis van deze gesprekken zijn aannamen gedaan voor deze industrie daar waar het niet de G14 betreft. In twee scenario's is het volume synthetische producten naar beneden bijgesteld op basis van de input van de G14, TNO en de nieuwe industrie.

2.5 Afstemming met aanpalende trajecten (WP 4)

Niet alleen netbedrijven maar ook kennis- en overheidsinstellingen hebben binnen de transitie behoefte aan een gedeelde visie op hoe het energiesysteem er op de langere termijn (2040-2050) uit gaat zien. Meerdere partijen werken aan een toekomstvisie voor het Nederlandse energiesysteem.

Op basis van dergelijke visies kan gewerkt worden aan de invulling van strategieën voor de realisatie van de voor dat systeem noodzakelijke ontwikkelingen in productie, transport, opslag en gebruik. Zo wordt voor alle partijen duidelijk wat al dan niet gewenste ontwikkelingsrichtingen zijn, en kunnen kip-eiproblemen in diverse ketens opgelost worden.

Het is nuttig om de beelden onderling te spiegelen. Er zijn altijd verschillen, maar deze dienen verklaarbaar te zijn. Het is goed om zaken te signaleren die elkaar 'hard' uitsluiten. Dit betekent dat er duidelijke keuzes gemaakt moeten worden of dat er sprake is van een duidelijk 'dilemma' dat geen eenduidige oplossing heeft (paragraaf 7.2 gaat verder in op de geïdentificeerde dilemma's).

Netbeheer Nederland, het Nationaal Plan Energiesysteem (NPE) van het Ministerie van EZK, het PBL en TNO hebben daarom besloten om – vanuit ieders eigen verantwoordelijkheden – tussentijds af te stemmen en informatie uit te wisselen met betrekking tot hun projecten gerelateerd aan het ontwikkelen van langetermijnvisies. De trajecten worden in tabel 1 kort toegelicht.

Tabel 1. Toelichting aanpalende trajecten.

PBL, trajectverkenning klimaatneutraal 2050	Het afzonderlijk en in samenhang verkennen van verschillende trajecten naar klimaatneutraliteit in 2050 voor de sectoren industrie, gebouwde omgeving, landbouw, mobiliteit en een aantal doorsnijdende thema's (H ₂ , biograndstoffen, elektriciteit). De verkenning gebeurt aan de hand van de belangrijkste richtinggevendende dilemma's. Het doel is te komen tot beleidsaanbevelingen voor de periode tot 2030, zodanig dat in de periode daarna de benodigde verdere emissiereducties kunnen worden gerealiseerd. Als hulpmiddel worden doorrekeningen met het OPERA-model voorzien.
Expertteam energiesysteem 2050	Ontwikkeling van een outlook, een breed gedragen kennisbasis met een overzicht van mogelijke transitiepaden naar een klimaatneutrale energievoorziening in de periode 2030-2050. Op basis van de outlook en een brede maatschappelijke afweging komen tot een advies dat duidelijkheid geeft over de richting waarin het integrale energiesysteem zich zou moeten ontwikkelen.
TNO	Actualisatie van de scenario's ADAPT en TRANSFORM die ontwikkeling richting een klimaatneutraal 2050 beschouwen.
Nationaal Plan Energiesysteem (NPE)	Dit plan geeft een beeld van het energiesysteem van de toekomst. Het gaat ook in op het traject ernaartoe, en hoe burgers, bedrijven, medeoverheden, staatsdeelnemingen, netbeheerders en andere betrokkenen mede vorm kunnen geven aan dit systeem. Het plan is nog in ontwikkeling.

⁶ Kalavasta (2022): Cluster analysis CTM – documentation

De activiteiten bestonden uit periodieke afstemming in de vorm van 'scharniermomenten' en samenwerksessies, elkaars tussenresultaten tegenlezen, bespreken en toepassen.

Resultaten zijn besproken en kwantitatieve uitkomsten vergeleken, waarbij de verschillen zijn geïdentificeerd. Verder zijn mogelijke verschillen doorgrond: hoe komt dit, wat ligt eraan ten grondslag, en kunnen we het verklaren? Waar relevant heeft op basis van de reacties een bijstelling plaatsgevonden van de uitgangspunten en/of sectorale (transitie)aannames II3050.

De betrokken partijen hebben aangegeven deze samenwerking van meerwaarde te vinden. De samenwerking heeft geleid tot verbetering van de kwaliteit en onderbouwing van de scenario's van de tweede editie van II3050.

Door deze wijze van samenwerking zijn de elementen van de energiesysteemvisies wederzijds herkenbaar. Ook is beter inzichtelijk welke elementen of bouwstenen van het systeem robuuster beschouwd worden en waar grotere onzekerheden liggen.

2.6 Volgende stappen

Dit scenariorapport wordt aangeboden aan het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat en de Tweede Kamer. Ook vindt er een bijeenkomst plaats voor geïnteresseerde stakeholders waar dit rapport en de resultaten worden toegelicht. Daarmee is deze eerste fase van de update afgerond.

Parallel aan de uitwerking van dit scenariorapport zijn de landelijke en regionale netbeheerders op basis van de scenario's gestart met de tweede fase, de flexibiliteit- en netwerkanalyses. Het analyseproces wordt in een bijeenkomst toegelicht aan geïnteresseerden en in de zomer van 2023 afgerond. De resultaten worden in het eindrapport beschreven.

De infrastructuur-ontwikkelpaden die voortkomen uit de scenario's worden in fase 3 verder uitgewerkt wat betreft de impact op kosten, fysieke ruimte, menskracht en materialen en in een eindrapport van deze tweede editie van II3050 gepresenteerd. Eind 2023 wordt er tot slot een stakeholderbijeenkomst georganiseerd over het eindrapport.

3. Scenario's en verhaallijnen

Het is onzeker hoe de energievoorziening er in 2050 uit dient te zien. Wel is duidelijk dat de keuzes die tijdens de transitie gemaakt worden gevolgen hebben voor de energie-infrastructuur. Andersom kan de beschikbaarheid van infrastructuur ook bijdragen aan de ontwikkelingen. Net als de eerste editie van II3050 beschrijft deze verkenning vier scenario's voor een klimaatneutrale energievoorziening.

De vier scenario's zijn uitwerkingen van vier alternatieve manieren waarop het Nederlandse energiesysteem klimaatneutraal kan worden. De scenario's schetsen een beeld van de maatschappij en een daarbij behorend energiesysteem, waarin uiteenlopende keuzes zijn gemaakt. De scenario's laten daarin de samenhang zien tussen maatschappelijke keuzes en de manieren om die te organiseren (governance en regie op de transitie). Uit deze verkenning blijkt hoe deze keuzes invloed hebben op de benodigde flexibiliteit en welke energie-infrastructuur daarbij hoort.

De verhaallijnen van de vier scenario's worden beschreven in dit hoofdstuk. De scenario's variëren van een focus op strakke regulering en collectieve techniekekeuzes tot een meer marktgeoriënteerd perspectief en gevarieerde techniekekeuzes. Binnen dit brede palet komen verschillende technische keuzes aan de orde en zijn er onderscheidende variaties in het gebruik van energiebronnen en -dragers. Dit alles met als doel inzicht te krijgen in de bandbreedte van de behoeften aan flexibiliteitsmiddelen en infrastructuur.

Hierbij moet aangetekend worden dat er veel meer toekomstscenario's mogelijk zijn. Bepaalde veranderingen in gedrag en de manier van samenleven kunnen van invloed zijn op het energiesysteem. Bijvoorbeeld minder autorijden, collectief samenwonen, consumptiepatronen, etc. Ook andere technieken dan die die nu beschouwd zijn, kunnen in de toekomst een rol spelen. Een aantal varianten wordt de komende periode onderzocht, zie hiervoor paragraaf 7.3.

3.1 Aanpak opstellen scenario's

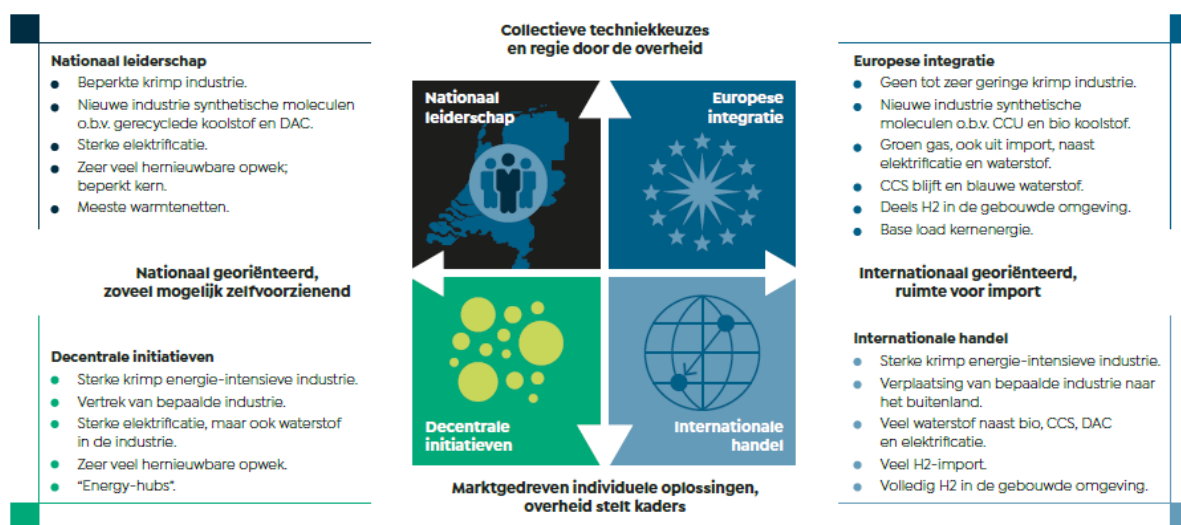
De energiesysteems scenario's beschrijven vier onderscheidende eindbeelden van een volledig klimaatneutraal energiesysteem inclusief een volledig klimaatneutrale elektriciteitsproductie in 2050. De verhaallijnen kaderen de invulling van de scenario's en beschrijven kwalitatief de ontwikkelingen die belangrijk zijn in de scenario's. De kwantitatieve en sectorale uitwerking van de scenario's volgen in hoofdstuk 4 en 5.

Voor de scenario's zijn de volgende gemeenschappelijke randvoorwaarden en uitgangspunten geformuleerd:

- Alle scenario's beschrijven een 100% klimaatneutraal energiesysteem in 2050 voor Nederland, dat volledig aan de energievraag in Nederland voldoet (leveringszekerheid, niet noodzakelijkerwijs zelfvoorzienend).
- Alle scenario's laten zien hoe Nederland de klimaattransitie kan invullen, gegeven een internationale context. Daarbij is de gedachte dat Europa in 2050 klimaatneutraal is en de hele wereld aan haar klimaatverplichtingen voldoet.
- Nederland is onderdeel van het Europees energiesysteem. Europees energie- en klimaatbeleid is daarom een belangrijke drijvende kracht in alle scenario's. Ook blijft uitwisseling van energie met het buitenland een belangrijke flexibiliteitsbron.

- In alle scenario's maakt de Nederlandse overheid, aanvullend op het Europese beleid, beleid en wetgeving die bepalend is voor hoe het toekomstige energiesysteem eruitziet.
- Volume-effecten zoals bevolkingsgroei, economische groei en groei-effecten binnen een sector als mobiliteit en de landbouw, worden zo min mogelijk gevarieerd tussen de scenario's. De volumes kunnen wel wezenlijk anders zijn dan op dit moment. Structuureffecten leiden mogelijk wel tot verschillen tussen scenario's.

De scenario's variëren op tal van verschillende aspecten. De netbeheerders hebben een aantal belangrijke factoren benoemd waarop de scenarioverhaallijnen verschillen. Verschillen zijn er zowel in aansturing door de overheid, draagvlak vanuit de samenleving, wijze van marktwerking en in de mogelijke technologische keuzes. Figuur 3 duidt de vier scenario's en de verschillen hiertussen.



Figuur 3. Voornamelijk uitgangspunten c.q. verschillen tussen de vier 2050 scenario's.

De horizontale as heeft een sterke link met de eerste editie I13050 over de mate van zelfstandigheid waarin de energietransitie en decarbonisatie opgelost worden. Deze as is relevant omdat de mate van importafhankelijkheid versus binnenlandse energieproductie tot verschillen in infrastructuur leiden. Marktgedreven versus regulering (de verticale as) wijkt af van de eerste editie I13050. De vorige keer lag de focus op de overheidslaag waaruit de sturing zou komen. Nu bepaalt de as of primair de markt richting geeft aan de ontwikkelingen met support van de overheid, of dat primair de overheid stuurt met support van de markt.

3.2 Verhaallijnen I13050

3.2.1 Decentrale Initiatieven (DEC)

Nederland streeft naar regionale actie door de particuliere businesscase van klimaatneutrale technieken te ondersteunen. Burgers en lokale gemeenschappen hebben een hoge mate van autonomie en maken eigen keuzes binnen de opgave. Sommige burgers kiezen voor de goedkoopste oplossingen, terwijl bij andere burgers ideële motieven meespelen. Via diverse prikkels worden duurzame keuzes van consumenten en bedrijven ondersteund. Lokale overheden doen dit bijvoorbeeld met kennis en financiële stimulansen. Er ontstaat een groot aantal lokale initiatieven van vooruitstrevende burgercollectieven en bedrijven. Hierdoor worden lokale bronnen optimaal benut. Zonne- en windenergie op land zijn stevig gegroeid. De industrie transformeert naar meer gebruik van bio-based en circulaire grondstoffen. Maar omdat duurzame energie vooral als variabel aanbod op grote schaal beschikbaar is, de acceptatie van CCS beperkt en er verder beperkt sturing op is, verdwijnt een deel van

de energie-intensieve basisindustrie uit Nederland. De warmteoplossingen voor de gebouwde omgeving bestaan uit een mix van technieken (waaronder in mindere mate warmtenetten) en worden gevoed door diverse lokale beschikbare bronnen, zoals geothermie, warmtepompen, WKO, groene waterstof en groen gas.

3.2.2 Nationaal Leiderschap (NAT)

Nederland streeft naar een energetisch efficiënt systeem binnen de Nederlandse mogelijkheden en stuurt nationaal sterk op de invulling van de energiemix. Overheden maken daarbij keuzes over de technieken die in Nederland gebruikt gaan worden. Hiervoor maakt de overheid verplichtend beleid en regulering en participeert zij financieel in projecten van nationaal belang. De overheid bevordert de ontwikkeling van nieuwe industrieën (onder andere synthetische brandstofproductie) en stimuleert elektrificatie van de bestaande industrie. In de gebouwde omgeving zorgt regie (verplichtende wijkaanpakken) voor de ontwikkeling van warmtenetten, gevoed door hoofdzakelijk restwarmte, geothermie en flexibele elektrische bronnen (zoals power-to-heat). Voor het energieaanbod komen grootschalige nationale projecten tot stand, zoals wind op zee die tot een maximum wordt benut en enkele flexibele kerncentrales. Groene waterstof speelt verder een belangrijke rol voor het balanceren van het elektriciteitssysteem, voor de levering van hogetemperatuurwarmte in de industrie en als grondstof.

3.2.3 Europese Integratie (EUR)

Nederland streeft naar een integraal en efficiënt Europees energiesysteem: landen stemmen hun energiebeleid onderling af en maken daarbij gebruik van elkaars bronnen. Europa werkt aan gezamenlijk energiebeleid en wil meer onafhankelijk zijn. Groen gas wordt in Europa op grote schaal geproduceerd en wordt daarom in diverse sectoren ingezet. Er is een stevige groei van zonne- en windenergie in combinatie met een toename tot 8 GW aan kernenergie. De mogelijkheden voor windenergie op de Noordzee worden goed benut in samenwerking met andere landen rond de Noordzee. De industrie verduurzaamt dankzij elektrificatie en de inzet van Europese biomassa en waterstof, als brandstof en grondstof. CCS wordt grootschalig toegepast, onder meer voor energieopwek met negatieve emissies (BECCS) en voor de productie van blauwe waterstof. Ook CO₂ uit omliggende landen wordt in Nederland opgeslagen. Wijkaanpakken staan centraal in de verduurzaming van de gebouwde omgeving en er is sterke regie op de ontwikkeling van bovenregionale warmtenetten. De combinatie van warmtenetten en hybride warmtevoorziening in gebouwen geeft een gematigde elektriciteitspiekvrage. Een Europees netwerk van laadinfrastructuur en uitbreiding van het HSL-netwerk zorgen voor verregaande elektrificatie van de mobiliteit.

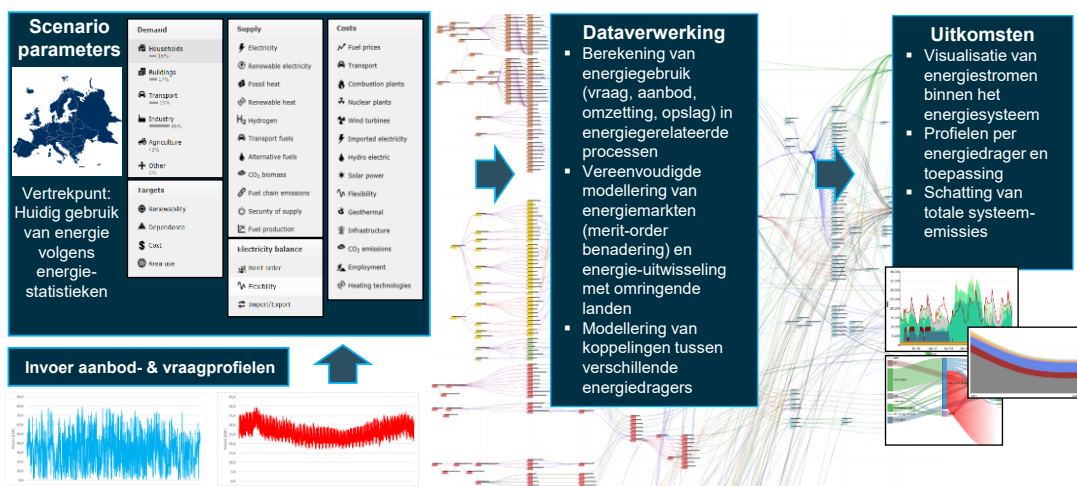
3.2.4 Internationale Handel (INT)

Nederland streeft naar ontwikkeling van de eigen economie door maximaal in te zetten op de internationale wereldwijde energie- en grondstoffenketens. Nederland is een 'multinational' die strategisch gebruik maakt van de internationale energie- en grondstoffenmarkten. Er wordt daarom op de wereldmarkt gezocht naar opties met de laagste kosten. Internationale vrijhandel speelt een belangrijke rol. De markt wordt geholpen door ondersteunende algemene prikkels, subsidies en CO₂-beprijzing (mede daardoor dragen ook Nederlandse bedrijven hun steentje bij om de keten te verduurzamen). Waterstof en andere klimaatneutrale energiedragers worden geïmporteerd uit landen waar deze relatief gunstig te produceren zijn. Nederland wordt een doorvoerland voor waterstof. In de gebouwde omgeving wordt ingezet op individuele transitiepaden: er is daarbij minder inzet van groen gas, maar wel veel hybride warmtevoorziening in combinatie met waterstof. De industrie verduurzaamt dankzij elektrificatie en inzet van waterstof (ook als grondstof). Door de wereldwijde handelsketens verdwijnt een deel van de energie-intensieve industrie naar het buitenland. In plaats daarvan worden meer halffabricaten geïmporteerd, die in Nederland verder worden verwerkt. Tevens zet Nederland in op de productie van groene waterstof, direct gekoppeld aan wind op zee. Vanwege de hoge energie-import hoeft Nederland echter minder zelf te produceren.

3.3 Het Energietransitiemodel

Om de scenario's aan de nationale en Europese klimaat- en energiedoelstellingen te toetsen en te bepalen welke ontwikkelingen aan de vraag- en aanbodzijde hiervoor nodig zijn om deze te halen, zijn alle scenario's energetisch doorgerekend met behulp van het Energietransitiemodel (ETM⁷).

Het openbaar toegankelijke en gevalideerde model biedt de mogelijkheid om het gebruik van energie vanuit de verschillende primaire energiebronnen, via diverse conversiestappen tot aan het sectorale eindgebruik van energie te simuleren. Figuur 4 illustreert de stappen.



Figuur 4 - Schematische weergave (stroomschema) van het werkproces in het Energietransitiemodel

In het kader van het I13050 scenariowerkproces zijn per scenario alle aannames over de toekomstige ontwikkeling van aanbod en vraag vertaald naar meer dan 500 scenarioparameters, aangevuld door consistente deels weersafhankelijke profielen voor zowel hernieuwbare opwek als vraag.⁸ Vervolgens is de inzet van flexibele (prijzafhankelijke) productie- en vraagtechnologieën via een versimpelde marktbenadering doorgerekend. Op basis van de modelresultaten is het mogelijk om de (transitie van) energiestromen in het energiesysteem zowel op jaar- als ook uurbasis⁹ te analyseren.

De achtergronddata van de scenario's zoals bepaald in het ETM kan door iedereen worden geraadpleegd. Zie bijlage D voor de weblinks voor elk scenario voor de zichtjaren 2030 – 2050. Voor de voornaamste uitgangspunten ten aanzien van de energieprijzen en 'willingness-to-pay' zie bijlage B. De uitgangspunten volgen waar mogelijk de prijspaden uit het TYNDP 2022 van ENTSOE/ENTSOE (de Europese koepelorganisaties van de netbedrijven)¹⁰. Omdat het een 'levend' model is, zijn er model updates uitgevoerd tijdens het werkproces. Wanneer nieuwe opties toegevoegd werden, kwamen deze automatisch op nul te staan. Denk hierbij bijvoorbeeld aan de modeltoevoeging van ammoniak, die in de scenario's als waterstofdrager is benoemd. Hierdoor zijn tussen het IP2024 en de I13050 scenario's enkele kleine discrepanties.

⁷ Het ETM is een energiesysteemmodel met als doel om scenario's kwantitatief te bepalen en de impact van verschillende scenarioparameterkeuzes te verkennen. Door de brede focus op het hele systeem zijn er op diverse vlakken versimpelde modelkeuzes gemaakt, en daardoor kunnen de resultaten afwijken van andere energiesysteem-simulatiemodellen of gedetailleerde Europese stroommarktmodellen (inclusief de stroommarktmodellen die TenneT in de vervolgstap van de scenario's draait. De in dit rapport getoonde resultaten zijn dus benaderingen.

⁸ Klimaatjaar 2012. Gebruik weersafhankelijke gegevens uit Pan European climate database (PECD) voor klimaatjaar 2012

⁹ Momenteel voor de energiedragers elektriciteit, waterstof, methaan en warmte. Andere energiedragers op jaarbasis.

¹⁰ <https://2022.entsos-tyndp-scenarios.eu/>

4. Uitkomsten en totaalbeeld energiesysteem 2050

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste uitkomsten van de scenariodoorrekening uiteengezet. De figuren in dit hoofdstuk tonen steeds eerst het jaar 2019, met daarnaast de jaren 2030 (IP2024-scenario's: Klimaatambitie/Nationale Drijfveren/Internationale Ambitie) en de jaren 2040 en 2050 (II3050-scenario's: Decentrale Initiatieven/Nationaal Leiderschap/Europese Integratie/Internationale Handel). In de tekst wordt ingegaan op het eindbeeld 2050. Het hoofdstuk is als volgt opgebouwd:

- 4.1 geeft de voorname vraag en aanbod van elke energiebron weer. Voor elk scenario is een Sankey-diagram gemaakt die voorname energiestromen en conversiestappen visueel weergeeft.
- 4.2 bespreekt de uitkomsten wat betreft de finale energievraag.
- 4.3 beschouwt de primaire energie-inzet die benodigd is om de finale energievraag te dekken.
- 4.4 toont het opgesteld flexibel vermogen.
- 4.5 zoomt in op het opgesteld vermogen en de vraag-aanbodbalans van energiedragers.
- 4.6 toont de impact van de transitie van het energiesysteem op de broeikasgasuitstoot.
- 4.7 gaat in op de CO₂-balans.

4.1 Totaaloverzicht van scenario's

Tabel 2 bevat de voornaamste kengetallen en uitkomsten van de scenario's, met 2019 ter referentie. Cijfers voor 2030 zijn bepaald in het IP2024-scenariotraject. Cijfers voor 2025, 2035 en 2040 zijn beschikbaar in bijlage B.

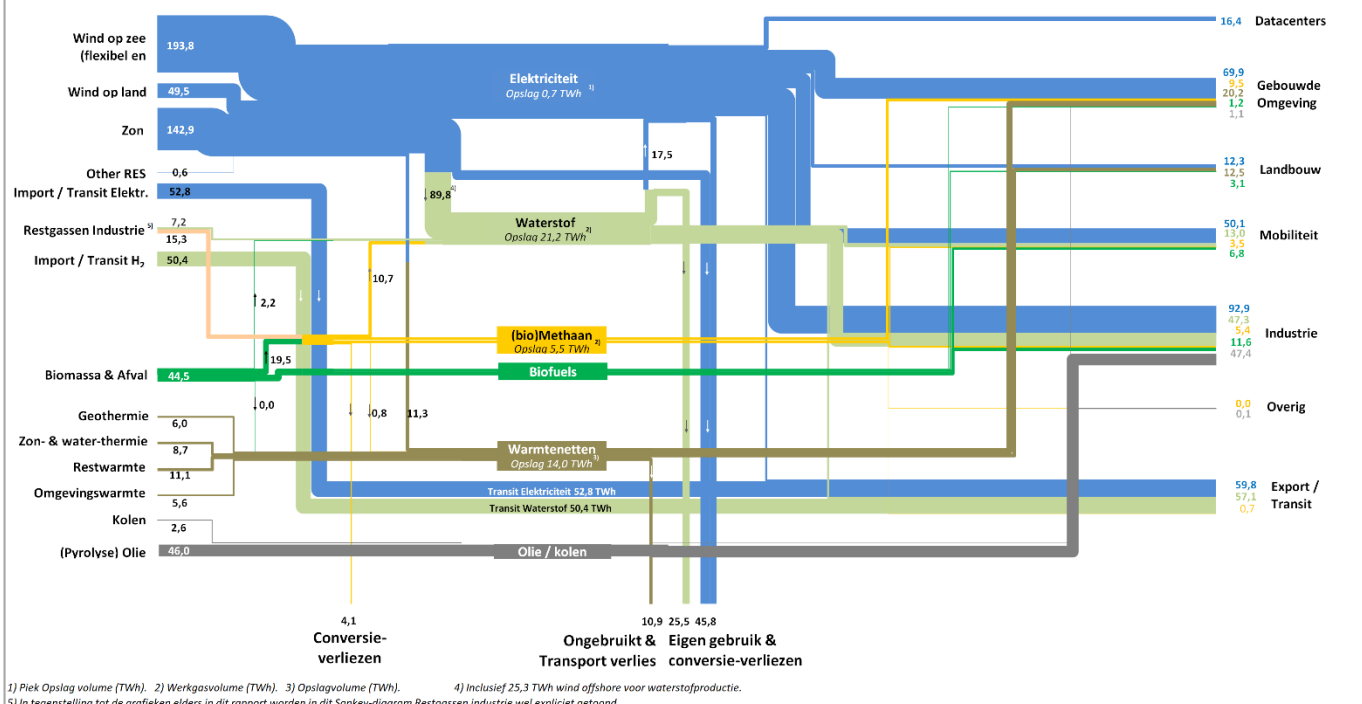
De Sankey-diagrammen onder Tabel 2 (stroomschema's) geven de belangrijkste energiestromen en conversies van de scenario's weer. Dit geeft inzicht in de verhoudingen tussen energiedragers en sectoren, en in de onderlinge relaties. Aan de linkerkant staan de primaire energiebronnen en aan de rechterkant de vraagsectoren. De dikte van de verbindingslijnen representeert de hoeveelheid energie in die stroom, gedurende een volledig gesimuleerd jaar (deze weerspiegelt dus volume en niet capaciteit). Ook de energieverliezen zijn weergegeven.

Tabel 2. Overzicht voornaamste kengetallen tweede editie I13050.

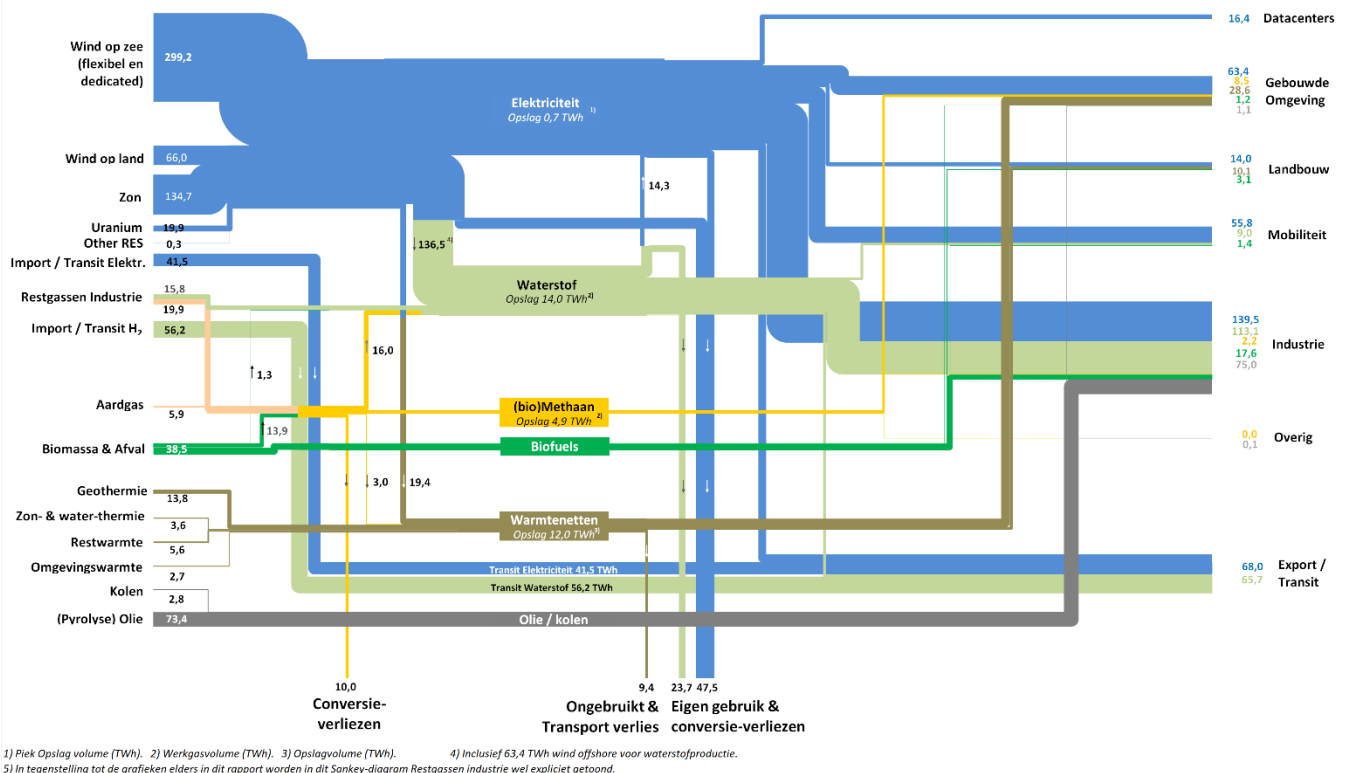
			2019	2030			2050			
			Ref	KA	ND	IA	DEC	NAT	EUR	INT
Vraag	Elektriciteitsvraag (finaal en flex) ¹¹	TWh	119	184	233	170	364	433	339	269
	w.v. Gebouwde omgeving	TWh	56,0	52,1	52,3	52,5	69,9	63,4	69,9	73,2
	w.v. Transport	TWh	2,4	18,5	25,6	12,8	50,1	55,8	46,7	35,0
	w.v. Industrie	TWh	41,3	54,1	63,5	47,5	92,9	139,5	99,8	71,5
	w.v. Landbouw, ICT, energie	TWh	19,0	25,8	30,6	24,4	32,4	33,8	39,4	39,1
	w.v. Flex: p2x en opslag	TWh	0,0	33,2	61,4	32,7	118,3	140,1	83,5	50,6
	Methaanvraag (finaal en flex)	TWh	374	238,8	209,1	235,7	18,6	15,5	120,6	12,0
	w.v. Gebouwde omgeving	TWh	109	73,5	67,7	82,0	9,5	8,5	22,0	0,1
	w.v. Transport	TWh	1	0,0	0,0	0,3	3,5	0,0	5,9	0,0
	w.v. Industrie	TWh	104	88,5	73,8	82,0	4,4	3,8	87,4	10,6
	w.v. Landbouw	TWh	10,5	4,5	2,2	4,6	0,0	0,0	0,0	0,0
	w.v. Flex: centrales en pieksetels	TWh	150,5	72,2	65,3	66,7	1,1	3,2	5,3	1,3
	Waterstofvraag (finaal en flex)	TWh	0,0	47,8	47,7	60,8	102,2	159,4	114,1	173,6
	w.v. Gebouwde omgeving	TWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,1	33,4
	w.v. Transport	TWh	0,0	3,7	2,1	7,9	13,0	9,0	5,7	34,6
w.v. Industrie	TWh	0,0	44,1	43,3	48,0	47,3	113,1	81,0	63,0	
w.v. Landbouw	TWh	0,0	0,0	0,0	1,2	0,0	0,0	0,0	3,5	
w.v. Flex: centrales en pieksetels	TWh	0,0	0,0	2,3	3,6	41,9	37,4	23,3	39,2	
Productie	Windenergie	GW	4	31	32	31	60	92	48	56
	w.v. op land	GW	3,5	9,1	10,3	7,5	15,0	20,0	10,0	10,0
	w.v. op zee (elektrisch)	GW	1,0	21,5	21,5	21,5	37,0	52,0	38,0	38,0
	w.v. op zee (waterstof)	GW	0,0	0,6	0,0	2,0	8,0	20,0	0,0	8,0
	Zon PV*	GW	6,2	59,3	76,1	42,1	183,1	172,6	126,3	100,0
	w.v. op land en water	GW	0,7	19,6	24,6	14,3	58,0	58,0	35,0	35,0
	w.v. gebouwen en woningen	GW	5,5	39,7	51,5	27,8	125,1	114,6	91,3	65,0
	Overig hernieuwbaar	GW	1,0	1,2	0,9	0,8	0,2	0,1	0,2	0,3
	Groen gas	TWh	1,7	19,7	9,7	24,4	19,5	13,9	78,5	12,5
	Aardgaswinning	TWh	278	40,6	40,6	40,6	0,0	0,0	0,0	0,0
	Waterstof groen	TWh	0,0	12,5	25,8	18,8	89,8	136,5	43,6	51,2
	Waterstof blauw	TWh	0,0	50,5	49,3	50,1	20,1	33,1	71,0	29,2
	Waterstof import	TWh	0,0	22,3	1,8	49,9	50,4	56,2	113,2	252,8
	Waterstof export	TWh	0,0	37,1	28,7	57,4	57,1	64,7	112,6	157,8
	Flexibiliteit Elektriciteit	Methaan opslag	TWh	nb	36,4	33,4	37,4	5,5	4,9	11,7
	Waterstof opslag	TWh	0,0	0,9	3,1	2,0	21,2	13,6	14,3	28,9
Centrales	Nucleair	GW	0,5	0,5	0,5	0,5	0,0	3,0	8,0	0,0
	Kolen (incl. meestook)	GW	4,0	0,0	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Gas (aard-/groen)	GW	20,1	16,3	14,7	14,5	0,0	0,0	0,0	0,0
	Waterstof	GW	0,0	0,0	1,4	1,9	20,0	15,0	11,0	15,0
Flexibiliteit Elektriciteit	Power-to-gas	GW	0,0	3,0	7,6	3,6	25,0	25,0	16,0	10,0
	Power-to-heat	GW	0,0	3,3	5,1	2,5	10,9	11,1	6,2	3,2
	Batterijen incl. EV	GW	0,0	12,3	19,3	8,3	70,3	59,7	38,6	40,6
	Vraagsturing (industrie)	GW	0,0	1,7	2,0	1,5	7,7	10,2	3,9	3,1
	Interconnectie (E)	GW	5,9	12,8	12,8	12,8	18,8	18,8	28,8	28,8
Totalen	Totaal hernieuwbaar vermogen	GW	15,2	101,4	119	83,4	266,3	304,7	184,6	174,2
	Totaal conventioneel vermogen	GW	24,6	16,8	18,2	16,9	20,0	18,0	19,0	15,0
	Totaal flex vermogen	GW	5,9	33,0	46,7	28,6	132,7	124,8	93,4	85,7
Emissies	Indicatie restemissies	Mt CO ₂ eq	183	96	91	96	9,0	9,9	8,9	8,8
	Indicatie reductie t.o.v. 1990	%	20%	58%	60%	58%	96%	96%	96%	96%

¹¹ In de tabel is voor de energievraag een totaal jaarvolume per scenario gegeven. Dit jaarvolume bestaat uit de optelling van de eind-energievraag van de verschillende sectoren alsook de inzet van de desbetreffende drager voor flexibiliteit, waaronder conversie en opslag. De finale energievraag in de sectoren heeft een bepaald profiel dat moet worden geleverd; het flexibele deel van de vraag is ten behoeve van de conversie. De Sankey-diagrammen gaan hier verder op in.

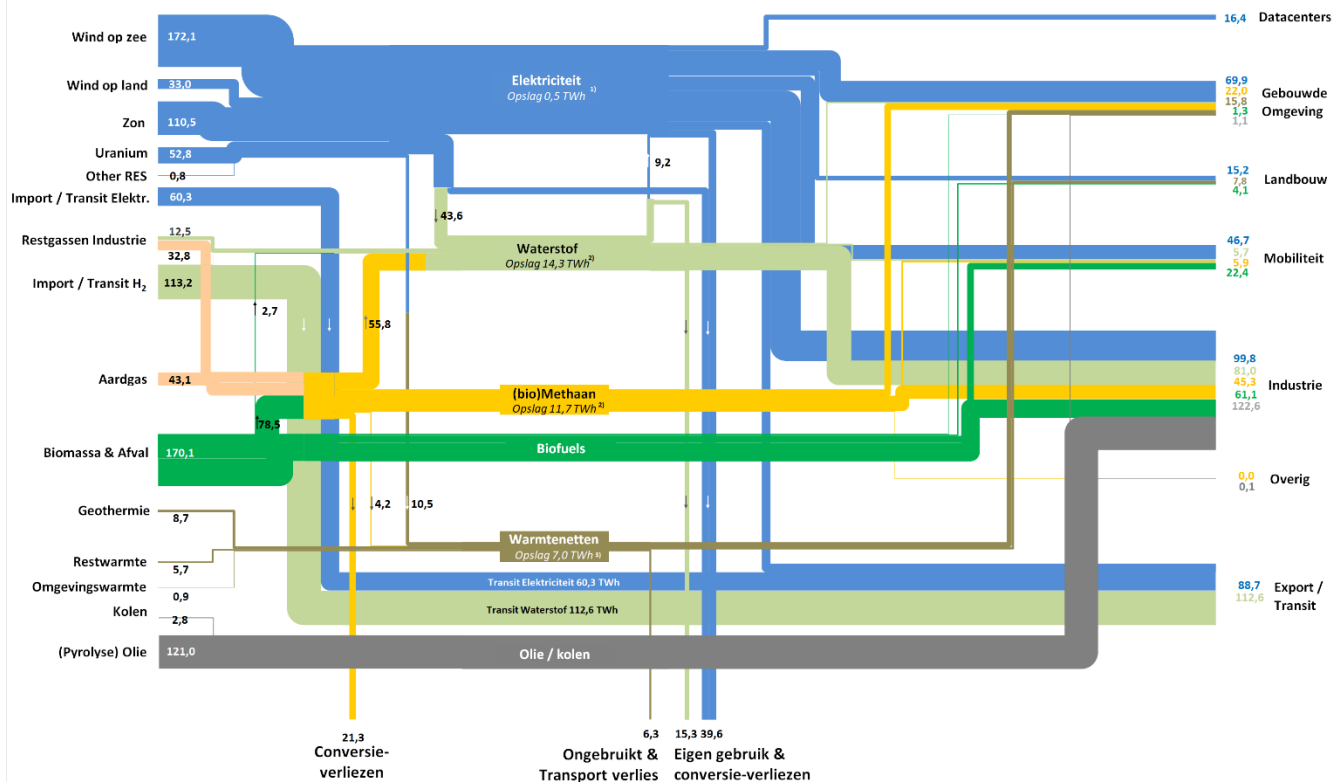
II3050: Decentraal 2050



II3050: Nationaal 2050

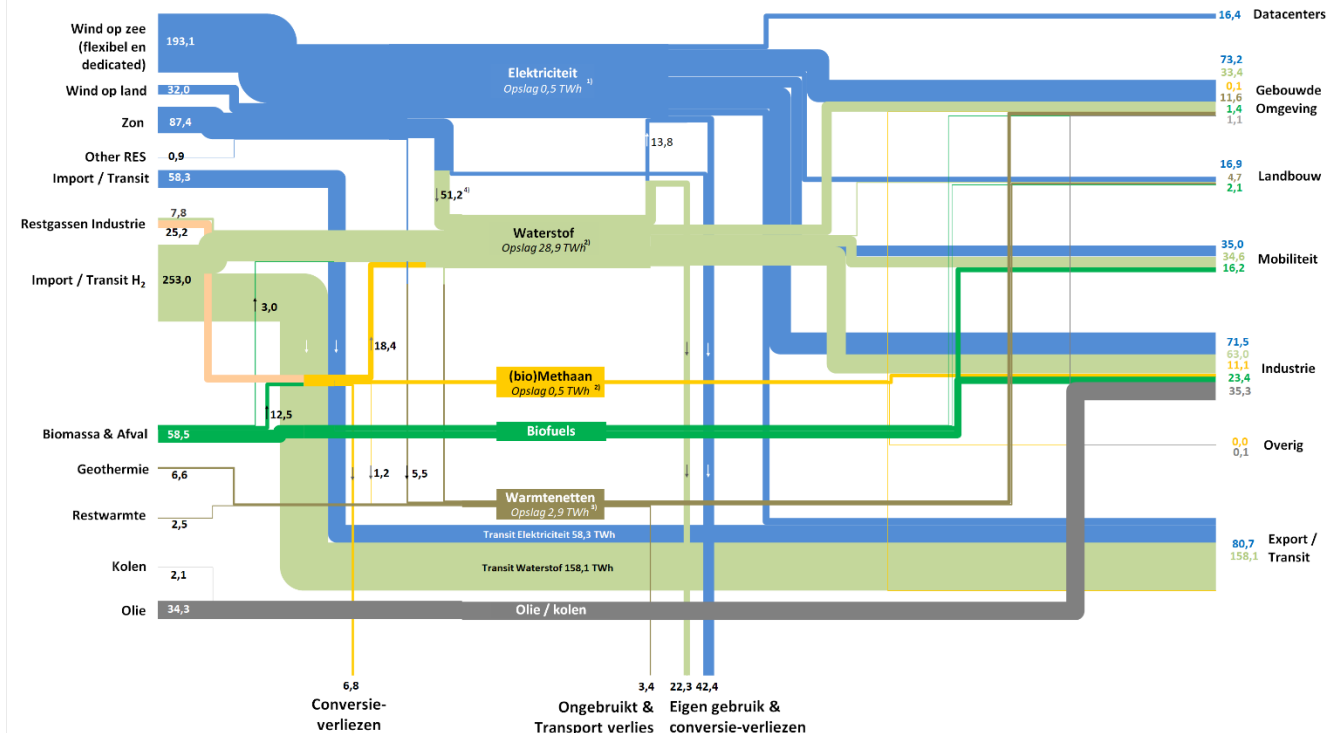


I13050: Europees 2050



1) Piek Opslag volume (TWh). 2) Werkgasvolume (TWh). 3) Opslagvolume (TWh).
 5) In tegenstelling tot de grafieken elders in dit rapport worden in dit Sankey-diagram Restgassen Industrie wel expliciet getoond.

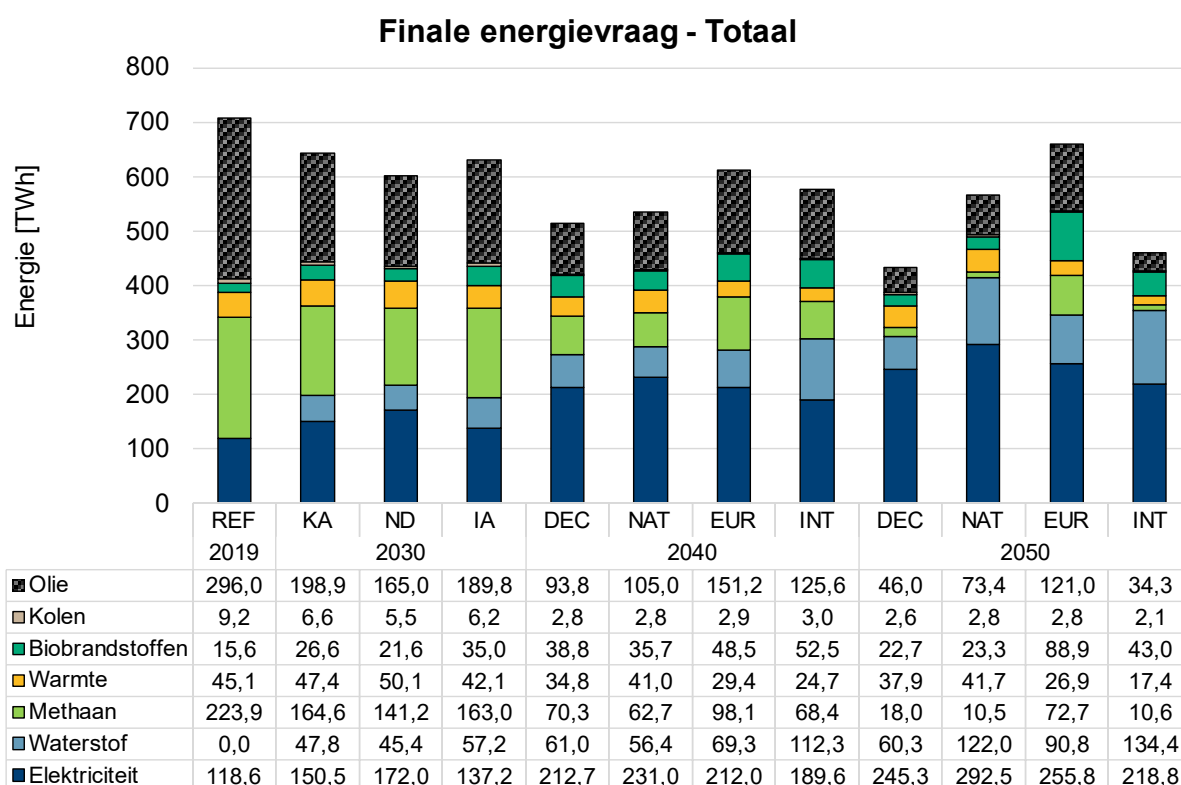
I13050: Internationaal 2050



1) Piek Opslag volume (TWh). 2) Werkgasvolume (TWh). 3) Opslagvolume (TWh). 4) Inclusief 25,3 TWh wind offshore voor waterstofproductie.
 5) In tegenstelling tot de grafieken elders in dit rapport worden in dit Sankey-diagram Restgassen Industrie wel expliciet getoond.

4.2 Eindgebruik van energie

Het finaal eindgebruik is het energieverbruik van eindverbruikers uitgesplitst naar energiedrager (Figuur 5) en in de sectoren (zie Figuur 6). Getallen zijn inclusief non-energetisch verbruik in de industrie en de (olie)vraag vanuit raffinaderijen voor de productie van brandstoffen, maar exclusief energieverbruik voor internationaal transport (bunkers en luchtvaart). De biomassa-vraag voor de productie van SAF is ook niet weergegeven. Elektriciteit, warmte en waterstof zijn secundaire energiedragers; de primaire bronnen die ingezet worden voor het maken hiervan worden beschreven in Paragraaf 4.3.



Figuur 5. Finale energievraag (binnenlandse vraag), in TWh per energiebron.

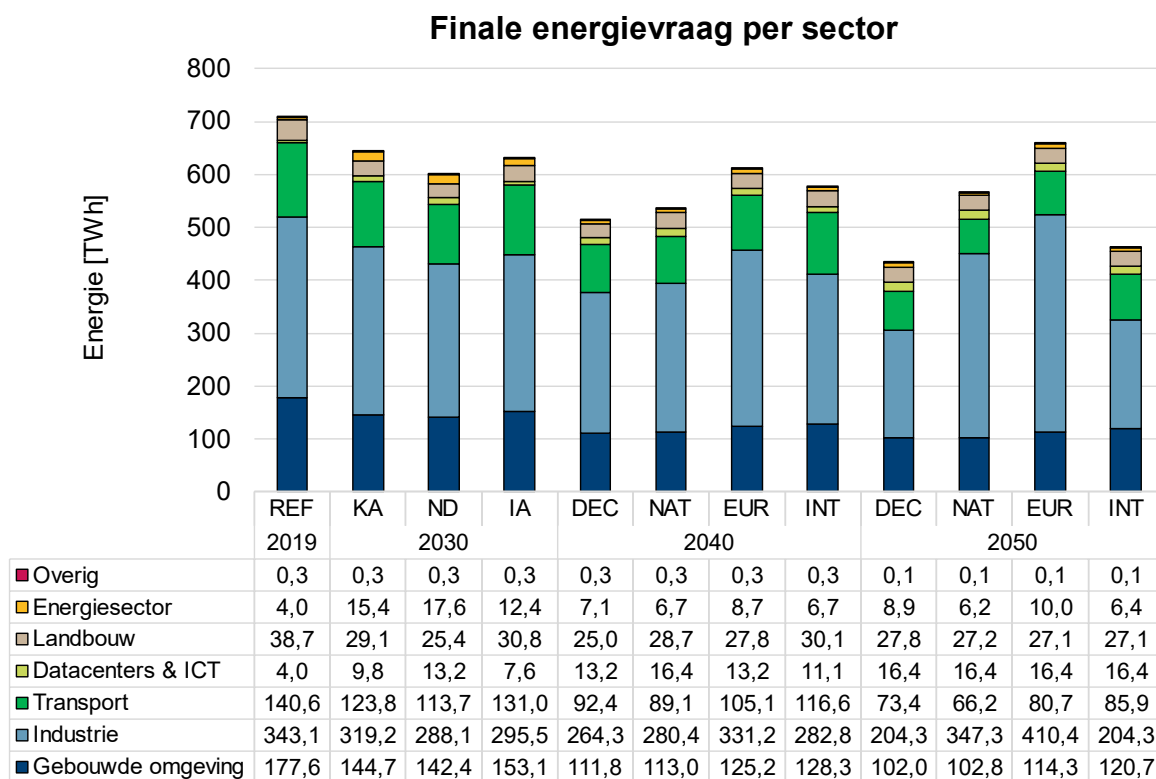
De totale finale energievraag is voor alle scenario's in 2050 lager dan nu. Dit komt door de verhoogde efficiëntie en energiebesparing in alle scenario's en alle eindsectoren. De totale energievraag hangt ook samen met ontwikkelingen in de energie-intensieve industrie: verduurzaamt deze in Nederland; blijft Nederland in grotere mate producerend (Nationaal Leiderschap en Europese Integratie); trekt de energie-intensieve industrie voor een deel weg en worden we meer circulair (Decentrale Initiatieven); of verlegt men de focus op optimalisatie van de internationale ketens (Internationale Handel)? De keuzes die bedrijven c.q. de overheid maken over de toekomst van de energie-intensieve industrie is een van de voorbeelden die het eindbeeld sterk beïnvloeden.

Per finale energiebron treedt een aantal veranderingen op. We noemen hier de voornaamste. Nadere toelichting volgt in paragraaf 4.5 en hoofdstuk 5:

- In alle scenario's is een sterke groei in de elektriciteitsvraag zichtbaar. Voor deze groei zijn twee hoofdredenen. Als gevolg van de bevolkingsgroei stijgt het activiteitsniveau van verschillende sectoren. Zo zijn er meer woningen nodig, groeit de vraag naar mobiliteit en is er meer vraag naar (industriële) producten. In het transitiepad van veel sectoren speelt elektrificatie een grote rol, denk aan elektrisch kraken in de

industrie, elektrisch vervoer bij transport en elektrische warmtepompen in de gebouwde omgeving. Dat zorgt voor een hogere finale elektriciteitsvraag en een groter aandeel van elektriciteit in de energiemix.

- De eindvraag voor waterstof is eveneens substantieel.¹² De industrie gebruikt waterstof als grondstof en als energiebron. De waterstofvraag varieert per scenario naar gelang de industriële behoefte aan waterstof en de verwachte ontwikkeling van de kostprijs van waterstof. In twee van de vier scenario's wordt waterstof ingezet in de gebouwde omgeving.
- De grootste warmtelevering via warmtenetten is voorzien in de scenario's Nationaal Leiderschap en Decentrale Initiatieven, grotendeels via geothermie dat ook in alle scenario's voorkomt; zowel als directe bron (eindlevering) als in de primaire voorziening voor de warmtenetten.
- Bio-based energie en grondstoffen spelen vooral een grote rol in het scenario Europese Integratie, in de andere scenario's speelt dit een minder grote rol.
- Het gebruik van fossiele brandstoffen zoals olie daalt in alle scenario's en daarnaast bestaat een aanzienlijk deel in de eerste drie scenario's uit import van pyrolyse olie. De emissies van fossiele brandstoffen worden in de tijd in toenemende mate afgevangen (CCS).
- Ook de vraag naar methaan daalt. Bovendien neemt het aandeel van groen gas in de gassamenstelling toe. In 2050 wordt in het Europese Integratie scenario het eindverbruik van methaan met groen gas voorzien.



Figuur 6. Finale energievraag, in TWh per sector.

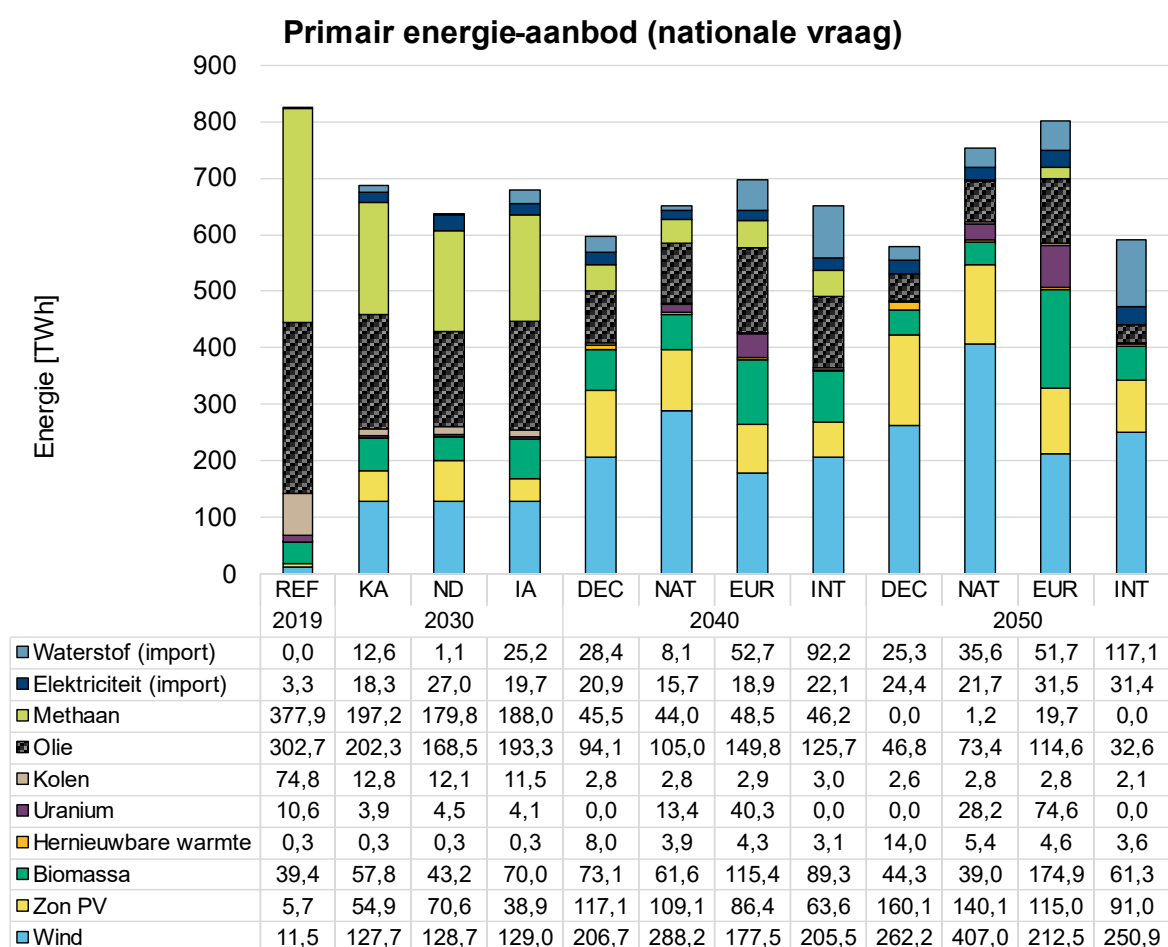
In alle sectoren neemt het finaal eindverbruik in de jaren af. De consumptie in de industrie heeft in alle scenario's het grootste aandeel in het eindverbruik. In 2050 zien we een forse variatie in het industrieel verbruik tussen de scenario's. Dit wordt verklaard doordat in de scenario's Decentrale Initiatieven en Internationale Handel een deel van de industrie uit Nederland vertrekt, terwijl in de scenario's Nationaal Leiderschap en Europese Integratie

¹² In de grafieken is alleen de waterstof getoond waarvoor transportnetten nodig zijn. Vraag die wordt ingevuld met aanbod op dezelfde locatie is niet als waterstof gelabeld, maar meegenomen in de energiecategorieën die daarvoor als grondstof worden gebruikt. Als zodanig is de circa 50 TWh waterstofvraag in 2019 ook niet zichtbaar.

nieuwe industrieën zich in Nederland vestigen, bijvoorbeeld voor de productie van synthetische brandstoffen die deels nodig zijn voor de internationale lucht- en zeevaart. Het energieverbruik van datacenters groeit fors over de jaren, maar in vergelijking met de andere sectoren blijft dit een kleine sector. (zie paragraaf 5.2.3). Het eindgebruik in de gebouwde omgeving neemt af door betere isolatie en efficiëntere verwarming. In de mobiliteit draagt meer elektrische aandrijving bij aan een lager energieverbruik, omdat deze veel efficiënter is dan de traditionele brandstofmotor. Ook de landbouw en de energiesector¹³ hebben een bescheiden aandeel in het totale eindverbruik.

4.3 Primaire energiebronnen

Het primaire energieaanbod omvat alle energie die nodig is om in het eindverbruik te voorzien, inclusief de energie voor conversie (bijvoorbeeld zon voor elektriciteitsopwekking of elektriciteit voor waterstofproductie).



Figuur 7. Primair energieaanbod voor binnenlandse behoefte, inclusief grondstoffen en synfuels. De benodigde biomassa voor de productie van SAF is niet gemodelleerd in het ETM en niet opgenomen in deze figuur. Vanaf 2030 bestaat een deel van het aanbod olie uit geïmporteerde pyrolyse-olie. Zie ook sectie 5.2.3.

¹³ Onder andere eigen verbruik van centrales, energieverbruik van olie- en gaswinning, etc. Brandstoffen voor conversie (zoals elektriciteitsproductie) zijn hier niet bij inbegrepen.

In Figuur 7 is goed te zien hoe de belangrijkste energiedragers in 2019 (gas, olie en kolen), vervangen worden door een duurzame energiemix in 2050, waar een grote rol is weggelegd voor verschillende vormen van CO₂-vrije opwek van elektriciteit in alle scenario's. We noemen de voornaamste veranderingen in de energiemix. Een nadere toelichting volgt in paragraaf 4.5 en hoofdstuk 5:

- **Elektriciteit:** de totale opwek van wind en zon neemt aanzienlijk toe. In twee van de vier scenario's is in 2050 ook nucleaire elektriciteit onderdeel van de energiemix. Uit duurzaam opgewekte elektriciteit wordt tevens waterstof gemaakt. In de scenario's Nationaal Leiderschap en Europese Integratie speelt dit een grote rol en is dus ook meer opwek noodzakelijk.
- **Methaan:** vandaag de dag speelt methaan (vooral in de vorm van aardgas) nog een zeer grote rol in de totale energiemix. Deze hoeveelheid is ongeveer gehalveerd in 2030 en neemt daarna snel verder af en heeft alleen nog een significante rol in het scenario Europese Integratie.
- **Biomassa:** richting 2050 kent de inzet van biomassa als energiebron een grote bandbreedte. Afhankelijk van het scenario blijft het volume nagenoeg gelijk of neemt met een factor drie toe (scenario Europese Integratie). Biomassa wordt gebruikt voor warmte en productie van biomethaan.

Er zijn enkele verschillen tussen de scenario's, de voornaamste zijn:

- In het scenario Decentrale Initiatieven en (nog meer) in het scenario Nationaal Leiderschap is duurzame elektriciteit de belangrijkste primaire energiebron, waarvan een deel in waterstof wordt omgezet. Nederland voorziet in deze scenario's grotendeels in haar eigen energiebehoefte.
- In de scenario's Europese Integratie en Internationale Handel is het beeld meer divers: naast elektriciteit zijn er ook diverse moleculen als primaire bron, waarvan een klein deel netto juist in de finale elektriciteitsvraag wordt omgezet.
- Het scenario Europese Integratie kent een groot aandeel biomassa en nucleaire elektriciteit. Dit wordt grotendeels ingezet voor elektriciteitsproductie, maar ook voor warmteproductie in warmtenetten, industrie en in hybride warmtepompen in huishoudens.
- In het scenario Europese Integratie wordt een klein deel aardgas ingezet voor de productie van blauwe waterstof door het toepassen van CCS. Tevens wordt het meest pyrolyse olie (50 TWh) geïmporteerd.
- In het scenario Internationale Handel is de diversiteit aan energiedragers met een aanzienlijk volume het grootst. In dit scenario wordt de meeste waterstof geïmporteerd (deels in de vorm van ammoniak) naast een aandeel biomassa. Dit zorgt voor een heel divers energiesysteem. Daarbij moet worden bedacht dat de geïmporteerde waterstof in andere landen weer uit duurzame stroom wordt geproduceerd: die elektriciteit is er dan wel als primaire bron, maar de conversiestappen vinden elders plaats.

4.4 Energiedragers

Deze paragraaf gaat in op de energiedragers van het Nederlandse energiesysteem: elektriciteit, waterstof, methaan, warmte, biobrandstoffen en synthetische brandstoffen. Daarbij wordt een toelichting gegeven op de huidige inzet, de ontwikkeling in vraag en aanbod tot 2050, de belangrijkste verschillen tussen de scenario's en relevante aannames of uitgangspunten in de scenariostudie.

4.4.1 Elektriciteit

Huidige inzet

In referentiejaar 2019 was geïnstalleerd vermogen aan opwek voor elektriciteit uit duurzame bronnen 11,6 GW. Voor conventionele opwek, door middel van centrales op fossiele brandstoffen, was dat bijna 25 GW. Van deze 25 GW werd verreweg het grootste gedeelte ingevuld door aardgas, namelijk ruim 19 GW. Daarnaast werd een klein aandeel van centrales gestookt met kolen, groen gas of nucleaire brandstoffen. Gezamenlijk hadden deze duurzame en fossiele bronnen een elektriciteitsproductie van circa 120 TWh. Hier stond in het jaar 2019 een vergelijkbare behoefte aan elektriciteit tegenover. De sectoren gebouwde omgeving en industrie hebben hierin het grootste aandeel met respectievelijk 56 TWh en 41 TWh aan elektriciteitsvraag.

Ontwikkelingen tot 2050

Vanwege de elektrificatie van de samenleving neemt de vraag naar elektriciteit de komende decennia toe. Deze toename is echter niet in alle scenario's en niet voor alle sectoren hetzelfde. In het scenario Internationale Handel blijft de stijging in elektriciteitsvraag het meest beperkt, naar circa 270 TWh in 2050. In het scenario Nationaal Leiderschap wordt de hoogste groei van elektriciteitsvraag verwacht, namelijk zo'n 430 TWh.

Om aan de groeiende elektriciteitsvraag te voldoen, stijgt het aanbod mee. Daarnaast verduurzaamt het elektriciteitsaanbod en wordt de rol van fossiele brandstoffen steeds kleiner, tot een eliminatie van fossiele brandstoffen in 2050 in drie van de vier scenario's. Hoewel het aanbod van elektriciteit per scenario verschilt, is er in alle scenario's een belangrijke rol voor wind op zee weggelegd. Daarnaast vormt ook wind op land en zon PV een groot deel van het aanbod in 2050. Ten slotte wordt er in de scenario's Nationaal Leiderschap en Europese Integratie ook ingezet op elektriciteitsopwekking uit nucleaire bronnen. In alle scenario's wordt in centrales waterstof omgezet in elektriciteit om tekorten op te vangen.

Met een verschuiving naar opwek met duurzame bronnen worden centrales ook anders ingezet. De verwachting is dat centrales op aardgas in 2030 nog steeds onderdeel van het systeem zijn, maar dat het opgesteld vermogen wel afneemt. Waar aardgascentrales in referentiejaar 2019 nog bijna 60% van de elektriciteitsvraag (70 TWh van de 120 TWh) voor hun rekening nemen, is dit in 2030 geslonken tot slechts 12% (30 TWh van 250 TWh, zie Figuur 8). In 2050 wordt geen aardgas meer gebruikt voor centrale elektriciteitsopwekking. Gascentrales draaien dan allemaal op waterstof.

Decentrale Initiatieven

De elektriciteitsvraag van de gebouwde omgeving vormt (in volume) kent een relatief gematigde ontwikkeling, hij neemt toe van 56 TWh in referentiejaar 2019 naar een kleine 70 TWh in 2050. Naast de elektrificatie van de gebouwde omgeving, maar er wordt ook uitgegaan van verregaande energiebesparing, een mix aan technieken voor warmte (waaronder warmtenetten) en het gebruik van efficiënte technologieën. De warmtenetten worden gevoed door diverse lokaal beschikbare bronnen zoals geothermie, groene waterstof en groen gas. Duurzame energie is ruim beschikbaar maar niet in een goedkope basislast, mede waardoor de energie-intensieve industrie gedeeltelijk uit Nederland wegtrekt (naast dat de overheid in dit wereldbeeld weinig gerichte sturing geeft om de basisindustrie specifiek hier te behouden). De elektrificatie van de industrie heeft daarom een gematigder invloed dan in andere scenario's. De decentrale industriebedrijven elektrificeren wel, en daardoor wordt een groei voorspeld van 41 TWh in 2019 naar een ruime verdubbeling van bijna 93 TWh elektriciteitsvraag van de hele industrie in 2050. Met het oog op de sterke elektrificatie van de transport- en mobiliteitssector wordt ook daar een flinke groei verwacht richting 2050. Waar deze sector in referentiejaar 2019 slechts 2,4 TWh elektriciteitsvraag had, neemt deze vraag toe via 7 TWh in 2030 tot 50 TWh in 2050.

De hoeveelheid elektriciteitsopwekking uit duurzame bronnen is stevig gegroeid. Met name zon en wind spelen een grote rol. De groei wordt vooral behaald door sterke toename van het aantal lokale projecten en de benutting van lokale bronnen. Zo is het opgesteld vermogen van zon-PV ingeschat op ruim 140 TWh in 2050. Dit aanbod uit zon is vrijwel evenredig verdeeld over verschillende toepassingsvormen: zonnevelden, zon op daken van bedrijven en zon op daken van woningeigenaren. Dit scenario gaat ervan uit dat in 2050 45 GW aan wind op zee (waarvan 8 GW dedicated voor waterstofproductie) en 9 GW wind op land is opgesteld. In dit relatief marktgedreven scenario stukt de ontwikkeling van wind op zee bij de 45 GW. Waterstof speelt een relatief grote rol voor de elektriciteitsvoorziening. Verwacht wordt dat dit oploopt van een kleine 2 TWh in 2030 tot 17,5 TWh in 2050. In dit scenario komt er geen elektriciteit uit nucleaire bronnen omdat de overheid in dit scenario weinig specifieke sturing geeft aan technologie of energiemix.

Nationaal Leiderschap

De totale elektriciteitsvraag is zo'n 430 TWh, een toename van ruim 250% ten opzichte van de 120 TWh in 2019. De bestaande industrie in Nederland wordt gestimuleerd om te elektrificeren, wat een grote stijging in de elektriciteitsvraag vanuit deze sector teweegbrengt: van ruim 40 TWh in 2019 tot 140 TWh in 2050. Daarnaast is de vraag vanuit elektrolyzers (power-to-gas) met 110 TWh ook aanzienlijk. De invloed van de gebouwde omgeving en de transportsector is vergelijkbaar met die in het scenario Decentrale Initiatieven.

Om aan deze stijging te kunnen voldoen, wordt een stevige groei van opwek met duurzame bronnen zoals zon en wind verwacht. De grootschalige nationale projecten leveren de grootste bijdrage. Zo wordt het potentieel van wind op zee maximaal benut (52 GW voor elektriciteit) en wordt een opgesteld vermogen goed voor 234 TWh opwek verwacht. Ook wind op land heeft het hoogst opgestelde vermogen van de vier scenario's bereikt: 66 TWh. Daarnaast is het opgesteld vermogen van zon-PV ingeschat op bijna 135 TWh in 2050. Dit aanbod uit zon is vrijwel evenredig verdeeld over verschillende toepassingsvormen: zonnenvelden/-weiden, zon op daken van bedrijven en zon op daken van woningeigenaren. Ten slotte worden nog twee bronnen met een klein aandeel in de elektriciteitsopwekking verwacht: opwek uit waterstof (14,3 TWh) en opwek door middel van nucleaire centrales (bijna 20 TWh).

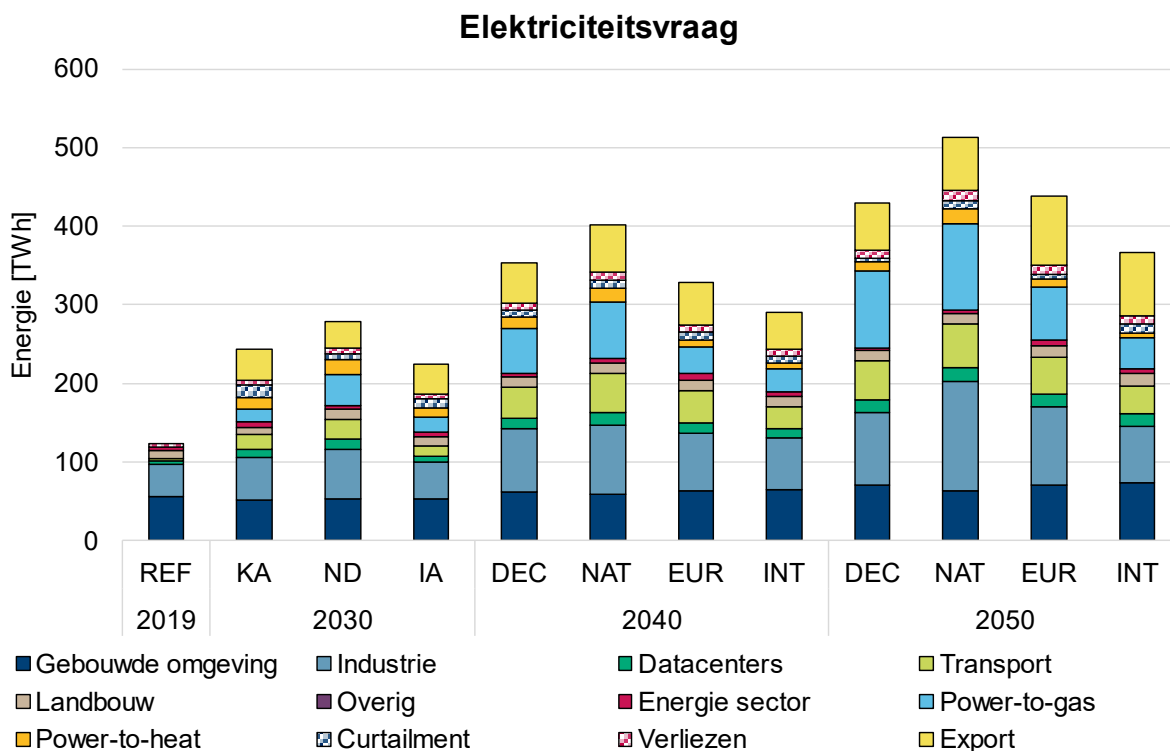
Europese Integratie

De elektriciteitsvraag is vergelijkbaar met die in het scenario Nationaal Leiderschap. Voor de gebouwde omgeving wordt uitgegaan van een gematigde groei in de elektriciteitsvraag, omdat er vooral wordt ingezet op hybride verwarmingssystemen op groen gas en waterstof en ook warmtenetten een significante rol spelen. De vraag neemt iets toe van 56 TWh in referentiejaar 2019 naar een kleine 70 TWh in 2050, maar blijft in vergelijking met andere sectoren redelijk stabiel. In de industrie wordt verduurzaamd dankzij elektrificatie maar ook door de inzet van Europese biomassa en waterstof, als brandstof en grondstof. De elektriciteitsvraag vanuit de industrie loopt op tot zo'n 100 TWh in 2050. De verregaande elektrificatie van mobiliteit, aansluiting van uitgebreide laadinfranetwerken en de uitbreiding van HSL-treinnetwerken door Europa brengen een grotere elektriciteitsvraag vanuit de transportsector teweeg.

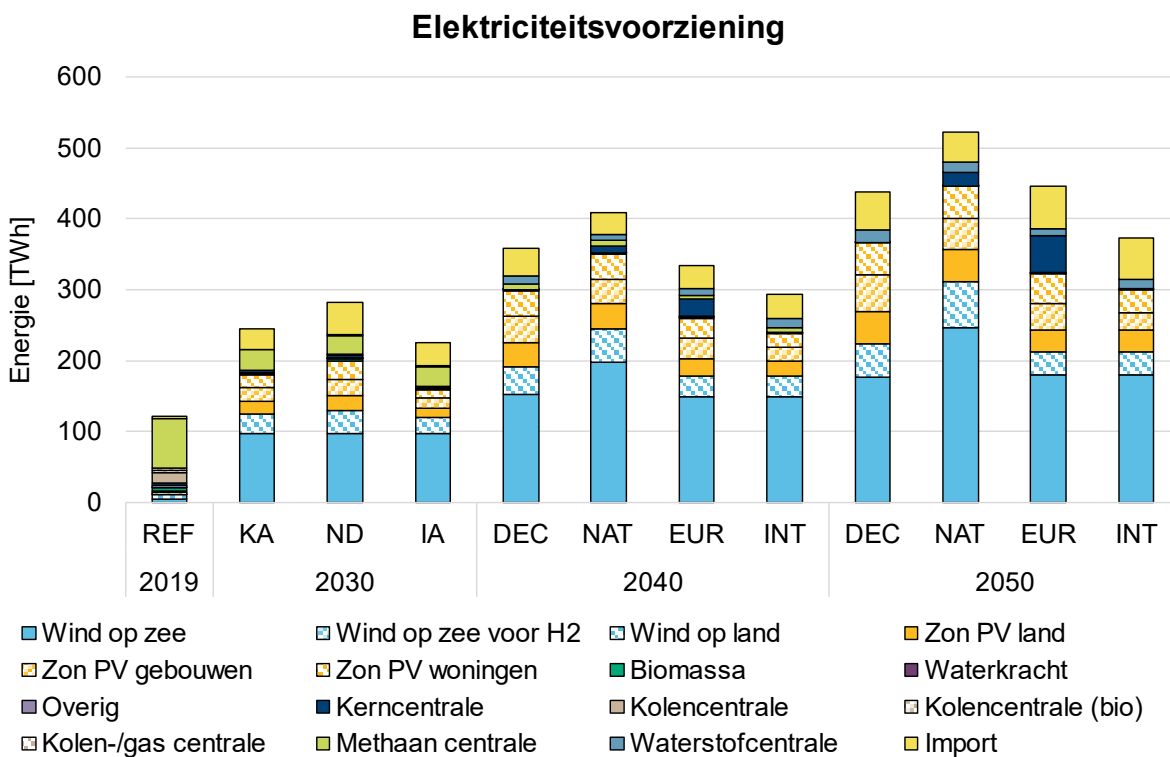
Kenmerkend voor dit scenario is de stevige groei van zon en wind en de toepassing van kernenergie. In samenwerking met omliggende landen wordt ingezet op offshore wind. Hierdoor wordt een groot deel van het wind-op-zee potentieel op de Noordzee benut (171 TWh in 2050). Daarnaast is er een significante rol voor zon-PV weggelegd, hoewel dit het lager ligt dan in de scenario's Decentrale Initiatieven en Nationaal Leiderschap en op circa 110 TWh in 2050 uitkomt. Wel wordt in het scenario Europese Integratie de grootste rol voor nucleaire elektriciteit opwek verwacht, namelijk via 3,2 TWh in 2030 tot ruim 50 TWh in 2050.

Internationale Handel

In dit scenario is de elektriciteitsvraag het minst gestegen, omdat er een grote rol voor waterstof en andere (chemische) energiedragers is weggelegd. De verduurzaming van de industrie baseert zich ook grotendeels op waterstof, waardoor er in deze sector minder elektrificatie optreedt. Vanwege de brede wereldwijde handel verdwijnt naar verwachting bovendien een deel van energie-intensieve industrie naar het buitenland, waardoor de elektriciteitsvraag van deze sector minder sterk toeneemt naar een ruime 70 TWh in 2050. Dit was in 2019 ruim 40 TWh. Ook in de gebouwde omgeving wordt ingezet op hybride warmtevoorziening met een grote rol voor waterstof. In deze sector is een beperktere mate van elektrificatie te zien; de elektriciteitsvraag groeit van 56 TWh in 2019 naar 73 TWh in 2050. Opvallend is dat de elektriciteitsvraag van de transportsector achterblijft bij die in de andere scenario's, namelijk 35 TWh ten opzichte van bijna 56 TWh in het scenario Nationaal Leiderschap. Uitgaande van grote inzet op waterstof gaat de transportsector veel gebruik maken van die energiedrager en dus minder van elektriciteit. Vanwege de achterblijvende vraag naar elektriciteit groeit het aanbod van elektriciteit, in dit iets meer marktgedreven scenario, minder dan in de andere scenario's. Toch is nog steeds sprake van een flinke benutting van het potentieel van wind op zee, namelijk 167 TWh en wordt in beperkte mate ingezet op wind op land (32 TWh). Zon-PV blijft iets achter bij andere scenario's, maar is in totaal alsnog goed voor circa 87 TWh aan elektriciteit. Opwek van elektriciteit met kernenergie komt niet voor.



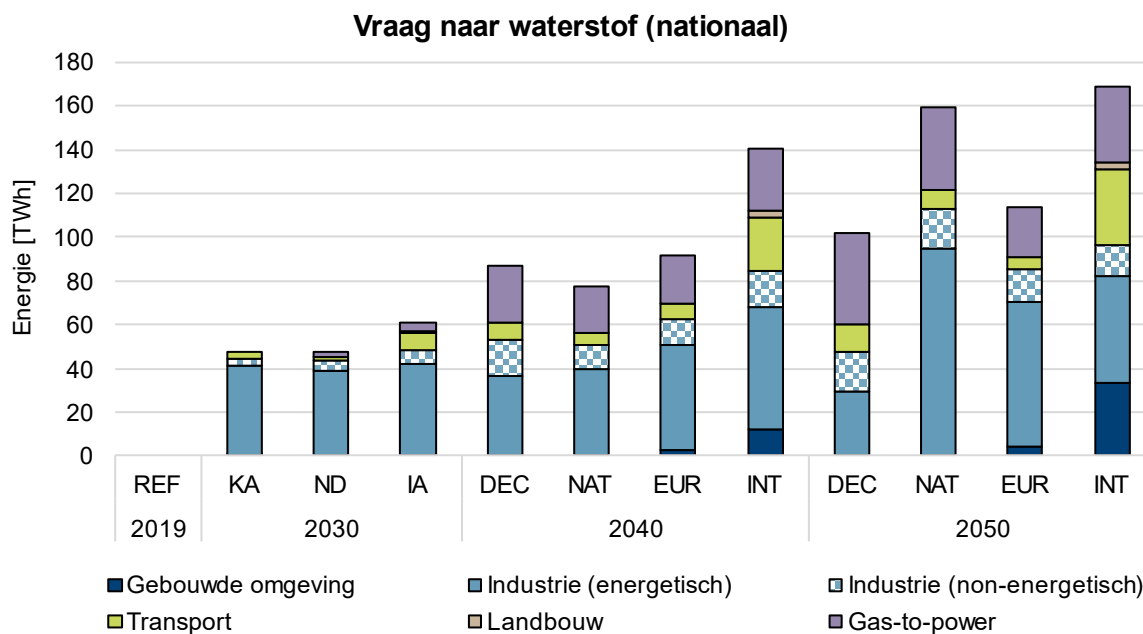
Figuur 8. Vraag naar elektriciteit in 2019 en ontwikkeling tot 2050, per sector.



Figuur 9. Aanbod van elektriciteit in 2019 en ontwikkeling tot 2050, per bron.

4.4.2 Waterstof en waterstofdragers (ammoniak)

In Nederland wordt op dit moment ongeveer 50 TWh waterstof grotendeels lokaal geproduceerd, deels uit aardgas met 'steam methane reforming' (SMR) en deels uit industriële restproducten.¹⁴ Deze waterstof wordt nu met name gebruikt voor kunstmestproductie en in de olieraffinage. Onderstaande figuren geven een overzicht van de hoeveelheden waterstof in de verschillende scenario's. Hierin is alleen de waterstof meegenomen waarvoor transportnetten nodig zijn; vraag die wordt ingevuld met aanbod op dezelfde locatie is buiten beschouwing gelaten.¹⁵



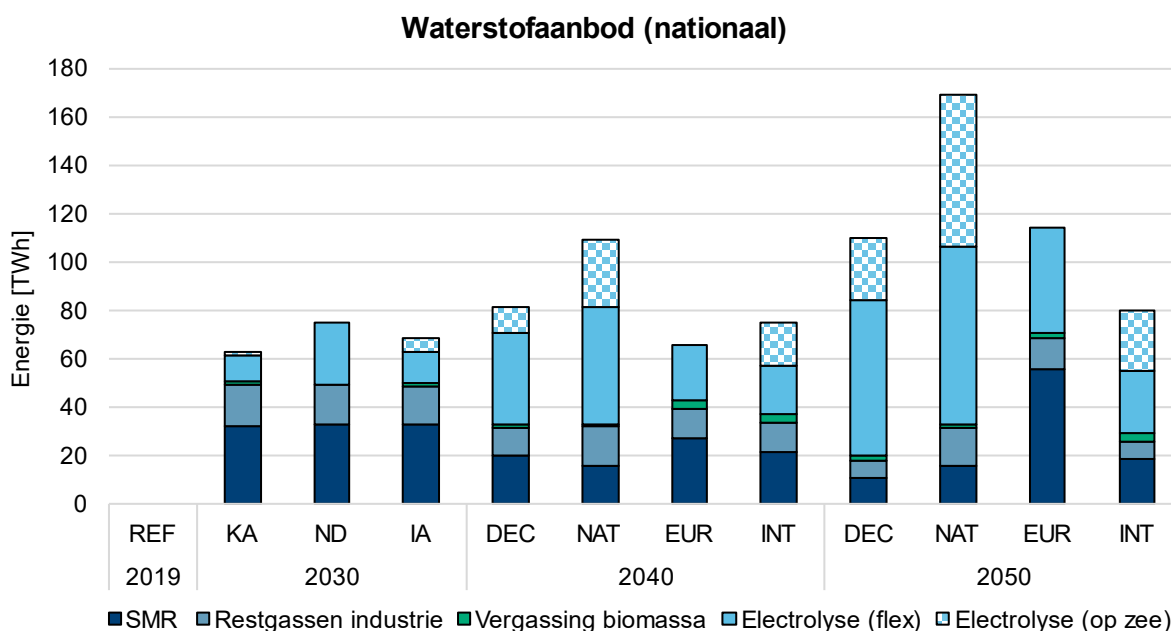
Figuur 10. Vraag van waterstof in 2019 en ontwikkeling tot 2050, per sector.

De binnenlandse vraag naar waterstof groeit in alle scenario's en het snelst in het scenario Internationale Handel. Op korte termijn is de consumptie van de industrie bepalend voor de vraag naar waterstof. Daarnaast gaat ook de elektriciteitsopwekking al in 2030 waterstof gebruiken. In 2040 is waterstof van belang voor de gebouwde omgeving, het meest in het scenario Internationale Handel, waar het de belangrijkste technologie is voor de piekvraag van de gebouwde omgeving (in hybride configuraties, dus met hybride warmtepompen). Een groot deel van de netten is dan omgebouwd. In het scenario Europese integratie is die rol er ook maar is het aantal gebieden waar de distributienetten wordt aangepast geringer. In 2040 is gebruik van waterstof voor flexibiliteit en balanceren van het elektriciteitssysteem toe. In 2050 groeit de vraag naar waterstof verder. Het scenario Nationaal Leiderschap laat met name een forse groei zien in de industrie. Dit houdt verband met de productie van synthetische grondstoffen voor de industrie en brandstoffen voor de lucht- en scheepvaart. In paragraaf 4.5.6 gaan we nader in op de impact van andere aannames rond de productie van synthetische brandstoffen in Nederland.

¹⁴ Het aandeel van waterstof uit SMR in de totale waterstofproductie is momenteel ongeveer 58% (28 TWh). Het restant wordt gemaakt uit industriële reststromen. Zie ook: <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2020/06/24/the-dutch-hydrogen-balance-and-the-current-and-future-representation-of-hydrogen-in-the-energy-statistics>

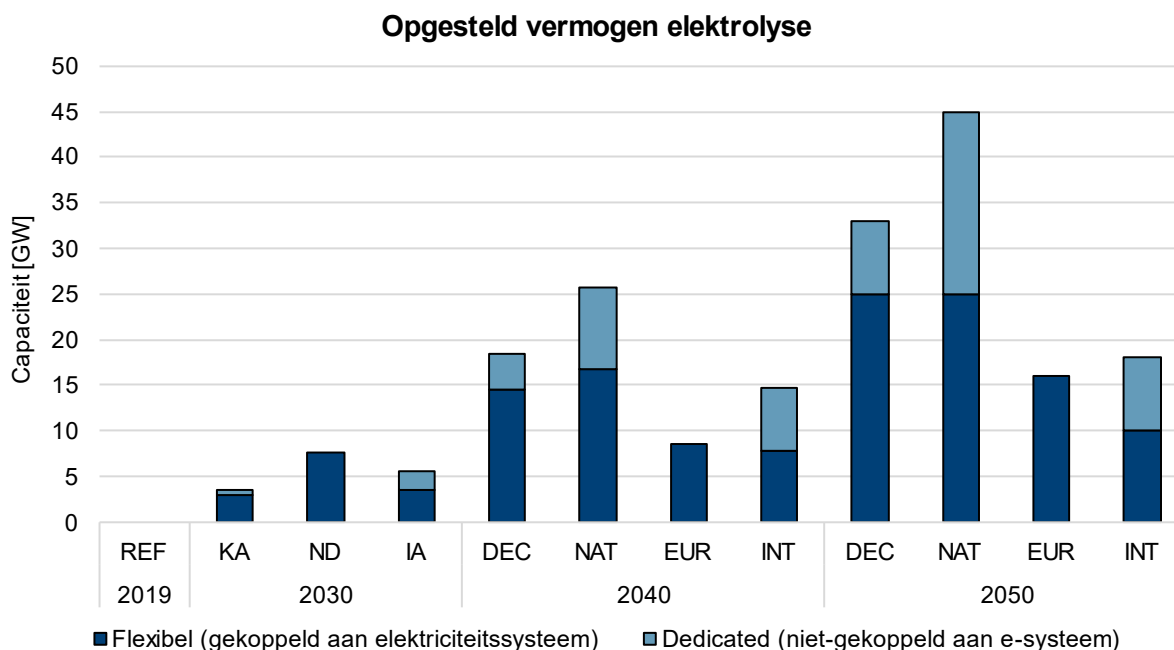
¹⁵ Het gebruikte CTM-model kan stoomkrakers niet als on-site productie modelleren. Als zodanig is de bijbehorende vraag/aanbod ook in de balansen meegenomen.

Naast de binnenlandse vraag groeit ook het binnenlands aanbod van waterstof. Conventionele productie uit aardgas neemt af in alle scenario's, met uitzondering van het scenario Europese Integratie. Deze fabrieken worden uitgerust met CCS om de emissies terug te brengen. Daarnaast worden industriële restgassen gebruikt om in een deel van de nieuwe waterstofvraag te kunnen voorzien. Ook hiervan wordt de CO₂ afgevangen. Op de langere termijn krimpt het gebruik van restgassen in de scenario's Decentrale Initiatieven en Internationale Handel. Dit houdt verband met het vertrek van bepaalde industriële processen uit Nederland. Waterstofproductie uit biomassa en huishoudelijk afval (FUREC) speelt een beperkte rol.



Figuur 11. Aanbod van waterstof in 2019 en ontwikkeling tot 2050, per bron.

De productie van groene waterstof uit elektrolyse groeit in alle scenario's. Elektrolysecapaciteit neemt het sterkst toe in de scenario's Decentrale Initiatieven en Nationaal Leiderschap, vanwege de focus op binnenlandse energieproductie in deze scenario's. Al in 2030 wordt in twee van de drie scenario's dedicated (offshore) elektrolyse voorzien. Dit neemt verder toe in de opvolgende jaren, met uitzondering van het scenario Europese Integratie, dat meer focust op blauwe waterstof. Het opgesteld elektrolysevermogen groeit tot maximaal 45 GW in 2050, waarvan ongeveer de helft dedicated op zee. Dit vermogen produceert tot 136 TWh aan groene waterstof. Hiermee voorziet het scenario Nationaal Leiderschap de grootste binnenlandse productie.



Figuur 12. Opgesteld vermogen elektrolyse.

De scenario's Europese Integratie en Internationale Handel voorzien beide in een lage binnenlandse groene waterstofproductie in 2050. In het scenario Europese Integratie wordt ook veel blauwe waterstof geproduceerd. In het scenario Internationale Handel ligt de focus op import van waterstof. Alle scenario's voorzien enige mate van waterstofimport vanaf 2030. Met de ontwikkeling van importfaciliteiten voor waterstof (onder andere ammoniakterminals) kan Nederland zich tevens ontwikkelen als doorvoerland (zie Figuur 13).¹⁶ Zowel import als doorvoer is het meest prominent in de scenario's Internationale Handel en Europese Integratie. In de scenario's Decentrale Initiatieven en Nationaal Leiderschap zijn de import en doorvoer naar verhouding het kleinst.

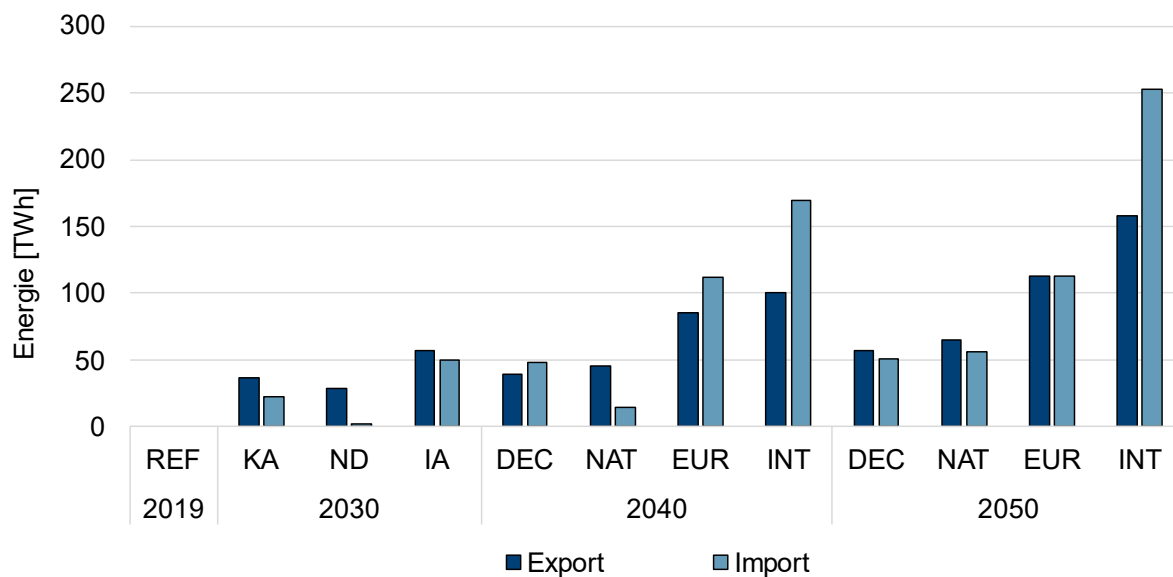
Het scenario Internationale Handel voorziet daarbij ook een forse netto-import.¹⁷ In de andere scenario's zijn import en export min of meer in balans.¹⁸ Het scenario Nationaal Leiderschap voorziet in 2040 een netto-export (evenals het scenario Nationale Drijfveren in 2030). Dit komt voornamelijk door de forse ambities op het gebied van offshore wind. In 2050 verdwijnt dit exportoverschot als gevolg van de binnenlandse waterstofbehoefte voor synthetische grond- en brandstoffen.

¹⁶ Getallen zijn inclusief export van waterstof uit restgassen via netten van derden.

¹⁷ Voor het scenario Internationale Handel is de waterstofimport en -export in 2050 niet volledig zichtbaar in het ETM, vanwege beperkingen in de modellering.

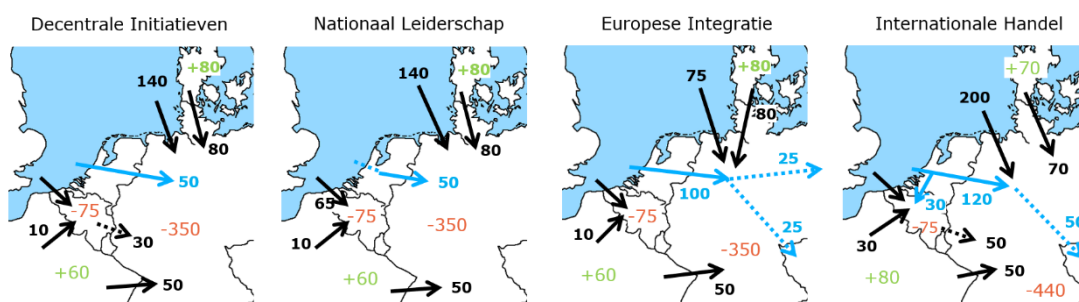
¹⁸ In het scenario Europese Integratie is hiervoor wel import van methaan nodig om waterstof te produceren via 'steam methane reforming' (SMR).

Waterstof import en export



Figuur 13. Import en export van waterstof in 2019 en ontwikkeling tot 2050.

Voor omringende landen is rekening gehouden met vraag en aanbod uit de scenario's van de ENTSO's voor het TYNDP2022.¹⁹ Hieruit blijkt dat ook daar een importbehoefte voor waterstof ontstaat. Een deel van deze import stroomt naar verwachting via Nederland.²⁰ Op basis van de TYNDP2022-informatie is een schatting van deze doorvoer gemaakt. De stroom van waterstof naar het buitenland in 2030 ligt tussen de 10 en 40 TWh. In 2050 ligt de bandbreedte tussen de 50 en 150 TWh, hoofdzakelijk richting Duitsland. In de scenario's Decentrale Initiatieven en Nationaal Leiderschap is de doorvoer van waterstof relatief laag, vanwege de nationale oriëntatie van deze scenario's. De meeste doorvoer is voorzien in het scenario Internationale Handel, waarvan 120 TWh naar Duitsland en 30 TWh naar België. Het scenario Europese Integratie ligt met 100 TWh doorvoer tussen de andere scenario's in.



Figuur 14. Doorvoer waterstof in 2050, in TWh.

¹⁹ <https://2022.entsos-tyndp-scenarios.eu/>

²⁰ <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/kamerstukken/2022/06/29/ontwikkeling-transportnet-voor-waterstof>

Voor import van buiten de EU wordt in eerste instantie gebruik gemaakt van scheepsvervoer, waarbij ammoniak²¹ (onder andere Australië²²) en gecomprimeerde waterstof (waaronder Noorwegen, Noord-Afrika) een grote rol spelen. Op de wat langere termijn wordt waarschijnlijk ook (vloeibare) waterstof verscheept. Tevens zijn dan pijpleidingimporten mogelijk, bijvoorbeeld vanuit Noorwegen of Marokko. In 2050 varieert de waterstofimport tussen de 50 en 250 TWh (max 7,5 Mton waterstof). Deze importhoeveelheid is goed voorstelbaar in het licht van de exportverwachting wereldwijd, die vele malen groter is.²³

4.4.3 Methaan (aardgas en groen gas)

Huidige situatie

In 2019 bedroeg de binnenlandse productie van aardgas 278,5 TWh. Dit betrof productie uit het Groningenveld plus kleine velden. De totale groengasproductie bedroeg 1,7 TWh. De binnenlandse vraag naar methaan was circa 380 TWh. Dit betekent dat Nederland voor een deel van de vraag afhankelijk is van importen. Het grootste deel van de vraag naar methaan is afkomstig van elektriciteitsproductie (38%), gevolgd door de gebouwde omgeving (29%), de industrie (27%) en overig gebruik (6%). Inmiddels is de productie van aardgas verder gedaald en die van groen gas gestegen. Onderstaande figuren tonen aanbod en vraag naar methaan (aardgas en groen gas) in de periode tot 2050.²⁴

Ontwikkelingen tot 2050

De periode tot 2050 kenmerkt zich door een aanzienlijke afname van het methaangebruik. Dit betreft een daling van 90-91% ten opzichte van 2019 in drie van de vier scenario's. De binnenlandse aardgasproductie loopt in de periode tot aan 2030 sterk terug tot ongeveer 40 TWh.²⁵ Dit wordt deels opgevangen door een toename van de import van aardgas.²⁶ In 2050 wordt in Nederland geen aardgas meer geproduceerd, uitsluitend nog groen gas. Het gebruik van groen gas varieert in de scenario's tussen de 13 TWh in het scenario Internationale Handel tot 80 TWh in het scenario Europese Integratie. Van deze bovengrens kan ongeveer de helft geproduceerd worden uit Nederlands biomassapotentieel. Het restant komt uit import.

In vrijwel alle scenario's wordt nauwelijks aardgas meer geïmporteerd. Uitzondering hierop is het scenario Europese Integratie, waarin nog een noemenswaardige hoeveelheid aardgas gebruikt wordt voor de productie van blauwe waterstof. Ook in het Nationaal Leiderschap scenario wordt nog voor 6 TWh aan aardgas geïmporteerd. Het scenario Europese Integratie voorziet dan ook in de grootste vraag naar methaan in 2050, circa 120 TWh. Het gebruik van methaan in de andere scenario's ligt tussen de 12 en 20 TWh en is daarmee redelijk vergelijkbaar. In de komende dertig jaar treden aanzienlijke verschuivingen op in de sectoren die methaan vragen. Productie van blauwe waterstof (SMR/ATR) wordt naar verwachting de voornaamste toepassing van het fossiele methaan dat nog wordt geïmporteerd. De vraag naar duurzaam methaan (groen gas) is in de scenario's Decentrale Initiatieven en Nationaal Leiderschap voornamelijk afkomstig van de gebouwde omgeving en in het scenario Internationale Handel van de industrie (als energiebron en als grondstof). Het scenario Europese Integratie kenmerkt zich door een relatief grote blijvende vraag naar duurzaam methaan vanuit zowel de Industrie

²¹ Het is ook mogelijk dat geïmporteerde ammoniak rechtstreeks wordt gebruikt in bijvoorbeeld de industrie. Dit kon echter nog niet worden gemodelleerd in het ETM. Wel is hiervoor een aparte variantanalyse gedaan (zie ook paragraaf 7.3).

²² De Nederlandse overheid heeft reeds een MoU (Memorandum of Understanding) inzake groene waterstof getekend met verschillende landen, waaronder Australië, Oman, Chili, Namibië en Uruguay.

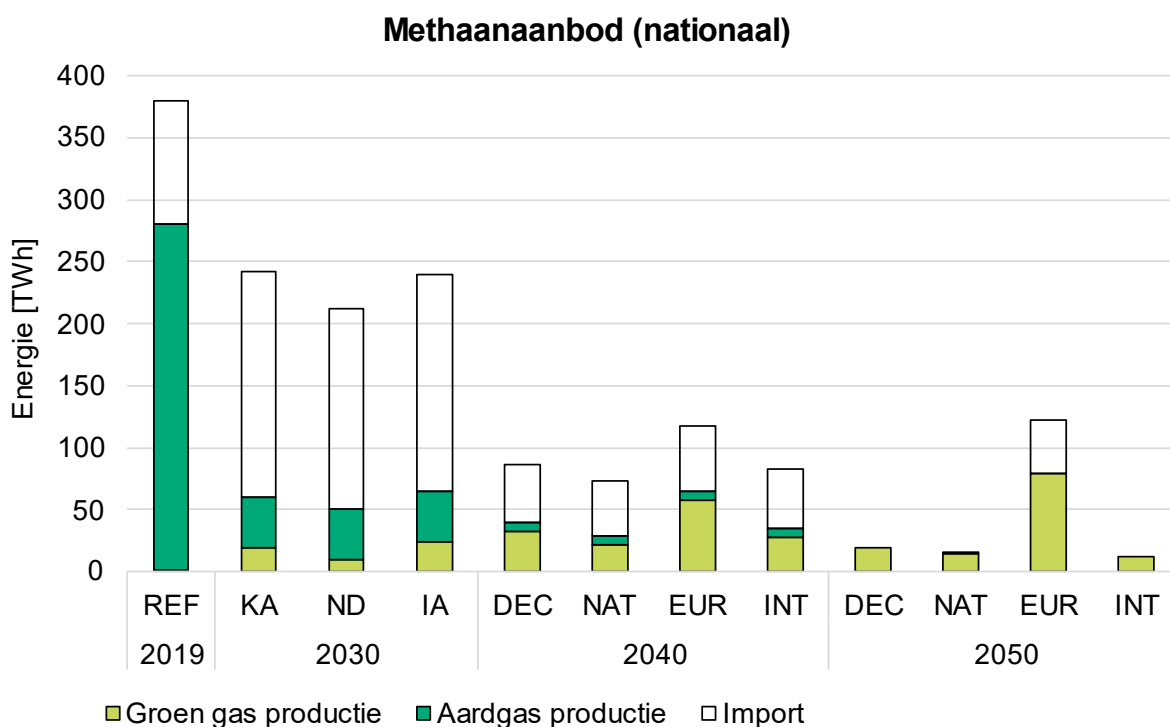
²³ Op dit moment hebben verschillende landen al voor circa 45 Mton aan projecten voor grootschalige waterstofproductie ten behoeve van de export aangekondigd. De meeste moeten al rond 2030 operationeel zijn. Hiervan circa 20 Mton in Australië, 7 Mton in Europa, 5 Mton in Afrika en 3 Mton in het Midden-Oosten. Voortdurend komen hier projectaankondigingen bij. IRENA Global Hydrogen Flows gaat voor 2050 uit van 150 Mton wereldwijd, waarvan 33 voor Europa (link). Global Hydrogen Flows van Hydrogen Council verwacht voor 2050 tot 400 Mton productie (link).

²⁴ De gasvraag is exclusief industriële restgassen, die niet via het landelijk gasnet geleverd worden.

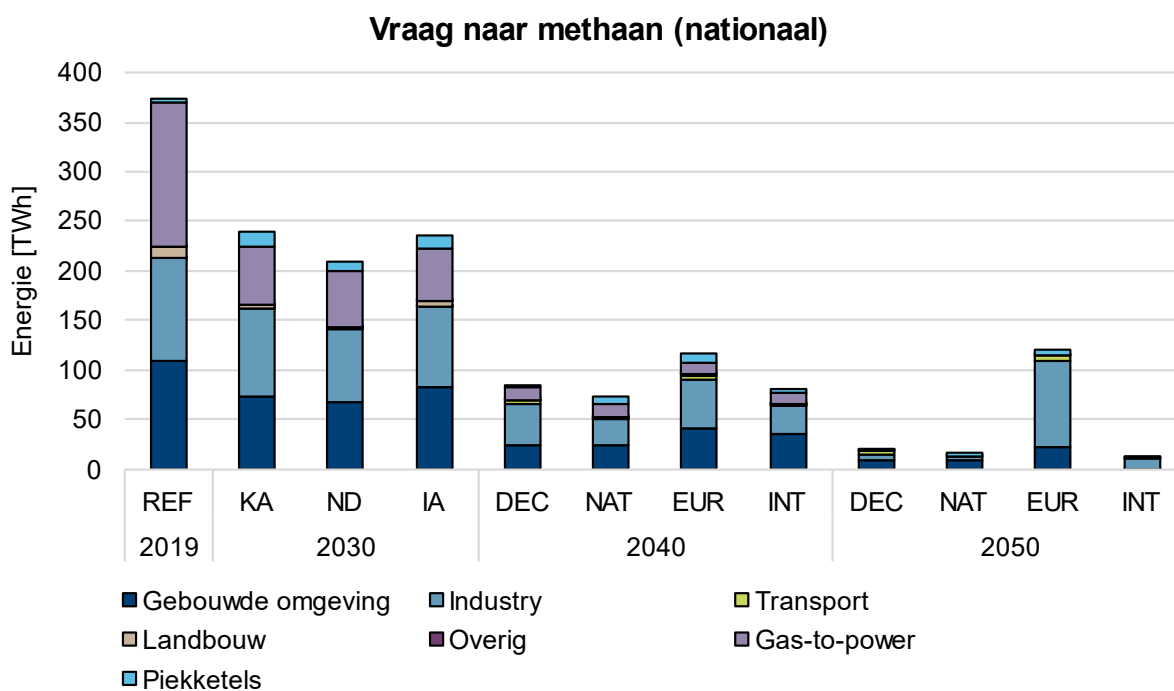
²⁵ Jaarverslag delfstoffen en aardwarmte in Nederland 2021. Alleen (voorwaardelijke) reserves zijn meegenomen: <https://www.nlog.nl/jaarverslagen>

²⁶ Als gevolg van de oorlog in Oekraïne en de energiecrisis zijn grote veranderingen opgetreden in het energiesysteem ten aanzien van de import van Russisch aardgas in heel Europa. Onder andere is de totale vraag naar aardgas gedaald en verschoven van import via pijplijn naar import als lng. Deze ontwikkelingen zijn in de analyses niet meegenomen. In de praktijk zal in de periode tot 2030 daardoor een groter deel van de importbehoefte als lng Nederland binnenkomen.

als de gebouwde omgeving. Het gebruik van methaan voor elektriciteitsopwekking is in 2040 al fors gedaald door ombouw van centrales naar waterstof. In 2050 zijn er geen conventionele centrales meer op methaan.



Figuur 15. Aanbod voor binnenlandse vraag naar methaan (aardgas en groen gas) periode 2019 tot 2050.



Figuur 16. Binnenlandse vraag naar methaan (aardgas en groen gas) periode 2019 tot 2050.

4.4.4 Warmte

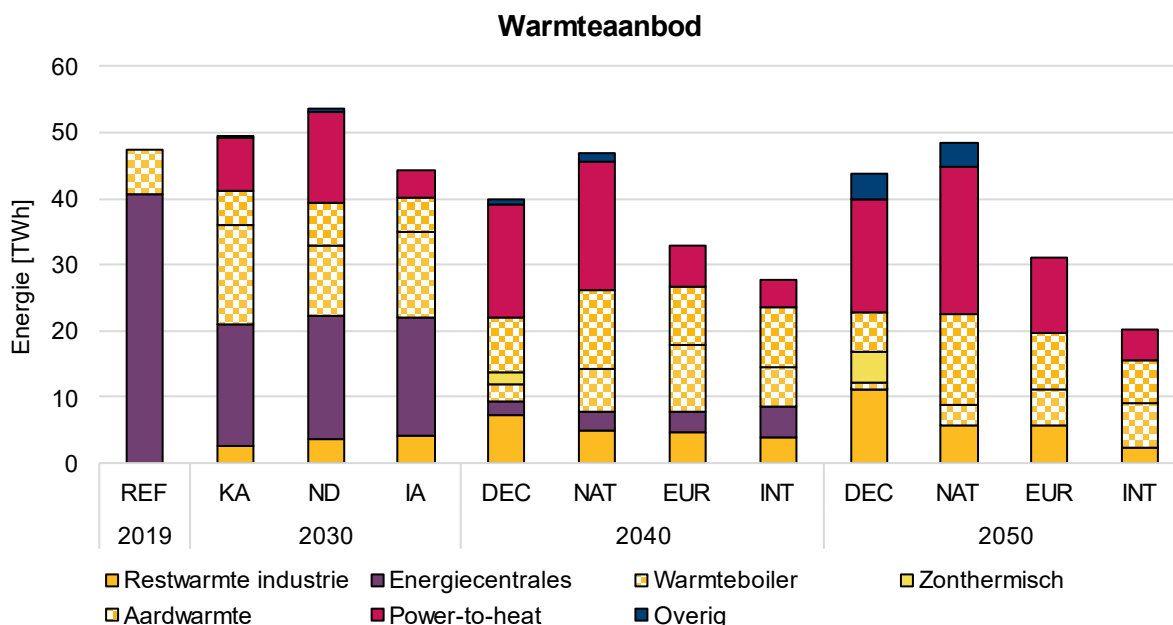
Huidige situatie

In 2019 bedroeg de vraag naar warmte via warmtenetten 47 TWh. De vraag is vooral afkomstig vanuit de industrie (23 TWh), de glastuinbouw (15 TWh) en de gebouwde omgeving (6 TWh). De flexibele vraag bedraagt 2 TWh. De warmte wordt voornamelijk geleverd door een combinatie van restwarmte uit lokale WKK's (14 TWh), gasketels (10 TWh), afvalverbrandingscentrales (4 TWh), bio-warmtecentrales (4 TWh), warmteboilers (7 TWh) en geothermie (2 TWh).

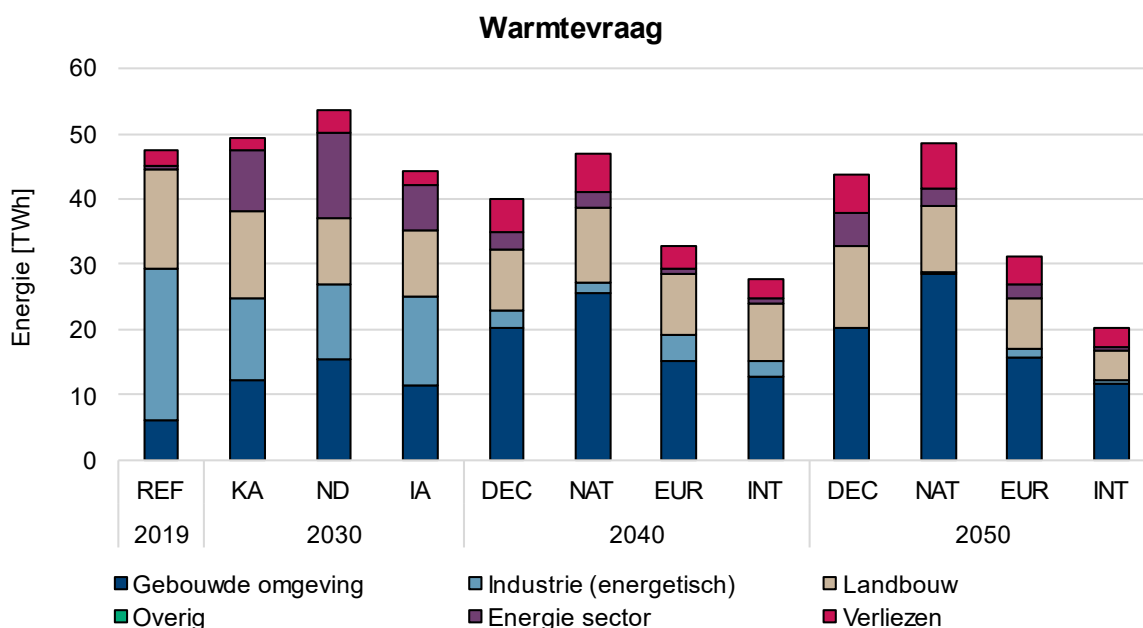
Ontwikkelingen tot 2050

Afhankelijk van het scenario blijft de vraag naar warmte nagenoeg gelijk in 2050 (Decentrale Initiatieven/Nationaal Leiderschap) ten opzichte van 2019 of halveert deze (Europese Integratie/Internationale Handel). In elk scenario is wel sprake van een verschuiving van de vraag. De warmtevraag in de industrie valt langzaam weg en wordt (deels of geheel) vervangen door een toename in de vraag vanuit de gebouwde omgeving. Het type warmtebron verandert ook aanzienlijk. Van overwegend warmtelevering door WKK's en AVI's verschuift het aanbod naar industriële restwarmte en grootschalige geothermie. De rol van warmtenetten neemt fors toe, ook in de glastuinbouw.

In het scenario Decentrale Initiatieven wordt veel (rest)warmte geleverd door de industrie. Ook spelen geothermie en zonthermie in dit scenario een rol van betekenis. De grootste warmtebron is, net als in de andere scenario's, power-to-heat: elektrische boilers en warmtepompen. In het scenario Nationaal Leiderschap wordt de warmte vooral geleverd door elektrische boilers, warmtepompen en aardwarmte. Dit scenario kent een warmtevraag vier keer zoveel als nu in gebouwde omgeving. aangezien veel woningen en gebouwen aangesloten worden op een warmtenet. De warmtevraag in het scenario Europese Integratie neemt met een derde af ten opzichte van vandaag de dag. De toename in warmtevraag in de glastuinbouw blijft achter bij de hierboven beschreven scenario's. Het scenario Internationale Handel kent de laagste warmtevraag: in de gebouwde omgeving is slechts een verdubbeling van de warmtevraag en de vraag vanuit de landbouw krimpt het meest.



Figuur 17. Aanbod van warmte in 2019 en ontwikkeling tot 2050, in TWh.



Figuur 18. Vraag naar warmte in 2019 en ontwikkeling tot 2050, in TWh.

4.4.5 Biogene brand- en grondstoffen

Biogene brand- en grondstoffen worden ingezet in de mobiliteit, industrie en in mindere mate in de gebouwde omgeving en landbouw. De mobiliteitssector gebruikt biobrandstoffen, bijvoorbeeld bio-diesel of duurzame vliegtuigbrandstof (Sustainable Aviation Fuel, SAF). De industrie vervangt een deel van de fossiele grondstoffen door biobased grondstoffen, bijvoorbeeld bio-nafta in de chemische industrie. De gebouwde omgeving en landbouw gebruiken vooral droge biobrandstoffen voor het stoken van pelletkachels en biomassaketels. Figuur 19 geeft een overzicht van het eindverbruik van biomassa, -grondstoffen en -brandstoffen.²⁷ Getallen zijn exclusief biomassa voor productie van groen gas, synthetische brandstoffen en de inzet van biomassa voor elektriciteitsproductie en afvalverbranding.

Huidige situatie

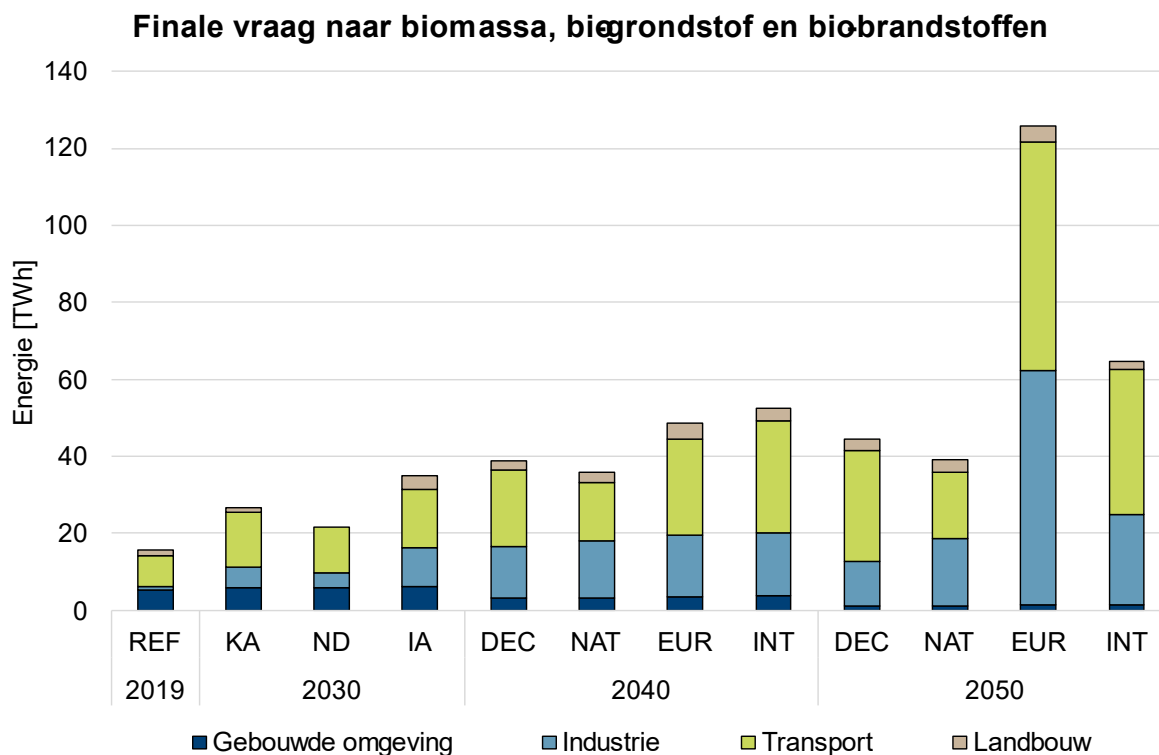
In 2019 bedroeg de vraag naar biogene brand- en grondstoffen 15,6 TWh. Dit is vooral biodiesel en bio-ethanol voor nationaal transport. Deze biobrandstoffen worden deels geproduceerd in biobrandstoffabrieken in Nederland, maar ook geïmporteerd uit landen buiten Europa. In de gebouwde omgeving en landbouw wordt aangenomen dat er lokaal beschikbare biomassa wordt verbrand in houtpelletkachels en biomassaketels. Het aandeel biogene grondstoffen in de industriesector is nu nog beperkt.

Ontwikkelingen tot 2050

De inzet van biobrandstoffen in transport verschilt tussen de scenario's. Tot en met 2040 neemt de vraag naar biobrandstoffen toe in elk scenario. Tussen 2040 en 2050 stijgt de totale vraag naar biobrandstoffen in transport verder, maar vindt ook een verschuiving plaats van wegverkeer naar luchtvaart, omdat de meeste voertuigen dan elektrisch rijden. In het scenario Europese Integratie wordt zowel in het wegverkeer alsook in de luchtvaart de grootste vraag naar biobrandstoffen verwacht. Voor meer informatie over het verduurzamen van de luchtvaart zie paragraaf 4.5.6 en 5.2.3.

²⁷ Biobrandstoffen voor de luchtvaart (SAF) zijn hierbij inbegrepen. Deze zijn echter niet zichtbaar in het ETM, omdat de internationale mobiliteit daarin niet gemodelleerd is. Biobrandstoffen voor de luchtvaart zijn niet opgenomen in de stroomdiagrammen.

Het gebruik van biogene grondstof in de industrie, bijvoorbeeld bio-nafta, neemt richting 2050 toe. In de scenario's Europese Integratie en Internationale Handel worden veel biogene grondstoffen gevraagd. In de scenario's Nationaal Leiderschap en Decentrale Initiatieven wordt voornamelijk gebruik gemaakt van circulaire en synthetische grondstoffen. Om aan deze vraag te voldoen, dient er zorgvuldig omgegaan te worden met de binnenlands beschikbare biomassa en moeten er veel nieuwe fabrieken gebouwd worden om bio-gerelateerde brand- en grondstoffen te produceren.



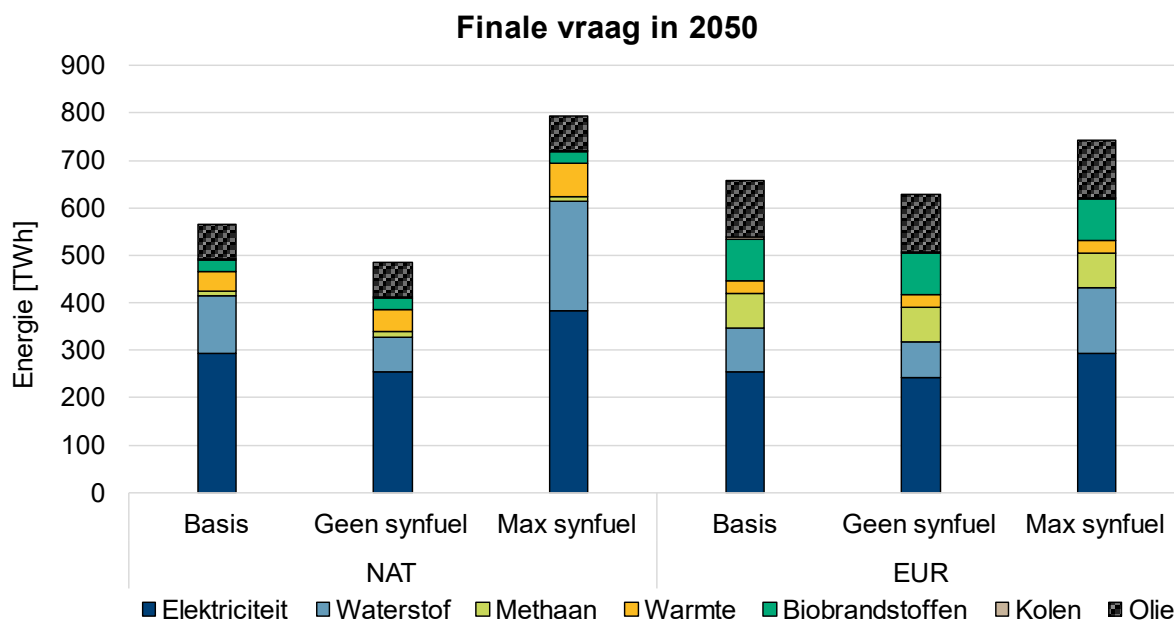
Figuur 19. Finale vraag naar biomassa, bio-gerelateerde brand- en grondstoffen.

4.4.6 Synthetische brand- en grondstoffen

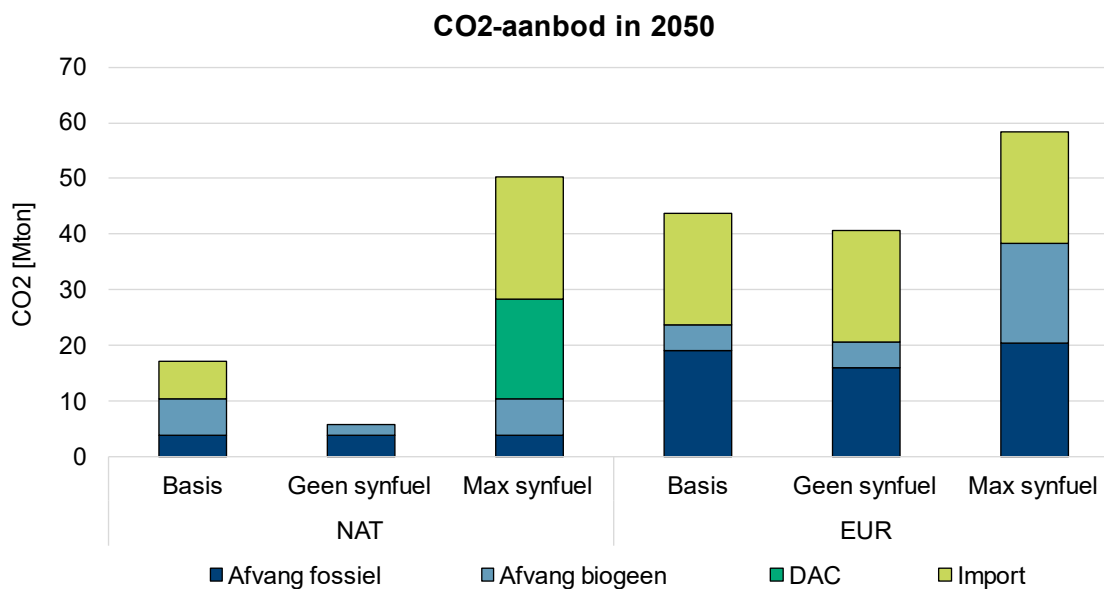
In een klimaatneutraal 2050 spelen synthetische producten een belangrijke rol. Bijvoorbeeld synthetische feedstocks voor de industrie en synthetische brandstoffen voor de lucht- en scheepvaart (zie ook paragraaf 5.2.3). Om deze synthetische producten te maken, is veel elektriciteit, waterstof en (biogene) koolstof nodig. In de scenario's Nationaal Leiderschap en Europese Integratie vindt deze productie in 2050 (deels) in Nederland plaats. Het gaat hier al snel om hoeveelheden waarbij – zeker in de context van de ontwikkelingen in andere vraagsectoren – de grenzen van wat er lokaal in Nederland aan duurzame stroom, waterstof en koolstof geproduceerd en getransporteerd kan worden, snel in zicht komen. Voor deze scenario's is daarom besloten om de hoeveelheid synthetische brandstoffen productie naar beneden bij te stellen ten opzichte van de plannen die de industrie voor deze studie heeft opgesteld (zie ook hoofdstuk 7). Hierbij is aangenomen dat alleen synthetische producten worden gemaakt uit waterstof die ook in Nederland geproduceerd kan worden. In de basis is ruwweg een derde van de industrieplannen meegenomen.

Onderstaande figuren illustreren de grote impact van deze keuze op het binnenlands eindverbruik (vraag naar waterstof, elektriciteit), import en export en op de behoefte aan CO₂. Hierbij zijn de scenario's van Nationaal Leiderschap en Europese Integratie vergeleken met twee varianten: een variant zonder synthetische producten

en een variant waarin zo veel mogelijk rekening wordt gehouden met de plannen van de industrie, ook als daarvoor import van waterstof en koolstof nodig is.

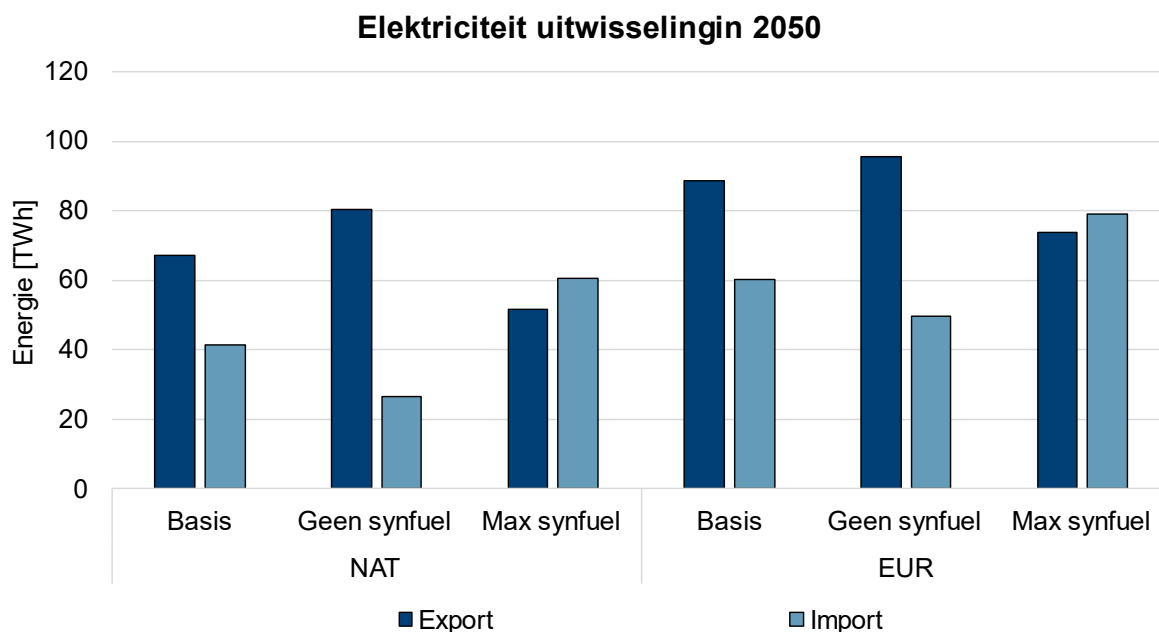


Figuur 20. Impact van synthetische brandstoffen productie op het finaal eindverbruik in 2050²⁸. De productie van SAF is niet gemodelleerd in het ETM en niet opgenomen in deze figuur.

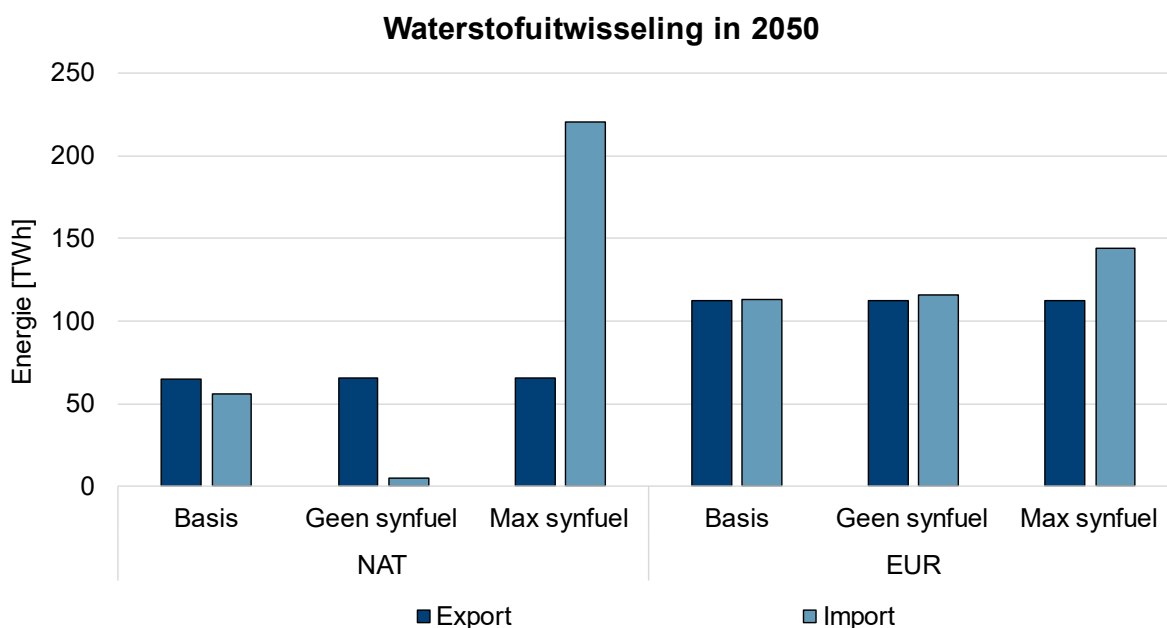


Figuur 21. Impact van synthetische brandstoffen productie op de behoefte aan CO₂ in 2050.

²⁸ Finaal warmtegebruik incl. verliezen en warmteoverschotten aan het eind van het jaar



Figuur 22. Invloed van varianten synfuel productie op elektriciteit uitwisseling in 2050.



Figuur 23. Invloed van varianten synfuel productie op waterstofuitwisseling in 2050.

De waterstofvraag voor synthetische producten in het scenario Nationaal Leiderschap is ongeveer 50 TWh. Dit is vergelijkbaar met de totale huidige waterstofvraag voor kunstmest, chemie en olieraffinage. In de variant waarin geen synthetische brandstoffen meer in Nederland gemaakt worden, is een fors overschot aan binnenlandse waterstof uit elektrolyse waarneembaar. In de max synthetische brandstoffen-variant is ongeveer 160 TWh waterstof nodig voor synthetische producten. In deze extra vraag wordt voorzien uit import.

Het scenario Nationaal Leiderschap bevat ongeveer 40 TWh aan elektriciteitsvraag voor synthetische producten, onder andere voor de productie van CO uit CO₂. Dit is exclusief de elektriciteit die nodig is om groene waterstof te maken. In de variant zonder synthetische brandstoffen verdwijnt deze binnenlandse vraag, met als gevolg dat het exportoverschot groeit. In de max synthetische brandstoffen-variant is de elektriciteitsvraag voor synthetische producten ongeveer 130 TWh; import en export van elektriciteit zijn daarbij min of meer in balans.

De hoeveelheid synthetische brandstoffen productie heeft impact op de behoefte aan (biogene) CO₂ en de afvang daarvan.²⁹ In het scenario Nationaal Leiderschap is ruim 10 Mton CO₂ nodig. Dit komt voor een deel uit import. In de max synfuel-variant groeit de CO₂-behoefte voor synthetische producten naar 44 Mton. Iets meer dan de helft van de productie hiervan wordt in Nederland gemaakt. De extra CO₂-behoefte ten opzichte van het basisscenario komt voor een groot deel uit 'direct air capture' (DAC). Dit is ongeveer 18 Mton.³⁰ Het restant moet geïmporteerd worden.

In scenario Europese Integratie zijn vergelijkbare trends zichtbaar. Omdat de rol van synthetische brandstoffen in dit scenario kleiner is, gaat het om geringere hoeveelheden. De gevolgen hiervan op de infrastructuur wordt in de variantanalyse verder onderzocht (zie ook paragraaf 7.3).

4.5 Flexibiliteitsanalyse

Energie uit wind en zon krijgt in alle transitiepaden een steeds belangrijkere plaats in het energiesysteem van de toekomst. Hierdoor wordt het primaire energieaanbod afhankelijker van (fluctuaties in) weersomstandigheden. Het energiesysteem heeft daarom in toenemende mate flexibele vraag en aanbod nodig dat kan meebewegen met de variërende productie van wind en zon. Dit hoofdstuk gaat achtereenvolgens in op de flexibiliteitsbehoefte, de gekozen invulling voor elk scenario en de invulling van de flexibiliteitsbehoefte voor elektronen, moleculen en warmte.

4.5.1 Elektronen

4.5.1.1 Behoeftte aan flexibiliteit

De I13050-scenario's gaan in verschillende mate uit van een groei van de opgestelde vermogens aan wind op zee, wind op land en zon-PV en een toename van de elektriciteitsvraag. De elektriciteitsproductie uit wind en zon-PV zijn hierbij weersafhankelijk. Windmolens kunnen alleen produceren als de wind waait en zonnepanelen leveren alleen stroom als de zon voldoende schijnt. Beide ontwikkelingen leiden tot een steeds verder toenemend verschil tussen elektrische vraag en productie op verschillende tijdsschalen. Voor de flexibiliteitsanalyses maken we gebruik van historische weerdata om de behoefte aan inzet van flexibiliteitsmiddelen in kaart te brengen. Hierbij worden de data van het gekozen jaar toegepast op het opgestelde vermogen aan duurzame opwek en de warmtevraag voor het toekomstige scenariojaar dat we analyseren.

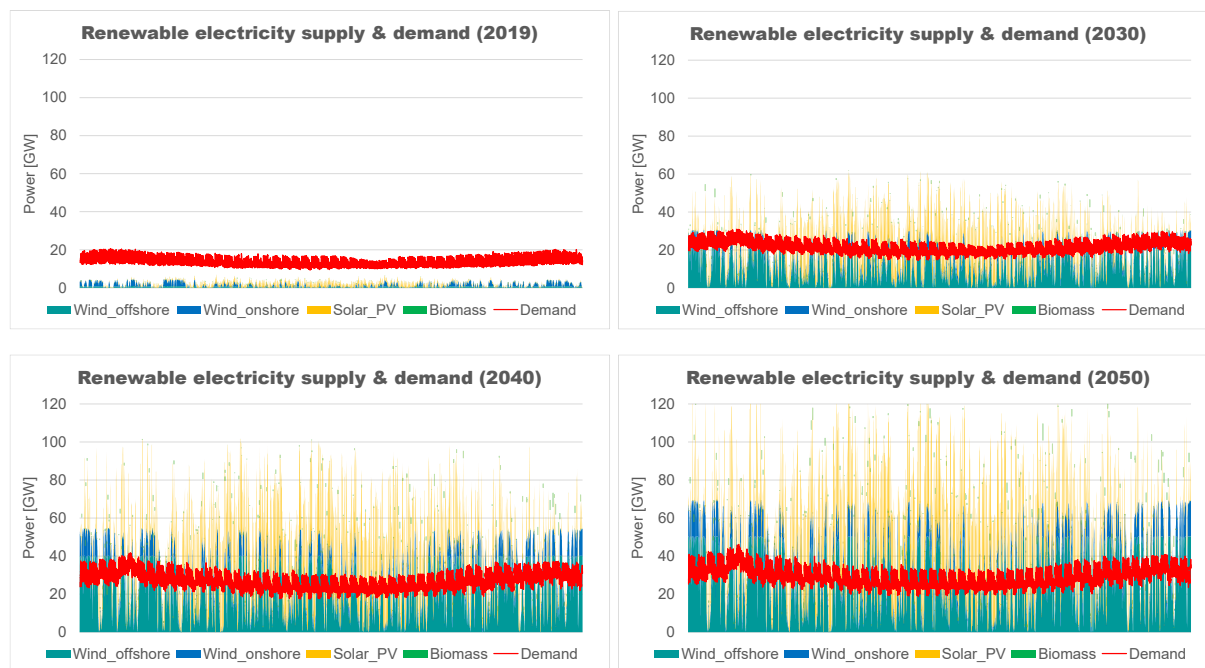
Voor deze studie nemen we een aangepaste versie van het klimaatjaar 2012 als uitgangspunt (zie bijlage A). Daarnaast gaan de nieuwe I13050-scenario's ervan uit dat ook de vraagzijde een fundamentele transformatie naar een efficiënter energiegebruik ondergaat, waarbij de toenemende elektrificatie van verschillende processen – dus het gebruiken van elektrische energie in plaats van een fossiele energiedrager – binnen alle vraagsectoren een belangrijke bouwsteen wordt. Voorbeelden zijn het gebruik van efficiënte warmtepompen in plaats van gasketels, elektrische voertuigen of elektrisch aangedreven verwarming in de industrie. Al deze ontwikkelingen

²⁹ De industrie gebruikt nog een beperkte hoeveelheid fossiele CO₂ voor synthetische producten met een lange levensduur (zoals plastics), waarmee de koolstof voor lange tijd wordt vastgelegd.

³⁰ Dit is qua ordegrrootte vergelijkbaar met het TRANSFORM-scenario van TNO (link).

leiden niet alleen tot een toename van de hoeveelheid elektrische vraag binnen een jaar, maar ook tot een significante stijging van de elektrische vraagvermogens in enkele uren van het jaar.

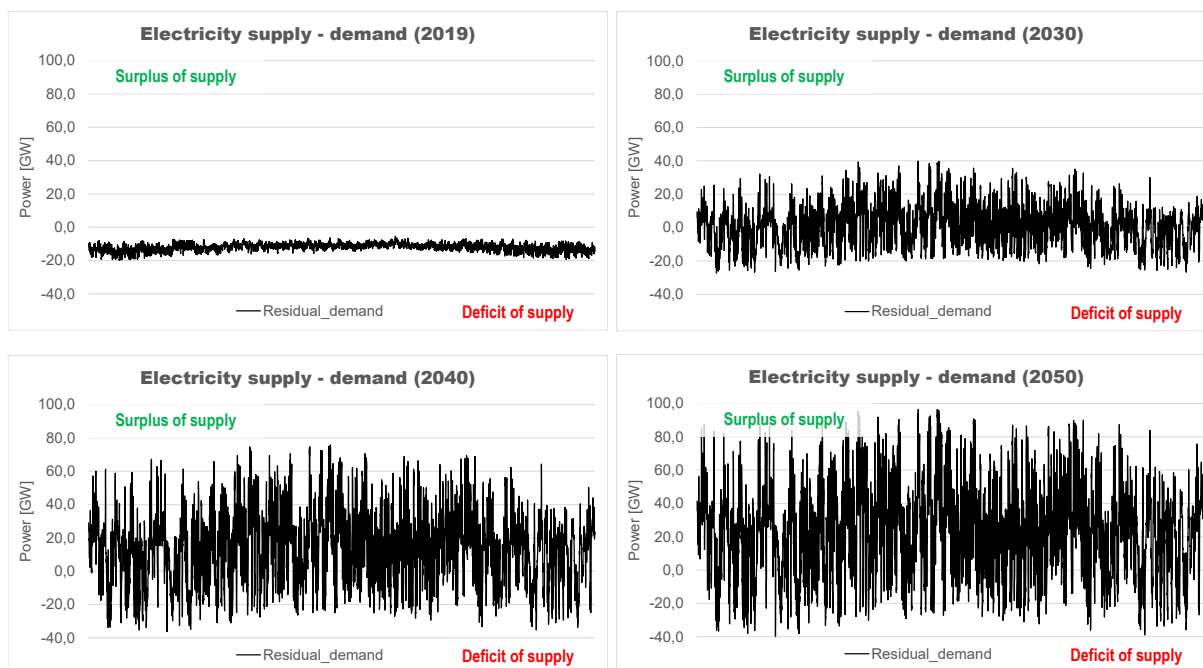
Figuur 24 toont de ontwikkeling van de hernieuwbare productie uit wind, zon-PV en biomassa. De elektrische vraag per uur is in het rood geplot. De vier grafieken laten de uiteenlopende vraag en aanbod zien in het referentiejaar 2019 en in de verschillende toekomstige steekjaren 2030, 2040 en 2050, in dit geval voor het scenario Nationaal Leiderschap. Richting 2050 nemen de extremen zichtbaar toe. Ook is ongeveer een verdubbeling van de gemiddelde elektriciteitsvraag zichtbaar in 2050 ten opzichte van 2019.



Figuur 24. Ontwikkeling hernieuwbare productie en elektrische vraag tot 2050.

Figuur 25 toont voor het scenario Nationaal Leiderschap, de uurlijkse verschillen tussen vraag en aanbod, gerangschikt van grootste overschot naar grootste tekort. Net als in Figuur 24 zijn ook hier toenemende extremen zichtbaar. Er treden zowel meer overschot- als tekort-uren op, wat een toenemende flexibiliteit van het energiesysteem vereist. In 2019 is er alleen sprake van een tekort over het jaar wanneer het duurzame aanbod wordt vergeleken met de vraag. Vanaf 2030 treden zowel tekorten als overschotten op.

Om het hele energiesysteem ook buiten de elektriciteitssector te kunnen verduurzamen, zijn de scenario's dusdanig bepaald dat het aantal uren met meer hernieuwbare elektrische opwek dan elektrische vraag structureel toeneemt vanaf 2030 en richting 2050. Bovenop het direct voorzien in de elektrische vraag, kan overschottenproductie namelijk worden omgezet naar andere energiedragers zoals groene waterstof en warmte.



Figuur 25. Ontwikkeling onbalans tussen vraag en aanbod elektriciteit tot 2050.



Figuur 26. Ontwikkeling behoefte aan flexibiliteit tot 2050.

4.5.1.2 Overzicht flexibiliteitsmiddelen

In de scenario's nemen we de volgende flexibiliteitsmiddelen mee om onbalans in vraag en aanbod van elektriciteit in de tijd bij elkaar te brengen. De onderstaande tabel toont de voornaamste flexibiliteitsmiddelen en hun rol:

Tabel 3. Overzicht met flexibiliteitsmiddelen voor het elektriciteitssysteem.

#	Type	Toelichting	Toepassingen / technologieën (voorbeeld)
1.	Interconnectie (exchange)	Uitwisseling van elektriciteit met het buitenland	<ul style="list-style-type: none"> • Interconnectoren (AC, DC)
2.	Aanbodrespons (curtailment)	Aanpassen van hernieuwbare elektriciteitsproductie	<ul style="list-style-type: none"> • Afschakelen van windproductie
3.	Opslag	Opslag van elektriciteit	<ul style="list-style-type: none"> • Grootschalige batterijen • Huishoudelijke batterijen • Elektrische voertuigen • Gas-to-power
4.	Vraagrespons (demand side response (DSR))	Tijdelijk aanpassen van energievraag (markt)	<ul style="list-style-type: none"> • Industriële vraagrespons • Hybride warmtepompen gebouwde omgeving • Slim laden elektrische voertuigen
5.	Conversie	Conversie naar andere energiedragers	<ul style="list-style-type: none"> • Power-to-heat • Power-to-gas
6.	Back-up elektriciteitscentrales	Regelbare conventionele elektriciteitscentrales	<ul style="list-style-type: none"> • Fossiele centrales (kolen, methaan, olie) • Duurzame centrales (biomassa, kernenergie, waterstof)

1. Interconnectie (import en export)

In Europees verband wordt de komende decennia gewerkt aan het verder integreren van het elektriciteitsnetwerk. Net zoals nu vormen de Europees verbonden elektriciteitsnetten een belangrijke bron van flexibiliteit en leveringszekerheid (CEP70%). Nederland kan importeren op het moment dat tekorten ontstaan en exporteren als dit gebeurt in het buitenland, afhankelijk van de elektriciteitsprijzen. Deze prijzen worden hierbij beïnvloed door de mate waarin profielen van productie en vraag in andere landen afwijken. In de scenario's worden de interconnectoren in 2050 een groot deel van het jaar gebruikt (5.000-6.000 uur vollast) voor import en export van elektriciteit. Er wordt over het jaar zo'n 40-60 TWh geïmporteerd en 60-90 TWh geëxporteerd.

2. Aanbodrespons (curtailment)

Afschakelen van weersafhankelijke opwek

Wanneer de wind waait en de zon schijnt maar er geen afnemer van deze energie is, kunnen windmolens en zonnepaneel omvormers afschakelen. De prijzen zullen op zulke momenten de nul benaderen waardoor dit in de markt vanzelf gebeurt. Daarnaast draagt een grote hoeveelheid weersafhankelijke opwek die tegelijkertijd het net op moet, bij aan overbelasting van het net. Als het net sterk uitgebreid zou moeten worden voor een paar uur gebruik, is dit het waarschijnlijk niet waard en is het afschakelen van deze opwek een betere optie. De precieze hoeveelheid die uiteindelijk afgeschakeld moet worden, kan pas na uitvoeren van de netberekeningen bepaald worden. Het afgeschakelde volumeonderdeel van wind curtailment bedraagt 5-13 TWh.

3. Opslag van elektriciteit

Grootschalige batterijen

Batterijen kunnen fluctuaties in de productie van wind- en zonne-energie opvangen door op te laden op momenten met veel productie (en lage stroomprijzen) en te ontladen op momenten met weinig productie terwijl de vraag nog hoog is (en hoge stroomprijzen). Onder de grootschalige batterijen vallen de redox-flow- en de systeembatterijen. Systeembatterijen in de scenario's draaien 200 tot 250 vollast cycli en de redox-flow-batterijen 30 tot 50 vollast cycli. Het lagere aantal cycli van redox-flow wordt veroorzaakt door de omvang en de langere ontladingsduur. De redox-flow-batterijen kunnen tot ongeveer 40 uur opgeladen of ontladen worden. De grootschalige

batterijen hebben een totale opwekhoeveelheid over het jaar van 13-21 TWh en een vraaghoeveelheid over het jaar van 17-28 TWh (85% cyclus efficiëntie voor systeembatterijen en 70% cyclus efficiëntie voor redox-flow-batterijen³¹).

Huishoudelijke batterijen

Batterijen die bij huishoudens staan, zijn kleinschaligere batterijen die in ongeveer twee uur volledig opgeladen of ontladen kunnen worden.

Huishoudelijke batterijen in de scenario's draaien in 2050 200 tot 250 vollast cycli. Dit vertaalt zich in een opwekhoeveelheid over het jaar van 3-10 TWh en een vraaghoeveelheid over het jaar van 4-11 TWh (90% cyclus efficiëntie).

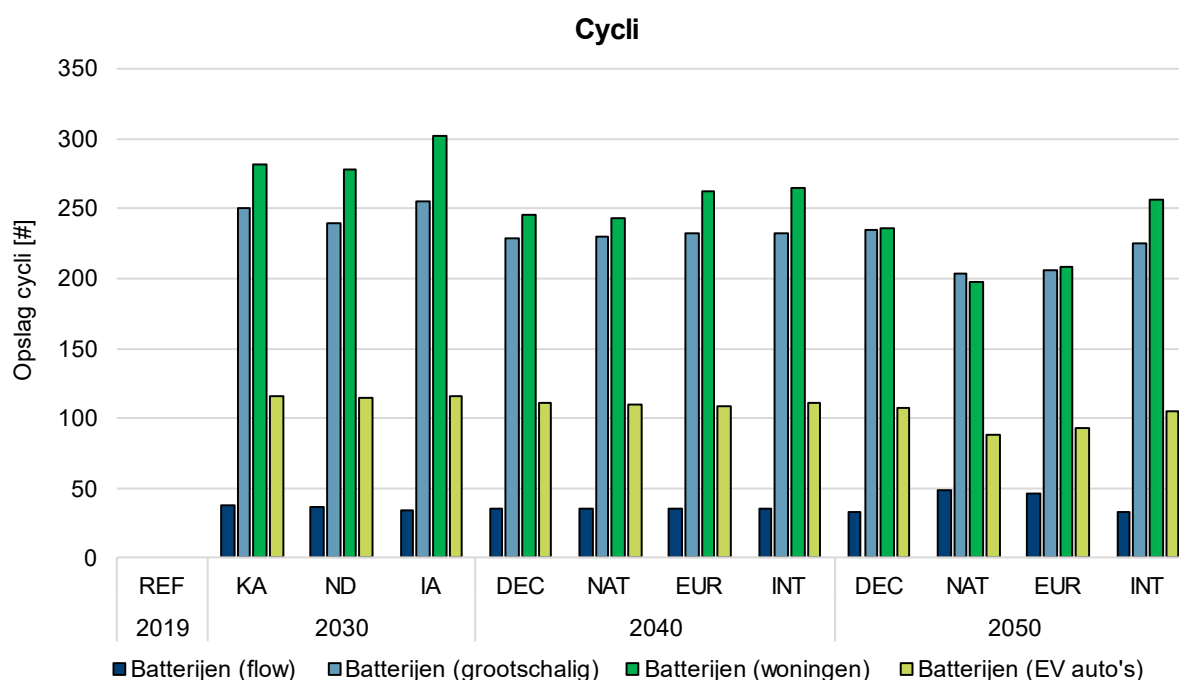
Batterijen van elektrische voertuigen (EV)

Naast dat op een systeemoptimalere manier voorzien kan worden in de vraag van elektrische voertuigen, kunnen de batterijen van elektrische voertuigen ook meedoen als elektriciteitsaanbod. Het voertuig moet dan verbonden zijn met het elektriciteitsnet en er moet een (financieel) voordeel zijn voor de eigenaar om hieraan mee te doen. Voor de elektrische auto's wordt de capaciteit van vehicle-to-grid gemodelleerd. Per auto is een accu met een capaciteit van 100 kWh beschikbaar. Het toekomstige vermogen per auto voor vehicle-to-grid is in de scenario's 3,7 kW. Er is aangenomen dat de beschikbare batterijen voor balancering elk moment op 10-20% liggen. Dit vertaalt zich in een opwekhoeveelheid over het jaar van 11-16 TWh (87% cyclus efficiëntie). De EV-batterij kent gemiddeld zo'n 100 vollast cycli over de scenario's heen.

Gas-to-power

Een deel van de overige elektriciteit wordt geconverteerd naar waterstof (zie ook 'Power-to-gas'). Daarnaast wordt een beperkt deel van de waterstof geconverteerd naar elektriciteit (zie ook 'Conventioneel back-upvermogen'). Effectief betekent dit een opslag van elektriciteit in waterstof met een opwekhoeveelheid over het jaar van 9-18 TWh en een vraaghoeveelheid over het jaar van 36-72 TWh. Indien de groene waterstof in Nederland geproduceerd wordt, bedraagt het cyclusrendement 26%. Deze hebben te maken met energetische verliezen bij de conversie van elektronen naar waterstof, maar nog belangrijker de gedane aannames dat 75% met een laagrendement gasturbine (OCGT) weer terug wordt omgezet naar elektriciteit en 25% met een hoog rendement gecombineerde stoom en gascentrale (CCGT). Bij andere aannames kan het rendement hoger liggen. Een cyclusrendement van 26% lijkt misschien weinig, maar dat valt mee omdat de gebruikte stroom op dat moment grotendeels 'overtollig' was (lage prijs) en geleverd wordt op een moment van schaarste (hoge prijs). Door meer hoger renderende waterstofcentrales is te zetten kan een hoger rendement worden bereikt, maar zullen de totale kosten ook wel stijgen.

³¹ De verhouding tussen de energie die wordt ingevoerd (in MWh) en de energie die wordt teruggewonnen uit de opslag (in MWh), is het cyclus efficiëntie of, in het Engels, 'roundtrip efficiency'.



Figuur 27. Aantal vollast laadcycli van verschillende types batterijopslag. Voor elke opslagtechnologie is de totale jaarlijkse energie-input gedeeld door het totale opslagvolume.

4. Vraagrespons (DSR)

Industriële vraagrespons

Sommige industrieën kunnen bij vraagpieken afschakelen, door middel van marktwerking of met een contract. Deze manier van flexibiliteit staat bekend als vraagrespons ('demand side response', DSR). De flexibiliteit kan geboden worden door het stoppen of juist extra opstarten van (delen van) het industriële proces, door hybride oplossingen (zie ook 'Power-to-heat') 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. De verwachting is dat door een transitie van industriële processen, waarbij rekening wordt gehouden met een volatielere elektriciteitsprijs, vraagrespons een relatief betaalbaar flexibiliteitsmiddel wordt in 2050. Het aantal vollasturen bedraagt 300 tot 600 uur en levert een flexibele bijdrage van 2-4 TWh.

Hybride warmtepompen gebouwde omgeving

In huishoudens zijn de hybride warmtepompen temperatuurafhankelijk gemodelleerd. Dit betekent dat ze van elektriciteit omschakelen naar groen gas of waterstof als de temperatuur daalt tot onder de 5 graden Celsius. Onder deze temperatuur wordt aangenomen dat warmtepompen niet meer goed werken op elektriciteit; de COP (*coëfficiënt of performance*) ligt dan in de gebruikte modellering onder de 2,6. Op jaarbasis wordt ongeveer twee derde van de ruimteverwarmingsvraag door de elektrische warmtepomp geleverd en een derde met gasketel³². Het tapwater wordt volledig met gasketel opgewekt.

Slim laden elektrische voertuigen

In alle scenario's is de verwachting dat er in de toekomst veel elektrische voertuigen zijn. Deze hebben een elektrische vraag bij het laden via laadpalen bij huis of in collectieve locaties. Het aantal laadpalen en de bezetting daarvan zijn daarbij sterk sturend in de gevraagde elektriciteit op enig moment. Wanneer veel

³² Deze parameters en uitkomsten zijn geen gegeven, maar hangen in de praktijk sterk samen met het stookgedrag, de kwaliteit van de woning en het gebruikte afgiftesysteem

voertuigen op hetzelfde moment laden, creëert dit een piekvraag die gebalanceerd moet worden. Dit hoeft niet wanneer de vraag voor het laden van voertuigen meer 'uitgesmeerd' kan worden, ook naar momenten waar andere sectoren minder elektriciteit vragen. De aanname is gedaan dat hier marktprikkels voor zullen bestaan.

5. Conversie

Power-to-heat

In de scenario's wordt ervan uitgegaan dat flexibele power-to-heat installaties in tijden van elektrische overschottenproductie uit wind en zon, extra warmte kunnen leveren aan regionale warmtenetten. Dit is goed voor een flexibele bijdrage van 3-17 TWh over het jaar. Het warmtesysteem levert hier flexibiliteit aan het elektriciteitssysteem door deze extra warmteproductie in te passen door middel van warmteopslag en/of terugschakelen van flexibele warmtebronnen zoals piekketels.

In de industrie is flexcapaciteit beschikbaar in de vorm van power-to-heat hybride ketels. In het ETM schakelen bij overschotten (lage elektriciteitsprijzen) de hybride ketels in de industrie om naar elektriciteit. Deze hybride ketels kunnen waterstof- of groengasketels zijn. Het aantal vollasturen is 4.000 in 2030 en neemt in de tijd af tot 1.000-2.000 uur in 2050 afhankelijk van markt-aannames ('willingness to pay') voor power to heat vs. power-to-gas en een cap op het maximaal te benutten warmte in dit weerjaar. De bijdrage aan het elektriciteitssysteem in 2050 ligt tussen de 0,9 en 2,6 TWh, maar die kan dus groter bij andere modelleerkeuzes.

Power-to-gas

Het elektrolysevermogen wordt voornamelijk flexibel ingezet om de overschotten aan elektriciteit maximaal te benutten. De 'willingness-to-pay' van de flexibele elektrolyse is hoger gezet dan de flexibele power-to-heat; voor deze aanname is in de praktijk mogelijk subsidie nodig om te realiseren. Hierdoor en vanwege het gebruik maken van geïmporteerde elektriciteit zijn de draaiuren van de elektrolyse-units aanzienlijk (5.500 uur in 2030 en tussen de 3.700 en 4.400 vollasturen per jaar in 2050), afhankelijk van het scenario en de markt-aannames ('willingness-to-pay') voor power-to-gas versus power-to-heat³³. Het elektrolysevermogen dedicated gekoppeld aan een wind-op-zee park is van het flexibele vermogen voor elektriciteit uitgezonderd³⁴. De benutte overschotten liggen tussen de 40 en 110 TWh (inclusief een deel dat als opslag gezien kan worden, zie ook 'Gas-to-power'). Aangenomen wordt dat het waterstofsysteem deze volatiele productie flexibel kan opvangen door middel van waterstofopslag.

6. Conventioneel (back-up) regelbaar vermogen

Om op de momenten dat er geen of beperkte duurzame opwek is en andere flexibiliteitsopties (vraagsturing, batterijen, uitwisseling met het buitenland) onvoldoende zijn om het verschil tussen vraag en aanbod op te vangen, worden regelende en back-up elektriciteitscentrales ingezet voor het leveren van het gevraagde vermogen.³⁵ In de scenario's komt het opgesteld vermogen aan conventionele back-upcentrales op 15-20 GW (zie Figuur 28). Deze uitkomst is bepaald middels een globale analyse in het ETM, nader te verfijnen in de tweede fase van I13050 en is dus onzeker.³⁶ 20 GW is vergelijkbaar met het huidige regelbaar vermogen aan gascentrales en fors minder dan het vermogen waar in de eerste editie van I13050 van uitgegaan werd. Er zijn meerdere redenen waardoor de uitkomst vooralsnog anders is:

1. In deze editie is het aantal centrales bepaald op basis van de verwachte *gemiddelde* weersomstandigheden in 2050, terwijl dit in de vorige editie op basis van *extremere* weersomstandigheden werd gedaan (met fors lagere temperaturen en draaiuren voor zon en wind).

³³ De 'willingness-to-pay' is bewust wat hoger gekozen voor elektrolyse om dit aantal vollasturen in het scenario op te nemen, ten nadele van power to heat.

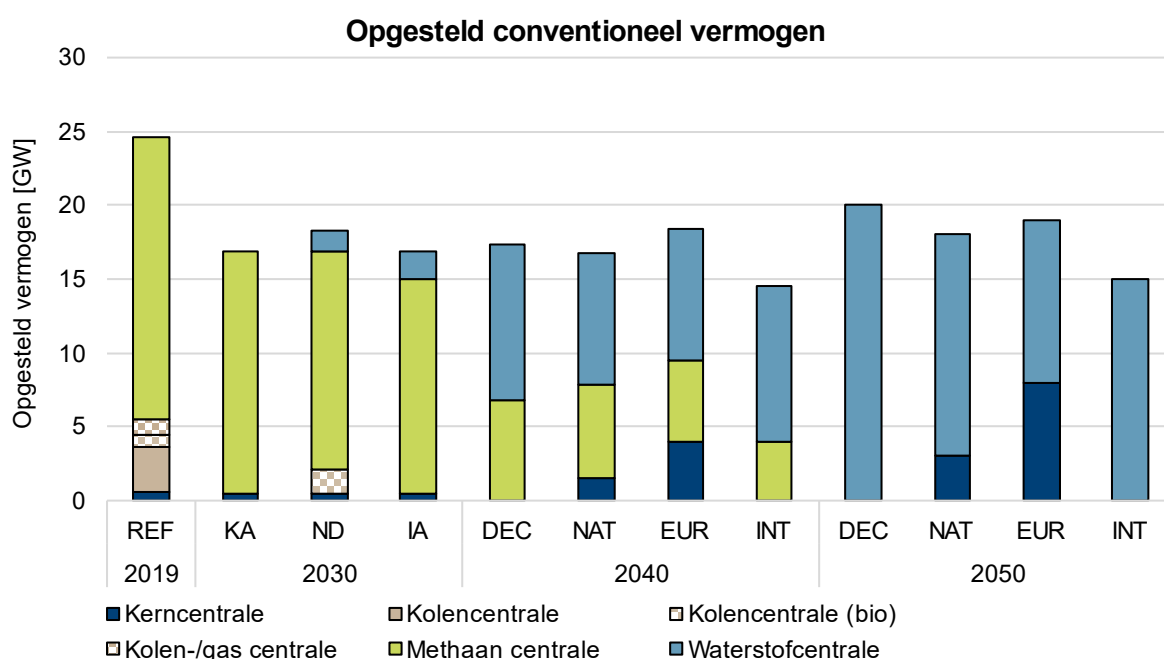
³⁴ Dedicated elektrolyse is vast gekoppeld aan de productie van bijvoorbeeld een windpark en vormt hierdoor geen flexibiliteit voor het elektrische systeem

³⁵ In de ETM-modellering wordt integraal naar alle flexibiliteitsopties gekeken (dus ook naar inzet van gascentrales), gascentrales staan in 2040/2050 achterin de merit-order-optie en zijn daarom hier als conventioneel c.q. back-up apart opgenomen.

³⁶ Om het benodigd vermogen aan back-upcentrales te bepalen, is in het ETM gekeken naar de indicator 'loss of load'. Op deze wijze is het vermogen aan centrales precies af te stemmen op het moment waarop geen tekorten meer ontstaan.

2. In deze editie wordt meer rekening gehouden met de mogelijkheid dat een deel van de industrie haar energievraag op piekmomenten kan aanpassen. Ook is aangenomen dat auto's niet allemaal tegelijkertijd laden.
3. Er is sprake van een grotere hoeveelheid en vooral verbeterde modellering van andere flexmiddelen, zoals batterijen, waardoor er minder vraag overblijft voor de back-upcentrales om op te lossen.
4. In deze editie zijn ook het buitenland en de Europese marktwerking gedetailleerder meegenomen, waardoor het flexibiliteitspotentieel door interconnectie beter in kaart gebracht kan worden.

Het effect van verschillende flexibiliteitsvarianten en weersomstandigheden wordt nog nader onderzocht. Deze studie doet geen uitspraken over de hoeveelheid regelbaar vermogen dat in een klimaatneutraal energiesysteem wenselijk is vanuit leveringszekerheidsperspectief. Hiervoor verwijzen we naar de leveringszekerheidsstudies van TenneT, die dit zowel voor de kortere als langere termijn in meer detail onderzoekt.³⁷



Figuur 28. Opgesteld conventioneel (back-up) vermogen, in GW.

Aangenomen is dat al rond 2030 de eerste gascentrales omgebouwd worden naar waterstof, tot 1,8 GW. In de daaropvolgende jaren neemt het aantal centrales dat op waterstof draait verder toe.³⁸ In 2040 bestaat met tussen de 9 en 11 GW iets meer dan de helft van het gasvermogen uit waterstofcapaciteit. De inzet van de resterende fossiele-gascentrales (tussen 4 en 7 GW) is in aantal draaiuren (in 2019 3.600) gedaald en varieert tussen de 1.100 (scenario Europese Integratie) en 1.450 (scenario Internationale Handel) uur. Vanwege de toename in het aantal fossiele-gascentrales dat met een CCS-installatie is uitgerust, zijn de broeikasgasemissies beperkt (zie ook 4.6.2 voor meer informatie over de ontwikkeling uitstoot broeikasgasemissies). In de scenario's Nationaal Leiderschap en Europese Integratie wordt ervan uitgegaan dat er voor 2040 nieuwe kerncentrales operationeel kunnen zijn met een opgesteld vermogen van 1,5 GW respectievelijk 4 GW. Tot 2050 wordt ervan uitgegaan dat het vermogen nog eens verdubbeld wordt naar 3 GW in het scenario Nationaal Leiderschap en 8 GW in het scenario Europese Integratie.

³⁷ Zie <https://www.tennet.eu/nl/nieuws/monitoring-leveringszekerheid-2022> en Adequacy Outlook (publicatie in 2023).

³⁸ Uitgangspunten zijn bepaald op basis van een analyse van Berenschot naar ombouwbaarheid van bestaande turbines naar waterstof.

Tabel 3 laat zien hoeveel capaciteit per type centrale in de scenario's is aangenomen en hoeveel vollasturen deze in het klimaatjaar 2012 maken.

Tabel 4. Overzicht capaciteit en aantal vollasturen regelbaar vermogen 2050.

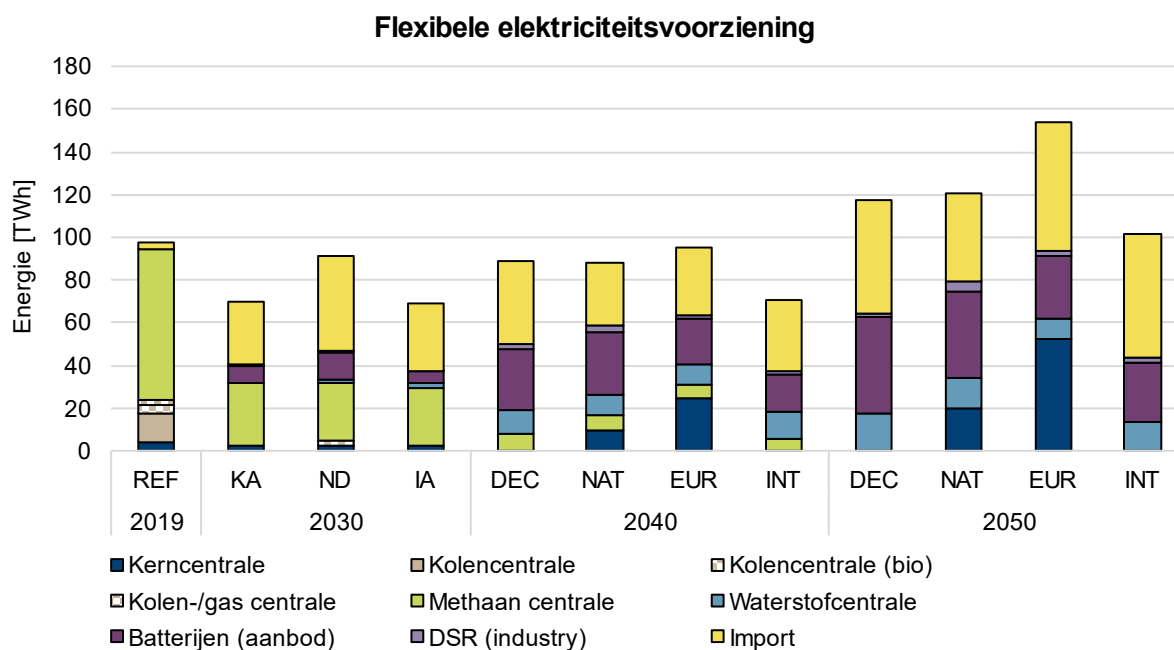
Scenario	Waterstof CCGT		Waterstof OCGT		Kerncentrales	
	Capaciteit	Vollasturen	Capaciteit	Vollasturen	Capaciteit	Vollasturen
DEC	5 GW	1.490	15 GW	669	0 GW	0
NAT	3 GW	1.477	12 GW	823	3 GW	6.623
EUR	2 GW	1.450	9 GW	698	8 GW	6.597
INT	3 GW	1.658	12 GW	738	0 GW	0

4.5.1.3 Invulling flexibiliteitsbehoefte

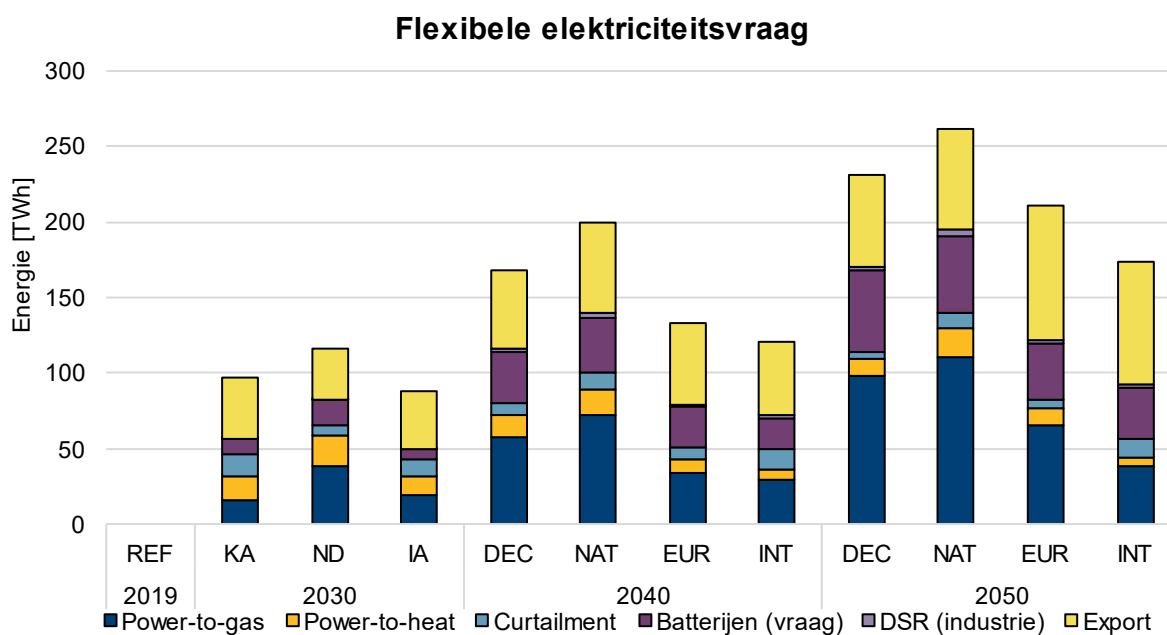
Deze paragraaf toont het opgesteld vermogen, de inzet in TWh en het aantal vollasturen dat van toepassing is bij het weerjaar 2012. De voornaamste verschillen tussen de scenario's worden toegelicht.

Figuur 29, Figuur 30, Figuur 31, Figuur 32 en Figuur 33 laten zien dat de capaciteit aan flexibele middelen fors toeneemt:

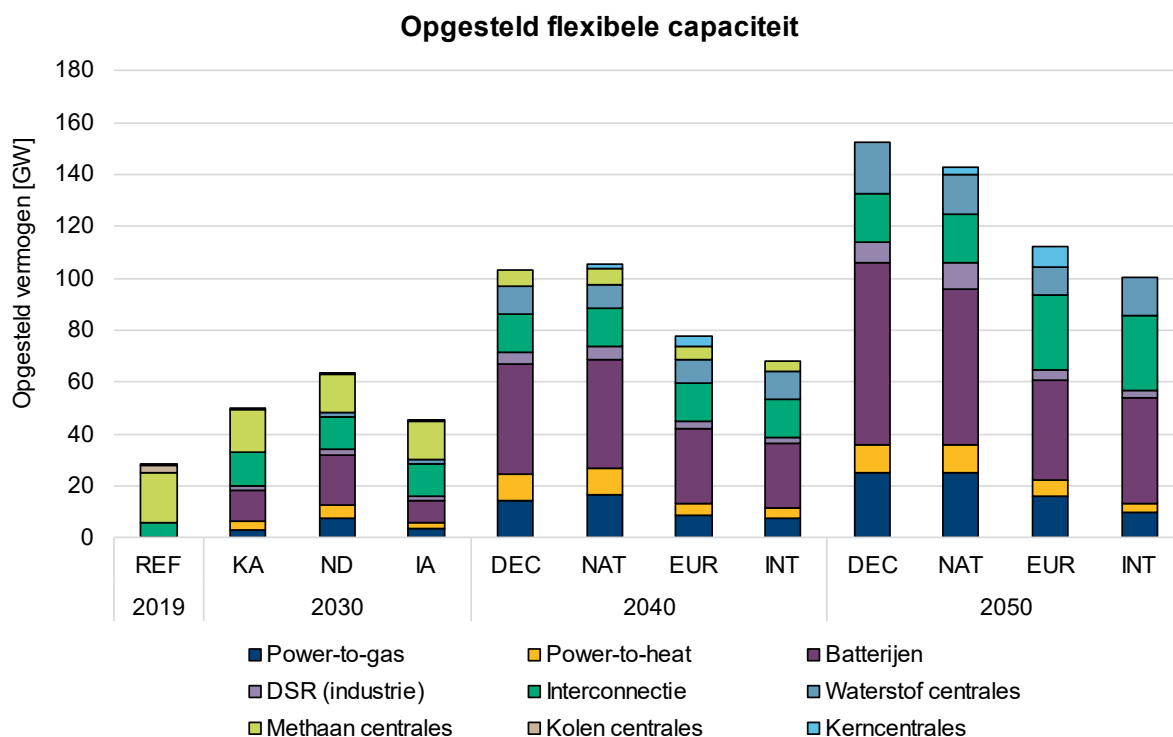
- Het scenario Decentrale Initiatieven kent met bijna 160 GW de grootste capaciteit aan flexibiliteit. In dit scenario is het meeste flexibel vermogen beschikbaar vanuit allerlei soorten batterijen (70 GW). De verwachting is dat batterijen een grote rol spelen als flexibele bron om onbalans op de korte termijn en verschillende netvlakken op te vangen. Daarnaast staat een grote hoeveelheid elektrolyzers opgesteld (25 GW), die gebruikt worden in geval van grote overschotten elektriciteit en onder andere in de behoefte van de waterstofcentrales voorzien. Ook is er in dit scenario een grote inzet van vraagrespon (8 GW).
- Het scenario Nationaal Leiderschap heeft een bijna even grote capaciteit aan flexibele middelen. De grootste capaciteit aan flexibel elektrisch vermogen is ook in dit scenario grootschalige batterijopslag, met daarnaast een grote hoeveelheid aan vraagrespon voor de industrie (respectievelijk 8 en 10 GW). Tevens staat er 4 GW aan nucleair vermogen. Het scenario komt verder grotendeels overeen met Decentrale Initiatieven.
- Het scenario Europese Integratie heeft een groot scala aan flexibiliteitsmiddelen. Zo staat voor 8 GW aan kernreactorvermogen opgesteld en spelen import en export een grotere rol. Lokale flexibiliteitsmiddelen zoals vraagrespon en batterijen (40 GW) zijn minder sterk aanwezig.
- Het scenario Internationale Handel heeft de minste vraag naar flexibele capaciteit. Net als in het scenario Europese Integratie is een grote rol weggelegd voor import en export. Naast een kleiner aandeel voor vraagrespon ligt in dit scenario ook minder focus op power-to-heat. De grootste capaciteit aan flexibel elektrisch vermogen is in dit scenario nog steeds batterijopslag.



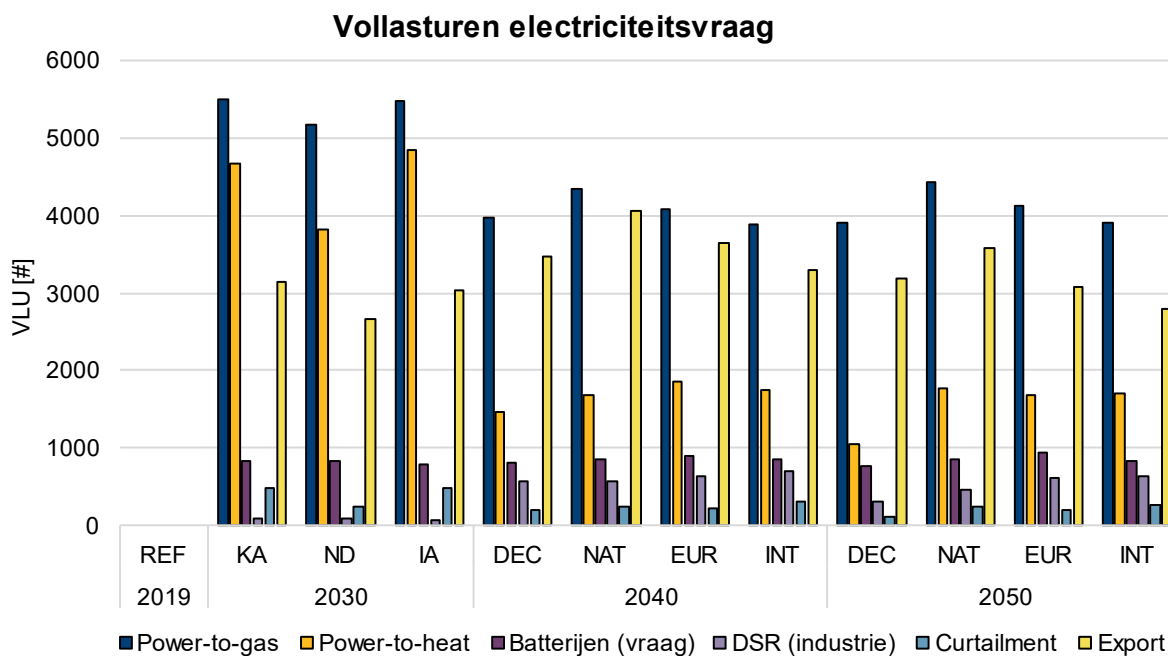
Figuur 29. Overzicht flexibele opwek voor tekorten in TWh.



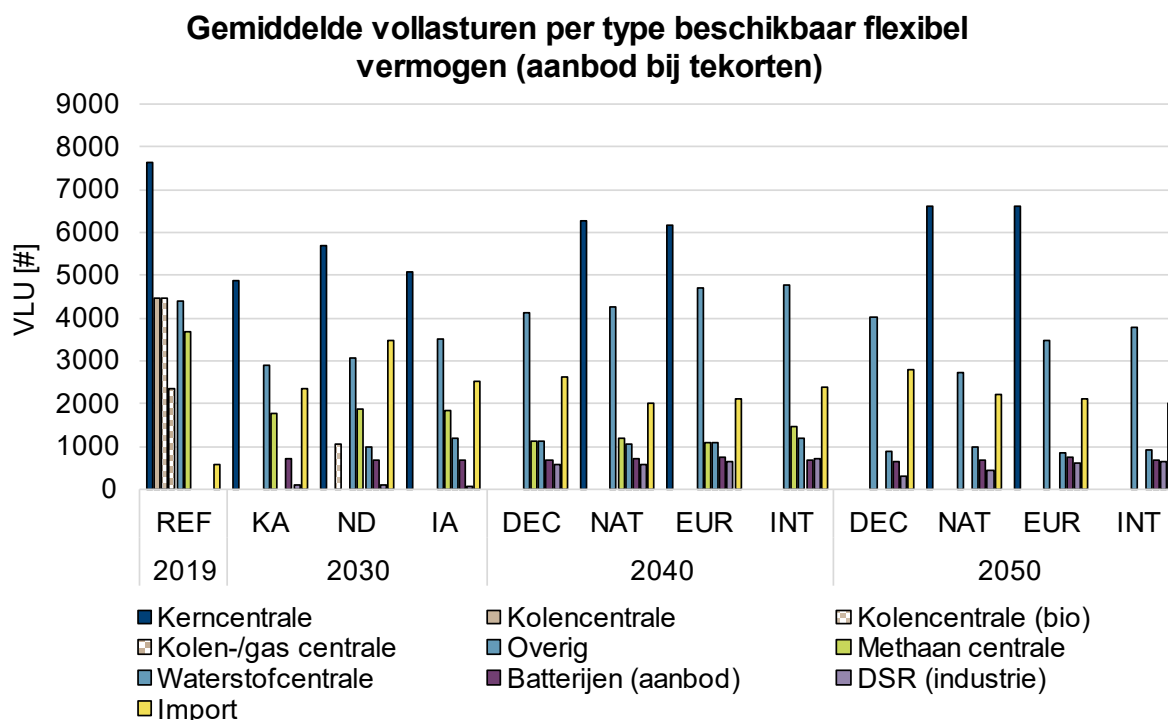
Figuur 30. Overzicht flexibele vraag voor overschotten in TWh.



Figuur 31. Opgesteld flexibel vermogen in GW. De productie van SAF is niet gemodelleerd in het ETM en de bijbehorende energievraag niet opgenomen in deze figuur.



Figuur 32. Gemiddelde vollasturen per type beschikbaar flexibel vermogen (vraag bij overschotten). De productie van SAF is niet gemodelleerd in het ETM en de bijbehorende energievraag niet opgenomen in deze figuur.



Figuur 33. Gemiddelde vollasturen per type beschikbaar flexibel vermogen (aanbod bij tekorten).

4.5.2 Moleculen

4.5.2.1 Behoeftte aan flexibiliteit

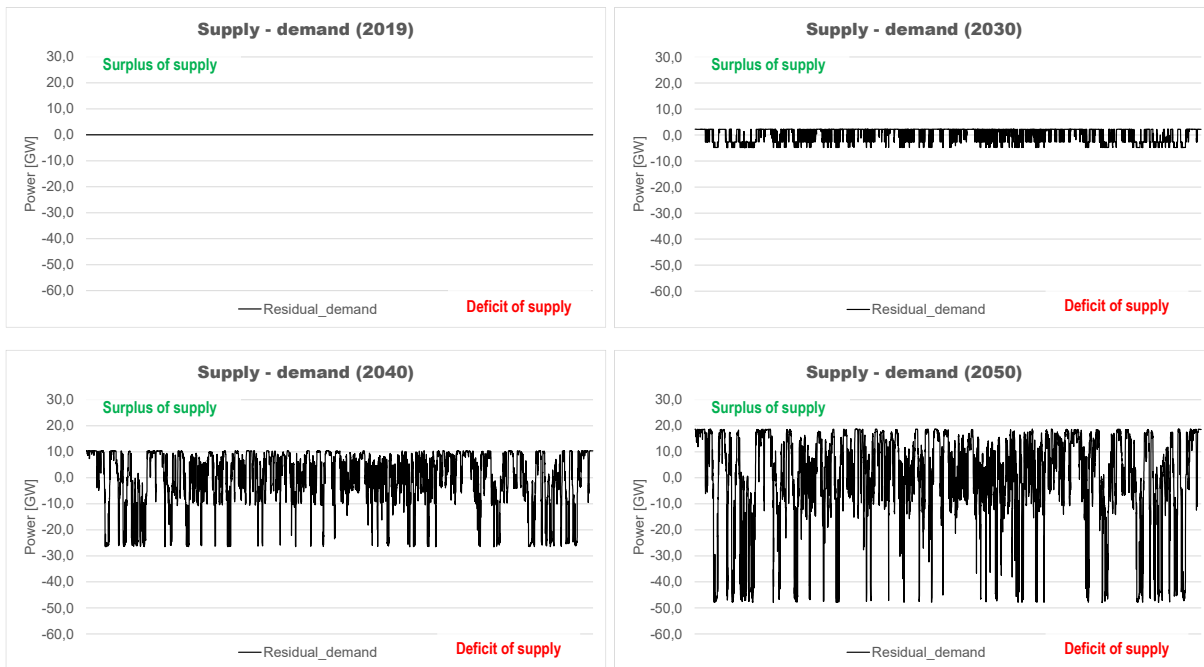
De I13050-scenario's gaan in verschillende mate uit van een groei van vraag en aanbod van waterstof. Wanneer welk type waterstof beschikbaar is, hangt samen met het aanbod van duurzame opwek en de vraag naar elektriciteit en de geldende wet- en regelgeving over bijvoorbeeld het percentage groene waterstof dat een verbruiker moet inzetten in het productieproces in een gegeven jaar. Als zodanig volgt het (variabel) aanbod van waterstof een ander profiel dan de vraag. Daar komt bij dat de waterstofvraag richting 2050 in toenemende mate temperatuurafhankelijk wordt. Bovendien levert het waterstofsysteem via centrales en elektrolyzers ook flexibiliteit aan het elektriciteitssysteem. Door al deze factoren ontstaat een behoefte aan flexibiliteitsmiddelen in waterstof en methaan.

De behoefte aan methaan is er onder andere vanwege het sterke seizoenspatroon in de vraag en de inzet van gascentrales als back-up voor variabele zon en wind. Omdat de vraag naar methaan in alle scenario's afneemt, zal ook de behoefte aan flexmiddelen hiervoor kleiner worden ten opzichte van nu. Toch zal er ook in 2050 nog flexibiliteitsbehoefte voor methaan zijn. Methaan blijft een rol spelen in de verwarming (onder andere via hybride warmtepompen) en daarom zal een bepaalde mate van seizoensvariatie blijven bestaan. Dat terwijl het aanbod van (groen) gas een vrijwel vlak jaarprofiel kent.

Net als voor de flexibiliteitsanalyse van elektriciteit maken we gebruik van historische weerdata om dit in kaart te brengen. Hierbij worden de data van het gekozen jaar toegepast op het opgestelde vermogen aan duurzame opwek, het vermogen aan elektrolyzers en de vraag voor het jaar dat we analyseren.

Figuur 34, Figuur 35, Figuur 36 en Figuur 37 tonen de ontwikkeling van de onbalans van methaan en waterstof. De grafieken laten de uiteenlopende vraag en aanbod zien in het referentiejaar 2019 en de verschillende toekomstige steekjaren 2030, 2040 en 2050, in dit geval voor het scenario Nationaal Leiderschap. Richting 2050

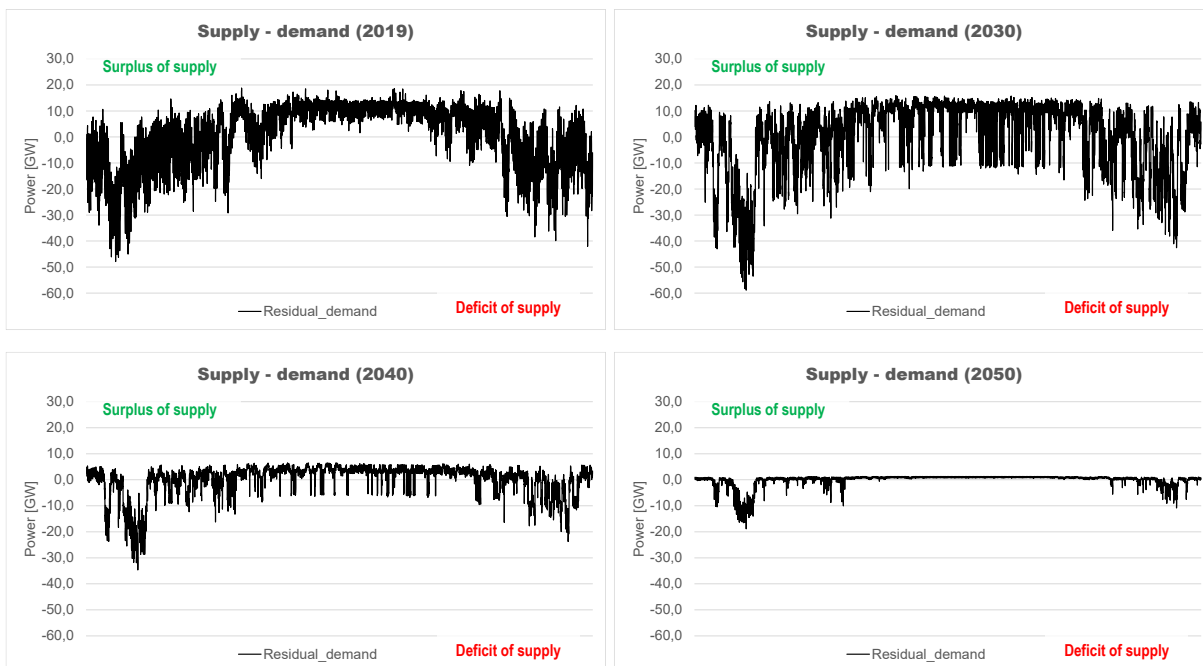
nemen de extremen zichtbaar toe en dus ook de noodzaak voor balancering c.q. flexmiddelen. Fase 2 van I13050 onderzoekt flexibiliteit in meer detail en het eindrapport van I13050 toont de definitieve onbalans voor elk van de vier 2050 scenario's.



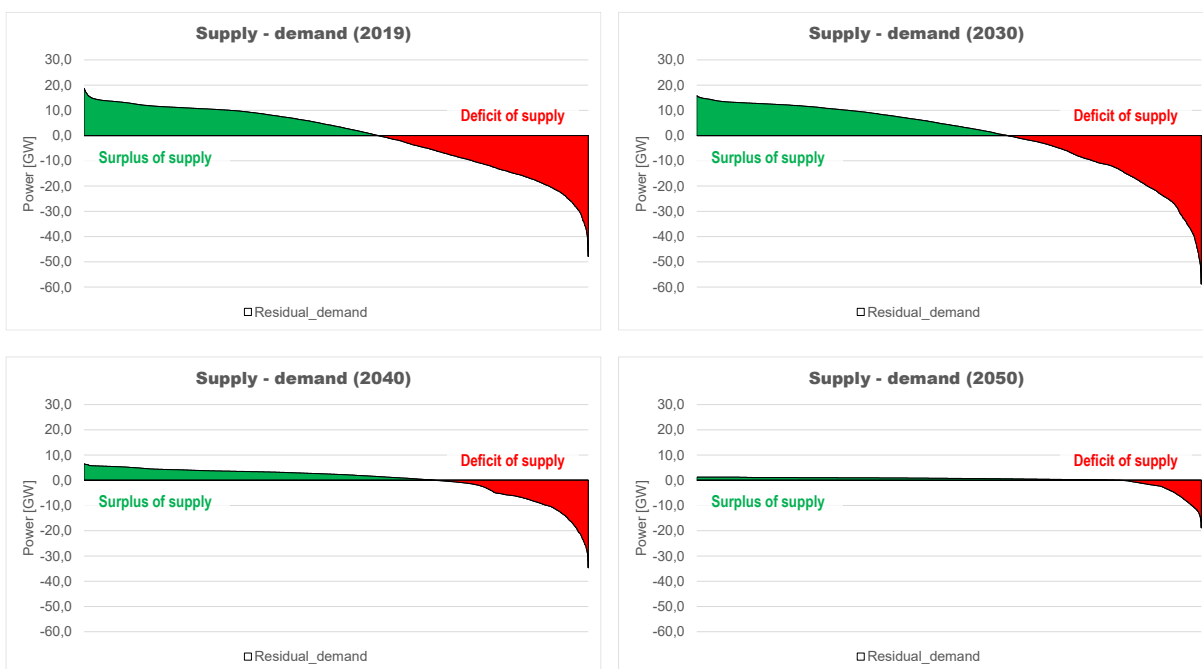
Figuur 34. Ontwikkeling onbalans tussen vraag en aanbod waterstof tot 2050.



Figuur 35. Ontwikkeling behoefte aan flexibiliteit waterstof tot 2050.



Figuur 36. Ontwikkeling onbalans tussen vraag en aanbod methaan tot 2050.



Figuur 37. Ontwikkeling behoefte aan flexibiliteit methaan tot 2050.

4.5.2.2 Overzicht en invulling flexibiliteitsmiddelen

In de scenario's nemen we de volgende flexibiliteitsmiddelen mee om onbalans in vraag en aanbod van waterstof en methaan in de tijd bij elkaar te brengen. Voor het balanceren van de vraag zijn twee voornamelijk opties. Ten eerste kan waterstof (en methaan), aangezien het een gasvormige energiedrager is, goed opgeslagen worden.

Daarnaast is het mogelijk om de vraag tijdelijk te reduceren door industriële vraagrespons of hybride warmtepompen in de gebouwde omgeving. We lichten beide opties nader toe.

1. Opslag

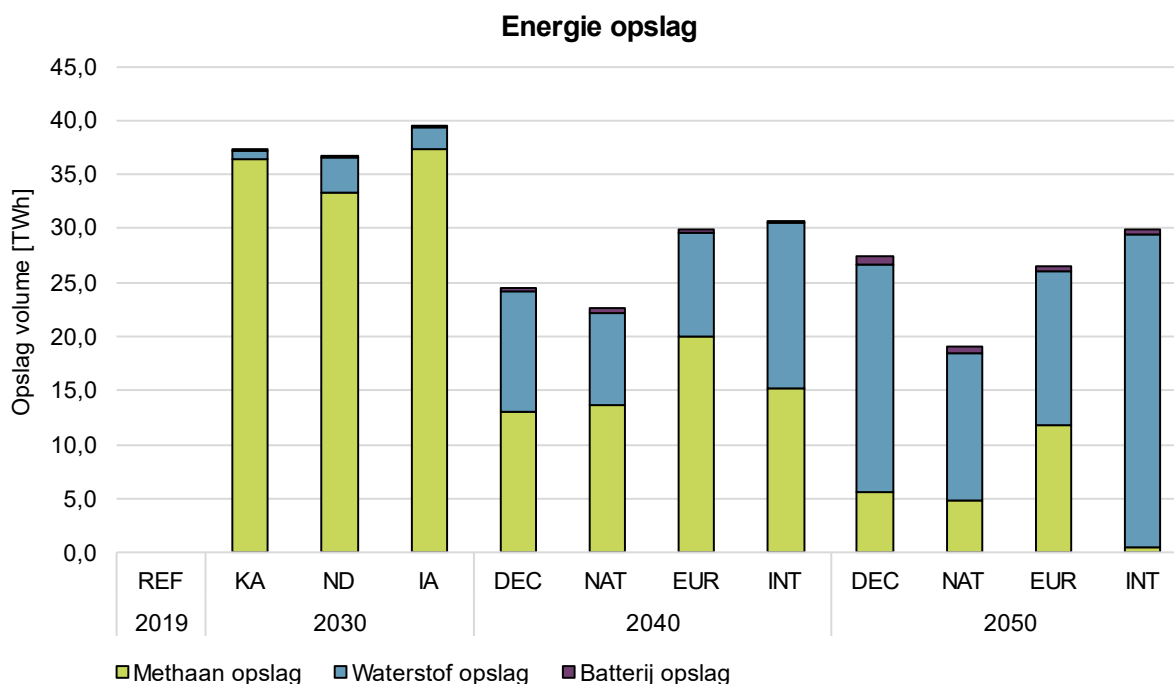
Waterstof kan op verschillende manieren opgeslagen worden. Op relatief korte termijn (al voor 2030) is de opslag van waterstof voorzien in zoutcavernes. Opslag van waterstof in oude gasvelden (op land, maar voornamelijk onder de Noordzee) is misschien mogelijk in de periode 2035-2040, maar moet nog nader worden onderzocht. De capaciteit die beschikbaar komt op het moment dat waterstof in oude gasvelden wordt opgeslagen, is ten opzichte van opslag in zoutcavernes. Naast deze twee vormen van grootschalige opslag is het ook mogelijk om waterstof lokaal (bijvoorbeeld bij tankstations, in importfaciliteiten³⁹ of als back-up bij eindverbruikers) op te slaan. De te realiseren volumes zijn hierbij echter zeer beperkt ten opzichte van het totaal.

De omvang aan waterstofopslag in termen van werkgasvolume varieert in 2050 tussen de 14 TWh in het scenario Nationaal Leiderschap en 29 TWh in het scenario Internationale Handel. Dit is een factor 20-60 meer dan het opslagvolume van batterijen. Deze behoefte aan opslag wordt voor een belangrijk deel gedreven door behoefte aan (langdurige) flexibiliteit in het elektriciteits- en warmtesysteem. Om overschotten van hernieuwbare elektriciteit nuttig te gebruiken, wordt (naast andere flexmiddelen) power-to-gas ingezet. Deze volatiele productie van groene waterstof zorgt er op sommige momenten voor dat het aanbod van waterstof de vraag overstijgt. Het surplus wordt opgeslagen voor gebruik op een later moment. Om tekorten van elektriciteit op te vangen, wordt onder andere gas-to-power ingezet. Dit zorgt voor grote vraagpieken in het waterstofsysteem, voor periodes van soms dagen of weken. Hiervoor moet voldoende volume aan waterstof achter de hand gehouden worden. Naar verwachting is meer dan de helft van het waterstofopslagvolume nodig voor deze periodes van tekorten in het elektriciteitssysteem. Voor warmtenetten geldt dat op koude momenten back-upketels op waterstof (of methaan) bijspringen om aan de warmtevraag te kunnen voldoen. Ook hiervoor moet voldoende waterstof op afroep beschikbaar zijn in de bergingen.

Het opslagvolume van 14-29 TWh komt neer op 60 tot 120 waterstofcavernes. Dit is gelijk aan ongeveer 30-60% van het werkgasvolume in de bestaande (seizoens)bergingen voor aardgas (Bergermeer, Norg, Grijskerk en Alkmaar). Voor methaan ligt de opslagbehoefte in 2050 tussen de 1 TWh in het scenario Internationale Handel en 12 TWh in het scenario Europese Integratie (zie ook Figuur 38 die de opslagvolumes in de verschillende scenario's toont). Deze getallen zijn berekend op basis van een normaal weerjaar. In een kouder weerjaar zal de opslagbehoefte hoger liggen. Dit wordt nader onderzocht in de vervolgfase van II3050.

Naast gasopslag voor het opvangen van onbalans binnen het jaar ontstaat er richting 2050 ook behoefte aan strategische opslag van energie. Bijvoorbeeld ter compensatie van importafhankelijkheid of van (op elkaar volgende) misoogsten van hernieuwbare energie. De behoefte aan strategische opslag wordt in het vervolg van de II3050-studie nog verder geanalyseerd.

³⁹ Geïmporteerde waterstof kan een rol spelen in de balancering van het waterstofnet doordat het tekorten aan 'eigen' groene en/of blauwe productie ten aanzien van de vraag kan opvangen. De reden hiervoor is dat een (vol) schip of importterminal ook dient als een opslaglocatie en waterstof kan en waarschijnlijk zal leveren op momenten van schaarste. Dan is namelijk de prijs het hoogst. In de analyse is de rol van import van waterstof niet afzonderlijk gemodelleerd en onderdeel van het totale opslagvolume.



Figuur 38. Opslagvolume van verschillende types opslag om waterstofsysteem in balans te houden.

2. Vraagrespons

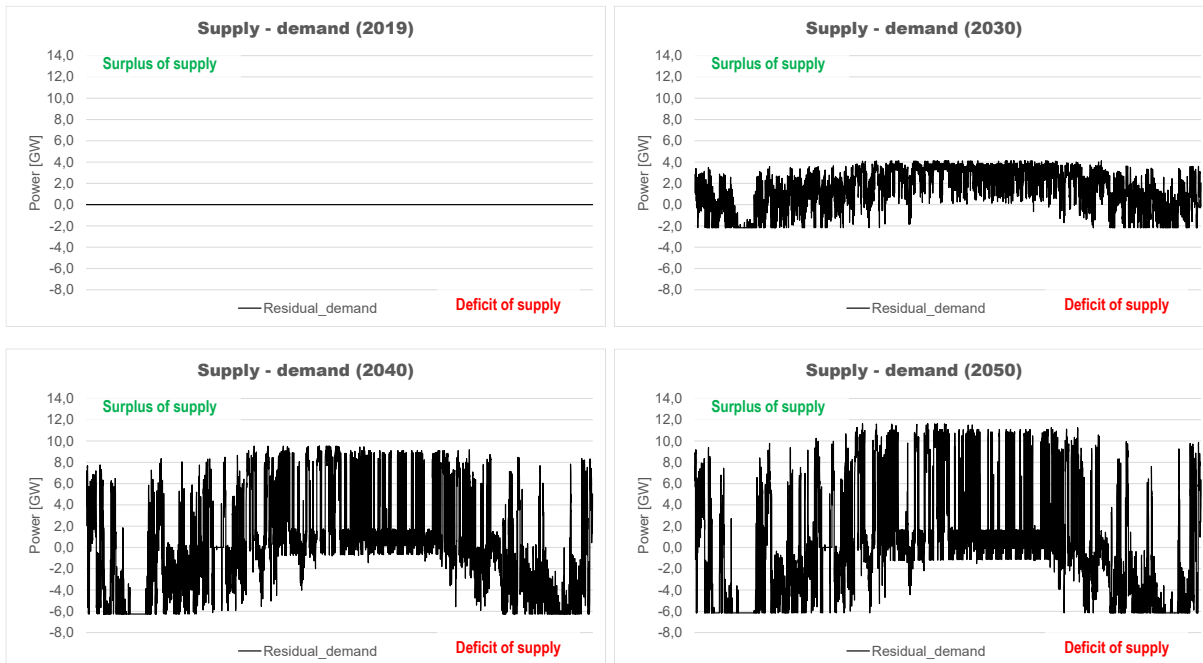
De industrie kan gecontracteerd worden om bij vraagpieken af te schakelen, door middel van marktwerking of met een contract. Deze manier van flexibiliteit staat bekend als vraagrespons ('demand side response', DSR). In de basis wordt deze vorm van flexibiliteit gedreven door de ontwikkeling van de elektriciteitsprijs. Bij een lage prijs zal de industrie overschakelen van gas naar elektriciteit en vice versa bij een hoge prijs. Hiermee kan het gassysteem (methaan en waterstof) via hybride toepassingen flexibiliteit leveren aan het elektriciteitssysteem. De verwachting is dat door een transitie van industriële processen, waarbij rekening gehouden wordt met volatielere beschikbaarheid van energie, vraagrespons een relatief betaalbaar flexibiliteitsmiddel wordt in 2050. De vraagrespons van de industrie is berekend aan de hand van inzet elektriciteit (zie 4.4.1). In de praktijk zal vraagrespons niet alleen optreden bij direct elektriciteitsgebruik, maar ook bij indirect gebruik zoals groene waterstof. Daarnaast ontwikkelt zich via hybride warmtepompen ook vraagsturing in de gebouwde omgeving. Deze is in de modellering niet afhankelijk van energieprijzen maar van de buitentemperatuur. Bij lage temperaturen schakelt de hybride warmtepomp over van elektriciteit naar gas, waarmee piekvragen op het elektriciteitsnet worden beperkt.

4.5.3 Warmte

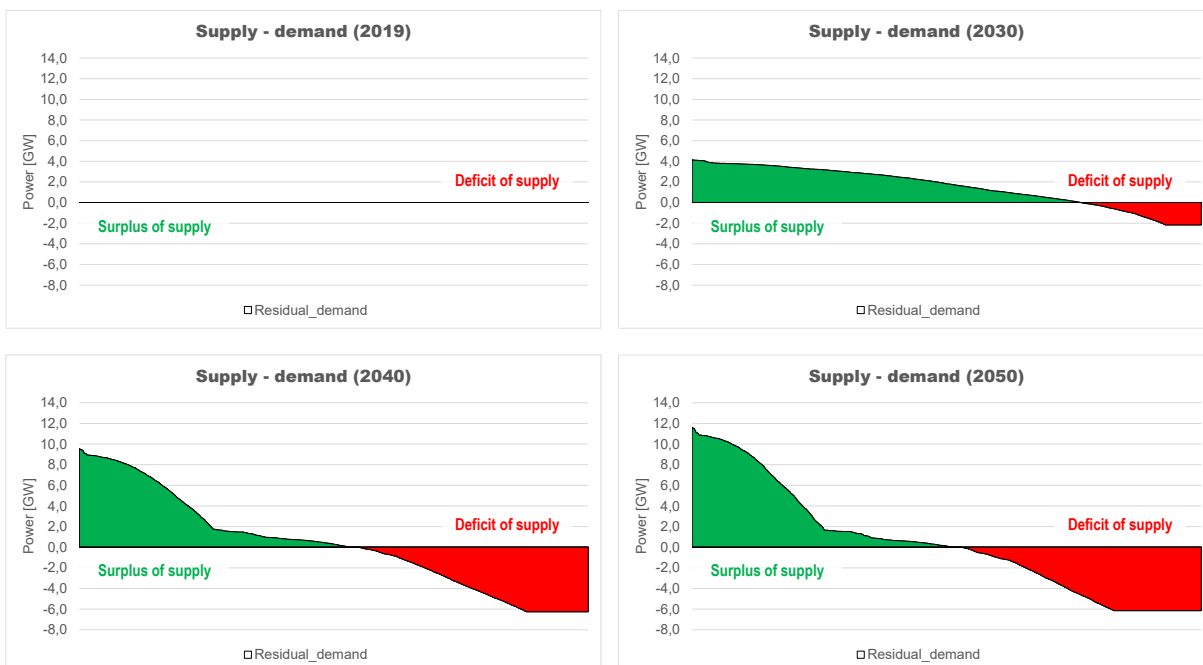
4.5.3.1 Behoeftte aan flexibiliteit

De vraag naar warmte door middel van warmtenetten neemt in de loop van de tijd toe. Daarbij kan de vraag naar warmte binnen een dag, week of maand aanzienlijk fluctueren, terwijl het aanbod van warmte min of meer stabiel is. Om het verschil tussen vraag en aanbod te overbruggen, worden warmtebuffers ingezet. Deze warmtebuffers leveren tevens een bijdrage aan de invulling van het seizoenspatroon in de warmtevraag: gedurende de zomermaanden worden warmtebuffers gevuld en in de koude maanden worden ze gebruikt en 'lopen ze leeg'. Daarmee vormen de warmtebuffers een aanvulling op de inzet van andere flexibele warmtebronnen. Warmtebuffers kunnen in geval van dreigende tekorten aangevuld worden door conversie van elektronen en moleculen. Meer dan elektronen en moleculen is de behoefte aan flexibiliteit voor warmte zeer gevoelig voor de temperaturen in het gekozen weerjaar. De impact van een kouder jaar wordt onderzocht in de volgende fase.

Figuur 39 en Figuur 40 tonen de flexibiliteitsbehoefte aan warmte gedurende het jaar. De grafieken laten de uiteenlopende vraag en aanbod zien in het referentiejaar 2019 en de verschillende toekomstige steekjaren 2030, 2040 en 2050, in dit geval voor het scenario Nationaal Leiderschap.



Figuur 39. Ontwikkeling aanbod warmte versus warmtevraag tot 2050.



Figuur 40. Ontwikkeling behoefte aan flexibiliteit warmte tot 2050.

4.5.3.2 Overzicht en invulling flexibiliteitsmiddelen

Voor het balanceren van de warmtevraag zijn er drie twee voornamelijk opties. Ten eerste kan een eventueel tekort aan warmte (volume en temperatuur) opgevangen worden door elektriciteit of gas in te zetten. Ten tweede kunnen warmtebuffers worden ingezet om warmte op verschillende tijdschalen te balanceren. Naast het direct opslaan van warm water in geïsoleerde tanks kan de warmte ook in de vorm van andere dragers zoals vloeibaar zout worden ontsloten. Met toenemende rol van warmtenetten wordt ook de ontwikkeling van warmteopslag belangrijker. Daarnaast is het mogelijk de vraag tijdelijk te reduceren door vraagrespons in de gebouwde omgeving. Die optie vraagt echter veel publiekscommunicatie en heeft geen invloed op de aanbodkant. In deze studie is deze optie niet meegenomen, het is vooral een crisismaatregel.

1. Power-to-heat

In de scenario's wordt ervan uitgegaan dat flexibele power-to-heat installaties in tijden van elektrische overschottenproductie uit wind en zon, extra warmte kunnen leveren aan regionale warmtenetten. Dit heeft een flexibele bijdrage van 3 tot 17 TWh over het jaar. Bij inzet van deze flexibele power-to-heat zal de warmteproductie uit andere bronnen zoals gasketels teruggeschakeld worden en overschotten worden opgeslagen in warmteopslag. Het warmtesysteem beweegt op deze manier flexibel mee met fluctuaties in vraag en aanbod van het elektriciteitssysteem.

2. Gas-to-heat

Vergelijkbaar met power-to-heat kunnen gasgestookte back-upboilers tijdelijk tekorten in de warmtelevering opvangen. Afhankelijk van het scenario zijn back-upgasboilers voorzien door inzet van groen gas of waterstof. De rol van gas-to-heat is relatief beperkt in vergelijking met power-to-heat.

3. Warmteopslag

In alle scenario's vormen warmtebuffers een belangrijke middel om aanbod en vraag binnen de warmtenetten op een klimaatneutrale manier te balanceren. Afhankelijk van het scenario en de rol van warmtenetten verschilt de dimensionering van de warmteopslag.

4.6 Ontwikkeling uitstoot broeikasgassen

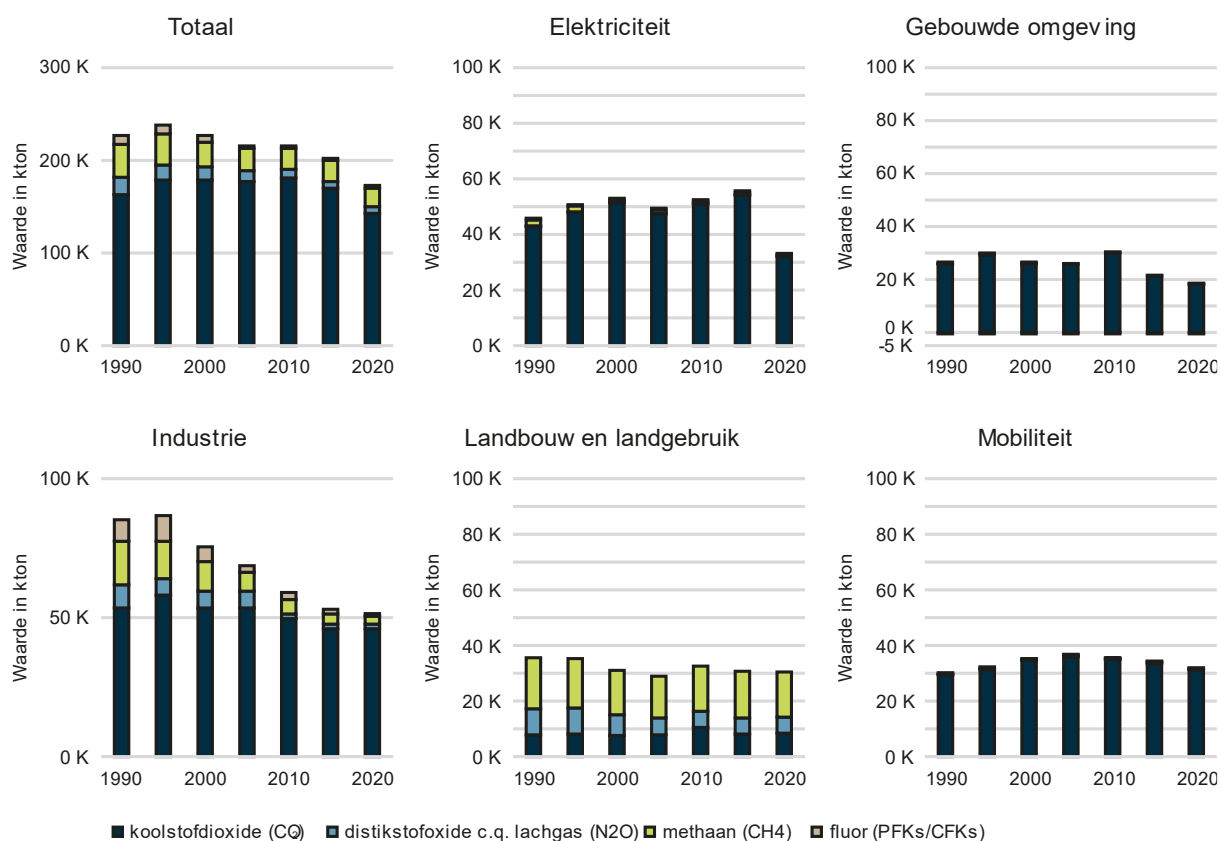
In deze paragraaf wordt ingegaan op de uitstoot van CO₂, de uitstoot van overige broeikasgassen en de verwachte ontwikkeling in uitstoot van broeikasgassen voor elk scenario en zichtjaar tot en met 2050. Ook wordt besproken of de klimaatdoelstellingen (zie paragraaf 1.2) worden gehaald.

4.6.1 Ontwikkeling uitstoot broeikasgassen 1990-2020

De ontwikkeling uitstoot broeikasgassen per sector sinds 1990 wordt weergegeven in Figuur 41.⁴⁰ Daaruit blijkt dat de uitstoot van broeikasgassen (koolstofdioxide, methaan, lachgas en fluoriden) in Nederland in de periode 1990-2020 met 25,5% is afgenomen (IPCC-methodiek). De reductie van koolstofdioxide bedroeg 15%; de reductie van de overige broeikasgassen was 55%. In deze cijfers is uitstoot van internationale lucht- en scheepvaart en biomassa niet meegenomen. Deze sectoren vallen buiten de scope van de Klimaatwet en afspraken die tussen landen gemaakt zijn tijdens de COP15 in Parijs. Ook is de uitstoot van landgebruik niet meegenomen in deze cijfers. In 2020 was de categorie LULUCF⁴¹ geen onderdeel van de IPCC-afspraken c.q. accountingmethodiek.

⁴⁰ Bron: Regionale CO₂-Routekaart, analyse Berenschot op basis van RIVM Emissieregistratie data Lucht (2022).

⁴¹ LULUCF staat voor: Landgebruik, verandering in landgebruik en bosbouw. Volgens de WUR is LULUCF de enige sector waarbij netto verwijderingen van CO₂ uit de atmosfeer mogelijk zijn door vastlegging van koolstof in biomassa en bodem



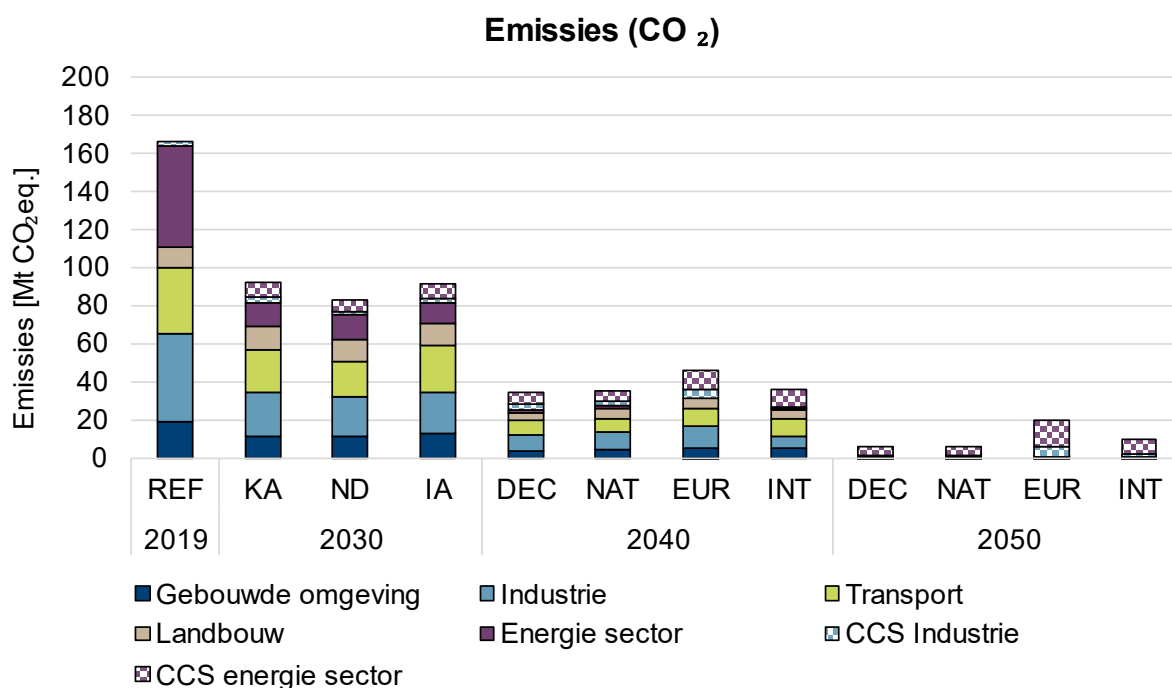
Figuur 41. Ontwikkeling uitstoot broeikasgassen in Nederland. De verticale as van de totaalfiguur (linksboven) en de andere vijf sectorale figuren wijken af van elkaar. De sectorale figuren hebben dezelfde verticale as.

4.6.2 Prognose ontwikkeling uitstoot CO₂-emissies

Figuur 42 geeft de CO₂-uitstoot van de verschillende scenario's voor elk tijdvak weer. De CO₂-uitstoot in 2019 bedraagt 164 Mton en loopt over de jaren heen terug naar *netto* nagenoeg 0 Mton in 2050.

Bruto varieert de CO₂-uitstoot in 2050 in de scenario's tussen de 5 en 20 Mton. Het verschil tussen de *bruto*- en *netto*-uitstoot ontstaat door de afvang van CO₂ door middel van CCS. Deze technologie wordt toegepast om de uitstoot van energiecentrales en industriële processen naar nul te brengen en de inzet ervan neemt richting 2050 toe, met name in het scenario Europese Integratie. De *bruto*-uitstoot wordt in de figuur weergegeven met schuingestreepte blokken.

De figuur toont dat er niet alleen een forse reductie in uitstoot in de periode 2019-2030 verwacht wordt, maar dat ook na 2030 nog veel reductie in uitstoot moet plaatsvinden om de 2050-doelen te halen.



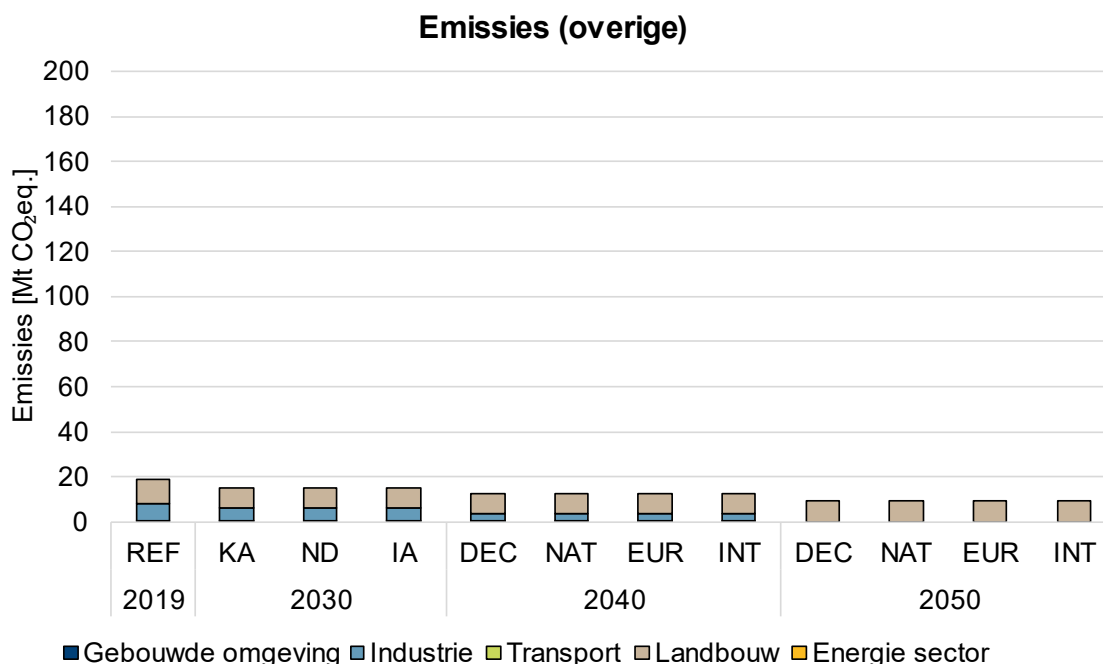
Figuur 42. CO₂-emissies per sector. De CCS van de energie sector is inclusief afvang voor productie van blauwe waterstof die gebruikt wordt om elektriciteit mee op te wekken. CCS wordt ook toegepast op afvalcentrales, afvalcentrales worden in het ETM toegerekend aan de energie sector.

4.6.3 Prognose ontwikkeling uitstoot overige broeikasgassen

Ook de uitstoot van overige broeikasgassen (lachgas, methaan en fluoriden) daalt richting 2050 sterk. Overige broeikasgassen worden voornamelijk uitgestoten door de sector landbouw en landgebruik. Het grootste deel van die emissies vandaag de dag betreft procesemissies (ongeveer 22 Mton CO₂-eq in 2021). Deze zijn hoofdzakelijk afkomstig van de veestapel (ongeveer 15 Mton CO₂-eq), maar ook uit bemesting (2 Mton CO₂-eq) en bodemprocessen (5 Mton CO₂-eq), vooral van het veenweidegebied.

Voor 2050 gaan we uit van een volledige reductie van overige broeikasgassen in de industrie, gebouwde omgeving en transportsector. De uitstoot van de sector landbouw en landgebruik (methaan en lachgas) neemt de komende decennia af door een aantal ontwikkelingen (zie paragraaf 5.4.2). De combinatie van deze ontwikkelingen voor de diverse emissiebronnen leidt tot een verwachting aan restemissies van 9 Mton CO₂-eq voor de sector landbouw en landgebruik. De onzekerheid rond dit getal is echter groot, zowel qua beleid, technische maatregelen als ontwikkelingen in de rest van de sector. De komende periode wordt ongetwijfeld beter zicht verkregen in de (mogelijkheden voor de) transitie in het landbouw- en voedselsysteem.

Onderstaande figuur toont de overige broeikasgasemissies vanaf 2019 tot en met 2050. De emissies van de landbouwsector bedragen 9 Mton CO₂-eq.



Figuur 43. Overige broeikasgassen per sector, som emissies binnen en buiten het energiesysteem. De sector 'Landbouw' omvat ook de uitstoot van de sector 'Landgebruik'.

4.6.4 Totaalbeeld ontwikkeling broeikasgassen 2030-2050

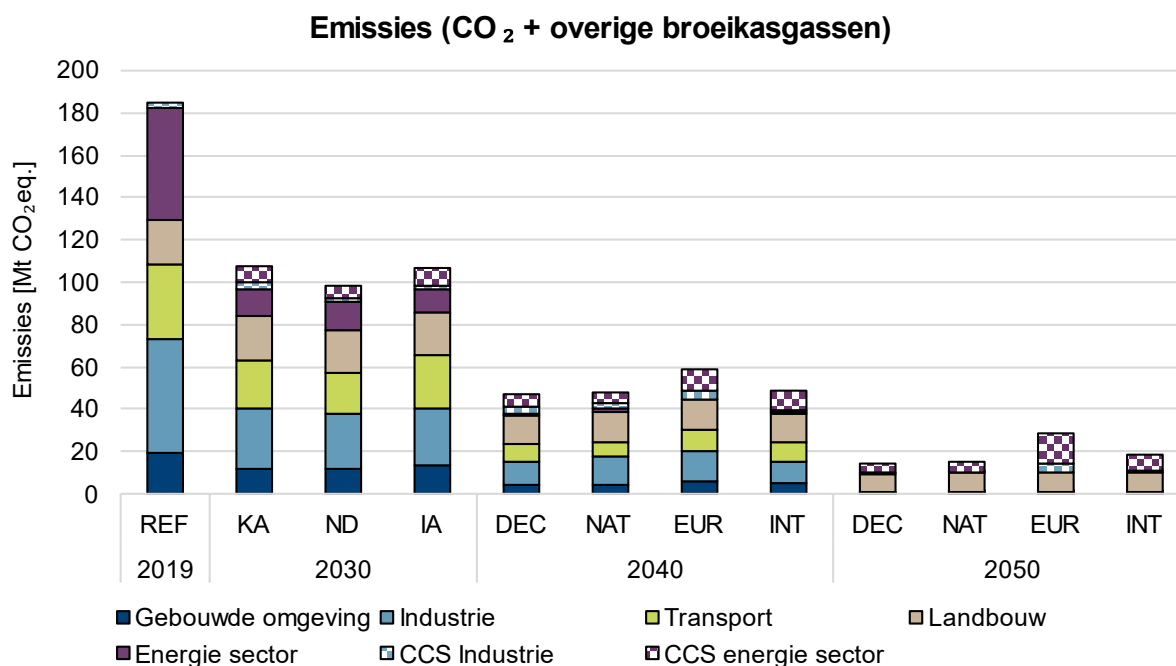
Figuur 44 toont alle broeikasgassen in CO₂-eq voor de verschillende scenario's. Daarbij zijn zowel de emissies van het energiesysteem (inclusief CCS/CCU verdisconteerd) als de emissies buiten het energiesysteem meegenomen. Zo ontstaat een volledig beeld c.q. inschatting van de restemissies in elk zichtjaar en scenario. Ten opzichte van 1990 wordt de volgende procentuele reductie gerealiseerd in de voor deze studie relevante zichtjaren:

- De 2030-scenario's bereiken een reductie van 58%-60%.
- De 2035-scenario's bereiken een reductie van 69%-74%.
- De 2040-scenario's bereiken een reductie van 81%-83%.
- De 2050-scenario's komen uit op een reductie van 95%-96%. De uitstoot in 2050 bestaat bijna volledig uit methaan- en lachgasuitstoot in de sector landbouw en landgebruik.

Op basis van de huidige vooruitzichten zijn er *netto* nagenoeg geen restemissies afkomstig uit het energiesysteem. Wel zijn er in 2050 nog restemissies afkomstig uit de sector landbouw en landgebruik. Om de doelen zoals vastgelegd in de Klimaatwet (vanwege recente aanscherping van 49% naar netto 55% in 2030 én van 95% naar klimaatneutraliteit in 2050) te halen dienen dus additionele maatregelen genomen te worden.

Het doel van een volledig CO₂-neutrale elektriciteitsproductie in 2050 wordt wel in elk scenario gehaald. De *bruto* CO₂-uitstoot van de energiesector in 2040 varieert tussen de 7 en 10 Mton; *netto* gaat het om 0 tot 2 Mton. Het 2050-doel van een CO₂-neutrale elektriciteitsproductie wordt in één van de vier scenario's gehaald in 2040. In dit

scenario (Europese Integratie) is de meeste inzet van CCS binnen de energiesector voorzien (afvang van 10 Mton CO₂).



Figuur 44. Totale uitstoot broeikasgassen per sector (CO₂ plus overige broeikasgassen). De sector ‘Landbouw’ omvat zowel de non-energetische restemissies in de landbouw als uitstoot van de sector ‘Landgebruik’.

4.7 CO₂-balans

In de verschillende scenario's wordt verschillend naar CO₂-afvang en -opslag gekeken. In deze paragraaf wordt de opvatting en het doeleinde van CCS en/of CCU per scenario toegelicht. De afsluitende kadertekst bevat een uitleg van de berekening van afgevangen en gebruikte CO₂.

In het scenario Decentrale Initiatieven wordt zo min mogelijk CCS toegepast. In dit scenario wordt CCS niet gezien als langdurig duurzame oplossing en daarom alleen toegepast als er geen andere mogelijkheid is. Enkele processen in de industrie blijven CO₂ uitstoten; deze worden in dit scenario wél voorzien van CCS. Een voorbeeld hiervan is de staalproductie, waarbij met de bekende technieken veel CO₂ vrijkomt. Deze wordt in het scenario afgevangen en opgeslagen. Voor de resterende uitstoot na CCS wordt de CO₂-uitstoot gecompenseerd door middel van CCS op groengas productie. In totaal gaat het om 5,6 Mton⁴² aan CO₂-afvang.

In het scenario Nationaal Leiderschap wordt alleen CCU toegepast. In dit scenario wordt CCS niet gezien als langdurig duurzame oplossing en daarom alleen toegepast als er geen andere mogelijkheid blijkt te zijn. Verschillende processen in de industrie blijven koolstof nodig hebben voor hun productieproces. De industrie legt de koolstof grotendeels vast in producten, brandstoffen en/of chemische verbindingen. Alle beschikbare CO₂ zou duurzaam moeten zijn maar is deels gerecycled fossiel. De beschikbare CO₂ komt in dit scenario ten goede aan de industrie. In totaal gaat het om 17,1 Mton aan koolstofgebruik.

⁴² De uitsplitsing van de verschillende categorieën in de koolstofbalans komt rechtstreeks uit het CTM. Deze onderverdeling kan afwijken van de weergave in het ETM, die iets minder gedetailleerd is.

In het scenario Europese Integratie is er veel ruimte voor CCS. CCS levert op korte termijn een kostenvoordeel ten opzichte van andere verduurzamingsstrategieën: het productie- en verwarmingsproces hoeft namelijk niet veranderd te worden. Dit houdt in dat veel bestaande (en nog niet afgeschreven) infrastructuur gebruikt kan blijven worden, de energiedragers blijven namelijk hetzelfde. Wel moet een CO₂-netwerk ontstaan om alle afgevangen CO₂ te transporteren en uiteindelijk op te slaan. In dit scenario wordt ook CO₂ gebruikt voor de productie van synthetische producten en brandstoffen. In totaal gaat het om 43,7 Mton aan CO₂-afvang voor opslag en gebruik. Dit is inclusief zo'n 20 Mton CO₂ uit het buitenland, die wordt opgeslagen in Nederland.

In het scenario Internationale Handel wordt minder gebruik gemaakt van 'carbon capture' dan in het scenario Europese Integratie. Door de intensivering van internationale handel zijn er meer duurzame energiedragers beschikbaar en is de noodzaak voor CCU/CCS lager. Een deel van de verwarmingsprocessen in de industrie gebruikt nog wel CCS. Dit gebeurt voornamelijk bij processen met een geconcentreerde CO₂-stroom. De resterende CO₂-uitstoot na CCS wordt gecompenseerd door middel van CCS op groengas productie. In totaal gaat het om 20,4 Mton aan CO₂-afvang voor opslag en gebruik. Ongeveer de helft hiervan betreft opslag van CO₂ uit het buitenland.

Tabel 5. Toelichting berekening CCS en CCU.

CCS

Voor de doorrekening van afgevangen CO₂ hanteren we de volgende aannames voor CCS: 98% bij ATR's met CCS en 50-100% bij AVI's (scenario-afhankelijk). Bij de grote industrie zijn hun aannames qua CCS-percentages uitgevraagd en per bedrijf doorgerekend. In het scenario Europese Integratie wordt ook centraal additioneel waterstof geproduceerd door middel van SMRs; hiervan is de veronderstelling dat twee derde van de emissies afgevangen wordt. Als de meeste CO₂ wordt opgeslagen, zijn er locaties nodig waar dit mogelijk is. Volgens de berekening van TNO is er een capaciteit van 1.700 Mton opslag op zee.⁴³ Hierdoor is het mogelijk te berekenen hoe lang deze opslagplaatsen volstaan als alle afgevangen CO₂ wordt opgeslagen. In het scenario met de meeste CCS, Europese Integratie, betekent dit dat de opslaggebieden tot ongeveer vijftig jaar kunnen voorzien in de opslag van CO₂. Daarnaast kunnen er ook mogelijkheden voor opslag in het buitenland worden ontwikkeld (bijvoorbeeld in Noorwegen).

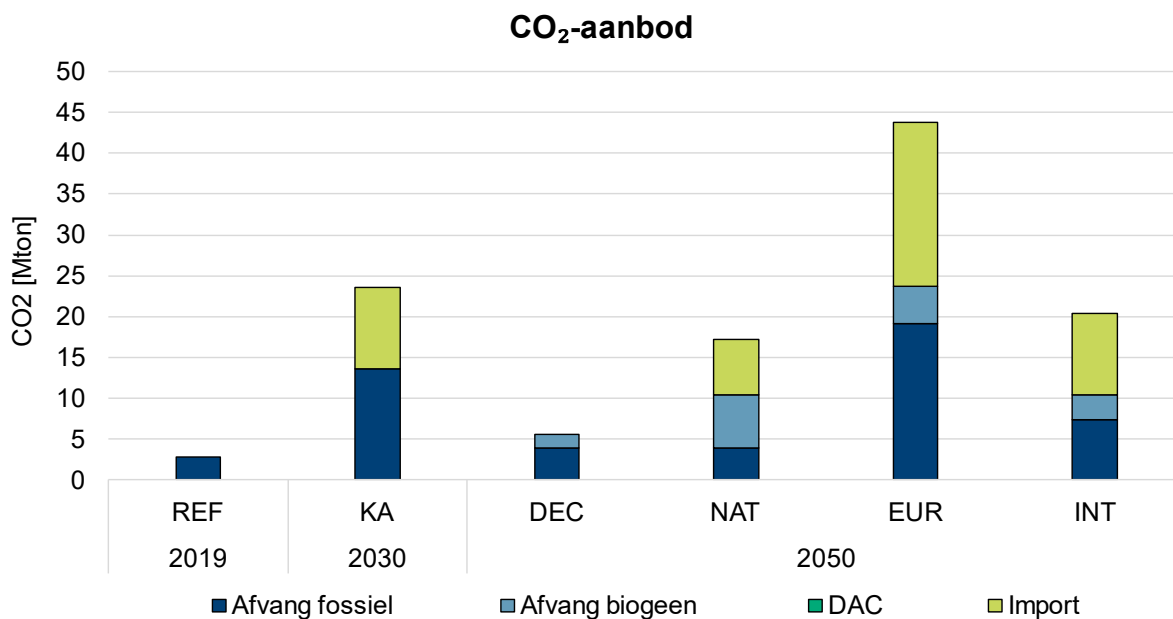
CCU

Op verschillende plekken in het energiesysteem kan afgevangen CO₂ ook gebruikt worden. Een grote gebruiker van CO₂ is nu de glastuinbouw, die CO₂ inzet om gewassen sneller te laten groeien. Deze CO₂ wordt echter maar deels opgenomen en dus alsnog voor een groot deel uitgestoten (huidig voordeel zit in verlaging van het energieverbruik van de glastuinbouwsector). Aangezien de glastuinbouw de komende decennia gaat elektrificeren en overstapt op geothermie, is er minder 'eigen' CO₂ beschikbaar. Hier zou de afgevangen CO₂ gebruikt kunnen worden. Aangezien de CO₂ in deze sector uiteindelijk echter toch uitgestoten wordt, moeten elders in Nederland negatieve emissies behaald worden. Een andere optie is om afgevangen CO₂ uit groen gas of biomassa te gebruiken.

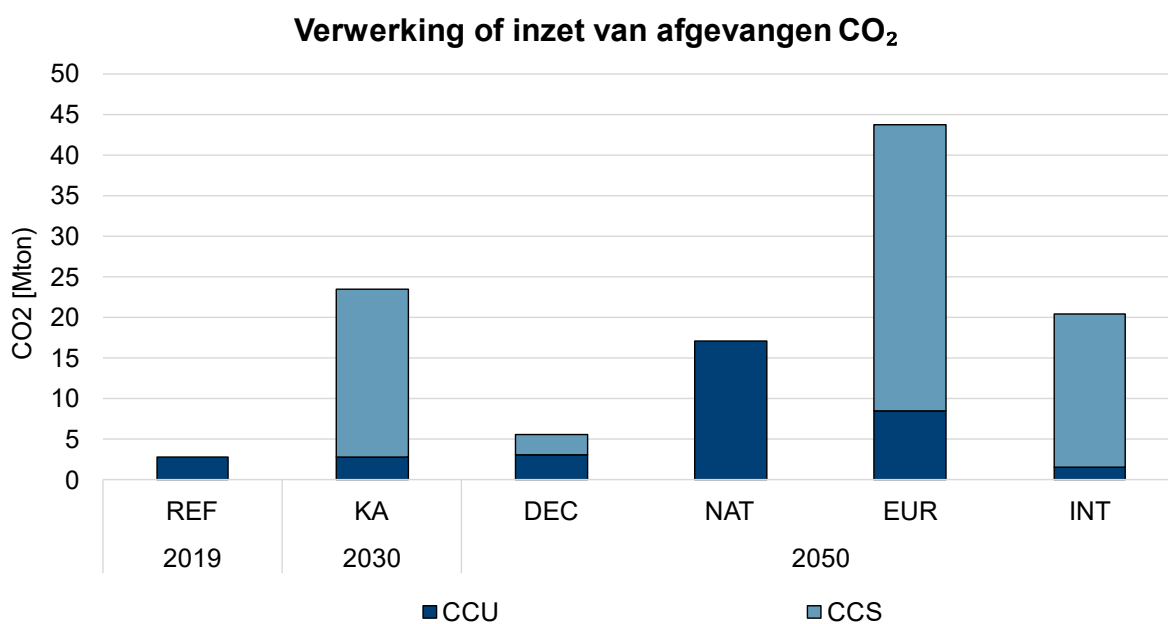
In de scenario's waar veel circulair gewerkt wordt, kan CO₂ een rol spelen met het aanvullen van koolstofatomen door het verlies van recycling. Daarnaast is er in de toekomst vraag naar koolstofatomen voor de e-refinery. Deze industrie produceert duurzame grond- en brandstoffen (synfuels) en heeft hiervoor koolstofatomen nodig.

In de scenario's Decentrale Initiatieven en Nationaal Leiderschap (en wellicht ook in Europese Integratie) is het volume van afvang bij fossiele brandstoffen iets groter dan het volume CCS (zie figuren hierboven). Dit betekent dat mogelijk een deel van de CCU op basis van fossiele CO₂ plaatsvindt en uiteindelijk alsnog in de atmosfeer terecht kan komen (snel via synthetische brandstoffen, later via materialen). Als koolstofatomen niet uit een duurzame bron afkomstig zijn, is er mogelijk additionele compensatie elders nodig.

⁴³ Van Gessel et al., (2018). Ondergrondse opslag in Nederland. Technische verkenning. TNO.



Figuur 45 - CO₂ balans (aanbod aan koolstof). DAC wordt in de basis scenario's van I13050 niet ingezet.



Figuur 46 – CO₂ balans (vraag naar CCU en behoefte aan CCS).

5. Sectorale invulling

In dit hoofdstuk worden de voornaamste keuzes voor de sectorale invulling uiteengezet. Voor elke sector wordt ingegaan op de verwachte ontwikkeling van belangrijke randvoorwaarden tot en met 2050, de voornaamste verschillen tussen de scenario's en de toelichting daarop plus het resultaat (finale vraag, opgestelde vermogen of het aanbod) in TWh.

- 5.1, de gebouwde omgeving: bij het schetsen van de vraagontwikkeling is een splitsing gemaakt tussen huishoudens en gebouwen.
- 5.2, mobiliteit: bij het schetsen van de vraagontwikkeling is een splitsing gemaakt tussen personenvervoer, vrachtvervoer en internationaal transport.
- 5.3, industrie: na een toelichting op de methodiek en de totstandkoming van de scenario's voor de industrie volgen de resultaten per industriesector.
- 5.4, de landbouwsector: in deze paragraaf is een splitsing gemaakt tussen de vraagontwikkeling van de glastuinbouw en de ontwikkeling emissies overige broeikasgassen.
- 5.5: capaciteit duurzame opwek.

5.1 Gebouwde omgeving

In deze paragraaf staat de energievraag van gebouwen in de gebouwde omgeving centraal. De vraag van elektrische auto's (ook al laden die bij het gebouw), komt aan bod in paragraaf 5.2. Het energieaanbod (lees: zon-pv op dak) vanuit de gebouwde omgeving behandelen we in paragraaf 5.5. Hierna gaan we in op de voornaamste inputparameters en resultaten, gevolgd door de verschillen in de scenario's voor respectievelijk huishoudens en gebouwen.

Drie belangrijke veranderingen ten opzichte van eerste editie II3050:

1. Meer mensen, meer woningen.
2. Grotere elektrificatie van warmtevraag.
3. Minder grote rol warmtenetten.

Woningbouw en bevolkingsgroei

Richting 2050 groeit het aantal inwoners in Nederland van 17,2 miljoen tot 19,5 miljoen.⁴⁴ Deze groei leidt tot een voorspelde toename van het aantal huishoudens in Nederland van 7,9 miljoen naar 9,2 miljoen. De stijging van het aantal huishoudens wordt versterkt door een daling van het gemiddeld aantal inwoners per huishouden. Het oppervlak aan (utiliteits)gebouwen stijgt met 20% ten opzichte van 2019.

Warmte en koude

De energievraag van de gebouwde omgeving neemt af van 180 TWh in 2019 tot zo'n 110 tot 125 TWh in 2050. In de gebouwde omgeving wordt er vooral veel energie voor verwarming van huizen en gebouwen gebruikt. Voor elk scenario geldt een sterke toename in de elektriciteitsvraag. Deze neemt toe van 23,4 TWh in 2019 tot gemiddeld 35 TWh in 2050, gedreven door elektrificatie van de warmtevoorziening (zie Figuur 47). Deze elektrificatie komt terug in alle scenario's, de mate waarin en in welke mate dit ook ondersteund wordt door duurzame gassen, loopt echter uiteen. Daarnaast is in alle scenario's een rol voor directe warmtevoorziening in de gebouwde omgeving via warmtenetten.

⁴⁴ https://nidi.nl/nl/nieuws_events/bevolking-2050-in-beeld/

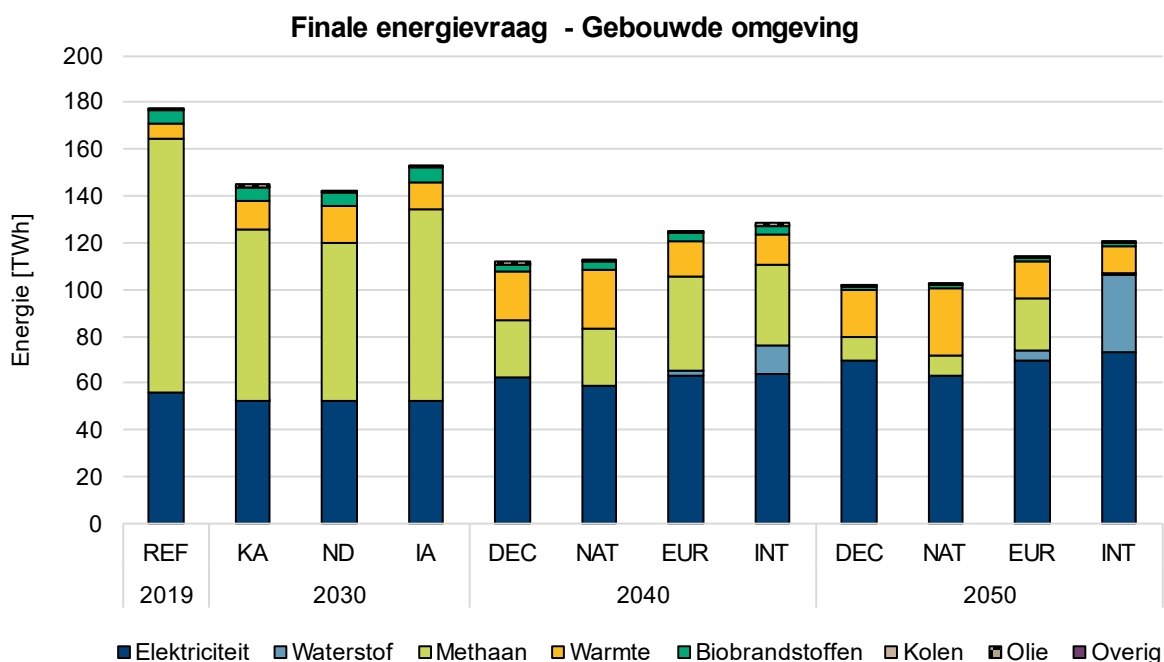
De gemiddelde temperatuur in Nederland ligt in 2050 hoger dan nu. Hierdoor neemt de vraag voor koeling van woningen tussen 2019 en 2050 met gemiddeld 2,5% per jaar toe. Ook in gebouwen neemt de koelvraag toe. Daar ligt de groei met 2% per jaar lager, omdat daar nu al meer gekoeld wordt. Warmtepompen en airconditioning systemen verzorgen het overgrote deel van deze koelvraag.

Apparaten en licht

Elektriciteit wordt in de gebouwde omgeving ook gebruikt voor apparaten en licht. Denk aan wasmachines, vaatwassers, televisies, computers, etc. In alle scenario's is de verwachting dat het aantal elektrische apparaten stijgt, maar dat deze wel snel veel efficiënter worden. Dit resulteert in een reductie van 10% van de energievraag uit apparaten in 2030 ten opzichte van 2019

Naar verwachting is 90% van de verlichting in de huishoudens LED en in de utiliteitsgebouwen zelfs 95%. Dit levert al tegen 2030 een besparing op van zo'n 9 TWh aan elektriciteitsvraag. In alle scenario's wordt aangenomen dat er volledig elektrisch gekookt wordt.

Daarnaast wordt ervan uitgegaan dat in utiliteitsgebouwen en huishoudens veel wordt gedaan om duurzamer met elektriciteit om te gaan en zo een gedragsverandering bewerkstelligd wordt. Hieronder vallen smarthome-technieken zoals bewegingssensoren, maar ook gedrag als kouder wassen, ramen sluiten als er verwarmd wordt en lichten uitdoen spelen een rol.



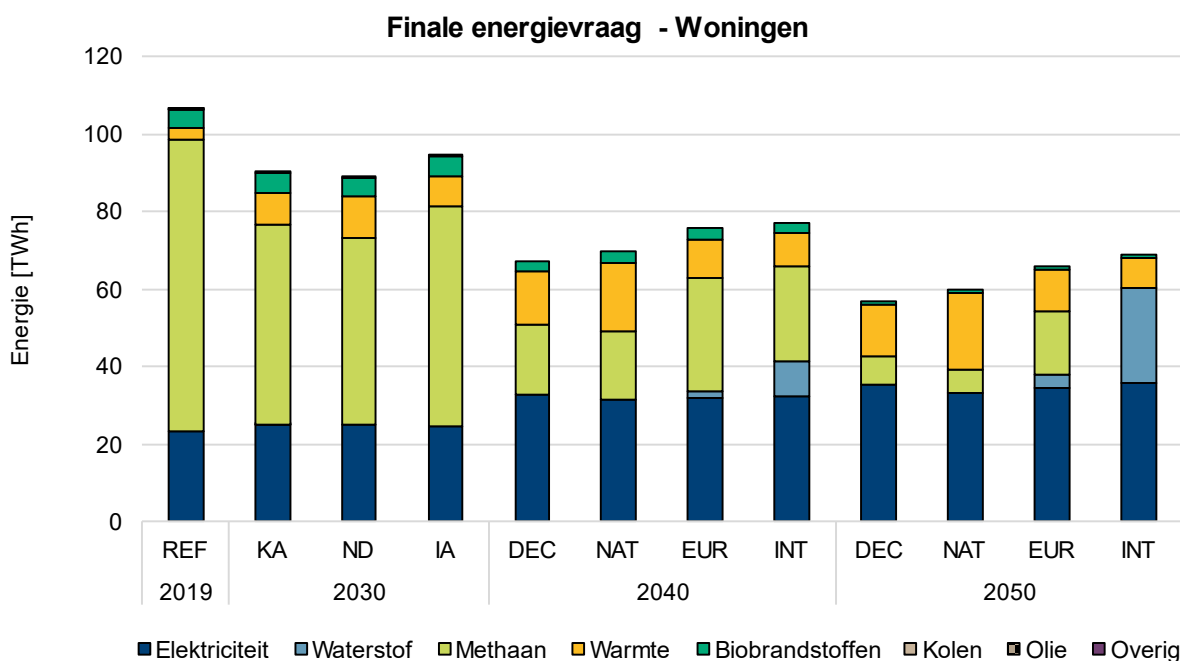
Figuur 47. Finale energievraag gebouwde omgeving, in TWh.

Hierna gaan we dieper in op de verschillende accenten van elk scenario voor huishoudens en gebouwen.

5.1.1 Huishoudens

Figuur 48 toont de warmtevraag van de huishoudens in de scenario's. Daaruit blijkt dat de finale warmtevraag in de scenario's Decentrale Initiatieven en Nationaal Leiderschap lager is dan in de andere scenario's. Dit komt doordat er in deze scenario's meer isolatie is toegepast. Deze hogere isolatiegraad hangt samen met het gebruik van meer volledig elektrische warmtepompen. In de scenario's Europese Integratie en Internationale Handel

worden juist meer hybride warmtepompen geïnstalleerd; woningen hoeven bij dit type verwarmingsbron minder geïsoleerd te worden. De totale warmtevraag is dan ook groter.



Figuur 48. Finale energievraag huishoudens, in TWh.

Decentrale Initiatieven

De focus van dit scenario is deels verlegd van warmtenetten naar kleinschalig all-electric. Deze aanpassing volgt de update van de verhaallijn die uitgaat van meer individuele oplossingen en acties door burgers tegenover een sterke trekkersrol van de overheid.

De rijksoverheid verplicht woningeigenaren hun woningen te verduurzamen. Gemeenten helpen hun burgers door duurzaamheidsleningen te verstrekken, zodat burgers op betaalbare wijze zelf woningaanpassingen kunnen doen. Burgers zijn zelf ook bovengemiddeld betrokken bij de energietransitie en bereid te investeren in verduurzaming van hun woning, bijvoorbeeld door middel van zeer goede isolatie en een bijpassende volledig elektrische warmtepomp, zonnepanelen en thuisbatterijen. Lokaal wordt gekozen voor de meest passende oplossing. Gemeenten stimuleren lokaal gewenste technieken, maar ook de markt laat ruimte om verschillende warmtetechnieken te kiezen, afhankelijk van de staat en locatie van de woning. Door de hoge bereidheid en stimulering wordt 50% van de woningen uitgerust met een all-electric warmtepomp. Warmtenetten worden op lokaal gunstige plekken aangelegd of uitgebreid; in 2050 is 20% van de woningen op een warmtenet aangesloten. Op de plekken waar all-electric warmtepompen of warmtenetten niet rendabel zijn (denk aan oudere vrijstaande gebouwen in het buitengebied), worden hybride warmtepompen geplaatst. Deze hybride warmtepompen worden gevoed met (lokaal geproduceerd) groen gas. Tenslotte wordt een aantal woningen verwarmd door middel van pelletkachels (biofuels in de grafiek hieronder). Dit betreffen niche-oplossingen. Woningeigenaren plaatsen ook zonnecollectoren, waarmee ze voor een groot deel in de energiebehoefte van het warmtapwater voorzien.

In combinatie met elektriciteitsopwekking en wijkbatterijen regelt de gemeente dat er voor het grootste gedeelte van het jaar voldoende elektriciteit beschikbaar is om de huizen te verwarmen.

Nationale Leiderschap

Een landelijk isolatieprogramma zorgt ervoor dat 50% van de woningen geschikt wordt voor all-electric warmtepompen.

Daarnaast kiest een aanzienlijk deel van het collectieve woningbezit in dit scenario voor het aanleggen van nieuwe warmtenetten samen met de publieke warmtebedrijven. Particuliere woningeigenaren sluiten hierbij aan. Warmtenetten zijn een effectieve alternatieve warmtebron, aangezien er bij een hogetemperatuurwarmtenet (HT) niet direct aanpassingen aan de woningen en bestaande verwarmingssystemen nodig zijn. De aanleg van warmtenetten schaalt op in de jaren na 2030 en uiteindelijk is 30% van de huishoudens aangesloten. Dankzij veel draagvlak bij burgers en woningbouwcorporaties is het mogelijk deze warmtenetten in korte tijd uit te rollen. Hiervoor worden ook al voor 2030 voorbereidingen getroffen, onder andere door wijken in de TVW aan te wijzen. Huizen worden vervolgens nageïsoleerd, zodat veel van de warmtenetten van hoge temperatuur naar middentemperatuur veranderen. Deze warmtenetten worden overwegend met geothermie gevoed (met een piek- en back-upvoorziening op basis van groen gas), aangezien deze warmte decentraal opgewekt kan worden. Gemeenten gaan door middel van het oprichten van gemeentelijke warmtebedrijven actief op zoek naar bronnen om warmte beschikbaar te kunnen stellen aan hun inwoners. Daarnaast realiseren gemeenten mogelijk met elkaar grootschaliger warmtenetten, zodat zij met minder geschikte bronnen ook genoeg warmte beschikbaar hebben.

Een klein deel (5%) van de woningen wordt niet geschikt geacht voor een andere warmtetechniek en blijft verwarmen met een HR-ketel. Deze wordt gevoed met groen gas. Tenslotte wordt een aantal woningen verwarmd door middel van pelletkachels (biofuels in de grafiek hieronder). Dit betreffen niche-oplossingen.

De helft van de woningen plaatst ook zonnecollectoren, waarmee ze voor een groot deel in de energiebehoefte voor hun warmtapwater voorzien.

Europese Integratie

Door verhoging van de gasprijs voor consumenten (dit wordt ondersteund door een verdere aanscherping van het ETS II voor gebouwen en wegtransport) worden alternatieven voor de huidige verwarming rendabel. Na 2030 is de CO₂-belasting van de Europese Unie het belangrijkste instrument geworden voor verduurzaming. Voor veel inwoners van Nederland is het lange tijd voordelig om met een hybride warmtepomp het gasverbruik dusdanig omlaag te brengen, dat dit nog niet opweegt tegen de extra investeringen in een all-electric warmtepomp of de aanleg van een warmtenet. De meeste hybride warmtepompen worden met groen gas gevoed, aangezien dit eenvoudig ingevoerd kan worden in het gasnet en er dus geen nieuwe infrastructuur voor hoeft te worden aangelegd. De rest van de hybride warmtepompen wordt gevoed met waterstof, die binnen Europa opgewekt kan worden. Voor nieuwe en goed geïsoleerde huizen (25% van de huizen) is de businesscase voor all-electric warmtepompen het meest gunstig.

De business case voor zonnecollectoren neemt toe en 40% van de woningen plaatst ook zonnecollectoren in combinatie met een hybride of all-electric warmtepomp. Hiermee zijn ze voor een groot deel in de energiebehoefte voor hun warmtapwater voorzien.

In dit scenario is 5% van de woningen economisch niet geschikt voor een andere warmtetechniek en blijft verwarmen met een HR-ketel. Deze wordt gevoed met groen gas. Tenslotte wordt een aantal woningen verwarmd door middel van pelletkachels (biofuels in de grafiek hieronder). Dit betreffen niche-oplossingen.

Internationale Handel

Internationaal gaan landen met goedkope stroom uit wind en zon zich toeleggen op de productie van waterstof. Waterstof neemt hierdoor steeds meer de plek in van aardgas. Om effectief gebruik te maken van deze waterstof, beslissen veel Nederlandse huishoudens om een hybride warmtepomp op waterstof aan te schaffen (50%).

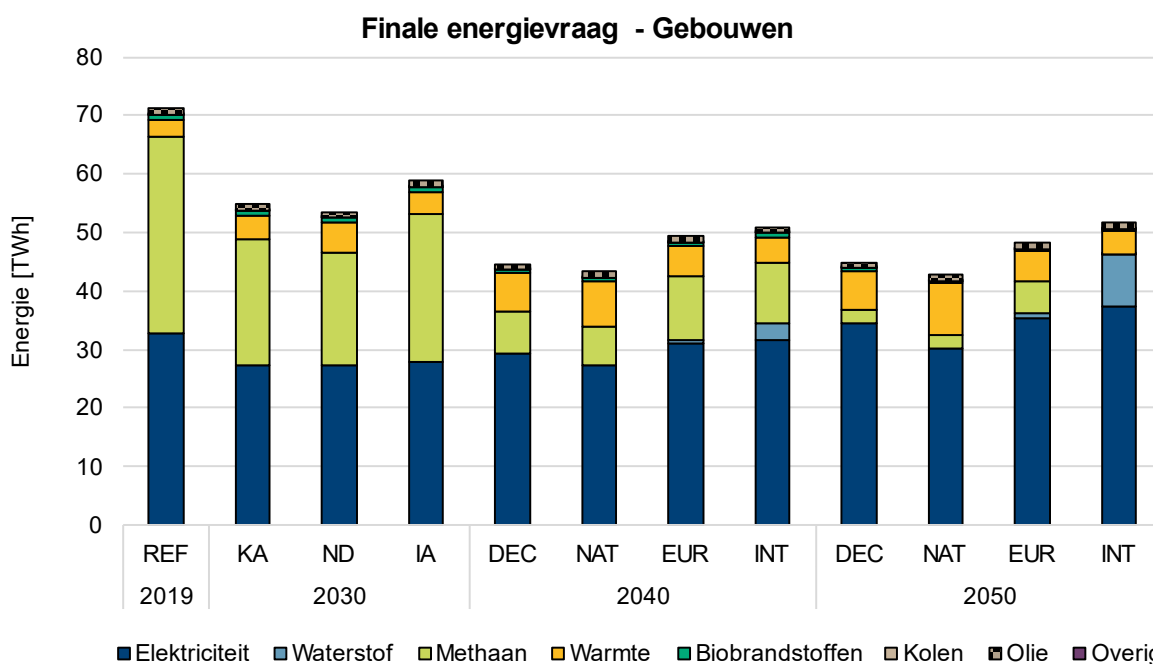
Alleen een deel van de nieuwbouw (met goede isolatie en vloerverwarming) maakt gebruik van een all-electric warmtepomp (25%). Warmtenetten blijven steken op het niveau dat in het Klimaatakkoord is bepaald. Dit komt in 2050 overeen met ongeveer 15% van het totaal aantal huishoudens.

Tien procent van de woningen is in dit scenario economisch niet geschikt voor een andere warmtetechniek en blijft verwarmen met een HR-ketel. Deze wordt gevoed met waterstof dat nu via het distributienet wordt geleverd. Tenslotte wordt een aantal woningen verwarmd door middel van pelletkachels (biofuels in de grafiek hieronder). Dit betreffen niche-oplossingen.

De business case voor zonnecollectoren neemt toe en 30% van de woningen plaatst ook zonnecollectoren in combinatie met een hybride of all-electric warmtepomp. Hiermee zijn ze voor een groot deel in de energiebehoefte voor hun warmtapwater voorzien.

5.1.2 Gebouwen (utiliteitsbouw)

De gebouwde omgeving bestaat naast woningen uit kantoren, scholen, ziekenhuizen maar ook theaters, bedrijfspanden en andere utiliteitsgebouwen. De energievraag van gebouwen neemt af van 72 TWh in 2019 naar gemiddeld 45 TWh in 2050. In alle scenario's neemt de rol van elektriciteit en warmte in het finale verbruik sterk toe. Gasvormige energiedragers blijven in alle scenario's een rol spelen in 2050, al is die rol in de scenario's Decentrale initiatieven en Nationaal leiderschap beperkt.



Figuur 49. Finale energievraag gebouwen, in TWh.

Decentrale Initiatieven

Gebouweigenaren, woningeigenaren, woningcorporaties, energieleveranciers en lokale overheden werken samen om op lokaal niveau tot passende warmteoplossingen te komen. Dit resulteert in een gevarieerde mix van warmtetechnieken, waarbij (lokale) warmtenetten 20% van de gebouwen voorzien van warmte, hybride

warmtepompen 25% en 5% in overige technieken. Door de hoge graad van na-isolatie en de hoge efficiëntie is voor de helft van de gebouwen een all-electric warmtepomp de meest economische keuze. De nationale overheid stuurt actief op een hoge mate van isolatie, waardoor all-electric in Nederland een groot marktaandeel krijgt.

Nationaal Leiderschap

De combinatie van huishoudens en gebouwen creëert een stabiele afname van warmte in een warmtenet, omdat er over het algemeen sprake is van een ongelijktijdig, dus aanvullend, verbruikspatroon. Gebouwen maken in dit scenario daarom ook vaak gebruik van warmtenetten. Uiteindelijk wordt in 2050 30% van de gebouwen op een warmtenet aangesloten. Op plekken waar geen warmtenetten mogelijk zijn, voorzien all-electric warmtepompen met WKO de grotere gebouwen van warmte. Voor kleinere gebouwen worden all-electric of hybride warmtepompen gebruikt. Uiteindelijk wordt 50% van gebouwen met een all-electric warmtepomp verwarmd. Voor gebouwen die niet geschikt zijn voor een all-electric warmtepomp of warmtenet, blijft de mogelijkheid bestaan om een hybride warmtepomp, HR-ketel of een alternatief verwarmingssysteem te gebruiken, zolang dit op basis is van duurzame energie.

Europese Integratie

Door verhoging van de gasprijs (dit wordt ondersteund door een verdere aanscherping van het ETS II voor gebouwen en wegtransport) worden alternatieven voor de huidige verwarming rendabel. In deze markt wordt de hybride warmtepomp in combinatie met 'spijt-vrije' isolatie als belangrijkste warmtetechniek beschouwd. De meeste hybride warmtepompen worden met groen gas gevoed, aangezien dit eenvoudig ingevoerd kan worden in het gasnet en er dus geen nieuwe infrastructuur voor hoeft te worden aangelegd. De rest van de hybride warmtepompen wordt gevoed met waterstof, die binnen Europa klimaatneutraal geproduceerd kan worden. Voor nieuwe en goed geïsoleerde gebouwen, is de businesscase voor all-electric warmtepompen het meest gunstig.

Internationale Handel

Ook in dit scenario komt het percentage warmtenetten in gebouwen overeen met het aantal huishoudens dat op warmtenetten is gezet. Omdat er veel import van waterstof mogelijk is kan de prijs van waterstof voor eindgebruikers in de gebouwde omgeving laag blijven. Hybride warmtepompen op waterstof zijn in veel gevallen economisch voordelig ten opzichte van all-electric warmtepompen. Een kwart van de gebouwen, vooral de nieuwbouw (met goede isolatie), maakt gebruik van een all-electric warmtepomp.

Tabel 6. Voornamelijk inputparameters huishoudens (cijfers voor 2050).

	Decentrale Initiatieven	Nationaal Leiderschap	Europese Integratie	Internationale Handel
Inwoners	19,5 miljoen	19,5 miljoen	19,5 miljoen	19,5 miljoen
Huishoudens	9,2 miljoen	9,2 miljoen	9,2 miljoen	9,2 miljoen
Groei aantal gebouwen	0,6% per jaar	0,6% per jaar	0,6% per jaar	0,6% per jaar
Isolatie	Gemiddeld A/B	Gemiddeld A	Gemiddeld A-B	Gemiddeld B
All-electric WP	50%	50%	25%	25%
Hybride WP (groen gas)	25%	10%	40%	-
Hybride WP (waterstof)	-	-	10%	50%
Warmtenet en hun warmtebron(nen)	20% waarvan: 100% geothermie met piek groen gas/biomassa	30% waarvan: 70% geothermie met piek groen gas/biomassa, 15% groen gas, 10% biomassa, 5% restwarmte AVI's	15% waarvan: 14% geothermie met piek groen gas/biomassa, 66% groen gas, 8% biomassa,	10% waarvan: 14% geothermie met piek waterstof, 21% waterstof, 28% biomassa,

			12% restwarmte AVI's en industrie	37% restwarmte AVI's en industrie
Overig/nicheoplossingen	5%	10%	10%	15%
Opgesteld vermogen zon PV	125 GW	115 GW	91 GW	65 GW
zothermische energie opbrengst	33 PJ _{th}	19 PJ _{th}	16 PJ _{th}	13 PJ _{th}
Energiebesparing apparaten ten opzichte van 2019	10%	10%	10%	10%
Koken	Inductie	Inductie	Inductie	Inductie

5.2 Mobiliteit

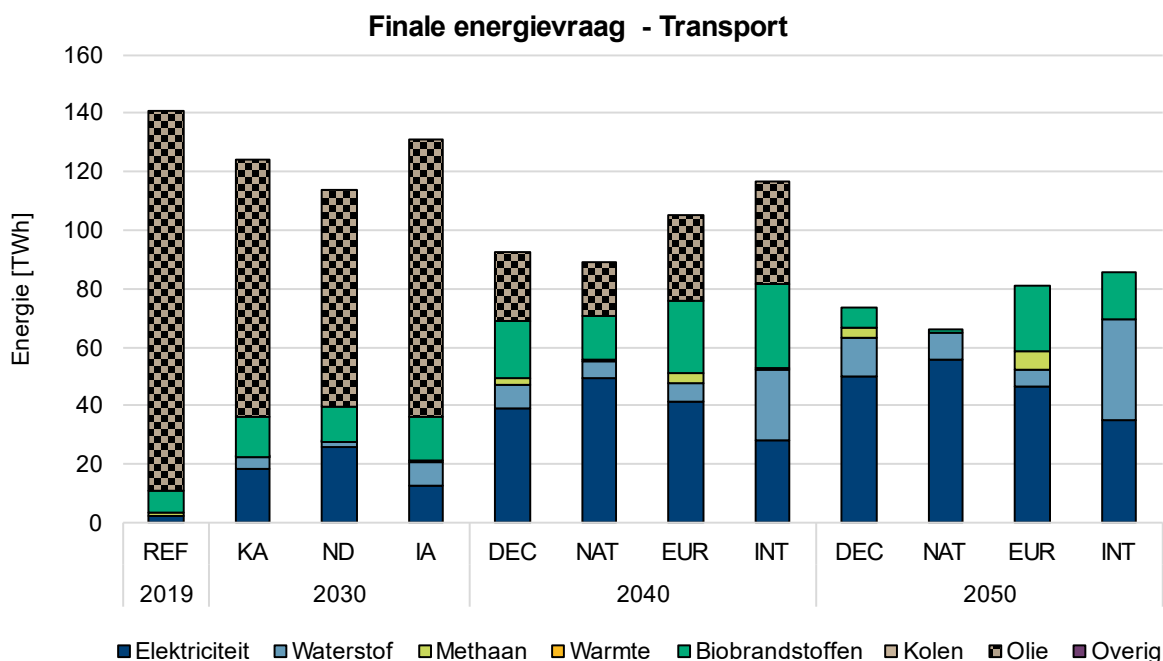
Mobiliteit is opgesplitst in personenvervoer (auto's, motorfietsen, fietsen, bussen, tram, metro, trein), vrachtovervoer (licht vrachtovervoer, zwaar vrachtovervoer, goederentreinen, binnenvaart) en internationaal transport (internationale luchtvaart, internationale scheepvaart). De primaire transitieroutes van personenvervoertuigen zijn een mix van mogelijkheden, zoals elektriciteit, duurzame gassen, biobrandstoffen en waterstof voor zwaardere voertuigen.

Actuele belangrijke beleidsontwikkelingen:

- Vanuit het Klimaatakkoord worden vanaf 2030 alle nieuwe personenvervoertuigen elektrisch (in Europa vanaf 2035), wat naar verwachting leidt tot 1-1,5 miljoen elektrische personenauto's in 2030. Deze trend zet vermoedelijk door richting 2050. Slim laden (netbewust, rekening houdend met lokale netcapaciteit) is voor deze groep voertuigen de standaard per 2030.
- Vanaf 2025 zorgt invoering van steeds meer zero-emissiezones voor een versnelling van elektrische (stads)logistiek. Binnenvaart, internationale scheepvaart en luchtvaart ontwikkelen nieuwe technologieën en doen pilots tot 2030.
- Hierdoor neemt na 2030 de vraag naar synthetische brandstoffen toe, met zeker na 2040 mogelijke grote implicaties voor de totale energievraag van deze sector. De mate waarin de scheep- en luchtvaart synthetische brandstoffen gaan tanken in Nederland, is zeer onzeker.

Door de verscheidene ontwikkelingen in de mobiliteitssector neemt de totale energievraag af van 140 TWh in 2019 naar gemiddeld 75 TWh in 2050. Tussen de scenario's Decentrale Initiatieven//Nationaal Leiderschap en Europese Integratie/ Internationale Handel zijn grote verschillen in de totale energievraag waarneembaar.

In het geval van de mobiliteitssector is 2040 geplot tussen de II3050 2050-scenario's en de investeringsplan 2035-scenario's.



Figuur 50. Finale energievraag transportsector, in TWh.

5.2.1 Personenvervoer

Er is een toename in aantal kilometers personenvervoer vanwege de bevolkings- en economische groei. Thuiswerken, een toename in deelmobiliteit mogelijkheden en (klimaat)bewustzijn zorgen er wel voor dat deze groei met 0,4% per jaar minder sterk is dan de bevolkings- en economische groei.

De reeds ingezette stijging van het aantal elektrische auto's zet door. Vanaf 2035 worden er vanwege normering alleen nog maar zero-emissievoertuigen verkocht in de Europese Unie. De huidige groei van het aantal elektrische auto's en beschikbare infrastructuur zorgt ervoor dat elektrische auto's in alle scenario's de dominante techniek zijn. Motorfietsen volgen de elektrificatietrend van auto's en brommers. Biobrandstoffen vormen ook een alternatief, maar zijn wegens de verwachte beperkte impact niet meegenomen. Tot slot wint ook de elektrische fiets verder aan terrein.

De regionale overheid zorgt door middel van aanscherping van concessies voor elektrificatie van het openbaar vervoer. Ook treinen, trams en metro's zijn in 2050 volledig elektrisch aangedreven. In Nederland is vanwege de goede spoorinfrastructuur en dichtbevolktheid geen specifiek voordeel voor waterstoffreinen, dit blijft een nicheoplossing voor de periferie. Verder is de verwachting dat voor alle transportmodaliteiten een efficiëntieverbetering optreedt.

Dit leidt ertoe dat de energievraag van personenvervoer afneemt van 70 TWh in 2019 naar gemiddeld 25 TWh in 2050, onder andere door de hogere efficiëntie van elektrische motoren ten opzichte van brandstofmotoren. De transitie vindt in de scenario's Decentrale Initiatieven en Nationaal Leiderschap al grotendeels voor 2040 plaats. In de scenario's Europese Integratie en Internationale Handel is een langzamer tempo van de transitie verondersteld. Duurzame brandstoffen worden pas op een later moment een aantrekkelijk alternatief voor de huidige fossiele bronnen.

Decentrale Initiatieven

Burgers kiezen bewust voor duurzaam transport en regionale overheden stimuleren openbaar vervoer. Hierdoor wordt het economisch gezien relatief minder aantrekkelijk om de auto te nemen. Voor persoonlijk vervoer maken Nederlanders daarom vaker gebruik van het openbaar vervoer. Ook stappen ze minder vaak in de auto voor korte ritten en nemen ze de fiets of elektrische brommer/ motor. Uiteindelijk is in 2050 het volledige personenvervoer elektrisch.

Nationaal Leiderschap

De nationale overheid investeert meer in openbaar vervoer en ontmoedigt het autogebruik. Net als in het scenario Decentrale Initiatieven maken Nederlanders voor persoonlijk vervoer daarom vaker gebruik van het openbaar vervoer. Tevens stappen ze minder vaak in de auto voor korte ritten en nemen ze de fiets of elektrische brommer/motor. Uiteindelijk is ook in dit scenario in 2050 het volledige personenvervoer – met uitzondering van langeafstandsbussen die rijden op waterstof – elektrisch.

Europese Integratie

Er wordt geen grote verandering in het gebruik van personenvervoer verwacht. Vanuit Europa worden geen specifieke maatregelen genomen om andere typen van vervoer te stimuleren. Het overgrote deel van de personenauto's wordt elektrisch (85%). Het resterende deel zijn auto's op waterstof of bio-Ing. Door ontwikkeling van een Europees netwerk van waterstoftankstations worden waterstofauto's richting 2050 interessanter voor automobilisten die vaak lange afstanden rijden. Vanwege de huidige voorsprong van infrastructuur en beschikbaarheid blijft de elektrische auto de eerste decennia dominant. Bio-Ing-auto's vormen een alternatief voor waterstofauto's en concurreren qua prijs met elkaar. Stadsvervoer wordt volledig elektrisch. Een deel van het regionale vervoer rijdt op waterstof om zo eenvoudiger langer te kunnen doorrijden.

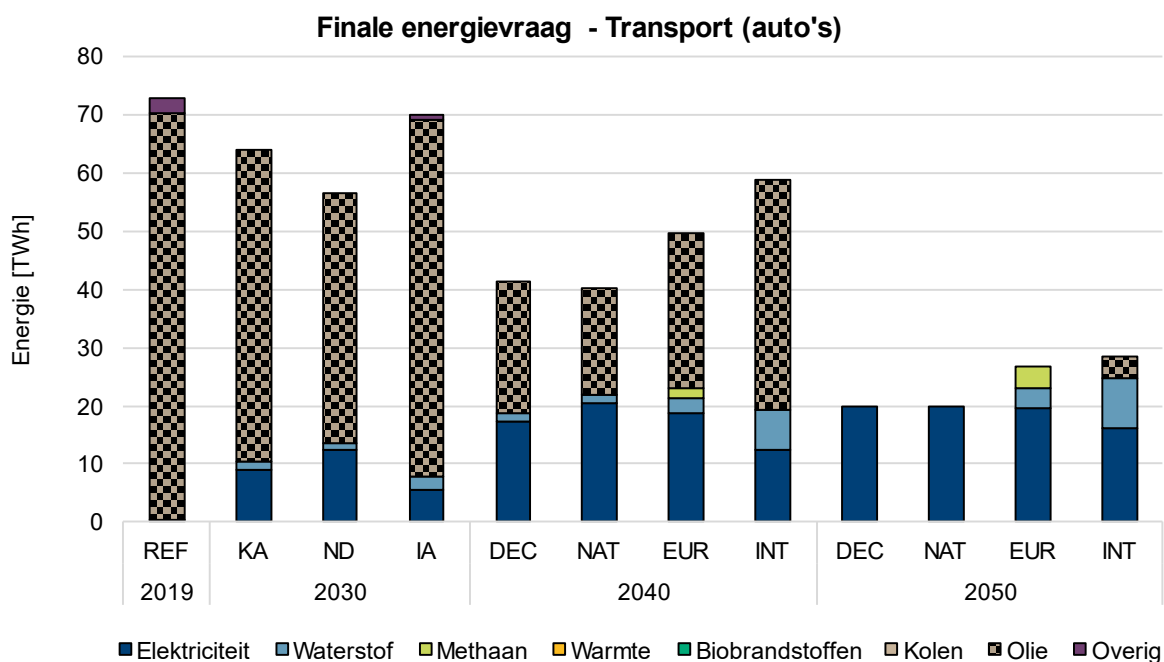
Internationale Handel

In dit scenario worden eveneens geen grote veranderingen in het gebruik van personenvervoer verwacht. Er worden geen specifieke maatregelen genomen vanuit internationale verdragen om andere typen van vervoer te stimuleren. Het grootste deel van de personenauto's wordt elektrisch (70%). Het resterende deel zijn auto's op waterstof of biobrandstoffen. De ruime beschikbaarheid van goedkope waterstof zorgt ervoor dat waterstof in bepaalde segmenten kan concurreren met volledig elektrische voertuigen. Stadsvervoer wordt volledig elektrisch. Een deel van het regionale vervoer rijdt op waterstof en biobrandstoffen om zo lange afstanden te kunnen overbruggen.

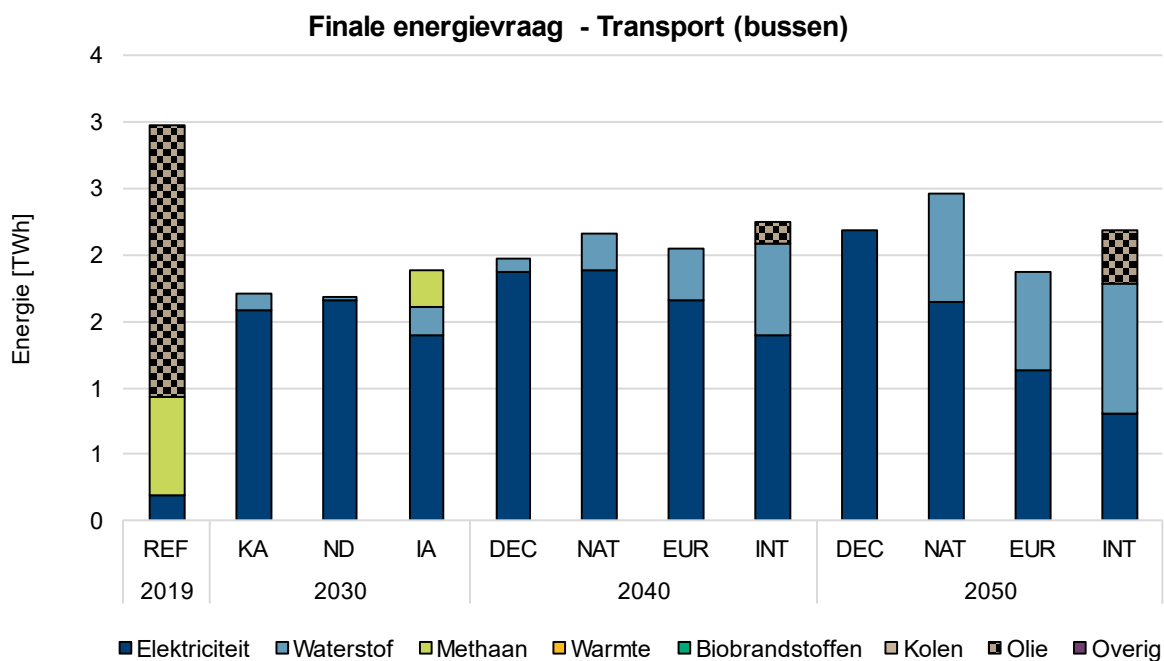
Tabel 7. Input voor scenario's personenvervoer (cijfers voor 2050).

Input	Eenheid	Decentrale Initiatieven	Nationaal Leiderschap	Europese Integratie	Internationale Handel
Groei reizigerskilometers	%/jaar	0,4			
Modal shift	-	10% shift van auto's naar overige categorieën, excl. binnenlandse vliegtuigen	10% shift van auto's naar overige categorieën, excl. binnenlandse vliegtuigen	Geen	Geen
Aandrijving auto's	-	100% elektrisch	100% elektrisch	85% elektrisch 10% waterstof 5% groen gas/bio-Ing	70% elektrisch 25% waterstof 5% biobrandstoffen

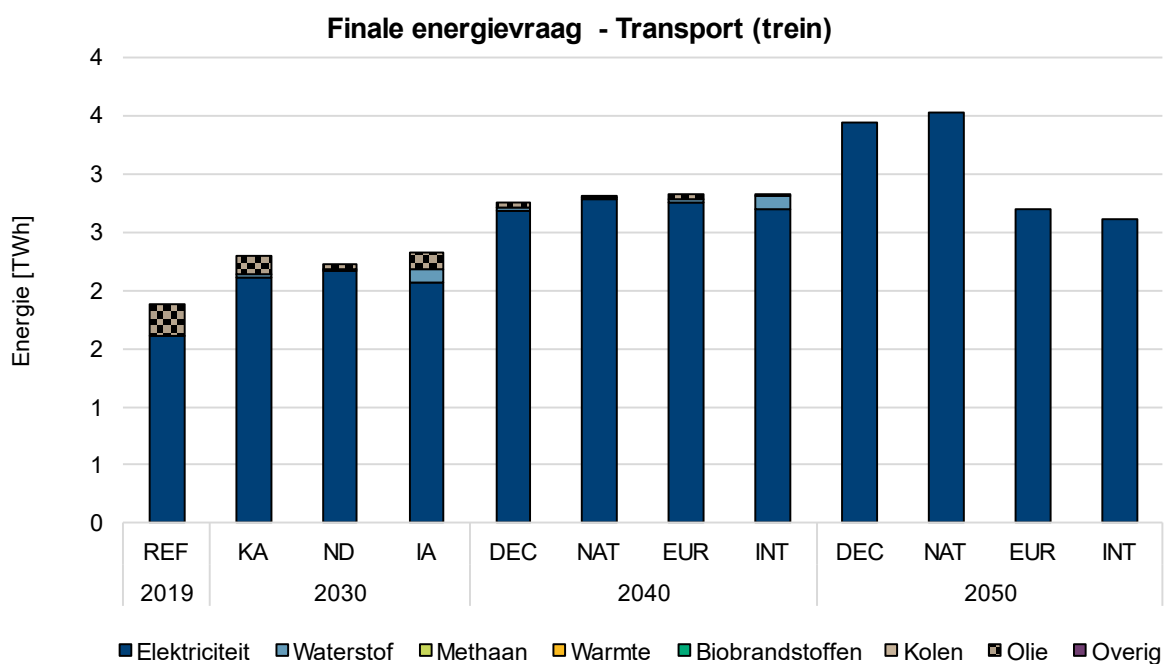
Aandrijving motorfietsen	-	100% elektrisch	100% elektrisch	50% elektrisch 50% biobrandstoffen	85% elektrisch 15% biobrandstoffen
Aandrijving fietsen	-	50% elektrisch (alle scenario's)			
Aandrijving bussen	-	100% elektrisch	75% elektrisch, 25% waterstof	70% elektrisch, 30% waterstof	50 elektrisch, 40% waterstof, 10% biobrandstoffen
Aandrijving tram, metro, trein	-	100% elektrisch (alle scenario's)			
Efficiëntieverbetering voertuigen	%/jaar	Elektrische voertuigen: 0,3 Waterstofvoertuigen: 0,3 Brandstofvoertuigen: 0,4 Treinen: 0,1 Schepen: 0,4 Vliegtuigen: 0,8			



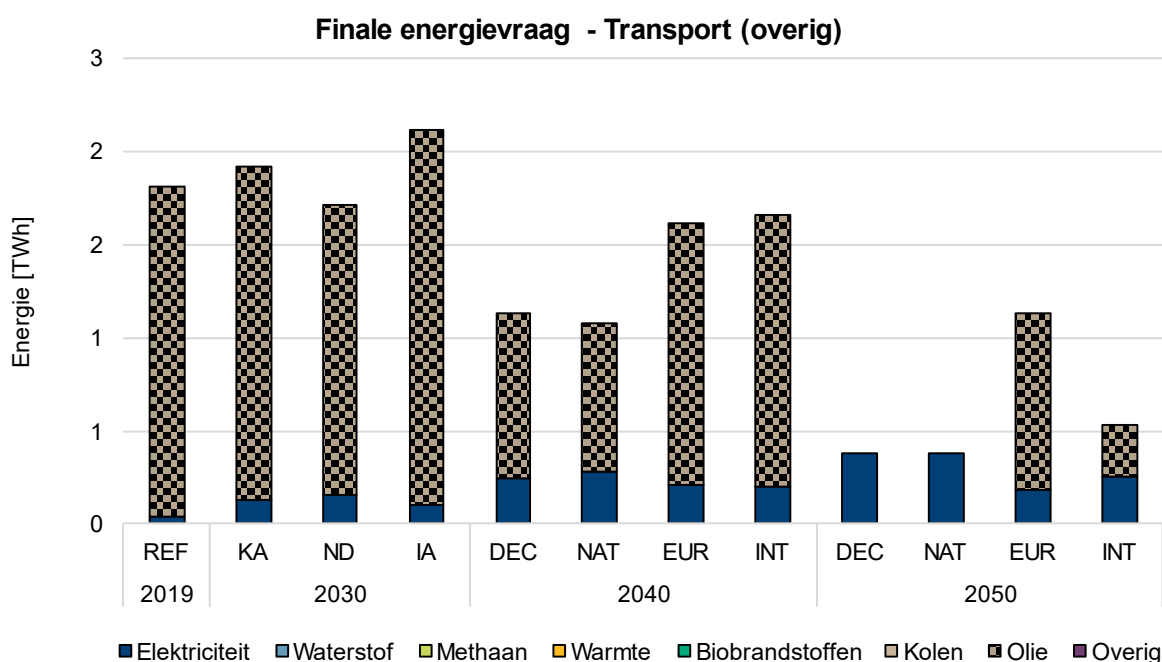
Figuur 51 - Finale energievraag – personenvervoer (auto's).



Figuur 52 - Finale energievraag – bussen.



Figuur 53 - Finale energievraag – trein.



Figuur 54. Finale energievraag – overig transport.

5.2.2 Vrachtvervoer

De behoefte aan vrachtvervoer stijgt met 1% per jaar op basis van de historische trend, onder andere door verdere bevolkingsgroei en economische groei. Licht vrachtvervoer volgt de elektrificatietrend, vergelijkbaar met personenauto's. Deze transitie wordt onder andere gestimuleerd door het ontstaan van nul-emissiezones in steden. Ook voor zwaar vrachtvervoer wordt elektriciteit de belangrijkste techniek, maar worden ook andere typen aandrijvingen gebruikt. Goederentreinen worden volledig elektrisch. De verduurzamingsroute voor binnenvaart is daarentegen nog erg onzeker. In de scenario's wordt daarom uitgegaan van een spreiding in technologieën, zoals elektrificatie, waterstof en bio-LNG.

Decentrale Initiatieven

In dit scenario worden geen grote verschuivingen verwacht tussen de verschillende modaliteiten voor vrachtvervoer. Licht vrachtvervoer wordt volledig elektrisch. Een groot deel van de zwaardere vrachtwagens, zeker op kortere afstanden, wordt eveneens elektrisch. Voor zwaar transport en op lange afstanden worden ook alternatieven op basis van waterstof en bio-LNG ingezet.

Nationaal Leiderschap

De rijksoverheid stimuleert duurzamere alternatieven van transport. Hierdoor wordt in dit scenario verhoudingsgewijs meer gebruik gemaakt van spoorvervoer en binnenvaart. Ook hier wordt licht vrachtvervoer volledig elektrisch. Het overgrote deel van het zwaar transport, zeker op kortere afstanden, wordt eveneens elektrisch. Voor niches zijn alternatieven op basis van waterstof beschikbaar.

Europese Integratie

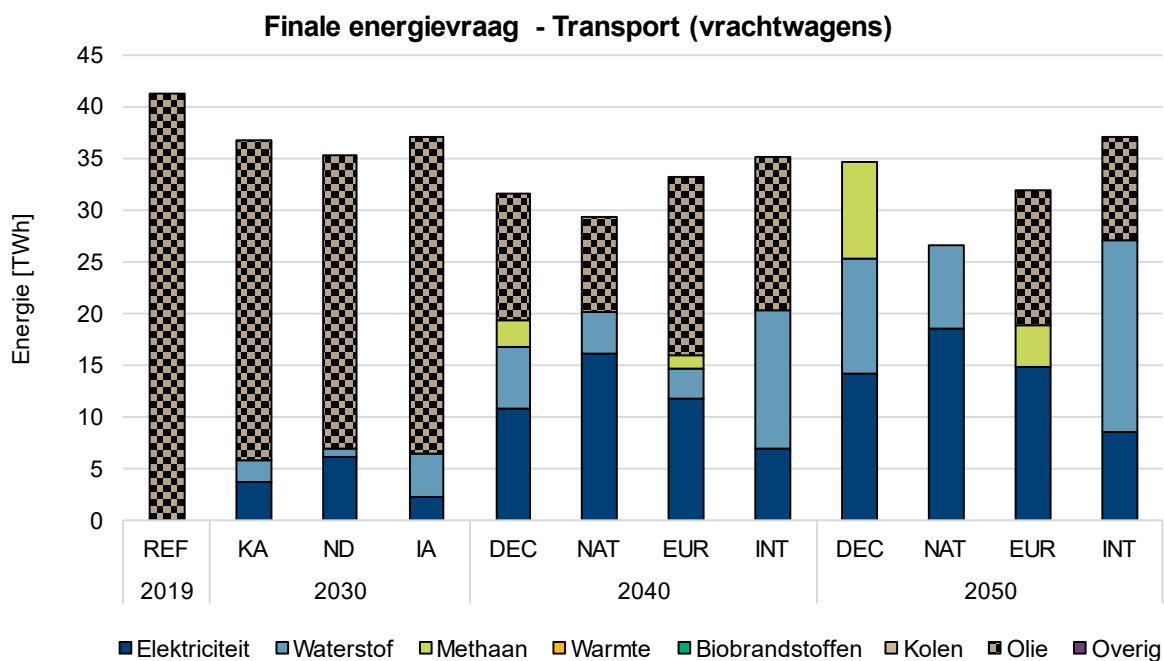
Op Europees niveau wordt het netwerk voor spoorvervoer en binnenvaart verder verbeterd. Vervoer via treinen en schepen wordt daarmee aantrekkelijker. Het overgrote deel van de vrachtwagens, zeker op kortere afstanden, wordt elektrisch. Voor licht transport wordt daarnaast gebruik gemaakt van busjes op waterstof of bio-LNG. Voor zwaar transport en op lange afstanden worden alternatieven op basis van waterstof, biodiesel en bio-LNG ingezet.

Internationale Handel

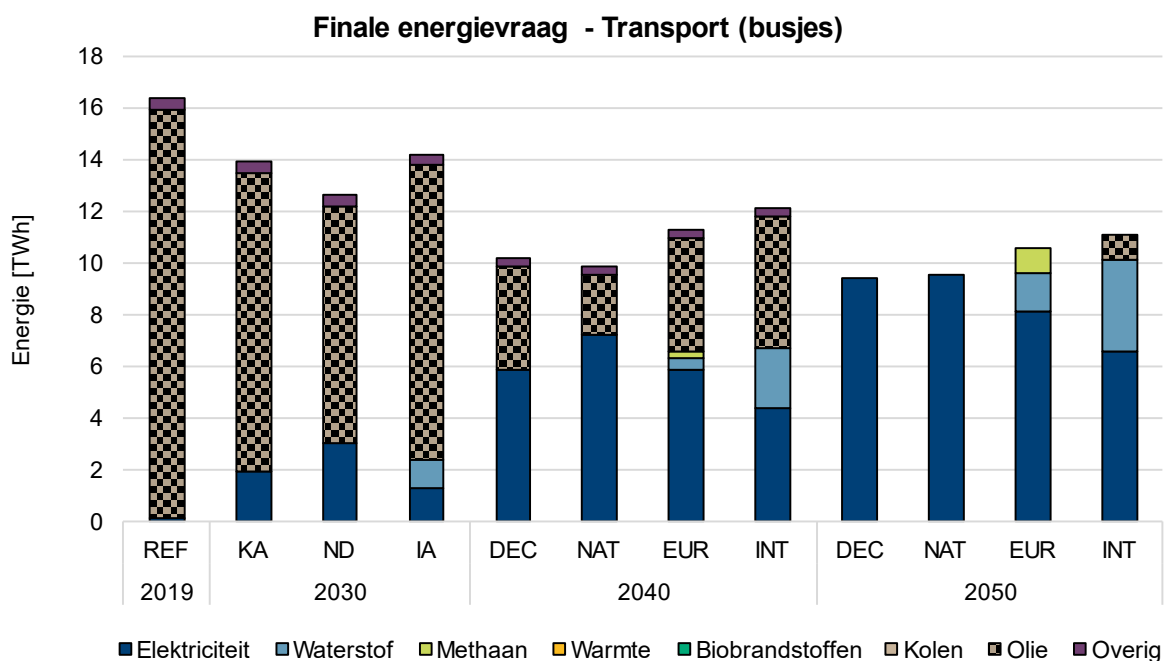
In dit scenario worden geen grote verschuivingen verwacht tussen de verschillende modaliteiten voor vrachtvervoer. Vanwege de ruime beschikbaarheid van duurzame waterstof en biobrandstoffen worden deze voor zwaar transport en op lange afstanden ingezet. Voor kortere afstanden worden elektrische vrachtwagens gebruikt.

Tabel 8. Input voor scenario's vrachtvervoer (cijfers voor 2050),

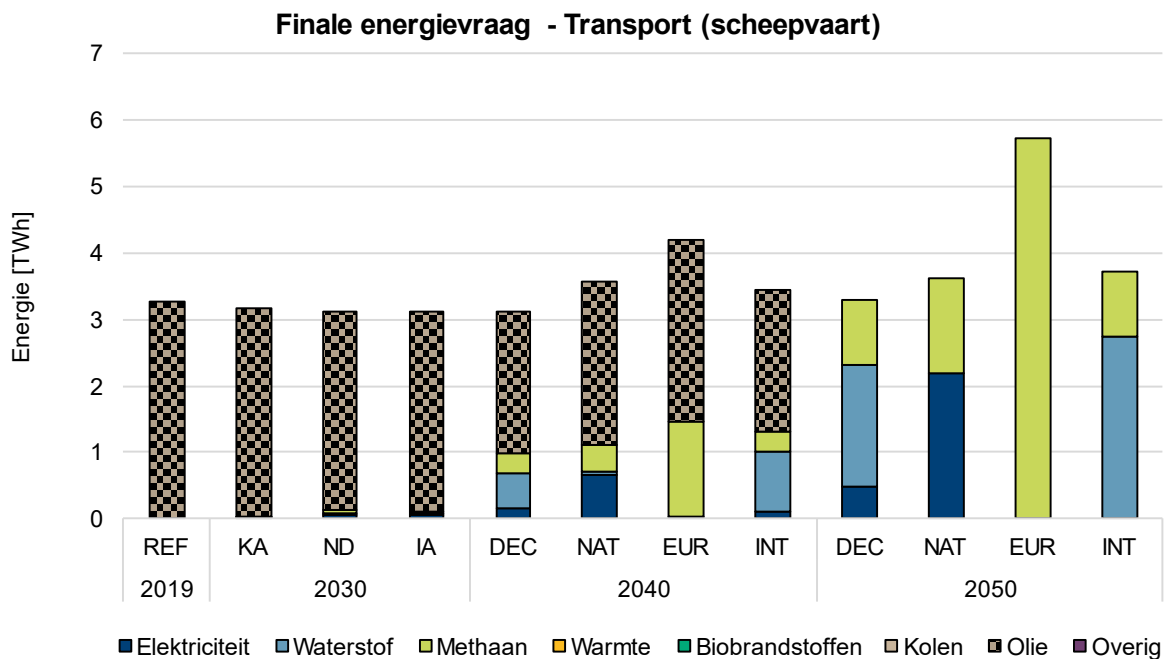
Input	Eenheid	Decentrale Initiatieven	Nationaal Leiderschap	Europese Integratie	Internationale Handel
Groei transportbehoefte	%/jaar	1,0 (in alle scenario's)			
Modal shift	-	Geen	10% shift van wegvervoer naar treinen en binnenvaart	10% shift van wegvervoer naar treinen en binnenvaart	Geen
Aandrijving licht vrachtvervoer	-	100% elektrisch	100% elektrisch	85% elektrisch 10% waterstof 5% groen gas/bio-LNG	70% elektrisch 25% waterstof 5% biobrandstoffen
Aandrijving zwaar vrachtvervoer	-	50% elektrisch 30% waterstof 20% groen gas/bio-LNG	75% elektrisch 25% waterstof	60% elektrisch 30% biobrandstoffen 10% groen gas/bio-LNG	30% elektrisch 50% waterstof 20% biobrandstoffen
Aandrijving goederentreinen	-	100% elektrisch (in alle scenario's)			
Aandrijving binnenvaart	-	25% bio-LNG 25% elektrisch 50% waterstof	25% bio-LNG 75% elektrisch	100% bio-LNG	25% bio-LNG 75% waterstof.
Efficiëntie	%/jaar	Elektrische voertuigen: 0,3 Waterstofvoertuigen: 0,3 Brandstofvoertuigen: 0,4 Treinen: 0,1 Schepen: 0,4 Vliegtuigen: 0,8			



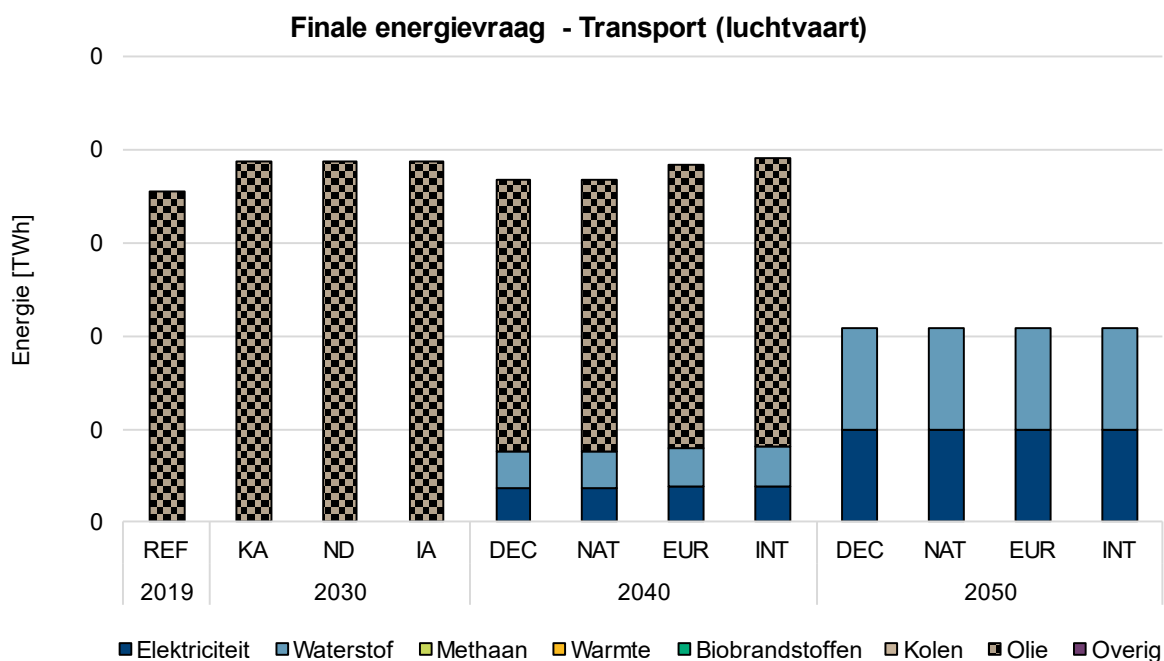
Figuur 55 - Finale energievraag - vrachtwagens. In 2050 is methaan bio-ethanol, olie is bio-diesel en biobrandstoffen is bio-LNG. Dit zijn allen duurzame brandstoffen.



Figuur 56 - Finale energievraag - licht vrachtvervoer/busjes. In 2050 is methaan bio-ethanol, olie is bio-diesel en biobrandstoffen is bio-LNG. Dit zijn allen duurzame brandstoffen.



Figuur 57 - Finale energievraag - scheepvaart. In 2050 is methaan bio-ethanol, olie is bio-diesel en biobrandstoffen is bio-LNG. Dit zijn allen duurzame brandstoffen.



Figuur 58. Finale energievraag – luchtvaart. De productie van SAF is niet gemodelleerd in het ETM en de bijbehorende energievraag niet opgenomen in deze figuur.

5.2.3 Internationaal transport

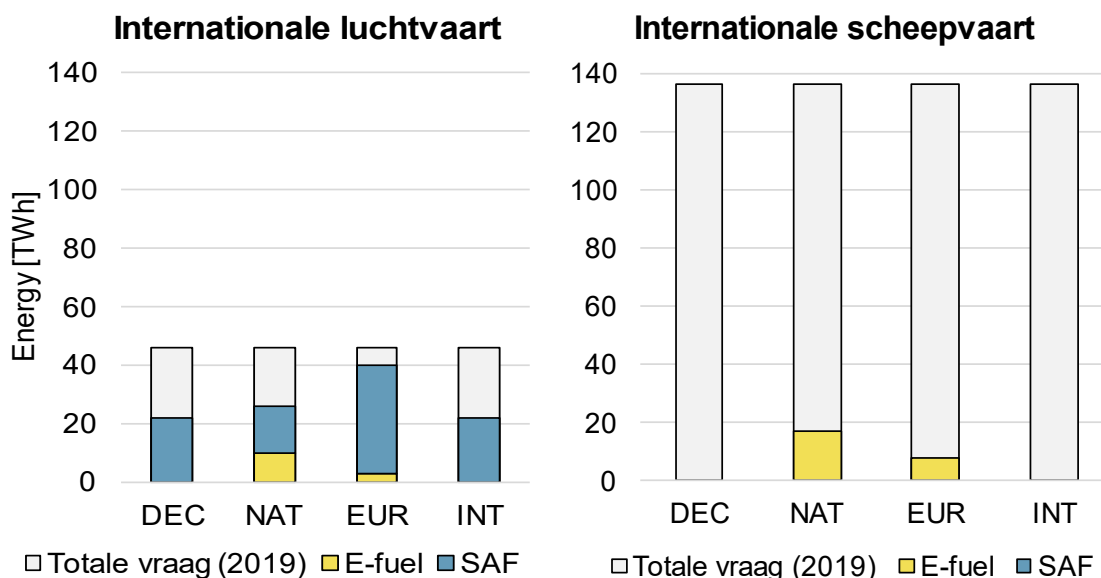
De sector internationaal transport heeft een grote invloed op de totale energievraag en wordt ook steeds meer onderdeel van de Europese en internationale afspraken rond het tegengaan van klimaatverandering. Daarnaast is inzicht in de transitie van deze sector van belang voor de netbeheerders en andere stakeholders, aangezien de energievraag van deze sector een grote impact heeft op de totale energievraag en de behoefte aan specifieke infrastructuur. In deze studie is in alle scenario's een groei van 0% verondersteld.

Voor de verduurzaming van internationaal transport zijn er verschillende efficiënte routes denkbaar:

- De biogene route, waarbij de brandstoffen uit biomassa worden gemaakt.
- De synthetische route, waarbij de brandstoffen worden gemaakt via 'direct air capture' en elektrolyse met duurzame elektriciteit en daarna een Fischer-Tropsch-proces.
- Het elektrificeren van schepen en korte vluchten.
- Het importeren van duurzame brandstoffen (voor het energiesysteem in Nederland maakt het minder uit welke brandstoffen precies).

Omdat er nog veel onduidelijkheid bestaat over welke route het meest efficiënt is, is er in deze studie onderscheid gemaakt tussen twee routes: binnenlandse productie en het importeren van brandstoffen (biogeen of synthetisch). Aannames hieromtrent verschillen per scenario:

- In het scenario Nationaal Leiderschap is het streven om zo veel mogelijk synthetische brandstoffen te produceren in Nederland, hoofdzakelijk uit wind op zee. Daarnaast wordt ook SAF geproduceerd.⁴⁵
- Het scenario Europese Integratie voorziet naast synthetische brandstoffen ook veel productie van biobrandstoffen (SAF), ingegeven door de beschikbaarheid van biomassa in deze verhaallijn.
- De scenario's Decentrale Initiatieven en Internationale Handel voorzien wel binnenlandse productie van SAF maar geen binnenlandse productie van scheepsbrandstoffen; deze worden overwegend geïmporteerd. Tevens is denkbaar dat schepen hun brandstof elders gaan bunkeren. Dit is verder niet gespecificeerd, aangezien het geen impact heeft op de gas- en elektriciteitsnetten.



Figuur 59. Binnenlandse vraag en productie van bio- en synthetische brandstoffen in 2050.

⁴⁵ De productie van bio- en synthetische brandstoffen heeft ook impact op het energieverbruik in de industrie.

De productie van brandstoffen voor de internationale lucht- en scheepvaart in 2050 is weergegeven in Figuur 59. Vergelijken met de vraag in 2019, is te zien dat de productie in Nederland in elk scenario onvoldoende is om aan de historische vraag te voldoen. Dit is te verklaren door de relatief grote internationale transportsector ten opzichte van de omvang van Nederland en het bijbehorend binnenlands duurzaam potentieel. Uit deze data blijkt dat het voor Nederland niet mogelijk is om de brandstofvraag van de internationale transportsector volledig zelf te verduurzamen.⁴⁶

De productie van biobrandstoffen voor de scheepvaart in Nederland is niet expliciet meegenomen, deze kan mogelijk naast synthetische productie van brandstoffen bestaan. Wel onder bepaalde voorwaarden, bijvoorbeeld dat de productie van biobrandstoffen kan concurreren met andere vraag naar biomassa. Daarnaast is niet verder gekeken naar de elektrische lucht- en scheepvaart. Hierin worden vorderingen gemaakt, maar hoe is nu nog niet te voorspellen. De huidige beste beschikbare technologie^{47,48} en een veronderstelde verbetering van de accu-energie-dichtheid tot 2050 bieden de mogelijkheid tot elektrificatie van korte vluchten. De elektrische luchtvaart blijft waarschijnlijk echter beperkt tot passagiersverkeer vanwege het relatief lichte gewicht van passagiers in vergelijking met vracht. Elektrische scheepvaart lijkt alleen weggelegd voor relatief korte afstanden. Dit betekent dat elektrische schepen in de binnenvaart denkbaar zijn, maar niet voor kust- of internationale routes.

5.3 Industrie

De industrie als sector kent een grote energie- en grondstofvraag en wordt daarnaast gekenmerkt door een sterke heterogeniteit: er zijn grote verschillen tussen de energie- en grondstofvraag per subsector. De basisindustrie (Staal, Chemie, Kunstmest en Raffinage) bestaat uit een klein aantal bedrijven dat gezamenlijk het grootste deel van de energie en grondstoffen van de industrie vraagt. Er bestaat ook heterogeniteit in energievraag tussen bedrijven binnen een subsector. Dit geeft enerzijds per bedrijf een andere vertreksituatie, maar betekent anderzijds soms ook dat bedrijven niet dezelfde mogelijkheden hebben en kiezen om hun emissies te reduceren. De industrie kent daarnaast vaak een internationaal speelveld; er wordt geconcurrereerd met bedrijven in het buitenland en veel producten worden internationaal verhandeld. Eventuele verschuivingen binnen de industrie, wie verduurzaamt wanneer en op welke wijze, hebben een grote invloed op de energievraag.

Veranderingen ten opzichte van de vorige editie

Ten opzichte van de eerste editie van II3050 zijn er diverse belangrijke veranderingen zichtbaar, zowel bij de gehanteerde aanpak als bij de uitkomsten:

- *Bottom-up aanpak met CTM en gedetailleerdere uitkomsten.* Voor deze editie van II3050 is voor de industriemodellering gebruik gemaakt van het Carbon Transition Model (CTM). Het CTM beschrijft de energievraag van honderden individuele bedrijven en de materiaalstroom van de meest energie-intensieve industrie. Hiermee werd het mogelijk om samen met de industrie in de context van de verhaallijnen een veel scherper beeld te verkrijgen van de veranderende energie- en grondstofvraag.
- *Gemiddeld genomen hogere energievraag, vergelijkbare energiemix.* De energievraag van de industrie in de vier scenario's is in deze editie gemiddeld genomen licht hoger dan in de vorige editie. De energiemix is echter over het algemeen zeer vergelijkbaar, met in alle scenario's de grootste rol voor elektriciteit, gevolgd door waterstof.

⁴⁶ Hierbij moet opgemerkt worden dat de productie van synthetische brandstoffen in de scenario's Nationaal Leiderschap en Europese Integratie beperkt is tot de hoeveelheid die met binnenlands geproduceerde waterstof kan worden gemaakt. Deze hoeveelheid is fors lager dan het volume dat de industrie in deze scenario's heeft aangegeven te willen produceren. Als ook geïmporteerde waterstof als grondstof wordt gebruikt, ligt de productiehoeveelheid van synthetische brandstoffen ruwweg een factor 3 hoger. Hiervoor wordt een variantscenario onderzocht (zie ook paragraaf 7.3).

⁴⁷ Eviation (2019). Eviation Alice.

⁴⁸ Yara Birkeland (2019). Yara Birkeland presskit.

- *Qua grondstoffen meer waterstof (en biomassa) inzet.* In deze editie is een grotere rol weggelegd voor met name waterstof, maar ook voor biomassa als grondstof in de industrie. Dit hangt deels samen met de productie van biogene en synthetische brandstoffen en grondstoffen, maar ook in de scenario's waar dit beperkt is, bestaat nu een redelijke waterstofvraag. Dit heeft tevens te maken met de gedetailleerdere beschrijving van de industrie van het CTM, waardoor beter zicht op de mogelijke waterstofvraag verkregen kan worden. Verder vindt in alle scenario's nog (enige) aardolieraffinage plaats, waar dat in de vorige editie in twee scenario's tot nul daalde.
- *Grote verschillen tussen de scenario's in de twee edities, met name tussen Nationaal Leiderschap en Internationale Handel.* Hoewel de vier scenario's in deze editie op een vergelijkbare manier ingestoken en gedefinieerd zijn als de vorige, zijn er opvallend grote verschillen. Zo is in het scenario Nationaal Leiderschap de energievraag ongeveer de helft hoger dan in de vorige editie. Dit komt hoofdzakelijk door de schaal waarop synthetische brandstoffen geproduceerd worden. In het scenario Internationale Handel is de vraag daarentegen bijna 40% lager, wat verklaard wordt door de grote import van halffabricaten en door krimp of verplaatsing van activiteiten naar het buitenland.

5.3.1 Methode

Kalavasta heeft in opdracht van de netbeheerders de industrie bevraagd over hun toekomst in 2050 (vier scenario-eindbeelden), 2040 (snel/langzaam scenario), 2035 (snel/langzaam scenario) en 2030 (één scenario). De vier ontwikkelde scenario-verhaallijnen van 2050, gemaakt door de netbeheerders, werden voorgelegd en de industrie heeft hier toekomstbeelden op geplot. Deze 2050-toekomstbeelden zijn bijna ongewijzigd in de scenario's gebruikt. De enige aanpassing was op de verwachte hoeveelheid synthetische brandstof productie (zie paragraaf 5.3.5).

De individuele ondervraagde partijen zijn momenteel de grootste uitstoters in Nederland en interessant in dit proces, omdat ze verwacht worden grote aanpassingen te doen in hun processen. Dit leidt waarschijnlijk tot grote impact op de infrastructuur. Deze industrie staat bekend onder de naam G14 en omvat grotendeels de sectoren staal, raffinaderijen, chemie en kunstmest. De volgende partijen zijn hiervoor gevraagd en hebben hieraan meegewerkt:

Sector	G14-bedrijven
Staal	Tata Steel IJmuiden
Raffinaderijen	Shell Pernis, BP Rotterdam, ExxonMobil Rotterdam, Gunvor Rotterdam, Zeeland Refinery* (* o.b.v. inschatting Kalavasta i.v.m. sancties Rusland)
Kunstmest (chemie)	OCI Nitrogen Geleen, Yara Sluiskil
Stoomkrakers (chemie)	Shell Moerdijk, DOW Terneuzen, SABIC Geleen
Overige chemie	Air Products Rotterdam, Air Liquide Rotterdam, Nobian (drie locaties), BioMCN

De opgehaalde gegevens zijn site-specifiek in het CTM geplaatst, waarna Kalavasta onder andere warmte en restgassen evenwichtig over de sites verdeeld heeft. Vanwege de gevoeligheid van de gegevens worden deze CTM-scenario's niet openbaar gemaakt. In overleg met de industrie zijn de CTM-scenario-versies alleen gedeeld met het I13050-team van de netbeheerders, zodat de energievraag per site in geregionaliseerde netberekeningen voor deze industriële sites goed meegenomen kan worden. Voor Shell Pernis en Shell Moerdijk zijn alleen de energiedragers naar de sites aangeleverd aan het I13050-team van de netbeheerders.

Daarnaast heeft Kalavasta de industriële toekomststrategieën verbreed en completer gemaakt door ook met de clustervertegenwoordigers gesprekken te voeren. De zes clusters zijn: Noordzee-kanaalgebied, Rotterdam-Moerdijk, Zeeland, Chemelot, Noord-Nederland en Cluster 6. Mede op basis van de opgehaalde informatie in de clusters en aangevuld met publieke bronnen, zijn de verwachte technologische ontwikkelrichtingen voor papier,

voedsel, aluminium, overige metalen, overige chemie en overige industrie gevormd. De resulterende energievraag per sector per scenario kon in het Energietransitiemodel (ETM) ingeladen worden.

Als laatste heeft Kalavasta aan de hand van gesprekken met kennisinstututen, waaronder TNO voor synthetische brand- en grondstoffen, en spelers in de markt voor biogene en gerecyclede moleculen zicht proberen te krijgen op de potentiële omvang van de nieuwe basisindustrie die biogene, gerecyclede en synthetische moleculen kan gaan produceren.

5.3.2 Scenario's voor de industrie

In de gesprekken met de industrie zijn ten eerste de door de netbeheerders ontwikkelde verhaallijnen meegegeven. Deze verhaallijnen staan in grote lijnen beschreven in hoofdstuk 3, maar bevatten ook specifiekere elementen voor de industrie, die hieronder per scenario toegelicht worden.

Decentrale Initiatieven

In dit scenario wordt sterk ingezet op elektrificatie in de industrie. Grondstoffen (koolstof) komen meer van bio-based en gerecyclede grondstoffen. Daarbij is er beperkte energie-import; zowel vanwege beperkte beschikbaarheid als hoge kosten. Uitzondering daarop is dat er wel elektriciteit met het buitenland uitgewisseld wordt voor de nationale systeembalans. De raffinaderijen krimpen sterk.

Nationaal Leiderschap

In dit scenario stuurt de Nederlandse overheid sterk aan op de nieuwe industrie en daarbij op de productie van synthetische en gerecyclede producten. Qua energiegebruik is de inzet voornamelijk een elektrificatie van de bestaande industrie, aangevuld door gebruik van waterstof. Ook in dit scenario is de rol van import relatief beperkt; dit vindt enkel plaats voor specifieke stromen bij nationale tekorten.

Europese Integratie

In dit scenario speelt import een grotere rol en ontstaat ook een meer diverse energiemix. Enerzijds wordt in de industrie ingezet op elektrificatie en waterstof zoals ook in andere scenario's, maar er is ook een significante rol voor CCS. CCS vindt plaats bij energieopwek met biomassa (negatieve emissies) en bij waterstofproductie uit aardgas. In dit scenario wordt qua grondstoffen dus koolstof uit fossiele en biogene bronnen gebruikt. Daarbij is ook sprake van een afhankelijkheid van Europese biomassa.

Internationale Handel

In dit scenario is Nederland voor de voorziening van moleculen als grondstoffen en energiedragers voor een belangrijk deel afhankelijk van het buitenland. De industrie elektrificeert ook hier voor een belangrijk deel, maar schakelt tevens grotendeels over op waterstof. Daarnaast is er een beperkte rol weggelegd voor biomassa, CCS en DAC voor de koolstofvoorziening.

5.3.3 Invulling industrie

Hierna volgt voor de industrie per sector de invulling. De 2050-beelden voor industrie werden in juli 2022 bevroren, de 2030- en 2035-scenario's vanuit het Investeringsplantraject in december 2022 en het gedefinieerde transitiepad voor 2040 in februari 2023. De verschillende tijdlijnen maken dat niet elk 2050-scenario perfect aansluit bij de actuele aangenomen richting vanuit het Investeringsplan. Ook heeft de industrie tussentijds aankondigingen gedaan, zoals de focus op het importeren van ammoniak. Het doel van II3050 is echter om een breed speelveld van mogelijke ontwikkelingen in 2050 te onderzoeken. Daarom is het acceptabel dat de 2050-beelden wat breder zijn dan de huidige plannen die zijn meegenomen in de Scenariorapportage voor het Investeringsplan. Voor de industrie is het ook belangrijk dat de industrie dankzij het ETS-systeem naar verwachting grotendeels emissieloos zal moeten zijn in 2040. De veertien industriebedrijven met de grootste broeikasgasemissie (samen verantwoordelijk voor 60% van de industriële broeikasgasemissies) verwachten bijvoorbeeld 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. Alleen de raffinaderijen verwachten nog grote veranderingen door te voeren na 2040 zoals grootschalige productie van synthetische brand- en grondstoffen. Dit komt doordat hun toekomstige afnemers (de internationale mobiliteit) ook een latere doelstelling hebben dan 2040.

In Tabel 9 is per sector een beschrijving gegeven van de aannames die voor de scenario's in 2050 zijn gemaakt, of zijn geconcludeerd uit de gesprekken met de industrie.

Tabel 9. Invulling industrie. De industriescenario's zijn gemaakt in het CTM na gesprekken met de G14 of door middel van een sectorspecifieke modellering. Daarom toont deze tabel niet de instellingen voor het ETM.

Sector		Decentrale Initiatieven	Nationaal Leiderschap	Europese Integratie	Internationale Handel
Staal	2040	Alle hoogovens zijn omgebouwd, DRI voornamelijk op methaan, aanvullend waterstof	Alle hoogovens zijn omgebouwd, DRI op waterstof en methaan, veel elektrificatie	Alle hoogovens zijn omgebouwd, DRI voornamelijk op waterstof, aanvullend methaan	Alle hoogovens zijn omgebouwd, DRI op waterstof
	2050	Grootschalige inzet van DRI op waterstof, aanvullend elektrificatie	Grootschalige inzet van DRI op waterstof, aanvullend elektrificatie	Grootschalige inzet van DRI op waterstof en een deel methaan, aanvullend elektrificatie	Import van halffabricaten en lokale verwerking tot eindproducten
Aluminium*	2040	Het aandeel gerecycled aluminium is groter dan primaire productie, verregaande elektrificatie, aanvullend aardgas en waterstof	Het aandeel gerecycled aluminium is groter dan primaire productie, verregaande elektrificatie, aanvullend aardgas en waterstof	Het aandeel gerecycled aluminium is groter dan primaire productie, gedeeltelijke elektrificatie, aanvullend aardgas en waterstof	Het aandeel gerecycled aluminium is groter dan primaire productie, gedeeltelijke elektrificatie, aanvullend aardgas en waterstof
	2050	100% recycling, verregaande elektrificatie	100% recycling, sterke elektrificatie, overige vraag ingevuld met waterstof	100% recycling, grotendeels elektrificatie, daarnaast inzet van groen gas	100% recycling, grotendeels elektrificatie, daarnaast inzet van waterstof
Overige metalen*	2040	Verregaande elektrificatie, aanvullend aardgas en waterstof	Verregaande elektrificatie, aanvullend aardgas en waterstof	Gedeeltelijke elektrificatie, aanvullend aardgas en waterstof	Gedeeltelijke elektrificatie, aanvullend aardgas en waterstof
	2050	Volledige elektrificatie	Sterke elektrificatie, overige vraag ingevuld met waterstof	Grotendeels elektrificatie, daarnaast inzet van groen gas	Grotendeels elektrificatie, daarnaast inzet van waterstof
Raffinage	2040	Lichte krimp van raffinagesector	Lichte krimp van raffinagesector	Zeer geringe krimp van raffinagesector	Lichte krimp van raffinagesector
	2050	Sterke krimp, geen productie van synfuels	Sterke krimp, sterke elektrificatie, hoge productie van synfuels	Krimp, lage productie van synfuels	Sterke krimp, geen productie van synfuels
Kunstmest	2040	Weinig ammoniak-import,	Veel ammoniak-import, nauwelijks eigen	Weinig ammoniak-import,	Veel ammoniak-import, nauwelijks eigen productie van waterstof

		waterstofproductie nog met aardgas	productie van waterstof	waterstofproductie nog met aardgas	
	2050	Geen ammoniak-import, waterstof wordt ingekocht of gemaakt met elektrolyse	Weinig ammoniak-import, waterstof wordt ingekocht	Weinig ammoniak-import, waterstofproductie nog met aardgas	Veel ammoniak-import, waterstof wordt ingekocht
Chemie	2040	Krimp van stoomkrakers, grotendeels elektrificatie	Lichte krimp van stoomkrakers, grotendeels elektrificatie	Productievolume blijft gelijk, grotendeels elektrificatie	Lichte krimp van stoomkrakers, grotendeels elektrificatie
	2050	Sterke krimp/vertrek van stoomkrakers, verregaande elektrificatie	Deels krimp/vertrek van stoomkrakers, verregaande elektrificatie	Alle stoomkrakers blijven	Deels krimp/vertrek van stoomkrakers
Voedsel*	2040	Substitutie van aardgas voor elektriciteit, 1,4% toename efficiëntie per jaar door warmtepomp, afbouw hybride warmte	Substitutie van aardgas voor elektriciteit, 1,5% toename efficiëntie per jaar door warmtepomp, afbouw hybride warmte, deels inzet waterstof	Substitutie van aardgas voor elektriciteit, 1,5% toename efficiëntie per jaar door warmtepomp, afbouw hybride warmte, deels inzet groen gas	Substitutie van aardgas voor elektriciteit, 1,5% toename efficiëntie per jaar door warmtepomp, afbouw hybride warmte, deels inzet groen gas en waterstof
	2050	Volledige elektrificatie, 1,6% toename efficiëntie per jaar door warmtepomp, afbouw hybride warmte	Verregaande elektrificatie, 2,0% toename efficiëntie per jaar door warmtepomp, afbouw hybride warmte, deels inzet waterstof	Verregaande elektrificatie, 2,0% toename efficiëntie per jaar door warmtepomp, afbouw hybride warmte, deels inzet groen gas	Verregaande elektrificatie, 2,0% toename efficiëntie per jaar door warmtepomp, afbouw hybride warmte, deels inzet waterstof
Papier*	2040	Substitutie van aardgas voor elektriciteit, 1,8% toename efficiëntie per jaar door warmtepomp, afbouw hybride warmte	Substitutie van aardgas voor elektriciteit, 1,9% toename efficiëntie per jaar door warmtepomp, afbouw hybride warmte, deels inzet waterstof	Substitutie van aardgas voor elektriciteit, 1,8% toename efficiëntie per jaar door warmtepomp, afbouw hybride warmte, deels inzet groen gas	Substitutie van aardgas voor elektriciteit, 1,8% toename efficiëntie per jaar door warmtepomp, afbouw hybride warmte, deels inzet groen gas en waterstof
	2050	Volledige elektrificatie, 2,3% toename efficiëntie per jaar door warmtepomp, afbouw hybride warmte	Sterke directe elektrificatie, 2,7% toename efficiëntie per jaar door warmtepomp, afbouw hybride warmte, deels inzet waterstof	Grotendeels directe elektrificatie, 2,5% toename efficiëntie per jaar door warmtepomp, afbouw hybride warmte, deels inzet groen gas	Grotendeels directe elektrificatie, 2,5% toename efficiëntie per jaar door warmtepomp, afbouw hybride warmte, deels inzet waterstof
Datacenters & ICT	2040	Interpolatie tussen 2030 en 2050 (alle scenario's)			
	2050	Groeit naar 16,4 TWh (alle scenario's)			
Overig*	2040	Krimp energieverbruik door afname gaswinning, verregaande	Krimp energieverbruik door afname gaswinning, verregaande	Krimp energieverbruik door afname gaswinning, gedeeltelijke	Krimp energieverbruik door afname gaswinning, gedeeltelijke elektrificatie, aanvullend aardgas, waterstof en biomassa

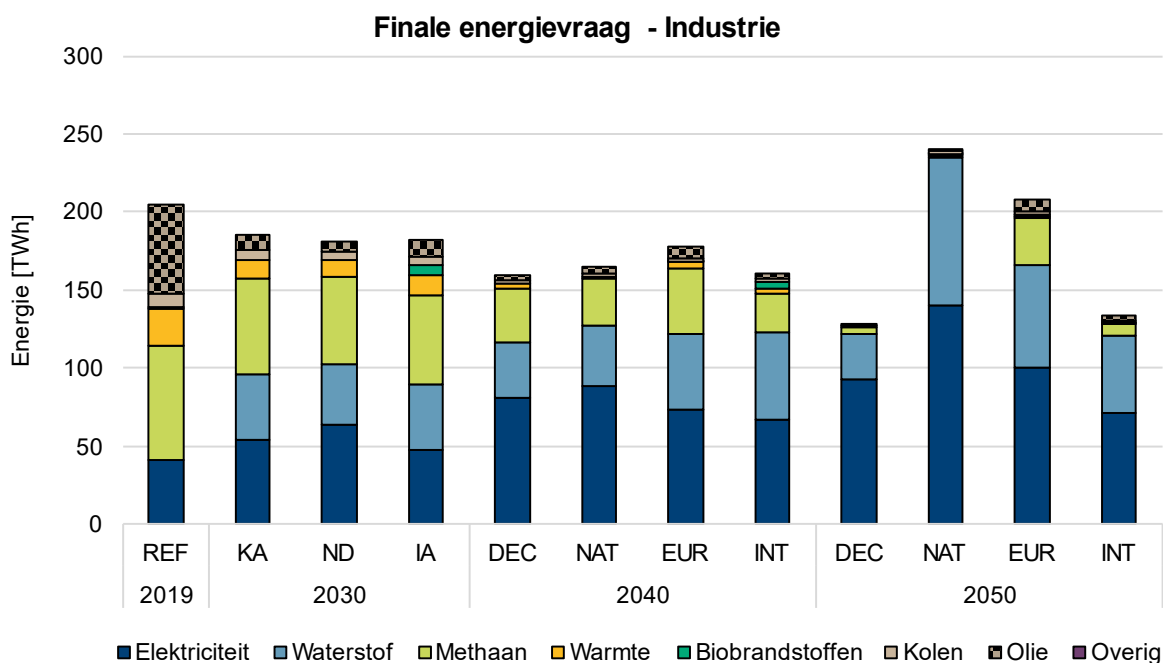
		elektrificatie, aanvullend aardgas en waterstof	elektrificatie, aanvullend aardgas en waterstof	elektrificatie, aanvullend aardgas en waterstof	
	2050	Afname energieverbruik door wegvallen gaswinning, volledige elektrificatie	Afname energieverbruik door wegvallen gaswinning, sterke elektrificatie, aanvullend waterstof	Afname energieverbruik door wegvallen gaswinning, elektrificatie, aanvullend groen gas	Afname energieverbruik door wegvallen gaswinning, elektrificatie, aanvullend waterstof

* Voor deze sectoren heeft Kalavasta sectorspecifieke transitiepaden opgesteld en daarna heeft een vertaalslag plaatsgevonden om de resulterende energievraag in het ETM in te stellen. Aluminium en Overige metalen zijn in het ETM aan de 'overige industrie' toegevoegd.

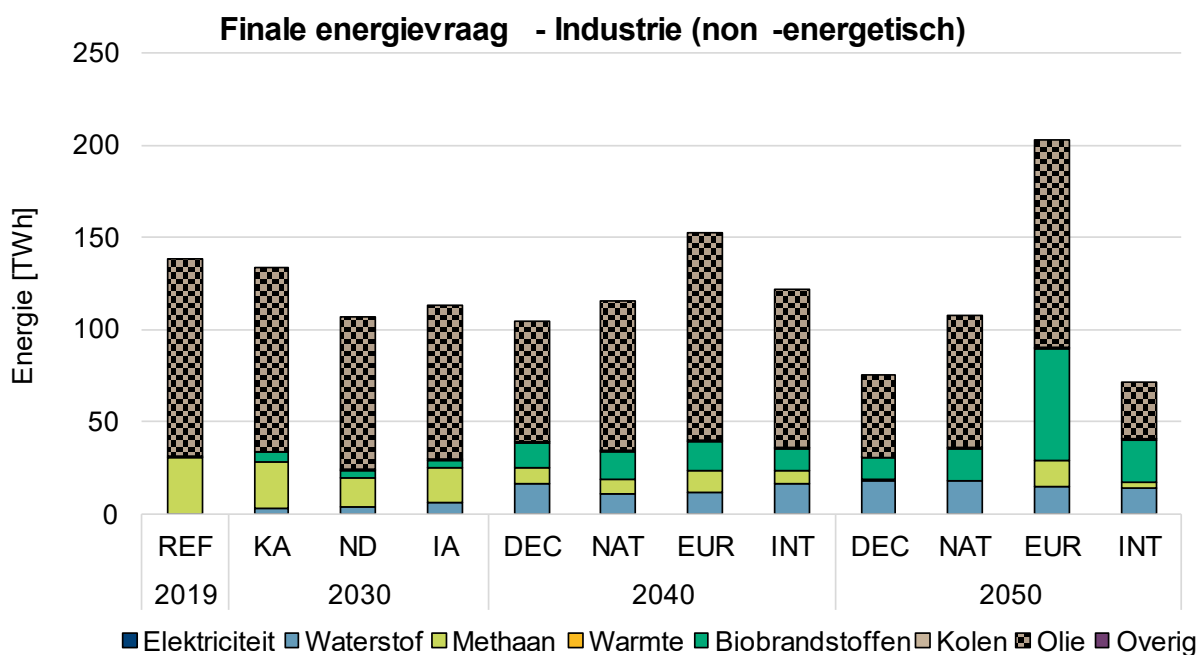
In de Figuur 60 en figuur 61 wordt de energie- en grondstoffenvraag van de industrie als geheel getoond. De totale energievraag van de industrie daalt licht tot 2040 en hangt in 2050 sterk af van het scenario. De energievraag in het scenario Nationaal Leiderschap is bijna tweemaal zo groot als die in het scenario Decentrale Initiatieven en het scenario Internationale Handel. Dit komt doordat in de scenario's Decentrale Initiatieven en Internationale Handel enkele industrieën resp. productieprocessen naar elders verplaatsen. In de scenario's Nationaal Leiderschap en Europese Integratie wordt in Nederland productie van synthetische brand- en grondstoffen verondersteld.

In de energievraag valt op dat de verschuiving van fossiele dragers (methaan, olie en kolen) naar duurzame dragers (elektriciteit en waterstof) al in 2030 is gestart. Kolen en olie worden sneller vervangen dan methaan, dat ook in de meeste 2050-scenario's nog wordt ingezet (grotendeels als groen gas).

In het grondstoffengebruik zien we dat waterstof en biomassa het gebruik van aardgas vervangen. Olie als grondstof wordt nog op grote schaal ingezet in 2050, met name in het scenario Europese Integratie.



Figuur 60. Finale energie vraag – industrie (energetisch en non-energetisch). De productie van SAF is niet gemodelleerd in het ETM en de bijbehorende energievraag is niet opgenomen in deze figuur.



Figuur 61. Finale energie vraag - industrie (non-energetisch). De productie van SAF is niet gemodelleerd in het ETM en de bijbehorende grondstofvraag niet opgenomen in deze figuur.

5.3.4 Resultaten per industriële sector

Hierna volgen de grafieken van het verwachte energiegebruik per industriële sector.

5.3.4.1 Staalindustrie

De staalindustrie ziet er in de vier scenario's vrij verschillend uit. In alle scenario's dalen de energievraag en de emissies echter sterk. De elektriciteits- en waterstofvraag neemt in alle scenario's toe, maar in het scenario Europese Integratie is ook sprake van fossiele-grondstoffengebruik in combinatie met CO₂-afvang en in het scenario Internationale Handel daalt de energievraag in Nederland sterk door de import van halffabricaten.

Vergelijking met vorige editie

Ten opzichte van de eerste editie van I13050 zijn nu nieuwere emissiereducerende technologieën meegenomen, waarbij met name directe ijzerertsreductie van belang is. Hierdoor ontstaat (ten koste van de warmtevraag) een grote waterstofvraag in alle scenario's, die niet bestond in de vorige editie. Ook kunnen nu reeds gereduceerde ijzerbriketten worden geïmporteerd, waardoor de energievraag in het scenario Internationale Handel veel lager is geworden.

Decentrale Initiatieven

In dit scenario schakelt de sector over op waterstof als grondstof om ijzererts te reduceren (in plaats van kolen) en neemt daarnaast de elektriciteitsvraag toe. Er zijn vrijwel geen fossiele inputs meer.

Nationaal Leiderschap

Waterstof beslaat het voornaamste deel van de energievraag van de staalsector in dit scenario. Daarnaast is de elektriciteitsvraag hier het hoogst van alle vier de scenario's. Het gebruik van fossiele inputs is zeer sterk teruggebracht.

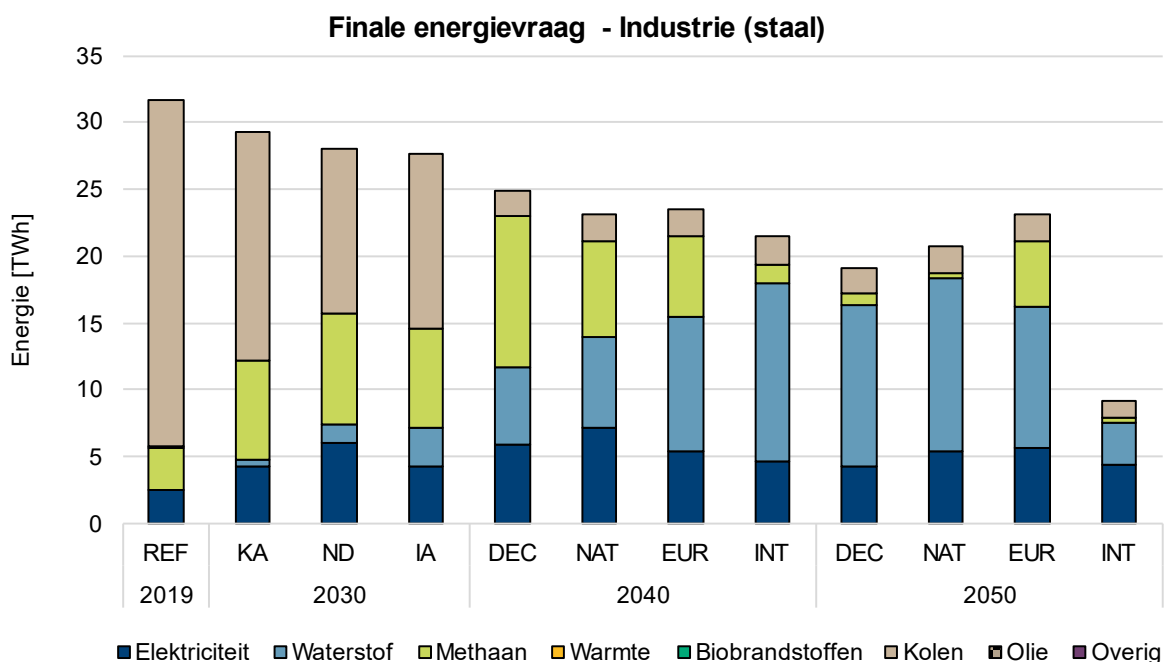
Europese Integratie

In dit scenario wordt ingezet op een mix van aardgas en waterstof als grondstof voor ijzerertsreductie. Emissies worden daarbij afgevangen. Verder vindt er ook redelijke elektrificatie downstream plaats. Dit is het enige scenario waarbij aardgas als grondstof in de staalsector ingezet wordt.

Internationale Handel

De energievraag neemt het sterkst af in dit scenario, vanwege een grote import van halffabricaten. Omdat de eindproductie hoofdzakelijk in Nederland plaatsvindt, is elektriciteit het grootst in de energiemix. Daarnaast is er nog een redelijke waterstofvraag.

Omtrent 2030 wordt eerst één van de twee hoogovens vervangen door een DRI- ('directly reduced iron') installatie met een Electric Arc Furnace (EAF). Deze DRI-unit heeft een mix van aardgas en waterstof als grondstof, waarbij het aandeel waterstof in de mix met de tijd toeneemt. Afhankelijk van de snelheid van de transitie is in 2035 of 2040 de tweede en laatste hoogoven ook omgezet naar een DRI-unit gecombineerd met een EAF, waardoor waterstof het grootste aandeel in de energiemix krijgt. Voor het scenario Internationale Handel wordt deze tweede hoogoven echter niet omgezet, omdat hier overgeschakeld wordt op de import van halffabricaten waarbij het DRI-proces in het buitenland plaatsvindt. De EAF wordt nog ingezet voor de vervaardiging van eindproducten.



Figuur 62 - Finale vraag - industrie (staal)

5.3.4.2 Aluminium

Er zijn diverse methodes om aluminium te produceren, die verschillen in efficiëntie en met name in elektriciteitsvraag. Momenteel wordt aluminium geproduceerd met elektrolyse en een deel gerecycled met een smeltoven, wat elektriciteit en aardgas vraagt (zie Figuur 63). In de toekomst kunnen er efficiëntere methodes worden ingezet om primair aluminium te produceren en kan er meer aluminium worden gerecycled. De warmtevraag van de smeltoven wordt nu nog ingevuld met aardgas. Dit kan in de toekomst worden vervangen door groen gas en waterstof. De ontwikkelde transitiepaden sloten niet goed aan bij de mogelijke instellingen in

de aluminiumsector in het ETM, omdat aardgas niet gesubstitueerd kan worden. Daarom is de verwachte energievraag voor 2040 en 2050 opgeteld bij de overige industrie en verdwijnt deze uit de aluminiumsector.

Vergelijking met vorige editie

Ten opzichte van de eerste editie van II3050 is er nu volledig ingezet op recycling van aluminium en wordt er geen primair aluminium meer geproduceerd in 2050. De elektriciteitsvraag neemt hierdoor sterk af en de warmtevraag neemt toe. Deze wordt per scenario anders ingevuld.

Decentrale Initiatieven

In dit scenario is de smeltoven volledig geëlektrificeerd.

Nationaal Leiderschap

In dit scenario vindt er verregaande elektrificatie plaats, aangevuld met waterstof.

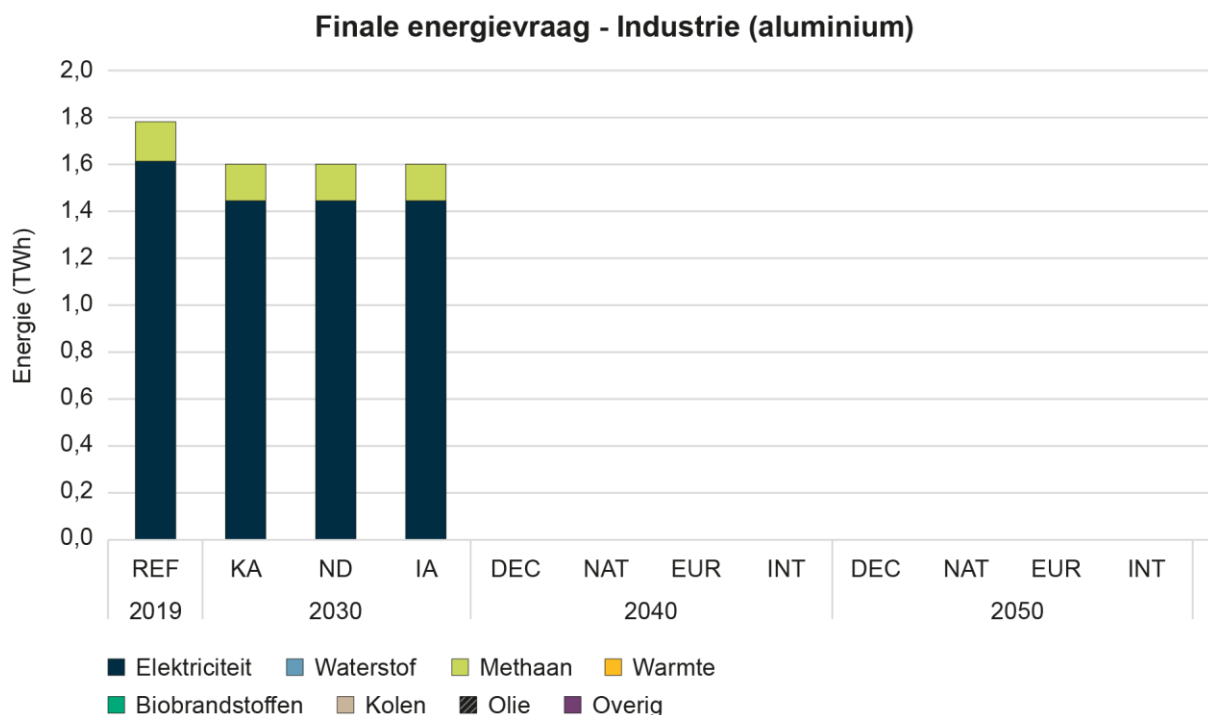
Europese Integratie

In dit scenario vindt er gedeeltelijk elektrificatie plaats, aangevuld met groen gas.

Internationale Handel

In dit scenario vindt er gedeeltelijk elektrificatie plaats, aangevuld met waterstof.

In de jaren tot 2050 vindt eerst een verschuiving plaats naar efficiëntere methodes om primair aluminium te produceren en neemt het aandeel gerecycled aluminium geleidelijk toe. Het gebruik van aardgas verschuift naar groen gas en waterstof.



Figuur 63. Deze figuur toont de energievraag van de aluminiumsector. N.B. de energievraag van aluminium is voor 2040 en 2050 toegevoegd aan 'overige industrie'.

5.3.4.3 Overige metalen

Binnen de sector 'overige metalen' vallen verschillende processen, zoals de secundaire staalproductie, de productie van zink via elektrolyse of (ijzer)gieterij. De sector kent een grote elektriciteitsvraag voor elektrolyse en mechanische processen en daarnaast een aardgasvraag voor het verwarmen onder hoge temperatuur (zie Figuur 64). Dit laatste kan in 2050 worden gesubstitueerd door groen gas of waterstof of door het inzetten van e-boilers. De ontwikkelde transitiepaden sloten niet goed aan bij de mogelijke instellingen in de sector 'overige metalen' in het ETM, omdat aardgas niet gesubstitueerd kan worden. Daarom is de verwachte energievraag voor 2040 en 2050 opgeteld bij de overige industrie en verdwijnt deze uit de sector 'overige metalen'.

Vergelijking met vorige editie

In de vorige editie is het effect van krimp (Decentrale Initiatieven) en groei (Europese Integratie en Internationale Handel) meegenomen. Dat is in deze editie achterwege gelaten. In de vorige editie is de energievraag verdeeld tussen elektriciteit (70-80%) en waterstof (20-30%). In deze editie is verregaande elektrificatie meegenomen, net als de inzet van groen gas.

Decentrale Initiatieven

In dit scenario wordt er volledig geëlektrificeerd.

Nationaal Leiderschap

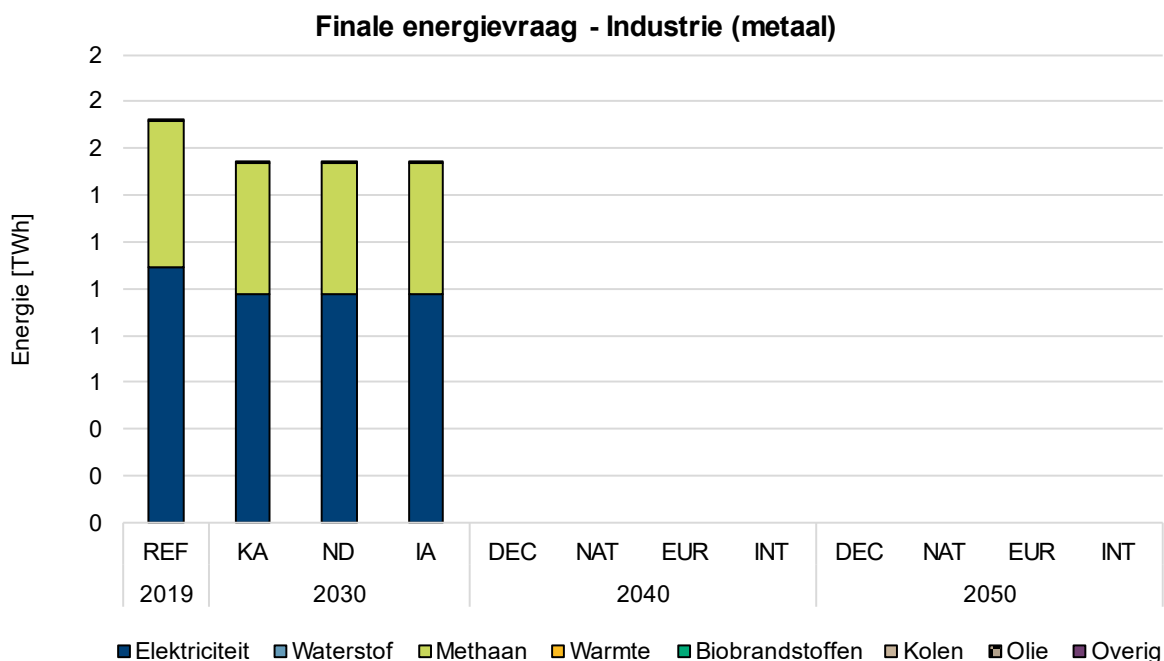
In dit scenario vindt er verregaande elektrificatie plaats, aangevuld met waterstof.

Europese Integratie

In dit scenario vindt er gedeeltelijk elektrificatie plaats, aangevuld met groen gas.

Internationale Handel

In dit scenario vindt er gedeeltelijk elektrificatie plaats, aangevuld met waterstof. In de jaren tot 2050 wordt de warmtevraag nog deels ingevuld met aardgas.



Figuur 64. Deze figuur toont de energievraag van de sector 'overige metalen'. N.B. de energievraag van deze sector is voor 2040 en 2050 toegevoegd aan de 'overige industrie'.

5.3.4.4 Raffinaderijen

In alle vier de scenario's zetten de raffinaderijen sterk in op het gebruik van blauwe waterstof en daalt de doorzet van fossiele olie tot 30 à 70% van de huidige productieniveaus. Dit betekent dat de scope 1-emissies sterk dalen, maar de scope 3-emissies niet naar nul gaan. In twee scenario's gaan de huidige raffinaderijen synthetische brandstoffen produceren, wat leidt tot een forse verhoging van de energievraag.

Vergelijking met vorige editie

Ten opzichte van de eerste editie van I13050 is de energievraag in alle scenario's fors hoger (behalve het scenario Internationale Handel waar de toename beperkt is). Daarbij is elektriciteit in twee scenario's een belangrijke energiedrager in de energiemix geworden. Dat geldt voor de twee scenario's waar op grote schaal synthetische brandstoffen en grondstoffen geproduceerd worden. Verder valt op dat er in alle scenario's Decentrale Initiatieven en Nationaal Leiderschap nog een aardoliedoorzet van minstens 30% van het huidige volume is, waar dat bij de vorige editie in de scenario's volledig verdween.

Decentrale Initiatieven

In dit scenario vindt de grootste krimp plaats en gaan de bestaande raffinaderijen geen synthetische brandstoffen produceren. De energievraag wordt voor het overgrote deel ingevuld door waterstof (als brandstof), aangevuld met een klein deel elektriciteit.

Nationaal Leiderschap

Dit is één van de twee scenario's waarbij de bestaande raffinaderijen besluiten om synthetische brandstoffen te produceren. Dit geeft de grootste waterstofvraag (voor een belangrijk deel grondstof) en ook elektriciteitsvraag (voor de energievraag) van alle vier de scenario's voor de raffinaderijen. Indien in dit productieproces niet gekozen wordt voor CO₂-elektrolyse maar voor een 'reverse water gas shift', valt de elektriciteitsvraag veel lager en de waterstofvraag veel hoger uit.

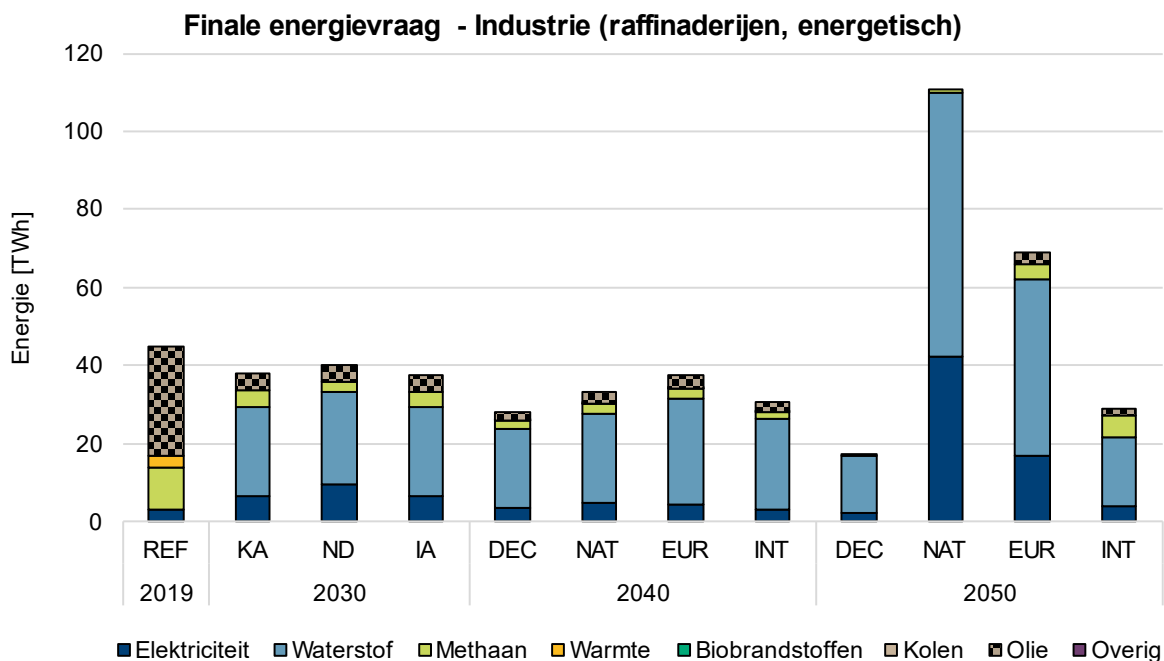
Europese Integratie

Ook in dit scenario domineert een aanzienlijke productie van synthetische brandstoffen de energiemix. Voor de fossiele-brandstoffen- en grondstoffenproductie wordt niet alleen waterstof maar ook methaan uit restgassen en groen gas ingezet. Daarbij worden de emissies grotendeels afgevangen.

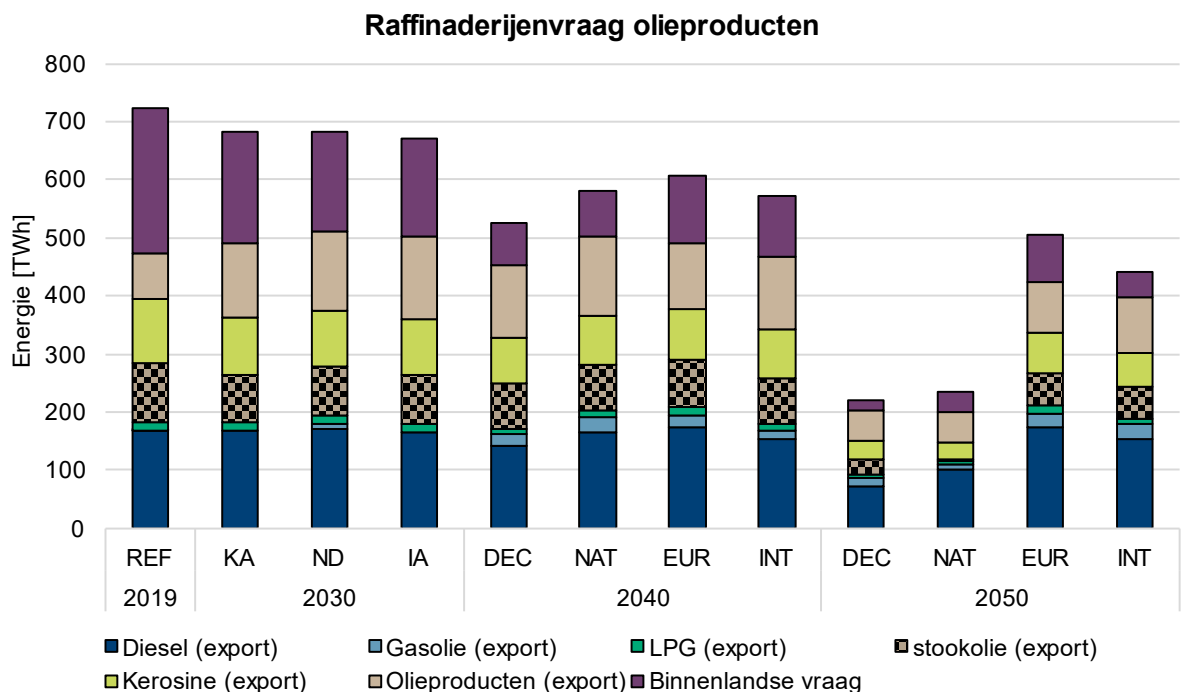
Internationale Handel

In dit scenario worden synthetische producten verhandeld, maar niet geproduceerd door de raffinaderijen in Nederland. De krimp is beperkter dan in sommige andere scenario's en de fossiele producten worden afgezet op de wereldmarkt, veelal buiten Europa. De energievraag wordt hoofdzakelijk ingevuld met waterstof, aangevuld met elektriciteit en methaan uit restgassen en groen gas, waarbij de emissies grotendeels afgevangen worden.

Voor de raffinagesector verandert de energievoorziening al sterk tussen nu en 2030. Waar nu hoofdzakelijk restgassen uit aardolie ingezet worden, worden deze in 2030 voor een belangrijk deel gebruikt om waterstof te produceren (waarbij de emissies afgevangen en opgeslagen worden). De verschuiving in de energiemix is zeer groot. Ook vindt er al enige vraagreductie plaats. In de jaren tot 2035 en 2040 zet dit door, waarbij de scenario's veel op elkaar lijken en hoofdzakelijk verschillen in hoe snel de vraagreductie plaatsvindt. Na 2040 worden de verschillen tussen de scenario's echter beduidend groter, hoofdzakelijk omdat in twee scenario's tussen 2040 en 2050 de productie van synthetische brandstoffen opgeschaald wordt.



Figuur 65. Finale energievraag - industrie (raffinaderijen, energetisch). Figuur is inclusief waterstofvraag voor synthetische brandstoffen productie, exclusief biomassagebruik voor biobrandstoffen en ook exclusief olie voor fossiele brandstoffen productie (voor met name export). Zie voor het gebruik van olie onderstaande figuur.



Figuur 66 - Finale vraag van raffinaderijen naar olie producten

5.3.4.5 Kunstmest

De kunstmestsector verwacht in 2050 binnen het productportfolio te schuiven en produceert op grote(re) schaal ammoniak, dat onder andere wordt ingezet als scheepsbrandstof en relatief minder als kunstmest. De invulling van de energievraag in de scenario's lijkt sterk op elkaar. In grote lijnen is er een verschuiving van aardgas (als grondstof en als brandstof) voor de productie van waterstof naar de productie van waterstof door middel van elektrolyse of het inkopen van waterstof. In alle scenario's verwacht de sector waterstof uit Nederland of internationaal in te kopen.

Vergelijking met vorige editie

In de vorige editie van II3050 liep de energie- en grondstofvraag sterk op van het scenario Decentrale Initiatieven naar het scenario Internationale Handel, voor een belangrijk deel vanwege volumereductie. Bij deze editie is de grondstofvraag (en daarmee productie) in de scenario's behoorlijk vergelijkbaar en fors hoger dan die in de vorige editie. Hetzelfde geldt voor de energievraag, waarbij zich echter wel afwijkingen voordoen. Zo produceert de industrie in het scenario Decentrale Initiatieven zelf veel waterstof door middel van elektrolyse en wordt in het scenario Internationale Handel voor een deel ammoniak als halffabricaat ingekocht.

Decentrale Initiatieven

In dit scenario krimpt de sector als geheel licht en blijft de finale energievraag ongeveer gelijk (lichte toename). Enerzijds daalt het kunstmestgebruik in Nederland, maar anderzijds wordt er extra ammoniak geproduceerd. De energievraag wordt hoofdzakelijk ingevuld met elektriciteit, die gebruikt wordt om lokaal waterstof te produceren, als aanvulling op ingekochte waterstof. Deze waterstof wordt vervolgens als grondstof en als brandstof voor het Haber-Bosch-productieproces van ammoniak ingezet.

Nationaal Leiderschap

De totale productie blijft in dit scenario redelijk gelijk. Toch vindt hier de grootste krimp van de energievraag plaats, omdat vrijwel alle benodigde waterstof wordt ingekocht en elders (in Nederland) wordt geproduceerd. Daarnaast is hier een verschuiving zichtbaar richting elektriciteit als energiedrager voor overige processen.

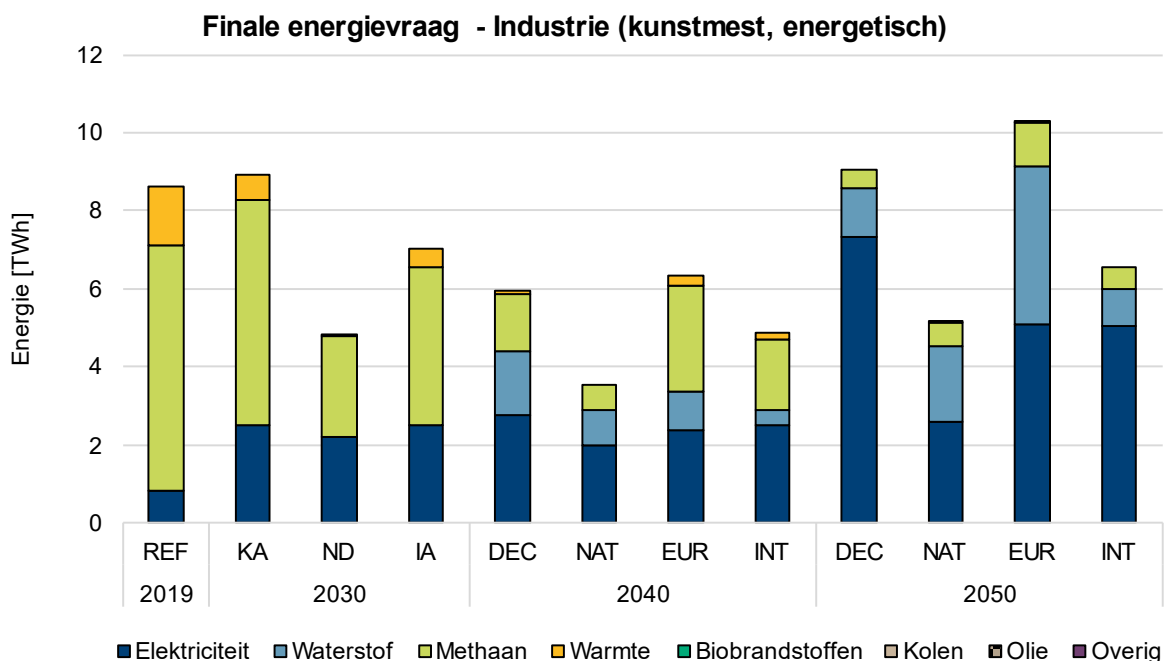
Europese Integratie

In dit scenario neemt de productie toe, onder andere door een hogere inzet van ammoniak als scheepsbrandstof. Dit is het enige scenario waar nog waterstof wordt geproduceerd met een 'steam methane reformer' in combinatie met CO₂-afvang. De steam methane reformer wordt voor een groot deel met biogene methaan gevuld. Daarnaast wordt een groot deel van de waterstof ingekocht.

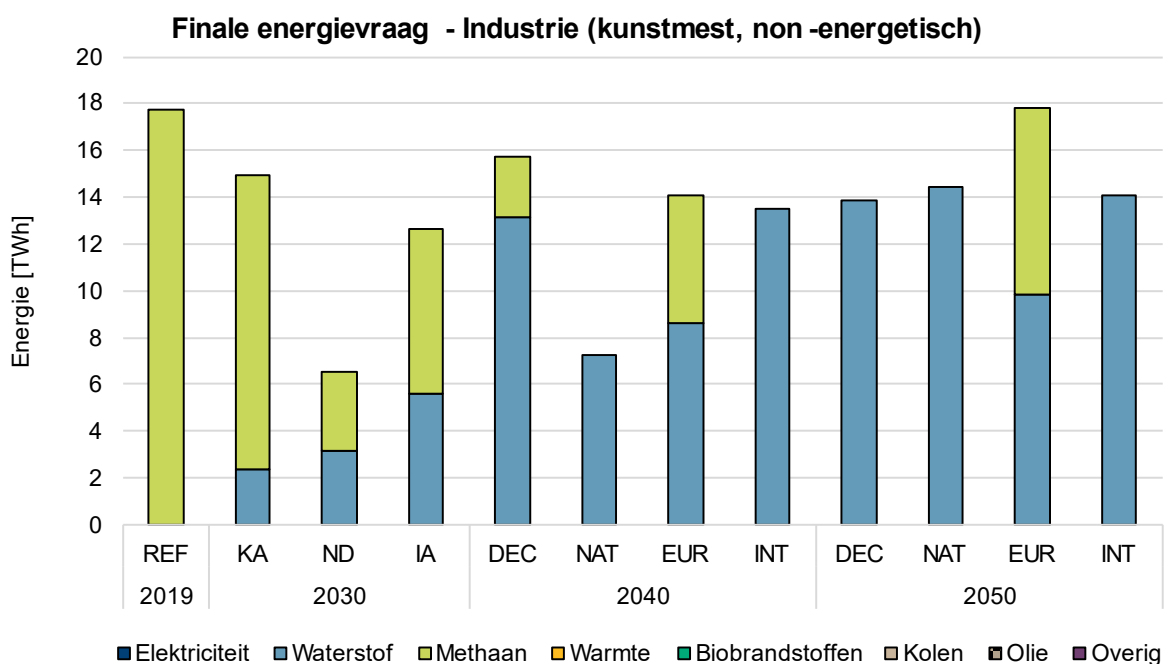
Internationale Handel

In dit scenario wordt ammoniak op de grootste schaal geïmporteerd. Daarnaast vindt ook productie in Nederland plaats. De benodigde waterstof wordt deels lokaal geproduceerd door middel van elektrolyse, maar de meeste waterstof wordt door de kunstmestsector ingekocht en elders (in Nederland) geproduceerd.

De energievraag in de kunstmestsector kent een opvallend verloop. In de eerste plaats daalt deze al sterk richting 2030 en verder tot 2040, omdat al vanaf 2030 de import van ammoniak wordt voorzien en deze vervolgens toeneemt. Daarbij daalt het aandeel aardgas en stijgt aandeel elektriciteit. Tevens wordt een beperkte maar toenemende hoeveelheid waterstof ingekocht. Na 2040 neemt echter in alle scenario's de energievraag toe, omdat er minder ammoniak wordt geïmporteerd en meer lokaal wordt geproduceerd (behalve in het scenario Internationale Handel). Er wordt meer waterstof ingekocht en elektriciteit wordt uiteindelijk dominant in de energievraag. Dit heeft voor een belangrijk deel te maken met de rol van ammoniak als scheepsbrandstof. Uiteindelijk lijken de vier scenario's qua invulling van de energievraag op elkaar, maar verschillen ze met name qua verhouding waterstofproductie via elektrolyse, steam methane reforming of inkoop.



Figuur 67. De energievraag van de kunstmestsector per scenario. NB: wanneer de kunstmestsector waterstof inkoop, is de energievraag voor de productie van die waterstof niet in deze figuur opgenomen.



Figuur 68. Finale vraag industrie (kunstmest, non-energetisch)

5.3.4.6 Chemie

In de rest van de chemische industrie vindt qua energievraag met name een sterke tot zeer sterke elektrificatie plaats, met in sommige scenario's een grote rol voor waterstof. Een substantieel deel van de vraag komt van de stoomkrakers, die in veel scenario's elektrificeren. De energievraag is echter in de scenario's Nationaal Leiderschap en Europese Integratie niet veel lager dan in 2019. Binnen het niet-energetische gebruik van de chemie zien we vanaf 2030 een toename in het gebruik van biogene en gerecyclede moleculen (zie Figuur 70, omdat het merendeel van de gerecyclede moleculen een fossiele oorsprong heeft, wordt dit gecategoriseerd als olie).

Decentrale Initiatieven

In dit scenario daalt de energievraag het sterkst en wordt deze vrijwel volledig ingevuld door elektriciteit. Ook de grondstofvraag daalt hier het hardst, wat sterk verband houdt met een krimp aan de kant van de stoomkrakers. De resterende grondstofvraag wordt voor ruim de helft ingevuld met biomassa.

Nationaal Leiderschap

Ook in dit scenario speelt elektriciteit een grote rol, met daarnaast een beperkt aandeel waterstof. De grondstofvraag ligt hier ook lager vanwege een krimp van de sector.

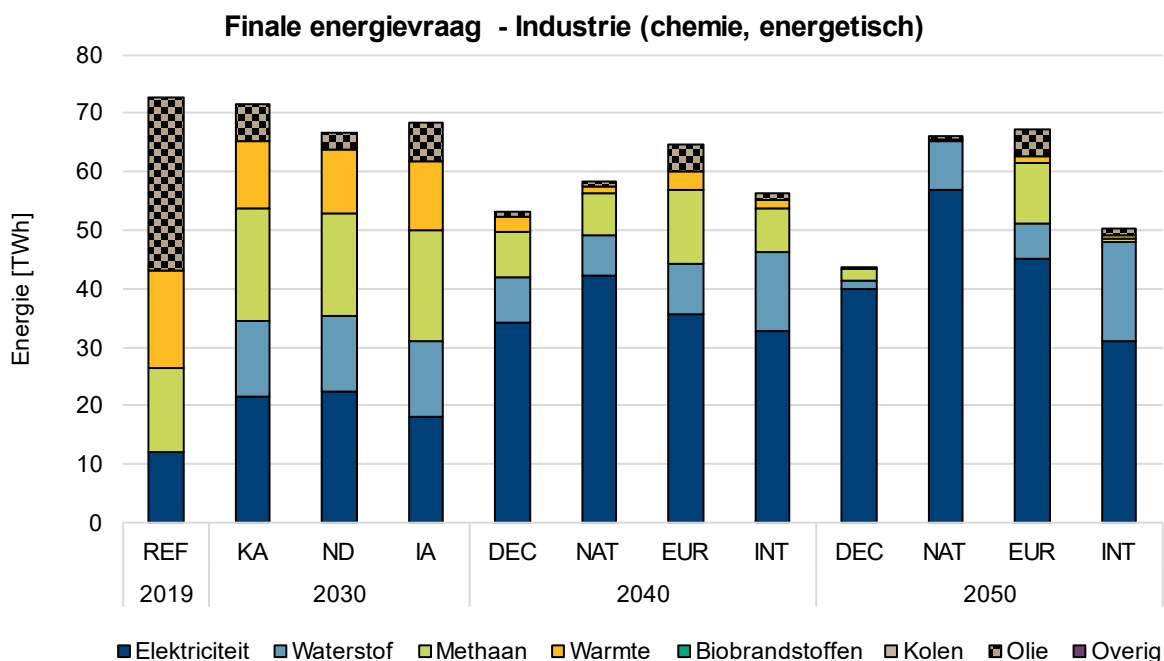
Europese Integratie

In dit scenario is de grondstofvraag hoger dan in het referentiejaar en bestaat deze voor ongeveer de helft uit biomassa en voor de andere helft uit oliestromen. De grote toename in grondstofvraag komt deels door een energieverlies, wanneer biomassa wordt gebruikt om bio-nafta (plasticgrondstof) te produceren. Elektriciteit en waterstof vormen net als in andere scenario's een groot deel van de energievraag, maar in dit scenario is ook een rol weggelegd voor methaan met CO₂-afvang.

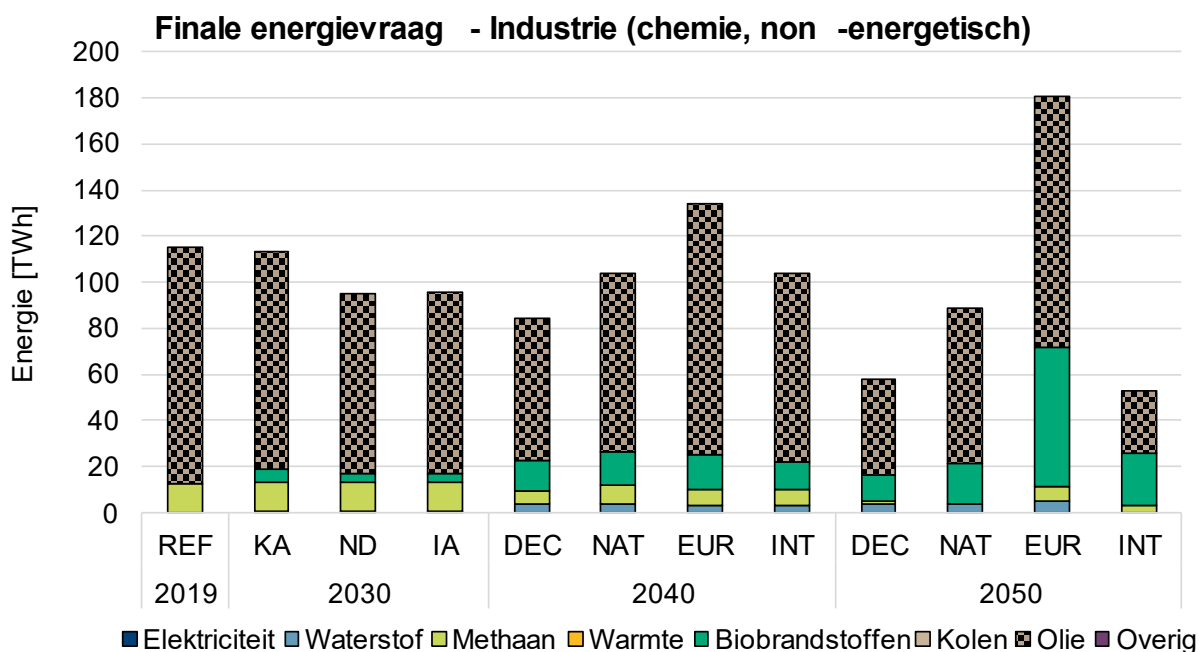
Internationale Handel

In dit scenario is elektriciteit dominant in de energievraag, maar ook waterstof speelt een redelijke rol. De grondstofvraag is vrij laag vanwege een krimp van de sector, alhoewel niet zo laag als in de scenario's Decentrale Initiatieven en Nationaal Leiderschap.

Zowel de energie- als de grondstofvraag vertoont een dalende trend (met uitzondering van het scenario Europese Integratie), waarbij de grondstofvraag wel veel sterker daalt. Opvallend in het verloop is dat er reeds in 2030 een behoorlijke waterstofvraag is, maar dat deze niet verder toeneemt en soms zelfs afneemt richting 2050. Het aandeel methaan daalt verder en het aandeel elektriciteit stijgt behoorlijk. Qua grondstoffen neemt de rol van aardolie af en groeit de rol van biomassa, maar is de tendens een sterke daling.



Figuur 69. Finale energievraag chemische industrie (energetisch) in TWh



Figuur 70. Finale energievraag chemische industrie (niet-energetisch), in TWh. Hierbij is een deel van de niet-energetische vraag naar olie vanaf 2030 ingevuld met pyrolyseolie, gemaakt van gerecycled plastic. Het aandeel pyrolyseolie vormt in 2030 een klein deel van het oliegebruik (10-15%), en neemt toe tot een aanzienlijk deel van het oliegebruik in 2050 (45-80%). Bij niet-energetisch gebruik van biogene grondstoffen gaat energie verloren bij het produceren van bio-nafta (grondstof voor de stoomkrakers). Daarom stijgt het totaalvolume biogene grondstoffen nodig om in de vraag te voorzien.

5.3.4.7 Voedsel

De voedselindustrie kenmerkt zich met name door toepassing van lagere-temperatuurwarmte (<200°C), die nu al deels en op termijn op grote schaal door warmtepompen kan worden ingevuld. Dit zorgt naast een sterke elektrificatie voor een efficiënter gebruik van energie, dus een afname van de totale energievraag. Daarnaast worden ook hybride boilers ingezet.

Decentrale Initiatieven

In dit scenario wordt volledig geëlektrificeerd.

Nationaal Leiderschap

In dit scenario is er naast vergaande elektrificatie ook een klein deel inzet van waterstof in hybride boilers.

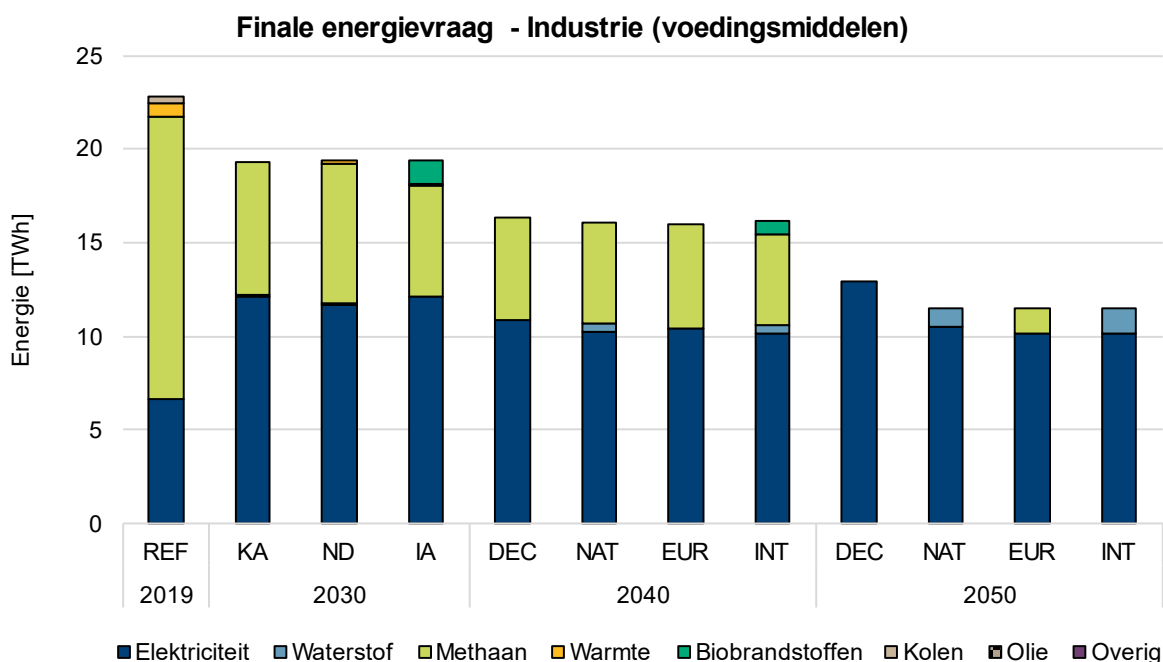
Europese Integratie

In dit scenario is er naast vergaande elektrificatie ook een klein deel inzet van aardgas in hybride boilers.

Internationale Handel

In dit scenario is er naast vergaande elektrificatie ook een klein deel inzet van waterstof in hybride boilers.

In de tussenliggende jaren zijn de belangrijkste ontwikkelingen in deze sector terug te zien in de energievraag. Aardgas wordt daarbij geleidelijk aan vervangen door een kleiner volume elektriciteit door de inzet van warmtepompen.



Figuur 71. Finale energievraag voedingsmiddelenindustrie, in TWh

5.3.4.8 Papier

De papierindustrie kenmerkt zich met name door toepassing van lagere-temperatuurwarmte (<200°C), die nu al deels en op termijn op grote schaal door warmtepompen kan worden ingevuld. Dit zorgt naast een sterke

elektrificatie voor een efficiënter gebruik van energie, dus een afname van de totale energievraag. Daarnaast worden ook hybride boilers ingezet.

Decentrale Initiatieven

In dit scenario wordt volledig geëlektrificeerd.

Nationaal Leiderschap

In dit scenario is er naast vergaande elektrificatie ook een klein deel inzet van waterstof in hybride boilers.

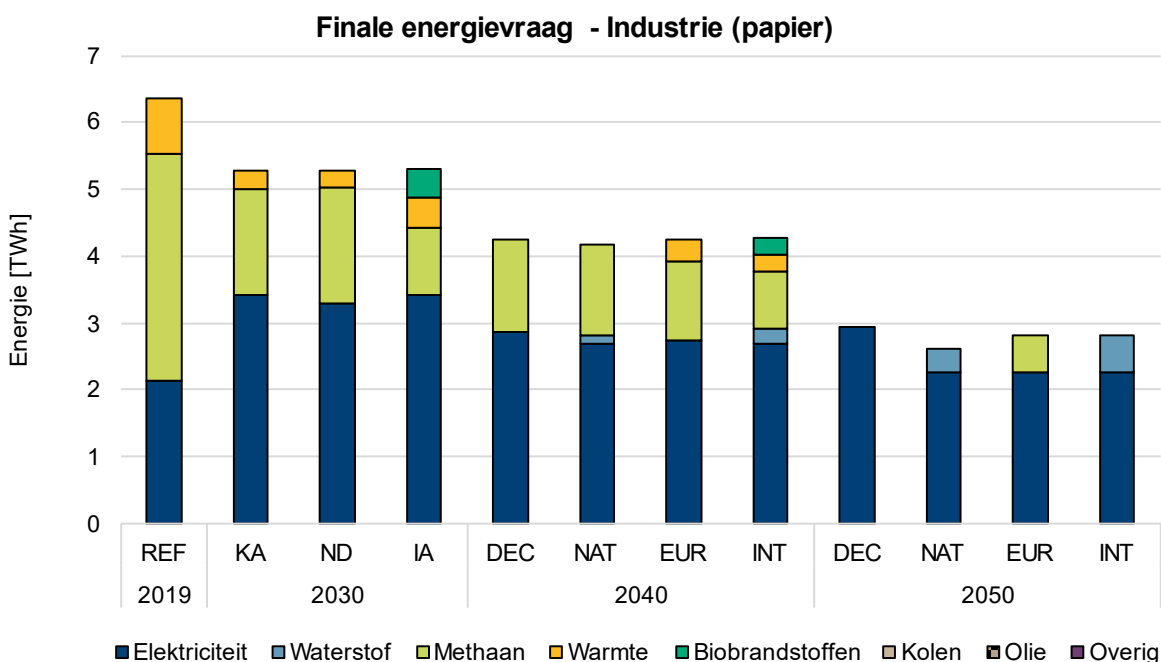
Europese Integratie

In dit scenario is er naast vergaande elektrificatie ook een klein deel inzet van aardgas in hybride boilers.

Internationale Handel

In dit scenario is er naast vergaande elektrificatie ook een klein deel inzet van waterstof in hybride boilers.

In de tussenliggende jaren zijn de belangrijkste ontwikkelingen in deze sector terug te zien in de energievraag. Aardgas wordt daarbij geleidelijk aan vervangen door een kleiner volume elektriciteit door de inzet van warmtepompen.



Figuur 72. Finale energievraag papierindustrie, in TWh

5.3.4.9 Datacenters/ ICT

Een betrouwbare energievoorziening, een voordelige geografische koppeling van Nederland aan de wereldwijde informatie-infrastructuur en een algeheel gunstig vestigingsklimaat hebben ervoor gezorgd dat in ons land een groot aantal datacenters gevestigd is. Deze leveren verschillende diensten waaronder cloud-computing, gegevensopslag en internetconnectiviteit. Bedrijven als Google, Microsoft en Amazon hebben datacenters in Nederland, evenals vele kleinere aanbieders. Gedreven door een toenemende behoefte aan en verdere concentratie van ICT-diensten, wordt in de toekomst een verdere groei van het aantal datacenters in Nederland verwacht. Die toename wordt niet alleen gedreven door een groeiende behoefte aan ICT-diensten, maar ook door

concentratie van datacenterservices in colocation-datacenters. Bedrijven die hun datacenters *inhouse* hebben, gaan deze diensten outsourcen bij colocation-datacenters. Door de schaal en expertise van deze colocation-datacenters is opslag goedkoper en efficiënter.

Datacenters zijn er in verschillende soorten en maten, en worden op verschillende netvlakken zowel op de regionale als landelijke stroomnetten aangesloten. Er worden twee soorten datacenters onderscheiden:

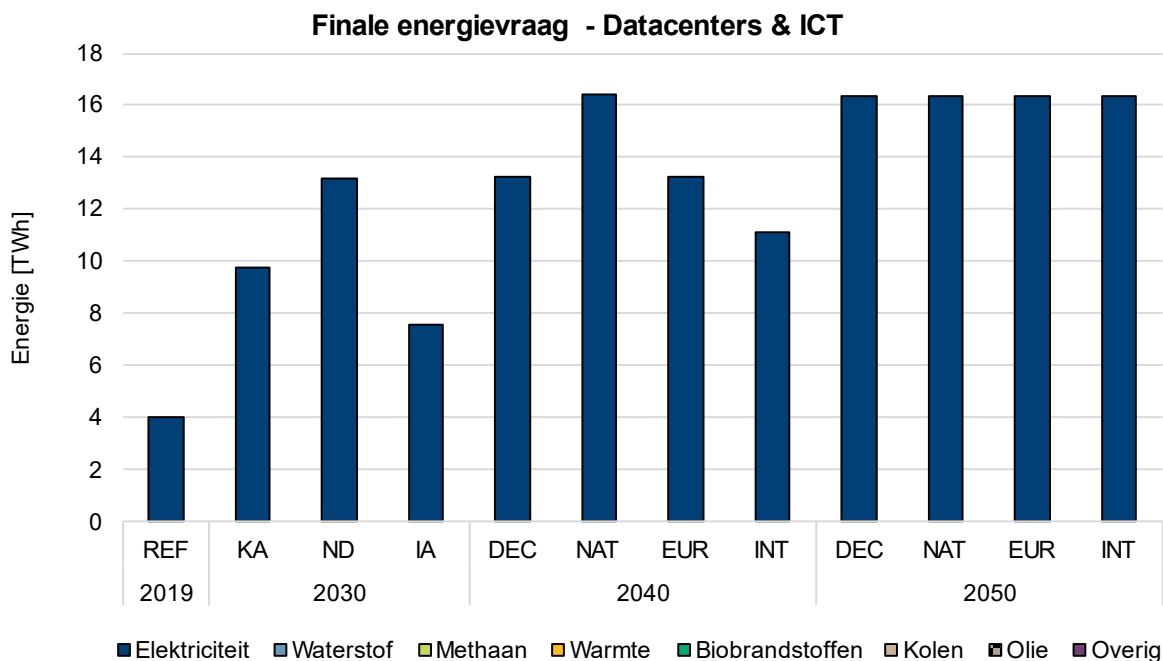
1. (Geclusterde) decentrale colocation-datacenters die ICT-diensten voor een groot aantal verschillende klanten aanbieden en met een aansluitvermogen tot maximaal zo'n 100 MW.
2. 'Hyperscale datacenters' met in de regel maar één klant en een aansluitvermogen van soms honderden MW.

Het elektriciteitsgebruik van datacenters wordt door een aantal factoren bepaald. Dit is als volgt meegenomen in alle scenario's:

- Vertrekpunt voor alle scenario's zijn de reeds bestaande datacenters in Nederland en bekende toekomstige datacenterprojecten volgens klantendata van de netbeheerders. Uit de klantenaanvragen blijkt per project het geplande maximale aansluitvermogen (gecontracteerd vermogen), jaar van inbedrijfname en de aansluitlocatie. Per project is een eerste inschatting gemaakt van de realisatiekansen.
- Omdat het daadwerkelijk gevraagde vermogen van datacenters in de praktijk meestal duidelijk lager is dan het gecontracteerde vermogen (bijvoorbeeld omdat het hele vermogen pas later in de tijd gerealiseerd wordt of om de mogelijkheid tot uitbreiding op een bestaande locatie open te houden), wordt in de scenario's bij het inschatten van de toekomstige elektrische vraag uitgegaan van een lager vermogen (piekvraagvermogen). Op basis van ervaringen uit reeds gerealiseerde projecten gaan we ervan uit dat het piekvraagvermogen gemiddeld maar 50% van het gecontracteerde vermogen uitmaakt.
- Omdat datacenters niet continu in alle uren van het jaar het piekvermogen vragen, wordt verder een gemiddelde benuttingsfactor ('load factor') toegepast. Voor colocation-datacenters gaan we op basis van de huidige observaties uit van gemiddeld 50% en voor grotere hyperscale datacenters van gemiddeld 70% benutting ten opzichte van het piekvermogen. In totaal resulteert uit de genoemde aannames een effectieve benutting van 30-40% ten opzichte van het gecontracteerde vermogen.⁴⁹ Dit levert de grondslag voor het bepalen van de totale elektriciteitsvraag in de scenario's.
- In de afgelopen jaren zijn er flinke technische efficiëntieverbeteringen⁵⁰ gerealiseerd in de datacentersector, zodat de elektrische vraag ondanks de forse toename aan datadiensten niet in dezelfde mate is toegenomen. In hoeverre deze trend zich technisch en economisch doorzet, is onzeker. Daarom gaan we in de scenario's uit van een besparingspotentieel van 15%.

⁴⁹ Dutch Datacenter Association (DDA), State of the Dutch datacenters.

⁵⁰ Bijvoorbeeld zuiniger processoren of slimmer gebruik van koelinstallaties, zie <https://www.iea.org/reports/data-centres-and-data-transmission-networks>



Figuur 73. Finale energievraag datacenters & ICT sector, in TWh

Terwijl de elektriciteitsvraag vanuit datacenters een grote impact kan hebben op de behoefte aan elektrische netinfrastructuur, is de daadwerkelijke realisatie van potentiële projecten onzeker en worden om die reden verschillende aannames gemaakt in de scenario's in 2030. Deze spiegelen vooral verschillende maatschappelijke keuzes en prioritering van datacenterprojecten in de tijd t.o.v. de noodzakelijke verduurzaming van de andere vraagsectoren in Nederland. In 2050 wordt in alle scenario's uitgegaan van hetzelfde niveau aan elektrische vraag, gelijk aan de eerste editie van I13050. De cijfers voor 2040 zijn een interpolatie. De toekomstige vraag is groot maar ook zeer onzeker en naar verwachting zullen de vragende partijen grotendeels bestaan uit nieuwe datacenters. Echter is het niet bekend waar of in welke verhouding van groot/klein deze aanwezig zullen zijn. Daarom is er gekozen om geen vraagbandbreedte aan te houden die de scenario's een richting op sturen, maar allen gelijk te houden voor betere vergelijking van andere aannames.

Decentrale Initiatieven (in lijn met IP-scenario Klimaatakkoord)

Een dynamische groei van hernieuwbare elektriciteitsproductie en dalende stroomprijzen zorgen ervoor dat het aantrekkelijk blijft om ICT- en datacenterdiensten in Nederland te vestigen. Regionale overheden in Nederland (bijvoorbeeld gemeentes) bepalen echter grotendeels zelf waar nieuwe datacenters komen in lijn met hun regionale strategieën. Om zo veel mogelijk decentraal te kunnen voorzien in de elektrische vraag, wordt fors ingezet op verdere efficiëntieverbetering en wordt vooral geïnvesteerd in kleinere (decentrale) colocatie-datacenters. De groei van grote datacenters blijft relatief achter.

Nationaal Leiderschap (in lijn met IP-scenario Nationale Drijfveren)

In dit scenario stijgt de elektrische vraag het meest. Door de in vergelijking grootste hernieuwbare elektriciteitsopwekking en een voordelig vestigingsklimaat blijft de ICT-sector in Nederland dynamisch groeien. Terwijl de overheid de vestiging van zowel colocatie- als hyperscale datacenters mogelijk maakt, worden ook steeds hogere eisen gesteld aan maatregelen voor een efficiënter energiegebruik. Hierdoor blijft de elektrische vraag vrijwel constant, ondanks een verdere toename van het aantal datacenters en dataverkeer na 2035 en richting 2050.

Europese Integratie

In dit scenario wordt de vestiging van datacenters sterker Europees en minder nationaal gecoördineerd. Aangezien sectoren binnen Nederland via elektrificatie snel moeten gaan verduurzamen is de overheid in de jaren t/m 2035 vergeleken met scenario Nationaal terughoudender met het verlenen van vergunningen, waardoor investeerders hun projecten deels in andere Europese landen realiseren. Echter door de reeds bestaande infrastructuur en goede koppeling aan het internationale dataverkeer blijft Nederland datacenterpartijen aantrekken, en de beschikbaarheid van voldoende hernieuwbare elektrische opwek in de latere jaren na 2035 zorgt ervoor dat de vraag van de ICT-sector in 2040 met enige vertraging op hetzelfde niveau als in scenario Decentraal uitkomt.

Internationale Handel

De beschikbare hernieuwbare stroomproductie is schaarser dan in de andere scenario's en wordt grotendeels ingezet voor de verduurzaming van andere sectoren die vandaag de dag nog een hoge emissie uitstoot kennen. De overheid voert geen actief beleid om datacentervestigingen binnen Nederland aan te moedigen, waardoor maar een klein deel van de datacenterprojecten in Nederland gerealiseerd worden en investeerders hun projecten verplaatsen naar andere plekken in de wereld. De combinatie van een wereldwijd nog steeds groeiende behoefte aan data-gerelateerde ICT diensten en meer en meer hernieuwbare overschotten aan elektriciteitsproductie binnen Europa maken dat Nederland de eerst vertraagde ontwikkeling op de langere termijn uiteindelijk weer inhaalt en er tussen 2040 en 2050 een forse groei van de datacentervestigingen plaats vindt.

5.3.4.10 Overige industrie

Onder de overige industrie vallen zeer uiteenlopende subsectoren: gaswinning, bouw(materialen), machinerie, niet-metallische mineralen (glas, keramiek en asfalt), textiel, transportmiddelen en houtbewerking. Voor gaswinning is aangenomen dat deze sector krimpt en in 2050 niet meer bestaat. Voor de overige subsectoren is een sterke elektrificatie aangenomen, maar geen inzet van warmtepompen, omdat de meeste subsectoren werken met hoge temperaturen. In de overige industrie vindt ook niet-energetisch gebruik van olie en kolen plaats; dit zijn voornamelijk restproducten van het olieraffinageproces die worden ingezet als grondstof. Het volume van deze niet-energetische vraag schaalte mee met de omvang van de sector overige industrie. Daarnaast is in 2040 en 2050 de energievraag van aluminium (5.3.4.2) en overige metalen (5.3.4.3) in deze grafiek opgenomen.

Decentrale Initiatieven

In dit scenario wordt volledig geëlektrificeerd.

Nationaal Leiderschap

In dit scenario is er naast vergaande elektrificatie ook een klein deel inzet van waterstof.

Europese Integratie

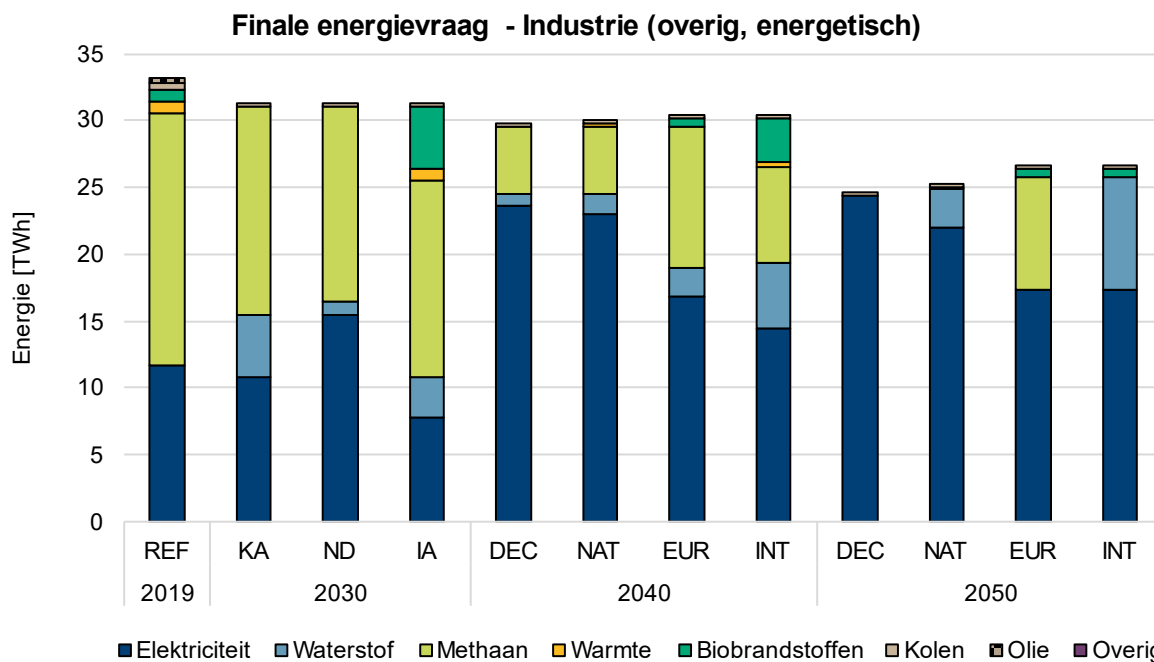
In dit scenario is er naast vergaande elektrificatie ook een deel inzet van groen gas. Verder is er een zeer geringe inzet van biomassa.

Internationale Handel

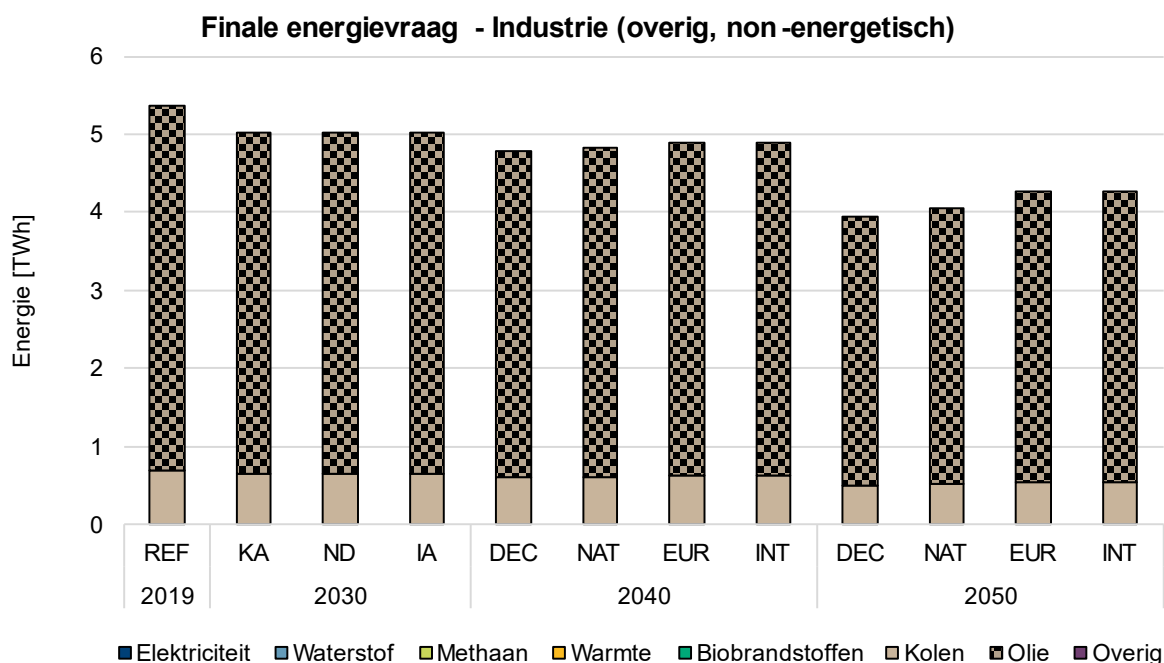
In dit scenario is er naast vergaande elektrificatie een deel inzet van waterstof. Verder is er een zeer geringe inzet van biomassa.

Al vanaf 2030 wordt een deel van het aardgas gesubstitueerd door elektriciteit. Vanwege de hogere temperaturen van sommige processen in deze sector gaat dit proces langzamer dan in bijvoorbeeld de papier- of voedselindustrie. In de tussentijd wordt er in de scenario's Decentrale Initiatieven en Nationaal

Leiderschap een verdere elektrificatie gezien dan in Europese Integratie en Internationale Handel, aansluitend op de verdere elektrificatie in die scenario's in 2050.



Figuur 74. De energievraag van de overige industrie. N.B. deze grafiek is inclusief aluminium en overige metalen.



Figuur 75. Finale energievraag overige industrie (niet-energetisch), in TWh.

5.3.5 Nieuwe industrie: synthetische brandstoffen en grondstoffen

Momenteel heeft Nederland een grote rol in de voorziening van brandstoffen voor de internationale scheep- en luchtvaart door de grootschalige productie vanuit de petrochemie. Aangenomen is dat de fossiele vraag in Europa richting 2050 wegvalt en wordt verduurzaamd. Naar verwachting is dit een combinatie van biofuels, biograndstoffen en synthetische producten. Bij synthetische producten worden brandstoffen en feedstocks gemaakt uit een bron van koolstof (in de vorm van CO₂) en waterstof. De vraag naar koolstof en waterstof vertaalt zich daarbij snel in een grote (indirecte) behoefte aan elektriciteit.

De industrie heeft aangegeven in de scenario's Decentrale Initiatieven en Internationale Handel geen productie van synthetische brandstoffen en biofuels in Nederland te verwachten. In het scenario Decentrale Initiatieven is hier geen plaats voor vanwege de lokale visie, in Internationale Handel wegens een te sterke internationale competitie van productie elders in de wereld. In de scenario's Nationaal Leiderschap en Europese Integratie worden wel significante productiehoeveelheden verwacht.

Tabel 10 - Productie synthetische brand- en grondstoffen, 2019 en in 2050 in Mton

2019			Productie in 2050				
	Productie	Vraag		DEC	NAT	EUR	INT
Kerosine	9,0	3,8	Syn-kerosine	0	0,8	0,3	0
			Bio-kerosine	1,8	1,3	3,1	1,8
Bunkerolie	18,1	11,4	Syn-bunkerolie	0	1,5	0,7	0
Grondstoffen	8,4	11,6	Syn-grondstoffen	0	0,9	0,5	0

Voor fossiele raffinage is de verwachting dat de productie ook in 2050 nog fors is, per scenario variërend van 30 tot 70% van de huidige productievolumes.

Verwerking input industrie

Er is voor gekozen om de input van de industrie rond de synthetische brandstoffen slechts beperkt mee te nemen in de hoofdscenario's. De plannen van de industrie zouden leiden tot extreem grote importhoeveelheden voor waterstof en koolstof aangezien er binnen de grenzen van Nederland (inclusief de Noordzee) onvoldoende ruimte is in aan deze vraag te voorzien. Om de impact van deze keuze inzichtelijk te maken zijn andere keuzes ten aanzien van synthetische brandstof productie in Nederland opgenomen als onderdeel van de variantenanalyse.

De industrie heeft in de scenario's Nationaal Leiderschap en Europese Integratie totaalvolumes van synthetische moleculen aangegeven die gepland zijn in 2050. Dit is uitgesplitst in synthetische kerosine, bunkerolie en grondstoffen voor de chemie, op basis van het huidige portfolio. Uiteindelijk is ervoor gekozen om twee aanpassingen te doen. De eerste aanpassing was alleen van toepassing op kerosine: de geplande volumes kerosineproductie zijn afgeschaald tot het punt dat er voldoende kerosine geproduceerd werd om aan de huidige vraag van Schiphol te voldoen. Hierbij is de geplande productie van SAF meegenomen. Het volume synthetische bunkerolie en synthetische-chemische grondstoffen nam in deze aanpassing niet af. De tweede aanpassing was om een derde van dit volume (aangepaste kerosine, onaangepaste bunkerolie en chemische grondstoffen) mee te nemen. Hiermee blijven we binnen de grenzen van wat binnen de elektriciteit -en waterstof mogelijk is zonder grote importstromen (zie ook de figuren in 5.3.4.4 Raffinaderijen).

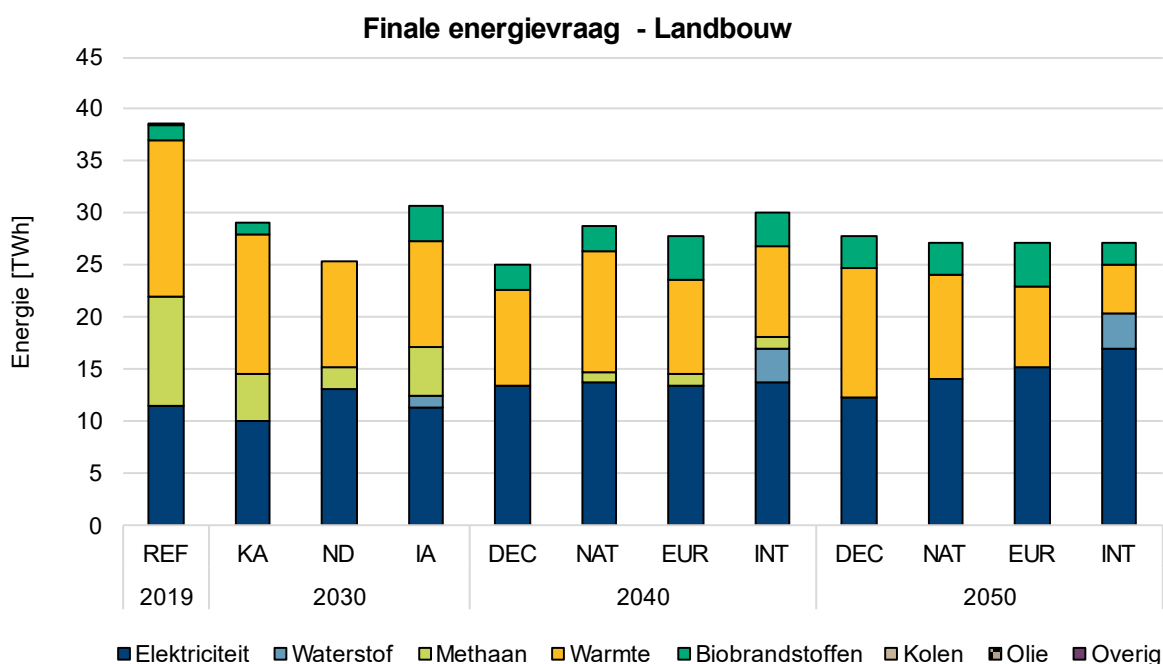
5.4 Landbouw en landgebruik

Het grootste gedeelte van de energievraag en -aanbod in de landbouw is gerelateerd aan de glastuinbouw. Hierbij gaat de sector ervan uit dat de glastuinbouw in 2050 is verduurzaamd. Daarnaast kent de landbouwsector de grootste non-energetische broeikasgasemissies. Deze zijn met name afkomstig van de (intensieve) veehouderij en landgebruik.

5.4.1 Landbouw (energievraag glastuinbouw)

De huidige energiecrisis en de afschaffing van het verlaagde belastingtarief voor de glastuinbouw zijn belangrijke ontwikkelingen voor de korte termijn. Deze ontwikkelingen hebben een nog onzeker effect op de (verduurzaming van de) glastuinbouw.

In de scenario's wordt onderscheid gemaakt tussen het opgesteld vermogen van de warmte-kracht-koppeling installaties (WKK), de groei/krimp van de warmte- en elektriciteitsvraag en de invulling van de warmtebehoefte. Verder wordt de aanname gedaan dat – net als in de eerste editie I13050 – landbouwvoertuigen geëlektrificeerd worden. De finale energievraag van de landbouw daalt in de periode 2019-2050 met ongeveer een derde van 40 TWh naar gemiddeld 27 TWh.



Figuur 76. Finale energievraag glastuinbouw, in TWh.

Aardwarmte heeft grote potentie voor het voorzien in de warmtevraag in de glastuinbouwsector in 2050 en kan daarmee in 2050 voor een groot deel de warmtevraag in de landbouw opvangen. Bij gebruik van aardwarmte voor verwarming zijn wel ketels nodig als back-up voor langdurige koude periodes. Daarnaast vraagt deze verduurzaming vaak om een aanvoer van CO₂, om de productie per vierkante meter op peil te houden.

Tabel 11: Input voor scenario's glastuinbouw (cijfers voor 2050)

	Decentrale Initiatieven	Nationaal Leiderschap	Europese Integratie	Internationale Handel
WKK-capaciteit (MW), 2040	0	413	827	1.240
WKK-capaciteit (MW), 2050	0	0	0	0
Groei elektriciteitsvraag (%) 2040-2050	0,6	0,7	0,5	0,7
Groei warmtevraag (%) 2040-2050	-1,7	-1,7	-1,5	-1,5
Warmtenet + aardwarmte (%)	75,0	67,5	58,3	48,3
Biomassa (%)	7,5	7,5	19,0	13,0
Methaan (%)			1,5	
Full-EWP / e-boiler (%)	17,5	25,0	21,3	23,8
Waterstofboiler (%)	0,0	0,0	0,0	15,0

Groei en krimp van warmte- en elektriciteitsvraag

Vanwege het elektrificeren en de intensivering van de glastuinbouw in het kader van verduurzamingsmaatregelen, verandert de warmte- en elektriciteitsvraag. Deze is vergelijkbaar voor alle vier de scenario's. Zo krimpt de warmtevraag vanuit de glastuinbouwsector. Het uitgangspunt is dat er in 2040 al 30% minder energie voor het verwarmen van de kassen wordt gebruikt dan in 2019. Daarna wordt een krimp van 1,7% per jaar verwacht. Voor elektriciteit daarentegen groeit het verbruik in de komende decennia. Verondersteld wordt dat alle scenario's tot 2030 en ook tussen 2030 en 2035 een lichte groei zien van 0,9% per jaar (KEV, 2022). Na 2040 stijgt de elektriciteitsvraag minder snel. Hierbij wordt een bandbreedte gehanteerd van 0,5-0,7% groei per jaar.

Decentrale Initiatieven

De warmtebehoefte wordt momenteel voor bijna 90% ingevuld met gas als brandstof voor ofwel WKK's of gasketels. In dit scenario wordt het meest ingezet op aardwarmte en warmtenetten. Dit levert een stabiele basisvoorziening en sluit aan bij de toename aan regionale warmtenetten waar de gebouwde omgeving gebruik van maakt. Als piek/back-up worden er biomassa- en groengasketels ingezet. Ook elektrische warmtepompen en e-boilers spelen een aanzienlijke rol om te voldoen aan de piekvraag en de vraag in gebieden zonder toegang tot aardwarmte warmtenetten. Daarnaast staan er nog groengas-/biomassaketels op plekken waar geen aardwarmte beschikbaar is. De regio voorziet in de aanlevering van deze groen gas-/biomassastromen.

Nationaal Leiderschap

De nationale overheid zet grootschalig in op geothermie voor de tuinbouwsector. In samenhang met de transitie in de gebouwde omgeving ondersteunt zij deze transitie en is waar mogelijk het warmtenet gekoppeld aan verbruikers in de gebouwde omgeving. De overgang naar warmtenetten verloopt snel in dit scenario; de ambitie is dat in 2035 al 70% van de totale warmtevraag via een warmtenet wordt ingevuld. Als piek-/back-upvermogen staan er biomassaketels, elektrische warmtepompen en e-boilers om te voldoen aan de piekvraag en de vraag in gebieden zonder toegang tot geothermie warmtenetten. De biomassaketels worden gevoed met biomassa die landelijk wordt ingezameld.

Europese Integratie

In dit scenario wordt slechts de helft van het potentieel aan aardwarmte benut; overheid en burgers zijn namelijk maar tot een bepaalde hoogte bereid hierin te investeren. Uitsluitend op plaatsen waar het rendabel is, wordt aardwarmte ingezet. De piek- en back-upvoorziening wordt gerealiseerd door biomassaketels, gevoed door grote biomassa-importstromen. Het grootste gedeelte van de warmte wordt opgewekt aan de hand van warmtepompen met thermische opslag.

Internationale Handel

In dit scenario wordt slechts de helft van het potentieel aan aardwarmte benut, overheid en burgers zijn maar tot bepaalde mate bereid hierin te investeren. Uitsluitend op plaatsen waar het rendabel is, wordt aardwarmte ingezet. De piek- en back-upvoorziening wordt gerealiseerd door biomassaketels, gevoed door beschikbare biomassa importstromen. Daarnaast wordt een groot percentage warmte opgewekt uit warmtepompen met thermische opslag. Ook komt nog een aanzienlijk percentage voor rekening van waterstofboilers. Dit is het enige scenario waarin waterstofboilers een aanzienlijke rol spelen.

5.4.2 Overige emissies landbouw en landgebruik

Het grootste deel van de emissies in de landbouw en het landgebruik vandaag de dag betreft procesemissies (ongeveer 22 Mton CO₂-eq in 2021). Deze komen hoofdzakelijk voor rekening van de veestapel (ongeveer 15 Mton CO₂-eq), maar ook uit bemesting (2 Mton CO₂-eq) en bodemprocessen (5 Mton CO₂-eq), vooral van het veenweidegebied. De vier scenario's voor 2050 zijn niet uitgewerkt voor dit deel van de landbouw; in plaats daarvan wordt een algemenere schets gegeven van de mogelijke emissies van de landbouw in 2050.

Veestapel

Binnen de veestapel is bijna 90% van de broeikasgasuitstoot methaan en het restant is lachgas. Uitgesplitst naar veesoorten komt bijna 90% van de emissies van de rundveestapel. Er zijn zowel technische als volumemaatregelen voorhanden om deze emissies te reduceren. De technische maatregelen zijn in de regel nog relatief onbewezen en kunnen de emissies slechts ten dele reduceren. Vooral de langetermijneffecten van sommige maatregelen (op bijvoorbeeld productie, maar ook dierenwelzijn) zijn nog onbekend. Gegeven de omvang van de Nederlandse veestapel, de grote impact op het landgebruik, milieu, natuur, biodiversiteit, het feit dat ongeveer twee derde van de dierlijke productie geëxporteerd wordt en de wens van het Ministerie van LNV om een kringlooplandbouw te realiseren is aangenomen dat de veestapel (sterk) krimpt. Om de veestapel af te stemmen op de beschikbare reststromen die uiteindelijk van Nederlandse bodem komen, moet de intensieve veehouderij vrijwel gedecimeerd worden en is in totaal een daling van ongeveer twee derde van de rundveestapel noodzakelijk. Dit betekent dat er ongeveer 5 Mton aan restemissies zijn van de veestapel.

Over dit getal bestaat echter grote onzekerheid, omdat het afhangt van verdere ontwikkelingen in de landbouw en welk beleid de overheid kiest. Daarom hanteren we een onzekerheidsmarge van 50%, waarbij lagere waardes duiden op verdere krimp en/of additionele technische maatregelen. Hogere waardes betekenen een beperktere krimp, eventueel deels gecompenseerd met technische maatregelen.

Bemesting

Bij de toevoeging van stikstof aan de bodem via mest, kunstmest en compost wordt een deel van de stikstof via chemische reacties omgezet in lachgas. Dit is een natuurlijk proces. Ook in de toekomst moeten er nutriënten aan de bodem toegevoegd worden, omdat deze met de oogst van gewassen ook weer onttrokken worden. Het Nederlandse landbouwareaal krimpt jaarlijks licht en het is goed voorstelbaar dat er, gegeven klimaat- en milieuopgaven, in de toekomst minder intensief geteeld wordt. Onder die omstandigheden treden deze emissies in vergelijkbare hoeveelheden op. Daarom is er een redelijke kans dat deze emissies weliswaar iets afnemen, maar niet tot nul dalen – en lijken restemissies van 1,5 Mton CO₂-eq in 2050 aannemelijk.

Bodemprocessen

Door de oxidatie ofwel afbraak van organisch materiaal in hoofdzakelijk de veenweidegebieden (3 Mton CO₂-eq) komen ook emissies vrij. Om deze naar nul te brengen, moet het veen permanent vernat worden. Dat verhoudt zich echter slecht met het huidige gebruik van deze gronden, waarop veel melkvee gehouden wordt. Een alternatief waarop richting 2030 ingezet wordt, is verhoging van het waterpeil in combinatie met drukdrainage, waardoor het veen weliswaar niet permanent maar wel meer vernat is. Dit kan de emissies ongeveer halveren, maar geeft ook restemissies en bemoeilijkt verder het huidige gebruik (bijvoorbeeld lagere opbrengsten). De

overige bijna 2 Mton betreft emissies van processen in de bodem van de landbouwgronden (niet-veen) en indirecte lachgasemissies. Het is lastig deze verder te reduceren. Daarmee lijken de restemissies van bodemprocessen uit te komen op 2 tot 3,5 Mton CO₂-eq, afhankelijk van of de veengronden permanent vernat worden. Uiteindelijk is een mix van deze twee sporen denkbaar, waarbij de restemissies naar verwachting 2,5 Mton bedragen.

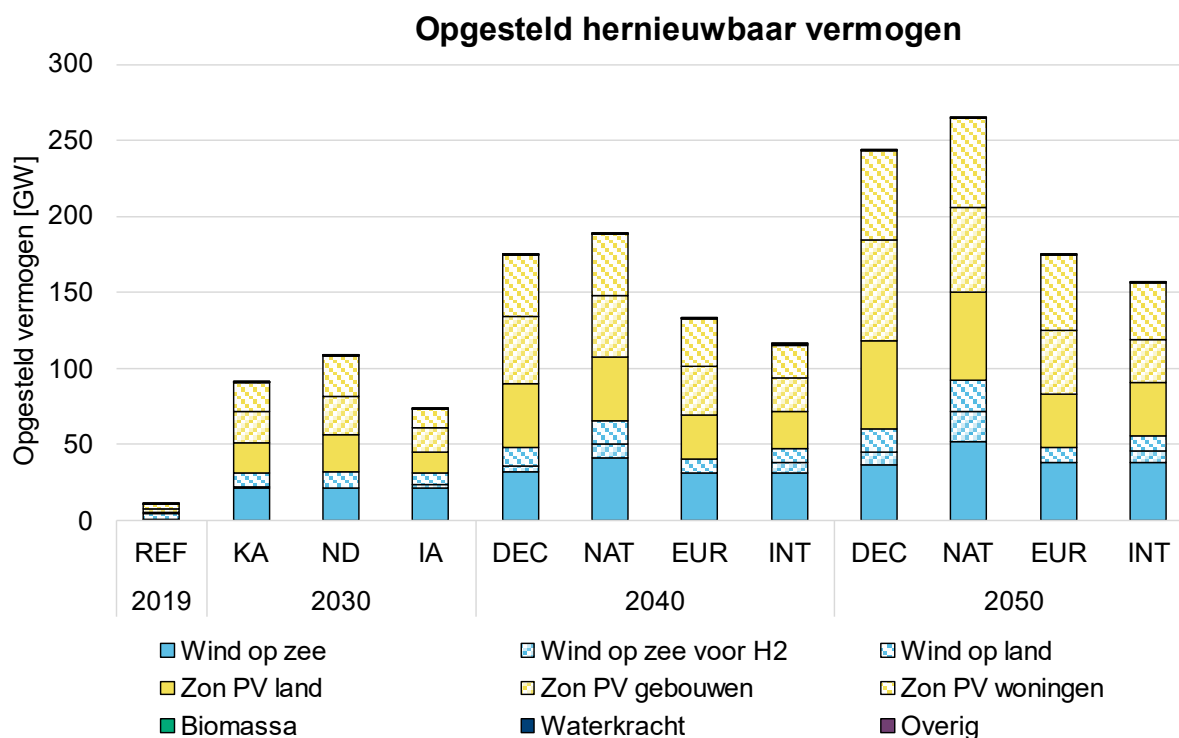
Koolstofvastlegging

Er wordt ook ingezet op het vastleggen van koolstof in landschapselementen, bestaande bossen (uitbreidingen) en nieuwe natuur. Gegeven de beperkte ruimte in Nederland, is het potentieel tot vergroting hiervan echter beperkt en voor nu op 0 Mton gezet.

De combinatie van bovenstaande ontwikkelingen voor de diverse emissiebronnen resulteren naar verwachting in restemissies van 9 Mton CO₂-eq voor de landbouw (5 Mton) en landgebruik (4 Mton). Dit getal staat echter niet vast, gezien de onzekerheden qua beleid, technische maatregelen en ontwikkelingen in de rest van de sector. De komende periode wordt ongetwijfeld beter zicht verkregen op de (mogelijkheden voor de) transitie in het landbouw- en voedselsysteem. De hoofdboodschap is echter helder: op basis van de huidige vooruitzichten is (zeker voor 2050) nog sprake van substantiële restemissies in de landbouw en het landgebruik in 2050.

5.5 Elektriciteitsaanbod

Deze sectie gaat in op het opgesteld elektrisch duurzaam productievermogen. Ten opzichte van 2030 neemt het vermogen aan totale duurzame opwek met een factor twee tot drie toe. De scenario's Decentrale Initiatieven en Nationaal Leiderschap hebben een opwekcapaciteit van zo'n 200 GW. Bij Europese Integratie en Internationale Handel gaat het om ruim 150 GW.



Figuur 77. Opgesteld duurzaam vermogen.

Decentrale Initiatieven

In dit scenario zetten energiecoöperaties vol in op duurzame elektriciteit in de regio, en de regio's op grootschalige zon-PV. Deze zon-PV is uit te voeren als zonneweides of in combinatie met andere functies. In totaal wordt hierdoor zo'n 58 GW zon-PV op land opgesteld. Bewoners en bedrijven zijn in dit scenario zeer actief en benutten hun daken optimaal voor opwek door zonnepanelen. Dit resulteert in een totaal van 125 GW zon op dak, waarvan 67 GW grootschalig op gebouwen en 58 GW kleinschalig op woningen. De hoge benutting van het dakpotentieel is in lijn met de voorgestelde verplichtingsmaatregel voor toepassing van zon-PV op daken door het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat.⁵¹ Deze voorgestelde maatregelen sluiten ook aan op de EU Solar Energy Strategy.⁵² Wind-op-land groeit verder door naar 15 GW. Dit additionele vermogen wordt deels gerealiseerd doordat de molens groter worden. De elektriciteitsvraag is echter zo hoog dat er landelijk ook extra windvermogen op zee geplaatst moet worden. De regio's reserveren voor hun klimaatneutraliteit een deel van dit wind-op-zee vermogen. In totaal wordt zo'n 45 GW wind-op-zee geïnstalleerd (waarvan 8 GW dedicated offshore PtX). Hiernaast worden back-upcentrales (20 GW) voorzien die in geval van tekorten aan moeten schakelen.⁵³ Deze centrales draaien volledig op waterstof. Afvalverbrandingsinstallaties worden niet meer gebruikt in dit scenario, aangezien Nederland volledig circulair is.

Nationaal Leiderschap

In dit scenario zorgt de landelijke overheid voor grote uitbreiding van het vermogen wind-op-zee, tot 72 GW (waarvan 20 GW dedicated PtX). Dit vermogen is zodanig afgestemd dat er voldoende waterstof geproduceerd kan worden, zonder van import afhankelijk te zijn. Daarnaast verwacht de nationale overheid dan ook dat op land een grote hoeveelheid windmolens kan komen, namelijk 20 GW. Hiervoor worden gebieden aangewezen. Ook voor elektriciteitsproductie door grootschalige zonopstellingen wijst de nationale overheid gebied aan. In totaal wordt zo'n 58 GW aan grootschalige zon-PV opgesteld. Doordat het voor particulieren aantrekkelijk blijft om zonnepanelen te installeren, wordt het dakpotentieel van woningen optimaal benut, wat resulteert in 58 GW. Ook bedrijven benutten grotendeels het dakpotentieel, goed voor 56 GW. Hiernaast worden back-upcentrales (18 GW) voorzien die in geval van tekorten aan moeten schakelen. Deze centrales draaien grotendeels op waterstof (15 GW), de overige capaciteit wordt door de kerncentrales geleverd.⁵⁴ De AVI's die een deel van de overgebleven reststromen verwerken, leveren negatieve emissies doordat deze uitgevoerd worden met CCS. Dit komt overeen met de ambities uit het Klimaatakkoord.

Europese Integratie

In dit scenario wordt slechts een deel van het duurzame vermogen gerealiseerd in Nederland. Wind-op-zee lijkt goed te passen op de Noordzee, vandaar dat Nederland daar grootschalig gebruik van maakt en voor 38 GW aan capaciteit vergund. Een groei van het aantal zonneweides, onafhankelijk van beleidskeuzes, lijkt in dit scenario ook voor de hand te liggen. Het vermogen wind-op-land stijgt na uitvoering van het Klimaatakkoord niet verder. Ook rekenen burgers en bedrijven op elektriciteit uit het net en investeren ze daarom minder in eigen zonnepanelen; in totaal gaat het om 'slechts' 125 GW. Voor zon-PV wordt niet het volledige dakpotentieel benut, alleen die daken die geschikt tot zeer geschikt zijn. Gezien de huidige marktontwikkelingen, waarbij zon-PV op daken snel groeit, en de mogelijke toekomstige verplichtingsmaatregel is de benutting van het dakpotentieel wel omhoog bijgesteld ten opzichte van de eerste versie II3050. Hiernaast worden back-up centrales (19 GW)

⁵¹ Zonnebrief (Kamerbrief over rol zonne-energie in energietransitie):

<https://www.rijksoverheid.nl/documenten/kamerstukken/2022/05/20/zonnebrief>

⁵² <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52022DC0221&from=EN>

⁵³ Het vermogen van back-upcentrales is lager dan in de eerste editie II3050. Voornamelijk reden hiervoor is een toename aan opgesteld vermogen aan batterijen en een grotere aangenomen rol voor demand side response in de industrie.

⁵⁴ Kerncentrales kunnen in het ETM flexibel op- en afschakelen naar gelang de elektriciteitsprijs. Maar omdat de marginale kosten van kernenergie erg laag zijn (< € 6/MWh), maken de kerncentrales veel draaiuren omdat de elektriciteitsprijs bijna altijd hoger ligt dan € 6. We nemen aan dat een elektrolyser maximaal € 30/MWh wil betalen voor stroom. Dus de kerncentrale blijft doordraaien voor elektrolyzers (en andere flex), ook als al in de basisvraag voor elektriciteit is voorzien. Alleen als er zoveel hernieuwbaar (of goedkope import) beschikbaar is dat in alle basisvraag kan worden voorzien, alle P2G, P2H op vol vermogen draaien, batterijen volledig aan het opladen zijn, etc., schakelen kerncentrales af omdat de elektriciteitsprijs dan richting 0 gaat. Kerncentrales hebben tussen de 6.000 en 6.500 draaiuren in de basisscenario's; in de scenario's met een hoge productie van synthetische brandstoffen loopt dit op richting de 7.000 draaiuren.

voorzien die in geval van tekorten aan moeten schakelen. Deze centrales draaien grotendeels op waterstof (11 GW), de overige capaciteit wordt door de kerncentrales geleverd. De AVI's die blijven bestaan in dit scenario, leveren negatieve emissies doordat een deel is uitgevoerd met CCS. Dit komt overeen met de ambities uit het Klimaatakkoord.

Internationale Handel

In dit scenario wordt slechts een deel van het duurzame vermogen gerealiseerd in Nederland. Wind-op-zee lijkt goed te passen op de Noordzee, vandaar dat Nederland daar grootschalig gebruik van maakt (46 GW, waarvan 8 GW voor dedicated PtX). Een groei van het aantal zonneweides lijkt in dit scenario eveneens voor de hand te liggen, al is deze wel het kleinst in dit scenario (35 GW). Ook het dakpotentieel van zon-PV wordt in dit scenario het minst benut, alleen de zeer geschikte daken komen hiervoor in aanmerking. Gezien de huidige marktontwikkelingen, waarbij zon-PV op daken snel groeit, en de mogelijke toekomstige verplichtingsmaatregel is de benutting van het dakpotentieel in dit scenario wel omhoog bijgesteld ten opzichte van de eerste versie II3050. Het vermogen wind-op-land stijgt na uitvoering van het Klimaatakkoord niet verder. Ook rekenen burgers en bedrijven op elektriciteit uit het net en investeren zij daarom minder in eigen zonnepanelen (respectievelijk 37 en 26 GW). Hiernaast worden back-upcentrales (15 GW) voorzien die in geval van tekorten aangeschakeld moeten worden. Deze centrales draaien op waterstof. De AVI's die blijven bestaan in dit scenario, leveren negatieve emissies doordat een deel is uitgevoerd met CCS. Dit komt overeen met de ambities uit het Klimaatakkoord.

Aftoppen van zon PV-productie

Zonproductie van fotovoltaïsche (PV) panelen brengt binnen korte tijd zeer hoge pieken op het net. Deze capaciteiten kunnen afgetopt worden, waardoor op momenten met hoge opwek, de pieken voor het net verlaagd worden. Aangenomen is dat huishoudens in 2040 55% van de maximale piek op het net kunnen zetten en zonneparken en andere zon-opwekkers 45% van de maximale piek. In 2050 zal er nog 40% van de piek in het net gevoed kunnen worden. Dit betekent in 2050 5-10% aan minder productie op jaarbasis ten opzichte van de huidige praktijk om op 70% van het piekvermogen aan te sluiten. De opwek van zonproductie is daarmee beter in te passen en het net is beter in balans te houden. Tabel 12 geeft een overzicht van de gehanteerde percentages die afgetopt worden op de maximale piek per steekjaar.

Tabel 12 - Aannames ten aanzien van aftoppen zon-pv (zgn. overplanting)

Jaar	2030	2035	2040	2050
Solar PV-huishoudens	30 %	30 %	45 %	DEC: 60% NAT: 60% EUR: 50% INT: 50%
Solar PV-gebouwen	50 %	50 %	50 %	
Solar PV-veldopstelling	50 %	50 %	50 %	

6. Regionalisering

6.1 Introductie

Om de locatie specifieke vraag en aanbod voor de netten van de netbeheerders te kunnen bepalen, zijn de nationale uitkomsten uit de scenario's geregionaliseerd. Deze informatie is het startpunt voor de netdoorrekeningen die in het eindrapport van de tweede editie van I13050 terugkomen.

Elke parameter is geregionaliseerd op buurtniveau. Vanaf dit buurtniveau is een goede match te maken met de aansluitingen van de netbeheerders en is er genoeg landelijke informatie beschikbaar om tot een landelijk dekkende buurtverdeling te komen. Deze regionalisering voor I13050 is uniek, omdat deze landelijk dekkend en uniform is voor alle netbeheerders.

Om te komen tot de buurtverdeling is gekozen voor een tweetrapsaanpak:

1. Allereerst is uitgegaan van landelijk dekkende informatiebronnen op buurtniveau. Via enkele analyseslagen wordt hieruit de verdeling van de ETM-parameters voor 2050 bepaald. Daaruit volgt een algemene verdeling van de ETM-parameters over Nederland per buurt.
2. Vervolgens konden de regionale netbeheerders de regionalisering binnen hun verzorgingsgebied nog aanscherpen, op voorwaarde dat de totale regionalisering gelijk bleef.

De regionalisering is op netbeheerders- en provincieniveau afgestemd tussen de netbeheerders.

6.2 Aanpak per sector

Deze paragraaf zet op hoofdlijnen per sector uiteen op basis waarvan de nationale resultaten geregionaliseerd zijn.

Regionalisering vraag gebouwde omgeving

De regionalisering van de vraag in de gebouwde omgeving is opgesteld vanuit openbare bronnen op buurt- en gemeenteniveau, zoals kerncijfers wijken en buurten van CBS. Onderstaand geven we een overzicht van de verdeelsleutels en de belangrijkste aannames om tot deze verdeelsleutels te komen.

De groei van het aantal woningen is gebaseerd op CBS-prognoses tot 2050 per gemeente. Iedere buurt in de gemeente maakt een gelijke groei door. Het aantal huishoudens per buurt is gekozen als verdeelsleutel voor de energie- en warmtevraag. Deze verdeelsleutel is toegepast op verlichting en andere elektrische huishoudelijke apparaten en/of systemen, dit is inclusief koeling en koken.

Voor de warmtevoorziening is ervoor gekozen om allereerst op basis van een aantal kenmerken de meest waarschijnlijke verdeling van warmtetechnologieën onder buurten te bepalen:

- **Warmtenetten:** De buurten met huidige warmtenetten, zullen in de toekomst in ieder geval het warmtenet houden. Vervolgens is aangenomen dat hoe hoger de woningdichtheid, hoe groter de kans op een warmtenet. In gemeenten waar al een groot deel van de woningen op een warmtenet is aangesloten, zullen andere buurten ook eerder op het warmtenet worden aangesloten.

- **Hybride warmtepompen:** In buurten met veel oude woningen is de kans op een hybride warmtepomp (en dus handhaving van het gasnet) groter, aangezien all-electric warmtepompen hier niet altijd toereikend zijn. De hybride warmtepompen worden op groen gas of waterstof gestookt. In een landelijke omgeving wordt meer groen gas verwacht en dichtbij productie en afnemers van waterstof zullen waterstof hybride warmtepompen staan.
- **HR-ketel:** De woningen die een HR-ketel behouden worden willekeurig verdeeld over de buurten, waarbij er slechts een deel van de woningen een HR-ketel behoudt.
- Overige technieken zijn willekeurig verdeeld over Nederland, waarbij per buurt slechts een minderheid verwarmd met een overige techniek.
- **All-electric warmtepompen:** voor buurten die geen warmtenet of gasnet hebben en voor nieuwere woningen in gebieden met een gasnet, is de aanname dat deze worden verwarmd met all-electric warmtepompen.

Regionalisering vraag mobiliteit

De regionalisering van de energievraag van de mobiliteitssector is met name gebaseerd op prognoses over het elektrisch laden in Nederland van Elaad. Per modaliteit zijn de volgende bronnen gebruikt:

- **Auto's:** De som van de laadinfrastructuur per buurt is gebruikt als verdeelsleutel op basis van Elaad outlook personenvervoer 2021Q3.
- **Bestelvoertuigen:** De som van de laadinfrastructuur voor bestelvoertuigen per buurt is gebruikt als verdeelsleutel op basis van Elaad outlook bedrijventerreinen 2022Q2.
- **Bestelvoertuigen:** De som van de laadinfrastructuur voor trucks per buurt is gebruikt als verdeelsleutel op basis van Elaad outlook bedrijventerreinen 2022Q2.
- **Bussen:** De som van de vermogensvraag van depotladen en bufferladen voor bussen per buurt is gebruikt als verdeelsleutel op basis van Elaad outlook bedrijventerreinen 2019Q3.
- **Treinen:** Het aantal sporen per station per buurt op basis van openbare GIS-data is gebruikt om de energetische vraag van treinen te regionaliseren.

Regionalisering vraag industrie

Om de energievraag van de industrie te bepalen, heeft Kalavasta gewerkt met het Carbon Transition Model (CTM). Dit model berekent op bedrijfsniveau voor alle 340 ETS-bedrijven de energievraag per scenario. De niet-ETS-bedrijven zijn per subsector geaggregeerd in de modellering; zo bevat de subsector papierindustrie een aantal ETS-papierbedrijven en 'overige papierindustrie'. De ETS-bedrijven vragen het merendeel van de energie binnen de industrie: tussen de 72% en 100% van de elektriciteit, methaan en waterstof in de 2050-scenario's. Het resultaat van de scenariomodellering in het Carbon Transition Model is dus de energievraag per drager per ETS-bedrijf en per subsector voor de niet-ETS-bedrijven.

Van de ETS-bedrijven is de exacte locatie bekend. De elektriciteits-, methaan- en waterstofvraag per ETS-bedrijf en per subsector voor de niet-ETS-bedrijven heeft Kalavasta gedeeld met de netbeheerders. De energievraag van de ETS-bedrijven is daarna geaggregeerd per CBS-buurt.

Voor de niet-ETS-bedrijven maken de netbeheerders een inschatting van de verdeling over CBS-buurten. De grootste energievraag in de scenario's waarvan de locatie niet bekend is, is voor de productie van synthetische brandstoffen. Hiervan is aangenomen dat deze in Rotterdam en Zeeland plaatsvindt (in Maasvlakte, Moerdijk, Borssele en Europoort, aflopend van circa 45% tot circa 10% per buurt).

Regionalisering vraag landbouw (glastuinbouw)

De regionalisering van glastuinbouw is gedaan op basis van het huidige gasverbruik van de glastuinbouwsector. Dit geeft een goed beeld van de actuele warmtevraag van deze sector. De aanname is dat de warmtevraag gelijkstaat aan de totale energievraag. Groei van de sector op andere locaties is hierbij niet meegenomen.

Regionalisering aanbod elektriciteit

Om de uitkomsten van het aanbod van elektriciteit te regionaliseren, is het opgestelde vermogen voor wind-op-land en grootschalige zonne-parken op land en zonne-installaties op daken van grootverbruikers verdeeld conform de door de regionale netbeheerders verzamelde concrete RES 1.0 plannen die ten tijde van het uitwerken van de scenario's bij TenneT waren aangeleverd.

Het aandeel zon-PV op daken van huishoudens is ingeschat op basis van het woningbestand en gerelateerd aan het gemiddelde dakoppervlak (zie ook gebouwde omgeving). Deze uitkomsten zijn bijgesteld voor regionale verschillen op netbeheerdersniveau.

Het elektriciteitsaanbod van conventioneel back-upvermogen (centrales) is gebaseerd op gegevens en prognoses van Gasunie en TenneT. Voor deze studie heeft Berenschot een quickscan uitgevoerd naar de technische ombouwbaarheid van bestaande centrales naar waterstofcentrales. Deze informatie is gebruikt voor de inschatting van de verdeling van conventioneel vermogen in onder andere 2040.

Regionalisering proces -en systeem flexibiliteit

Bij flexibiliteit is net zoals in de eerste editie van I13050 onderscheid gemaakt tussen twee verschillende types: Proces flex beschrijft toepassingen die vast aan een specifiek proces zijn gekoppeld waardoor de locatie door de onderliggende toepassing bepaald is. Systeem flex bedoelt daarentegen flexibiliteitsmiddelen waarvan de locatie aan de voorkant niet vastgelegd is en er een keuze mogelijk is. Tabel 13 geeft een overzicht van verschillende toepassingen per type.

Tabel 13. Flexibiliteitstoepassingen en regionalisatie

Flexibiliteits type	Toepassingen
Proces flex	Vraagsturing, batterijen in huishoudens / EVs / bij zonneparken, power-to-heat in de industrie, grote centrales
Systeem flex	Grootschalige batterijen, power-to-heat voor warmtenetten, power-to-gas, curtailment, backup-centrales, import / export

Voor systeem flex toepassingen gaan we in de basis ervan uit, dat er sturende maatregelen geïntroduceerd gaan worden die ervoor zorgen dat deze vanuit systeem- en infrastructuurperspectief grotendeels op gunstige locaties binnen Nederland komen. Hieraan is invulling gegeven door een analyse van de lokale aanbod- en vraagsituatie. Op plekken waar veel opwek t.o.v. de vraag wordt verwacht plaatsen we vragende flexibiliteit, en op plekken met relatief veel vraag t.o.v. de opwek leverende flexibiliteitsmiddelen.

6.3 Uitkomsten regionalisering

De regionalisering heeft geleid tot het lokale aanbod en vraag die te zien zijn in Figuur 78 en Figuur 79. Terwijl de regionale verdelingen in eerste instantie op buurtniveau⁵⁵ zijn bepaald, zijn ze voor betere leesbaarheid en optelbaarheid in de overzichten geaggregeerd naar gemeenteniveau.

De vraag van de industriële clusters is in bijna alle overzichten duidelijk herkenbaar. De wittere gebieden zijn vaak de dunner bevolkte gebieden, waar de vraag naar energie laag is. De verdeling van de elektrische vraag komt in alle scenario's sterk overeen. Dit is een logisch gevolg van het feit dat alle sectoren in alle scenario's een duidelijke elektrische vraag kennen. De regionalisering van flex zal volgen in het I13050 eindrapport.

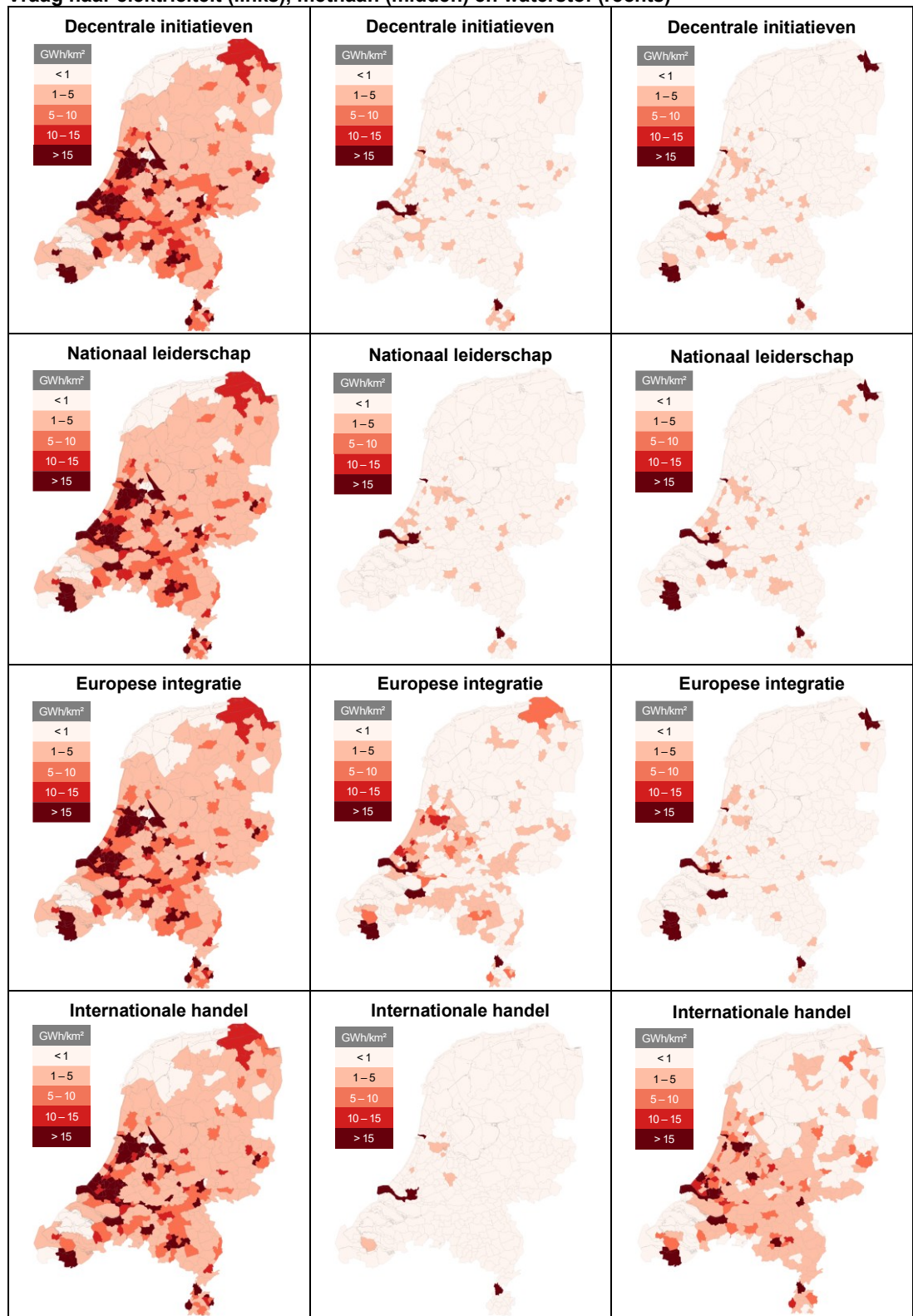
⁵⁵ Rond 14.000 regio's, voor een overzicht zie bijvoorbeeld https://cbsinuwbuurt.nl/#buurten2019_gemiddeld_electriciteitsverbruik_totaal

Aanbod van elektriciteit (links), methaan (midden) en waterstof (rechts)



Figuur 78. Regionalisering van het aanbod van elektriciteit, methaan en waterstof per scenario (2050).

Vraag naar elektriciteit (links), methaan (midden) en waterstof (rechts)



Figuur 79. Regionalisering van de vraag naar elektriciteit, methaan en waterstof per scenario (2050).

7. Inzichten II3050 en vervolg

De II3050-studie schetst de transitie van het energiesysteem van Nederland tot 2050. Voor een juiste interpretatie van de resultaten worden in dit hoofdstuk de belangrijkste inzichten van de scenario's en de dilemma's besproken en zijn de hieruit volgende aanbevelingen uiteengezet.

7.1 Inzichten en implicaties van de scenario's

Deze paragraaf gaat in op de belangrijkste inzichten en implicaties die volgen uit de scenario's:

1. Inzicht in ontwikkelpad(en) van het energiesysteem.
2. Belangrijkste bouwstenen voor verduurzaming vraag per sector.
3. Belangrijkste bouwstenen voor transitie energiedragers.
4. Koolstofbalans van het toekomstige duurzame energiesysteem.
5. Restemissies binnen en buiten het energiesysteem in 2050.

1. Inzicht in ontwikkelpad(en) van het energiesysteem

Deze scenariostudie schetst enkele evenwichtige beelden en onzekerheden die van invloed kunnen zijn op investeringsbesluiten richting een klimaatneutrale toekomst:

- a) Er zijn meerdere mogelijkheden om de verduurzaming van het energiesysteem te realiseren maar er zijn ook bepaalde ontwikkelingen die altijd nodig zijn en dus ook altijd moeten worden ontwikkeld. Waaronder in ieder geval een sterke elektrificatie, waterstof, vaste, vloeibare en/of gasvormige bio-energie, import van energiedragers, en ook afvangen en vastleggen van CO₂ (fossiel én biogeen).
- b) De transitie kan met bestaande of op termijn naar verwachting beschikbare technieken worden ingevuld. Grootschalige(re) toepassing hiervan moet nog wel leiden tot kostendaling van deze technieken en innovaties.
- c) Een groot volume van de opwekking van hernieuwbare energie kan in Nederland plaatsvinden. Interconnectiviteit met omliggende landen en/of import van energie is echter noodzakelijk voor het balanceren van vraag en aanbod op het net en een kostenefficiënte verduurzaming van Europa.
- d) Energievraag en -aanbod ondergaan in alle sectoren een forse verandering. Dit vraagt om een investering in, en aanpassing van de infrastructuur. Dit wordt verder onderzocht in het II3050-eindrapport dat eind 2023 wordt gepubliceerd.
- e) Enkele grote aannames hebben veel invloed op de totale en soort energievraag. Het gaat om de omvang van de vraag per sector, de kostprijs van energie, de (beleids)keuze om wel of niet sectoren te normeren en de handhaving daarop.

2. Belangrijkste bouwstenen voor verduurzaming van de vraag per sector

In alle scenario's daalt de totale energievraag vanaf nu tot 2050, de daling kent een bandbreedte van 7 tot 39%. Het bereiken van deze reductie van de energievraag c.q. reductie van CO₂-uitstoot van het energiesysteem vergt een transitie in alle sectoren en dit vergt dus een inspanning om dit voor elkaar te krijgen. De technologieën en mogelijkheden die hiervoor beschikbaar zijn, verschillen per sector en toepassing. Hieronder geven we per sector een samenvatting van de belangrijkste ontwikkelingen in de energievraag:

- Voor duurzame verwarming van de gebouwde omgeving (woningen en utiliteitsbouw) staan collectieve en individuele opties ter beschikking. Collectieve warmte is hoofdzakelijk afkomstig van restwarmte en geothermie, met een rol voor hernieuwbare gassen voor piekvraag in de wijken. Het aantal warmtenetaansluitingen groeit in alle scenario's (tot maximaal 30% van de gebouwenvoorraad – minder dan in de eerste I13050). Door toepassing van warmtepompen, all-electric en hybride, neemt het aandeel van elektriciteit in de warmtevoorziening fors toe. Dit zijn individuele opties. Via hybride toepassingen kunnen groen gas en waterstof een bijdrage leveren aan de leveringszekerheid van huishoudens en gebouwen in koude periodes. Hiermee kan naast flexibel gebruiksgedrag (bijvoorbeeld stuurbare elektrische warmtepompen) piekbelasting op het elektriciteitsnet worden voorkomen.
- De verduurzaming van de mobiliteit vergt verschillende energiedragers waarbij elektrificatie de belangrijkste is. Personenauto's zijn in 2050 vrijwel allemaal elektrisch. Het zware (weg)transport maakt vooral gebruik van elektrische aandrijving. Voor vervoer over water worden primair waterstof en biobrandstoffen gebruikt. Internationale mobiliteit gebruikt hoofdzakelijk bio- en synthetische brandstoffen.
- In de industrie wordt onderscheid gemaakt tussen grote en kleinere industrie. Voor grote industriële bedrijven zijn er diverse emissiereductieroutes en is er ook een grote afhankelijkheid van het internationale speelveld – soms sluiten bedrijven of importeren ze halffabricaten. Veelal wordt ingezet op elektrificatie en waterstof, maar ook spelen routes van recycling, CO₂-afvang en biomassa die voor sommige bedrijven in bepaalde scenario's een rol. In de kleinere industrie is elektrificatie de hoofdtrend, al is er ook een rol weggelegd voor waterstof in sommige processen. Verder wordt duidelijk voor de industrie dat niet alles kan: massaal inzetten op één emissiereductieroute of bijvoorbeeld de grootschalige productie van synthetische brandstoffen is niet altijd in het Nederlandse energiesysteem in te passen.
- In de landbouw neemt het finaal energiegebruik af, onder andere door energiebesparing en krimp van het areaal. In de glastuinbouw wordt het gebruik van gasketels en warmtekrachtkoppeling afgebouwd. In plaats daarvan wordt veel duurzame warmte geleverd via geothermie en daarnaast ook door warmtepompen en biomassaketels. Deze verduurzaming vraagt wel om aanvoer van CO₂ om de gewasopbrengst op peil te houden.

3. Belangrijkste bouwstenen voor transitie energiedragers

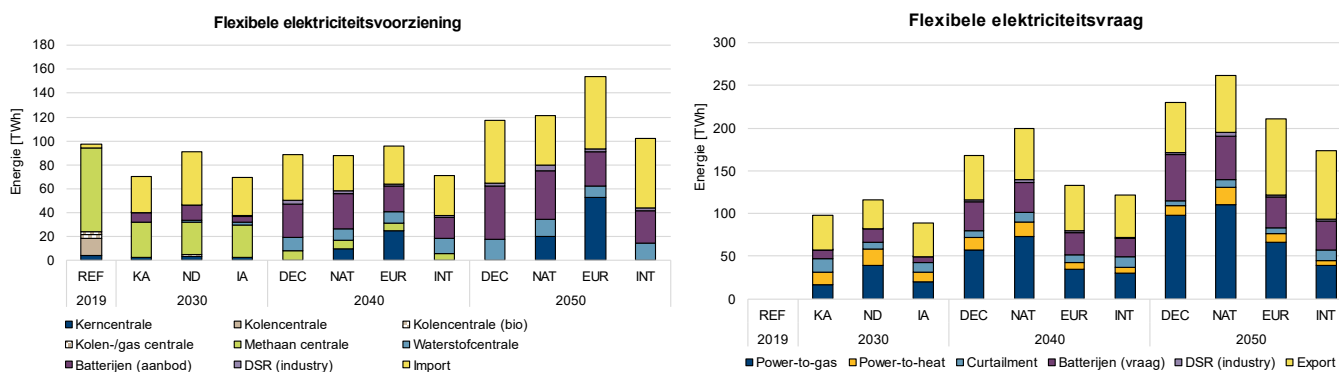
Komende jaren vindt in het energieaanbod een grote verschuiving plaats. Van momenteel grotendeels fossiel (gas, olie en kolen) naar een nagenoeg volledig duurzame energiemix met een grotere mate van elektrificatie, conversie naar onder andere waterstof en bio-gerelateerde brandstoffen in 2050. Voor elke energiedrager zijn de volgende voorname veranderingen te destilleren:

a. Elektriciteit

Een belangrijke pijler van het klimaatneutrale energiesysteem is duurzame elektriciteit en elektrificatie van de samenleving. Het totale aanbod neemt van toe van 119 TWh in 2019 naar 310 tot 470 TWh in 2050. Ook de vraag neemt fors toe, van 119 TWh in 2019 naar tussen de 270 en 430 TWh in 2050. Dit vraagt om grote veranderingen in het elektriciteitsnetwerk, een sterke groei van het opgestelde vermogen en vele aanpassingen in de processen die energie gebruiken in de verschillende sectoren.

Windenergie produceert samen met zonne-energie (en in twee scenario's nucleaire centrales) een groot deel van de benodigde energie om zowel directe als indirecte elektrificatie (door middel van conversie naar waterstof en warmte) van sectoren mogelijk te maken. Opwek van elektriciteit in conventionele centrales neemt af vanwege de beschikbaarheid van hernieuwbare opwek en vanwege de prijsopdrijvende impact die voortkomt uit de afname van het aantal ETS-rechten.

Net als de vorige editie van I13050 toont deze editie aan dat flexibiliteitsmiddelen nodig zijn om vraag en aanbod op elkaar te laten aansluiten. De totale elektriciteitsoverschotten groeien van zo'n 3 TWh in 2019 naar 85 tot 100 TWh in 2050. De totale elektriciteitstekorten stijgen van zo'n 5 TWh in 2019 naar 180 tot 270 TWh in 2050. Import speelt de grootste rol in het oplossen van elektriciteitstekorten, met een impact van 40 tot 60 TWh. In de scenario's wordt een groot deel van de elektriciteitsoverschotten via flexibele power-to-gas omgezet naar waterstof (40 tot 110 TWh). Export kent een aandeel van 60 tot 90 TWh. Power-to-heat kent een bedrijfstijd van 1.000-2.000 uur. Batterijen zijn zeer belangrijk voor de dagelijkse balans vanwege hun grote aantal cycli, maar leveren geen enkele opslag voor langere tijdschalen vanwege de beperkte capaciteit. Voor de langere-termijnbalans over weken, seizoenen of zelfs jaren zijn grote opslagvolumes nodig en regelbaar vermogen van back-upcentrales.



Figuur 80. Overzicht flexibele opwek voor tekorten en flexibele vraag voor overschotten.

Ook flexibiliteitsmiddelen met een kleinere voorziene impact leveren een noodzakelijke bijdrage aan het balanceren van vraag en aanbod in het energiesysteem.

De hoeveelheden benodigde elektrificatie en de hoeveelheden flexibiliteitsmiddelen zijn in deze editie berekend op basis van een soort van 'koperen plaat' aanname. De scenario's houden geen rekening met eventuele beperkingen van infrastructuur. Ook is de doorvertaling daarvan op de behoefte aan flexmiddelen of de locatiekeuze daarvan niet gemaakt. De daadwerkelijke behoefte aan balancering van het elektriciteitssysteem wordt in het eindrapport van I13050 berekend.

b. Waterstof

Het waterstofaanbod is in eerste instantie afkomstig van import, stoomkrakers en restgassen van de industrie. Groene waterstofproductie start al vóór 2030 en groeit in de jaren daarna aanzienlijk. Alle scenario's voorzien een zekere mate van waterstofimport, voor gebruik in Nederland en/of voor doorvoer. Voor import van buiten de EU wordt in eerste instantie gebruik gemaakt van scheepsvervoer in de vorm van ammoniak en gecompriëerde H₂. Ook wordt import van vloeibare waterstof via pijpleiding mogelijk.⁵⁶

De vraag naar waterstof hangt nauw samen met de ontwikkelingen in de industrie. Niet alleen ten aanzien van de technologiekeuzes, maar ook door groei of krimp van industriële activiteiten in Nederland. Tevens laten de I13050-scenario's zien dat de waterstofvraag sterk bepaald wordt door de mate waarin synthetische brandstoffen voor de lucht- en scheepvaart in Nederland worden geproduceerd.

Vanaf 2030 groeit de rol van waterstof bij de balancering van het hele energiesysteem. Bij overschotten van duurzame elektriciteit wordt waterstof geproduceerd via elektrolyse. Bij tekorten aan elektriciteit worden waterstofcentrales ingezet. Deze centrales dienen het elektriciteitsnet te balanceren. In 2050 is conventioneel

⁵⁶ <https://ehb.eu/files/downloads/ehb-report-220428-17h00-interactive-1.pdf>

regelbaar vermogen hoofdzakelijk gebaseerd op waterstof, naast nucleair. Daarnaast vormt waterstof een belangrijke vorm van opslag, zowel op de korte termijn als voor seizoenflexibiliteit (ook ten behoeve van elektriciteit en warmte). Tijdige ontwikkeling van de gehele waterstofketen (productie, transport infrastructuur, opslag en importfaciliteiten) is hierbij belangrijk.

c. Warmte

De totale warmtevraag/-aanbod bedraagt in 2019 47 TWh. In 2050 kent de warmtevraag een grote bandbreedte van 20 tot 50 TWh. Voor elk scenario zijn power-to-heat, geothermie en restwarmte uit de industrie de belangrijkste warmtebronnen. In het scenario Decentrale Initiatieven speelt zonthermie ook een rol in de totale warmtelevering, in de andere drie scenario's zijn er boilers. In de industrie is een afname in de warmtevraag verwacht. Groei in de warmtevraag is met name toe te rekenen aan de toename van het aantal warmtenetten in de gebouwde omgeving. Deze sterke stijging van het aantal warmtenetten vraagt om tijdige ontwikkeling van de benodigde infrastructuur en duidelijke keuzes hierover door de betrokken overheden. Op dit moment is het tempo van de beoogde opschaling onvoldoende om de transitie van de sector tijdig te realiseren. De vraag vanuit de landbouw neemt af (bandbreedte van de afname is 30 tot 50%), onder andere vanwege een toename in efficiëntie.

d. Methaan (aardgas en groen gas)

De periode tot 2050 kenmerkt zich door een aanzienlijke afname van het methaangebruik. De binnenlandse aardgasproductie is de afgelopen jaren al sterk teruggelopen door de afbouw van productie uit het Groningenveld. Een andere ontwikkeling in de komende jaren betreft de afbouw van de export van aardgas. In 2050 is er geen binnenlandse productie van aardgas meer. Alle eindverbruik van methaan is dan groen gas. In het scenario Europese Integratie wordt nog wel aardgas geïmporteerd, voor de productie van blauwe waterstof.

De productiedaling wordt opgevangen door import en de productie van groen gas in Nederland. Het gebruik van groen gas varieert in 2050 tussen de 14 en 80 TWh. Van dit maximum wordt ongeveer de helft geproduceerd uit Nederlandse biomassa. Het restant wordt geïmporteerd. Om deze productie ook tijdig te kunnen realiseren, is passende stimulering nodig. De bijmengverplichting in de gebouwde omgeving kan hierbij een prikkel geven.

Alhoewel groen gas in 2050 een kleinere rol speelt in de scenario's dan diverse andere energiedragers, blijft de beschikbaarheid ervan belangrijk. Op dit moment is dierlijke mest de grootste biomassastroom die ingezet zou kunnen worden voor de productie van groen gas. Het is echter de vraag in hoeverre dit aanbod in de toekomst beschikbaar blijft. Indien er ingezet wordt op technische maatregelen voor (stikstofuitstoot van) de veestapel, is er meer mest beschikbaar voor verwerking dan wanneer de veestapel krimpt. Er zijn echter nog forse restemissies indien enkel ingezet wordt op technische maatregelen, dus is een krimp van de veestapel in de context van de stikstofopgave aangenomen. Dit verlaagt de hoeveelheid mest en daarmee de potentie om groen gas te produceren. Naast groen gas uit vergisting is er veel groeipotentieel voor productie uit vergassing (onder andere superkritische watervergassing). In 2050 zorgt deze techniek voor ongeveer de helft van het productievolume. Hiermee kan energie geproduceerd worden uit een diversiteit aan (afval)stoffen.

4. Koolstofbalans van het toekomstige duurzame energiesysteem

De industrie gebruikt vandaag de dag hoofdzakelijk fossiele brandstoffen als grondstof en schakelt in de scenario's over op een mix van gerecyclede, synthetische, biogene en fossiele grondstoffen. De beschikbaarheid van al deze grondstoffen is echter beperkt. Omdat er in Nederland relatief veel basisindustrie is die de producten exporteert, zijn de in Nederland beschikbare afvalstromen onvoldoende om alle basisindustrie mee te voeden. Deze stromen moeten dus ofwel geïmporteerd worden (wat vereist dat ze niet elders verwerkt worden) ofwel vervangen door een nieuwe bron. Als deze grondstoffen niet beschikbaar komen, zal er een kleinere koolstofintensieve basisindustrie in Nederland overblijven.

Het is niet goed mogelijk om tot een volledig circulaire industrie te komen. Er treden altijd verliezen op in de keten. Dat impliceert dat er nieuwe bronnen nodig zijn om bepaalde producten te maken, die biogeen, synthetisch of zelfs fossiel kunnen zijn. Fossiele grondstoffen kunnen alleen ingezet worden wanneer de koolstof vastgelegd kan worden voor de lange termijn. In het kader van landgebruik en voedselcompetitie is slechts een beperkte hoeveelheid biobased stromen beschikbaar in Nederland. De hoeveelheid afgevangen CO₂ die als bouwsteen kan dienen voor synthetische producten, is eveneens relatief schaars. Indien de koolstof bij gebruik niet vrijkomt en het product recyclebaar is, is daarmee wellicht nog een rol voor fossiele grondstoffen weggelegd. Kortom, hoe de koolstofstromen in de toekomst precies lopen en welk omvang deze hebben, is een thema waar de komende jaren beter zicht op verkregen moet worden.

5. Restemissies binnen en buiten het energiesysteem in 2050

In alle 2050-scenario's zijn er nog restemissies in Nederland, variërend tussen de 9 en 10 Mton. De uitstoot concentreert zich in de sector landbouw en landgebruik (veestapel, bodem, veenweidegebied). In de energie -en industriesector wordt ook CO₂ uitgestoten; deze wordt echter afgevangen en telt daarom niet mee in de emissiebalans. De Nederlands overheid heeft recentelijk de Nationale Klimaatwet aangescherpt met de ambitie heeft om in 2050 geheel klimaatneutraal te zijn binnen het grondgebied van Nederland. Daarmee ontstaat een noodzaak om additionele negatieve emissies te realiseren binnen de landsgrenzen.

Hoe dit het beste gedaan kan worden, vereist nog verder onderzoek. Er zijn diverse mogelijkheden, waaronder biogene en synthetische routes. In welke mate van het buitenland gebruik gemaakt kan worden is ook nog niet duidelijk⁵⁷. Voor bio-based zou extra natuur voor koolstofvastlegging gerealiseerd kunnen worden. Een andere optie is om biogene grondstoffen te gebruiken en de koolstof langdurig op te slaan in eindproducten of bijvoorbeeld onder de grond op te slaan. Deze routes vragen om meer biomassa en daarmee meer land, dat echter ook schaars is. De synthetische route kan eruit bestaan met 'direct air capture' (DAC) CO₂ uit de atmosfeer te binden en dit langdurig op te slaan in eindproducten of onder de grond. DAC is echter een energie-intensief proces, dus deze route vraagt om meer hernieuwbare energie.

Tot slot is het ook het vermelden waard dat er in alle eindscenario's nog (zeer grote) scope 3-emissies van het energiesysteem zijn. Deze emissies vallen buiten de gestelde doelen, maar betekenen wel dat in Nederland op grote schaal nog producten van fossiele brandstoffen gemaakt worden met een grote milieu-impact. Deze worden weliswaar niet in Nederland gebruikt, maar dragen wel bij aan de mondiale broeikasgasuitstoot. Dit vraagstuk is vele malen groter dan de genoemde restemissies uit landbouw en landgebruik, en mogelijk dus ook zeer beleidsrelevant.

7.2 Onzekerheden en dilemma's

De resultaten van de I13050-studie schetsen een klimaatneutraal Nederland in 2050. De scenario's zijn daardoor bruikbaar om het speelveld te bepalen ten aanzien van benodigde opwek, flexibiliteit, infrastructuur en opslag. Voor een juiste interpretatie van de resultaten en om eventuele vragen voor te zijn, gaan we in dit hoofdstuk in op de onzekerheden en dilemma's. De keuzes hierin vallen buiten de scope van de netbeheerders, maar zijn van grote impact op de scenario's. Het betreft de volgende kwesties:

1. Toekomst is intrinsiek onzeker.
2. Zelfvoorzienendheid versus import/export afhankelijkheid.
3. Hoe sturen Nederland en Europa de transitie?
4. Gebruik van de Noordzee.

⁵⁷ De in 2021 vastgelegde Europese Klimaatwet heeft expliciet als doel om als Europa geheel klimaatneutraal te zijn in 2050, maar ook expliciet als doel dat landen van elkaars bronnen en mogelijkheden gebruik maken.

5. Ontwikkeling van nieuwe en/of opschaling bestaande technologieën.
6. Regionalisering.
7. Synthetische brandstoffen in Nederland.
8. De koolstofketen.
9. Strategische opslag.
10. Restemissies in 2050.
11. Rechtvaardigheid en draagvlak.

1. Toekomst is intrinsiek onzeker

Perfect de toekomst voorspellen is onmogelijk. Trends worden gebroken, een baanbrekende innovatie vindt plaats (of juist niet), er komt regulering of een incident verandert ons gedrag tijdelijk of permanent. Allerlei gebeurtenissen kunnen een zeer grote impact hebben op aannames en uitkomsten van de scenario's. Het doel van I13050 is dan ook vooral mogelijke toekomsten uit te testen. Het is een middel om met de intrinsieke onzekerheid van de energietransitie om te gaan en zo goed mogelijk te begrijpen welke veranderingen nodig zijn (beleid, gedrag, overig) om de doelstelling klimaatneutraal in 2050 te realiseren. De inzichten van I13050 helpen bij het beantwoorden van vragen als: Hoe groot zou de opgave kunnen zijn? Wat zijn hoofd- en bijzaken? Hoe wenselijk zijn deze toekomstbeelden? Waar moeten we nu al over nadenken om problemen in de toekomst te voorkomen?

Tussen de eerste en tweede versie van I13050 zijn al grote verschillen in aannames te zien. Dit is het gevolg van voortschrijdend inzicht gedurende de afgelopen twee jaar. Dit maakt duidelijk dat de toekomstbeelden voor 2040 en 2050 niet in beton gegoten zijn en dat de scenario's over enkele jaren opnieuw geactualiseerd dienen te worden naar de nieuwste inzichten.

2. Zelfvoorzienendheid versus import/export afhankelijkheid

Net als bijna alle Europese landen is Nederland afhankelijk van andere landen om te voorzien in de energiebehoefte. In 2000 importeerde Nederland nog 38% van de benodigde energie, in 2020 was dat opgelopen tot 68%.⁵⁸ Het gemiddelde importcijfer in Europa bedroeg 58% in 2020 met uitlopers van 90% afhankelijkheid (Malta, Cyprus en Luxemburg) tot slechts 10% afhankelijkheid in Estland.

Import en export van energie verloopt momenteel grotendeels via een vrije marktwerking, er is tot zeer recent beperkt overheidssturing op. De afhankelijkheid van anderen wordt meestal gezien als geen probleem, zolang er vertrouwen is en de verwachting bestaat dat de importerende partijen blijven vragen en de exporterende partijen blijven leveren, tegen acceptabele prijzen. De inval van Rusland in Oekraïne en het gebruik van aardgas om Europa onder druk te zetten, legde kwetsbaarheden bloot in de energieafhankelijkheid van Europa. De EU was voor met name ruwe aardolie en aardgas sterk afhankelijk van specifiek één leverancier: Rusland en dit werd dus een probleem. Europa realiseerde zich dat importafhankelijkheid vergt dat er een gediversifieerde energiemix moet zijn met een groter aantal leveranciers. Ook kwam de focus meer te liggen op het streven naar meer energie-onafhankelijk en zelfvoorzienend te zijn (REPowerEU).

In de vier scenario's is die relatieve zelfvoorzienendheid op verschillende manieren meegenomen, met accentverschillen ten opzichte van de vorige editie. Gezien de recente gebeurtenissen, heeft dit element tot veel vragen geleid. Het is nu nog niet te zeggen en dat hebben we ook niet uitgewerkt welke handelspartners in 2050 goede en betrouwbaar zijn en welke niet.

Naast nadelen of risico's kent importeren ook voordelen. De kosten van importeren kunnen een stuk lager zijn dan zelf produceren. Een ander mogelijk voordeel is dat door niet alle energie zelf op te wekken, veel ruimte bespaard wordt in Nederland en op de Noordzee. Ruimte die in Nederland relatief schaars is. De inpassing van

⁵⁸ <https://ec.europa.eu/eurostat/cache/infographs/energy/bloc-2c.html?lang=en>

het energiesysteem is een uitdaging die verder besproken wordt in de dilemma's 'Gebruik van de Noordzee' en 'Regionalisering'. Daarnaast moet gezegd worden dat veel importeren niet per se synoniem is met een grote mate van afhankelijkheid, wanneer de importportfolio divers is. Zo kent logistieke import over land of zee andere afhankelijkheden dan import via vaste infrastructuur. Ook kan een variatie in aanbod van verschillende stakeholders de absolute afhankelijkheid verkleinen.

Daarnaast verwachten we dat Nederland in 2050 ook meer exporteert. Onze buurlanden, andere EU-lidstaten en de rest van de wereld zijn ook bezig met hun energietransitie en hebben soms minder mogelijkheden om zelf energie op te wekken en zelfvoorzienend te worden. Om klimaatverandering tegen te gaan, is mondiaal een reductie in uitstoot nodig en is samenwerken en exporteren van energie daarbij soms vereist.

3. Hoe sturen Nederland en Europa de transitie?

Met het Klimaatakkoord van Parijs is in 2015 afgesproken dat de opwarming van de aarde beperkt moet worden tot fors minder dan 2 graden Celsius ten opzichte van het pre-industriële tijdperk, met als streven de opwarming beperkt te houden tot 1,5 graad. In Nederland is deze ambitie vertaald naar een CO₂-reductiedoelstelling van ten minste 55% in 2030 ten opzichte van 1990 en klimaatneutraliteit in 2050. Hoewel dit een helder doel is, blijft de manier waarop dit gehaald moet worden onzeker.

Hoeveel ruimte krijgen lokale overheden en marktactoren om zelf hun transitie vorm te geven? Welke keuzes gaat de industrie maken en in hoeverre blijven zij in Nederland? Welke instrumenten gebruikt de nationale overheid om verandering te stimuleren of af te dwingen? Wat voor regelgeving wordt vanuit Europa vormgegeven en hoe wordt deze vertaald naar nationaal beleid? De nationale uitwerking van de Fit-for-55⁵⁹ of het gevolg van REPowerEU-voorstellen⁶⁰ zijn momenteel nog onduidelijk, maar hebben verstrekkende doelstellingen op het gebied van energiebesparing, hernieuwbare energie, groene waterstof en het ETS-handelssysteem.

In de vier scenario's van deze verkenning zijn alle schaalniveaus relevant. Elk scenario kent echter een ander accent, variërend van decentrale, nationale, Europese tot internationale aanpakken.

4. Gebruik van de Noordzee

Een van de startpunten van de scenario's was om de hoeveelheid duurzame opwek te bepalen. De maximaal mogelijke hoeveelheid wind-op-zee is hierbij gesteld op 72 GW. Hierbij is rekening gehouden met het ruimtebeslag voor onder andere de vaarroutes, natuurgebieden en militaire oefengebieden.⁶¹ In de toekomst (ook na 2050) kunnen er echter nieuwe ruimteclaims bijkomen. Het is dus onzeker in hoeverre er ook daadwerkelijk ruimte is voor 72 GW. Hetzelfde geldt voor de ruimte op Nederlands landgebied voor onshore wind- en zonneparken. Hier hebben nóg meer partijen een deel van de ruimte nodig. Mogelijk gaat de Noordzee gebruikt worden ten behoeve van export, waarbij het de vraag is welk verdienpotentieel voor Nederland daarin zit. Dit is ook gerelateerd aan het dilemma 'Zelfvoorzienendheid versus import/export'. Een andere vraag is welke energiedragers uiteindelijk op zee geproduceerd worden. In alle scenario's wordt een flink deel van de elektriciteit op de Noordzee geproduceerd en in een deel ervan geldt dit ook voor waterstof. Ook dit heeft invloed op de mogelijke indeling van de Noordzee.

5. Ontwikkeling van nieuwe en/of opschaling bestaande technologieën

Deze studie gaat uit van vele veranderingen in ons energiesysteem om te komen tot klimaatneutrale scenario's voor 2050. Hierbij hebben we zo goed mogelijk rekening gehouden met de huidige stand der techniek en voorspellingen gedaan over de technologische ontwikkeling. Het is echter niet goed mogelijk om rekening te houden met disruptieve technologieën en potentiële 'game changers'. Een snellere of juist tragere ontdekking van

⁵⁹ <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/#:~:text=The%20Commission%20presented%20the%20proposal,in%20the%20fossil%20fuels%20sector>

⁶⁰ https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_3131

⁶¹ North Sea Energy Outlook 2020 <https://www.government.nl/documents/reports/2020/09/01/report-north-sea-energy-outlook>

nieuwe oplossingen of tegenvallende resultaten beïnvloeden het tempo van de transitie en de situatie zoals die er in 2050 uit kan zien. Hieronder gaan we in op de meest bepalende nieuwe technologieën en noemen we technologieën die fors opgeschaald moeten worden. We geven daarbij onze verwachting over het tijdframe (wanneer is een technologie beschikbaar en wanneer is deze nodig?), de regionale impact (waar zou dit kunnen en op welke schaal?) en de interactie met of impact op andere energieopwekking, flex of energiedragers.

5.1 Kernenergie (grootschalig)

Momenteel worden de voorbereidingen gestart voor de bouw van twee kerncentrales van de derde generatie in Borssele. Naar verwachting zijn deze rond 2035 operationeel en hebben opgeteld een vermogen van zo'n 2,6 GW. De kerncentrales voorzien in circa 9 tot 13% van de elektriciteitsproductie in 2035.⁶²

- Tijdframe: in Europa worden de meeste kerncentrales met budgetoverschrijding en uitloop van meerdere jaren opgeleverd. De kans is dus aanwezig dat de twee centrales in Borssele later operationeel zijn. In dat geval is er waarschijnlijk langer conventioneel vermogen noodzakelijk.
- Regionaal: beide centrales zijn op dit moment voorzien in Borssele. Hier wordt de huidige centrale vervangen en afhankelijk van het scenario (Nationaal Leiderschap of Europese Integratie) komt er extra vermogen bij of neemt dit af (Decentrale Initiatieven en Internationale Handel). Een toe-/afname van het nucleaire vermogen heeft impact op de benodigde netcapaciteit.
- Overig: er is politiek soms aandacht voor de ontwikkelingen op het gebied van thorium. Dit heeft mogelijk invloed op de daadwerkelijke productie van de te bouwen conventionele centrales. De verwachting is niet dat thoriumreactoren op tijd beschikbaar zijn.

5.2 Direct Air Capture (DAC)

De inzet van DAC kent twee voorname redenen. Ten eerste kan zo in de vraag naar koolstofmoleculen voor bijvoorbeeld de industrie of glastuinbouw worden voorzien. Ten tweede kan DAC gebruikt worden voor koolstofopslag ter compensatie van uitstoot, bijvoorbeeld ter verduurzaming van moeilijk te decarboniseren sectoren zoals de lucht- en scheepvaart. Grootschalige inzet van DAC kent vier vereisten: veel goedkope stroom en warmte, beschikbaarheid van ruimte, infrastructuur om koolstof te transporteren en op te slaan, plus een markt in negatieve emissies.

- Tijdframe: volgens het IEA is op korte termijn het totaal opgesteld productievermogen van DAC 1 Mton CO₂ per jaar. Om wereldwijd 'net zero' te halen, is opschaling tot 60 Mton CO₂ per jaar nodig in 2030; op dit moment lijkt 5,5 Mton CO₂ per jaar gerealiseerd te gaan worden. 2050 vergt een verdere forse opschaling.⁶³
- Regionaal: grootschalige inzet van DAC heeft veel ruimte nodig. TNO becijferde recentelijk dat om in 2050 te voorzien in de behoefte aan brandstoffen en chemische bouwstenen (vraag vanuit bedrijven cluster Rotterdam) een Tweede Maasvlakte nodig is. Het is dus onzeker of de totale inzet van DAC past in Nederland.
- Overig: de technologie van DAC bestaat, maar technologische innovaties zijn nodig om de energievraag per afgevangen ton CO₂ en de ruimtevraag te beperken en zo de wereldwijd benodigde volumes te kunnen halen. De inzet van DAC in Nederland is tevens sterk afhankelijk van het transitietempo van de lucht -en scheepvaart, in combinatie met de locatie waar deze sector primair gaat tanken.

5.3 Elektrolyse

Groene waterstof wordt geproduceerd met elektrolyzers. De wereldwijd opgestelde capaciteit bedraagt eind 2022 zo'n 1 GW. Volgens het IEA kan dit volume groeien tot gemiddeld 180 GW in 2030. Dit is al een forse toename, maar voor een net-zero scenario in 2050 is eigenlijk al 700 GW in 2030 nodig.⁶⁴

- Tijdframe: het geplande opgestelde vermogen voor elektrolyzers is in Nederland zo'n 0,75 GW in 2027 en 3 tot 4 GW in 2030. Dit is nog beperkt en investeringsbeslissingen komen lastig van de grond. De huidige drempels hiervoor (beperkt aanbod van infrastructuur en onduidelijkheid over wet -en regelgeving) worden de

⁶² <https://www.rijksoverheid.nl/actueel/nieuws/2022/12/09/borssele-voorkeurslocatie-voor-twee-nieuwe-kerncentrales>

⁶³ <https://www.iea.org/reports/direct-air-capture>

⁶⁴ <https://www.iea.org/reports/electrolyzers>

komende jaren verhelderd. Opschaling na 2030 (met ook meer goedkope elektriciteit) lijkt daarmee haalbaar. Zeker gezien het feit dat de productiecapaciteit van PEM- en ALK-elektrolyzers aanzienlijk toeneemt en de techniek volwassener wordt.

- Regionaal: afhankelijk van het type elektrolyser en de productiemethodiek neemt een 1 GW-elektrolyser tussen de 8 en 17 hectare aan ruimte in beslag (ISPT, 2020). Elektrolyzers moeten dicht bij een elektriciteitskabel en aan een waterstofnet worden geplaatst. Uitgaande van 12,5 hectare per 1 GW-elektrolyser kan 32 GW aan elektrolyzers gebouwd worden op het nieuw aangekochte terrein van de Eemshaven (400 hectare).
- Overig: de productie, handel en regelgeving zijn momenteel nog fors in ontwikkeling. De kostprijs van groene waterstof is nu nog vele malen hoger dan het fossiele alternatief. Beleidsinstrumentarium zoals het EU-ETS, normering van inzet groene waterstof en dergelijke lijkt noodzakelijk om te komen tot een rendabele businesscase op de korte tot middellange termijn.

5.4 Opslag van energie

In 2050 is in elk scenario een grote rol weggelegd voor het (kunnen) opslaan van energie. De (tijdige) beschikbaarheid van opslagcapaciteit vormt een grote onzekerheid en aandachtspunt in de energietransitie. Opslag van energie is op dit moment voorzien door middel van batterijen, warmtebuffers en waterstof en leveren een belangrijke vorm van flexibiliteit.

- Tijdfraam: opslag van energie in batterijen gebeurt al op redelijke schaal, met name in de transportsector. Warmtebuffers zijn technologisch volwassen, maar spelen in de praktijk een kleine rol. Middelgrote opslag van waterstof in zoutcavernes is voorzien voor eind dit decennium. Grootschalige opslag in oude gasvelden zit echter nog in de onderzoeksfase.
- Regionaal: inzet van batterijen op kleine schaal kent weinig ruimtebeslag. GW-formaatbatterijen die naast een station staan zijn niet overal eenvoudig in te passen. Warmtebuffers kunnen ondergronds aangelegd worden. De bovengrondse impact op het ruimtebeslag lijkt daarmee beperkt. Afhankelijk van de diepte kan het op veel tot juist weinig plaatsen in Nederland. De opslag van waterstof (anders dan in een schip) is sterk geografisch gebonden.

6. Regionalisering

Het ETM is een nationaal energiesysteemmodel en gaat ervan uit dat er geen netcongestie is. Alleen vraag en aanbod worden gebalanceerd en nog niet de daadwerkelijke inzet van of effect op de infrastructuur (de zogeheten 'koperen plaat'-aannee). De ETM-resultaten worden geregionaliseerd, zodat elke netbeheerder beschikt over een inschatting van de vraag- en aanbodprofielen in een bepaalde buurt, wijk of verdeelstation. Deze regionalisatie maakt gebruik van de huidige kennis over waar bedrijven zitten en mensen wonen, aangevuld met aannames over de veranderende vraag. Naast de groei en/of afname van een vraag per sector moet ook rekening gehouden worden met nieuwe vraag per sector. Deze regionale verdeling is lastig in te schatten. Waar komen nieuwe woonwijken? Waar komt nieuwe industrie zoals datacenters en synthetische-brandstofproductie? Waar komen de toekomstige laadpunten voor de transportsector en de flexibiliteitsmiddelen? De antwoorden op deze vragen hebben alle grote impact op de resultaten, maar veelal ontbreken bronnen die dit al in kaart hebben voor 2050. De gemaakte aannames worden verder beschreven in hoofdstuk 6.

7. Synthetische brandstoffen in Nederland

Op dit moment verwerken de Nederlandse raffinaderijen ongeveer 2.400 PJ aan aardolie op jaarbasis; een deel ervan gaat naar Nederlands wegverkeer, een deel naar internationale scheepvaart en luchtvaart, een deel naar de chemie en een deel wordt geëxporteerd. In de verschillende scenario's verdwijnt de vraag naar fossiele brandstoffen op basis van aardolie (vrijwel) volledig. Daarbij wordt doorgaans en op hoofdlijnen voorzien dat het wegverkeer elektrificeert, de scheepvaart overschakelt op ammoniak en de luchtvaart op synthetische kerosine. Het is nog niet bekend waar deze synthetische brandstoffen vandaan komen.

In de scenario's Nationaal Leiderschap en Europese Integratie vindt deze productie (deels) in Nederland plaats. Het gaat hier al snel om hoeveelheden waarbij – zeker in de context van de ontwikkelingen van andere vraagsectoren – de grenzen van wat er lokaal in Nederland aan duurzame stroom, waterstof en koolstof geproduceerd en getransporteerd kan worden, snel in zicht komen. Voor deze scenario's is daarom besloten de plannen om synthetische brandstoffen te produceren naar beneden bij te stellen. Daarmee is Nederland niet zelfvoorzienend in haar consumptie van synthetische brandstoffen, al is dat nu ook niet het geval, omdat daarvoor aardolie geïmporteerd wordt.

Hoe groot de productie van synthetische brandstoffen in Nederland wordt, is voor een belangrijk deel afhankelijk van de economische competitiviteit van lokale productie ten opzichte van import enerzijds en de mate waarin we zelf in deze brandstoffen wensen te voorzien anderzijds. Over dit vraagstuk moet nog een verdere maatschappelijke discussie plaatsvinden, waarbij ook gaat meespelen in hoeverre de overheid deze ontwikkelingen ondersteunt.

In de scenario's hebben we echter keuzes moeten maken en daarbij de industrieplannen bijgesteld. Op basis van eerdere studies (HyChain) lijkt het voorstelbaar dat het goedkoper is om synthetische brandstoffen te importeren dan ze lokaal te produceren. In het kader van de in deze scenario's opgestelde capaciteit aan hernieuwbare opwek, lijkt de ruimte voor de productie van synthetische brandstoffen gevoed door Nederlandse stroom beperkt. Indien we vervolgens waterstof moeten importeren om, gecombineerd met CO₂-neutrale koolstof (die we wellicht ook moeten importeren, zie hieronder), synthetische brandstoffen te maken, is het al gauw qua kosten en infrastructuur efficiënter om de eindproducten rechtstreeks te importeren. Dit is natuurlijk mede afhankelijk van de importmogelijkheden en ontwikkelingen in de wereld.

8. De koolstofketen

In de Nederlandse industrie worden vandaag de dag hoofdzakelijk aardolie, aardgas en kolen als grondstof gebruikt. Indien de industrie wil overstappen op andere, niet-fossiele bronnen, heeft zij doorgaans de keuze uit biogene, gerecyclede en synthetische grondstoffen. Deze zijn echter ook niet onbeperkt beschikbaar.

De koolstofketen bevat uiteindelijk waarschijnlijk een mix van alle type grondstoffen: gerecycled, biogeen, synthetisch en fossiel. Hoe groot die aandelen in de mix precies zijn, is voor een belangrijk deel afhankelijk van de handel die hierin mogelijk is. Daarbij is het vanuit oogpunt van circulariteit wenselijk dat de gerecyclede stroom substantieel is. Het biogene aandeel blijft waarschijnlijk beperkt, gegeven de volumes en de footprint. Synthetische productie speelt wellicht enige rol en fossiele bronnen fungeren met name als sluitpost daar waar andere bronnen of recycling beperkt zijn.

Het is hierbij van belang om onderscheid te maken tussen specifiek CO₂ als grondstof (het geval voor synthetische grondstoffen) en overige moleculen als grondstof (biogeen/gerecycled/fossiel). Er is dus sprake van een koolstofketen in brede zin en daarbinnen ook van een CO₂-balans (voor synthetische grondstoffen), een afvalbalans (gerecyclede grondstoffen), een biomassabalans (voor biogene grondstoffen) en een restvraag naar fossiele grondstoffen.

De inzet van biomassa in de industrie vraagt in alle scenario's een grondgebruik van minstens ongeveer het equivalent van het Nederlandse landbouwareaal, en in het scenario Europese Integratie een veelvoud daarvan. Het gaat hier om biomassa die ingezet wordt als grondstof voor biobrandstoffen (bio-kerosine), groen gas en bio-nafta. Deze vraag is volledig additioneel aan de bestaande biomassavraag in het heden. De ruimte om additionele biomassa uit Nederland te betrekken, is beperkt, dus het overgrote deel van deze vraag moet vanuit het buitenland ingevuld worden. Het is de vraag of al deze (duurzame) biomassa beschikbaar is en geïmporteerd kan worden.

Sommige stromen van producten kunnen we na hun levensduur recyclen. Hierbij gaat het met name om plastic. In Nederland wordt aanzienlijk meer plastic geproduceerd dan geconsumeerd. Indien we in de toekomst waar mogelijk Nederlands plastic afval zouden recyclen en weer als grondstof voor de chemie gebruiken, is dat bij lange na niet genoeg om alle stoomkrakers in Nederland te voeden. Slechts een fractie van de toekomstige vraag naar pyrolyse-olie in de scenario's kan met lokaal geproduceerde pyrolyse-olie ingevuld worden. Om een circulaire plastics-keten in te richten, waarbij de krakers in Nederland blijven staan, moet afval van de geëxporteerde kunststoffen (mogelijk reeds verwerkt tot pyrolyse-olie) op grote schaal geïmporteerd worden. Of we inderdaad al dit afval of deze pyrolyse-olie kunnen importeren en of dit niet elders verwerkt wordt, is nog een open vraag. Verder bestaan er ook synthetische routes, waarbij uit een bron van koolstof en waterstof producten opgebouwd worden. Specifiek voor de plastics-keten lijkt het logischer om direct ethyleen te maken, dan om eerst synthetische nafta te maken en dat weer te kraken tot ethyleen. Anderzijds geeft de productie van synthetische kerosine ook fracties zoals synthetische nafta. Die zou dan in een stoomkraker gekraakt kunnen worden tot ethyleen. Deze synthetische routes hebben gemeen dat ze CO₂ als grondstof nodig hebben en daarnaast een grote elektriciteitsvraag genereren. Als dit op grote schaal gebeurt, is meer CO₂ nodig dan er op jaarbasis uit andere processen afgevangen wordt. Dit gebeurt in het scenario Nationaal Leiderschap. Dat betekent dat afgevangen CO₂ geïmporteerd moet worden of dat deze CO₂ via 'direct air capture' (DAC) uit de atmosfeer komt.

Bij een beperkte beschikbaarheid van gerecyclede en biogene moleculen en beperkte synthetische productie, kunnen fossiele grondstoffen nog steeds een rol spelen, zolang de koolstof bij het gebruik van het product niet vrijkomt en het product recyclebaar is. In een productketen zijn er onvermijdelijke verliezen en is een volledig circulaire keten daarmee vrijwel onmogelijk te realiseren. Daarom is het ondoenlijk de basisindustrie te voeden met 100% gerecyclede stromen (van zelfgeproduceerde producten), zeker ook omdat een groot deel van de geproduceerde producten geëxporteerd wordt.

9. Strategische opslag

Momenteel houdt Nederland voor circa 90 dagen binnenlands verbruik (ongeveer 4 Mton)⁶⁵ aan strategische voorraad aan voor olie. Deze voorraadverplichting volgt uit Europese richtlijnen.⁶⁶

Richting 2050 verdwijnt veel van de huidige vraag naar olieproducten, ten gunste van hernieuwbare energie zoals waterstof en ammoniak. De capaciteit van strategische reserves van deze hernieuwbare energiedragers is een politieke keuze. Strategische voorraden kunnen worden aangehouden ter compensatie van geïmporteerde energie of ter compensatie van de binnenlandse productie van hernieuwbare energie. Deze is namelijk onderhevig aan onzekerheid vanwege variatie in weersomstandigheden.

In overleg met het Ministerie van EZK is er vooralsnog voor gekozen de omvang van deze opslag te bepalen op basis van het scenario. In scenario's met weinig import (zoals Decentrale Initiatieven) kan strategische opslag nodig zijn om een jaar met een 'misoogst' van stroom uit zon en wind, een hogere vraag door lage temperaturen of een combinatie daarvan aan te kunnen. In scenario's met veel import (zoals Internationale Handel) is strategische opslag van belang om een periode met minder import door een plotselinge geopolitieke wending op te kunnen vangen. Om opslagcapaciteit te balanceren, is in scenario's als standaard weerjaar een jaar geselecteerd met veel verschillende weersomstandigheden.

Bij strategische opslag ten behoeve van 'slechte' weerjaren (een jaar met weinig wind en zon) kan gekeken worden naar periodes van meerdere jaren. Strategische gasopslag kan in de vorm van waterstof in cavernes (en wellicht in lege gasvelden), maar er wordt ook gekeken naar strategische opslag in de vorm van methaan of ammoniak. Het gegeven dat de strategische opslag in de praktijk niet vaak wordt aangesproken, kan een rol spelen bij de keuze van beschikbaar te maken capaciteit.

⁶⁵ <https://cova.nl/voorraadplicht/>

⁶⁶ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/NL/ALL/?uri=CELEX%3A32009L0119>

10. Restemissies in 2050

Alle 2050-scenario's hebben als doel dat de broeikasgasemissies in Nederland in 2050 netto nul zijn. Bij verdere inspectie blijken deze scenario's op sommige fronten toch restemissies te kennen, die soms al gecompenseerd worden en soms niet. Deze restemissies worden hieronder toegelicht voor scope 1 (directe emissies), scope 2 (indirecte emissies van ingekochte energie en grondstoffen) en scope 3 (ketenemissies):

- **Scope 1.** Van directe restemissies is met name sprake in de industrie en in de landbouw en betreffen vrijwel alleen procesemissies. In totaal gaat het om ongeveer 5% van de emissies van 1990. In de industrie worden nog zeer beperkt op enkele plaatsen fossiele grondstoffen ingezet, waarbij niet alle emissies afgevangen (kunnen) worden. De hoogte hiervan verschilt per scenario, maar is niet meer dan een paar Mton CO₂-eq. In de landbouw (en landgebruik) bestaan nog restemissies van de bodem en de veestapel, in totaal ongeveer 9 Mton CO₂-eq. Door veenoxidatie stoten de veengronden broeikasgassen uit zolang ze niet volledig vernat zijn. Bij de aanlevering van nutriënten via dierlijke mest, kunstmest en compost naar de landbouwgronden ontstaat via bodemprocessen lachgas, een zeer krachtig broeikasgas. Tot slot is de veestapel verantwoordelijk voor het grootste deel van de emissies van de landbouw, hoofdzakelijk via pensfermentatie bij rundvee. Deze restemissies moeten gecompenseerd worden.
- **Scope 2.** De indirecte emissies dalen ook hard in de scenario's, maar niet volledig naar nul. Alle energie en grondstoffen die ingekocht worden en in Nederland geproduceerd zijn, kennen in principe geen indirecte emissies – de directe energetische emissies zijn immers netto nul, zoals hierboven beschreven. Er worden echter ook energiedragers en grondstoffen ingekocht die in het buitenland geproduceerd en daarmee niet per se CO₂-neutraal zijn. Hierbij kan het onder andere gaan om elektriciteit, waterstof, ammoniak, ijzererts of ijzerbriketten en fossiele brandstoffen. Voor de indirecte emissies wordt daarbij enkel gekeken naar de directe emissies van de productie van het ingekochte product. De overige ketenemissies vallen onder scope 3.
- **Scope 3.** De overige ketenemissies zijn onder te verdelen in een upstream en downstream deel:
 - Upstream ketenemissies betreffen alle emissies verder terug in de keten, vóór de vervaardiging van het ingekochte product. Voor fossiele brandstoffen gaat het dan bijvoorbeeld om de extractie van deze brandstoffen. De upstream ketenemissies zijn niet volledig in kaart gebracht en zijn ook afhankelijk van de scenarioveronderstellingen over wat er in de rest van de wereld gebeurt op het gebied van de energietransitie.
 - De downstream ketenemissies betreffen alle emissies verderop in de keten. Ook deze zijn niet makkelijk in kaart te brengen (en tevens afhankelijk van de scenarioveronderstellingen over de rest van de wereld), omdat hierbij bijvoorbeeld bekend moet zijn van een product zoals een kunststof die geëxporteerd wordt, hoe dit aan het eind van zijn levensduur verwerkt wordt. Er is echter één belangrijke stroom waarbij deze ketenemissies wel bepaald kunnen worden en dat zijn de fossiele transportbrandstoffen. Daarvan is bekend dat ze bij gebruik volledig verbrand worden. In alle 2050-scenario's zijn er nog forse ketenemissies van de fossiele raffinaderijen, omdat deze nog fossiele transportbrandstoffen aan andere werelddelen leveren. Bedragen deze vandaag de dag ongeveer 120 Mton CO₂-eq, in 2050 tellen ze, afhankelijk van het scenario, nog op van tientallen tot bijna 100 Mton CO₂-eq.

Waar in de scenario's de scope 1- en scope 2-emissies netto (bijna) nul zijn, zijn de scope 3-emissies van het energiesysteem nog steeds (zeer) hoog. Het is de vraag of dat acceptabel is, en of hierop gestuurd gaat of kan gaan worden. Want op deze manier draagt de Nederlandse samenleving toch bij aan klimaatverandering door producten te maken die bij hun gebruik inherent veel broeikasgasemissies genereren.

11. Rechtvaardigheid en draagvlak

De energietransitie is een grote verandering van het energiesysteem met vergaande impact op alle inwoners en bedrijven in Nederland. Alle scenario's worden aan het einde van het proces in het eindrapport van I13050 uitgedrukt in termen van hun impact op tijd, ruimte, maakbaarheid en grondstoffen. Het dilemma dat hier

aangestipt wordt, is de rechtvaardigheid van die claim op deze middelen om de decarbonisatie voor elkaar te krijgen. Wie draagt de kosten en hoe worden deze verdeeld? Moeten de grootste (huidige of vroegere) veroorzakers van vervuiling ook het meest inleveren om de doelen te behalen of dragen we dit met z'n allen omdat we allen voordeel hebben bij het resultaat? Of worden de lasten verlegd naar de toekomst?

Vele stakeholders (overheid, ngo's, marktpartijen, burgers) discussiëren hierover en proberen een zo goed mogelijke oplossing te formuleren. Hoe wij als maatschappij deze oplossingen vorm willen geven, heeft invloed op de uiteindelijke transitieroute. En als de oplossingen door (delen van) de maatschappij als onrechtvaardig worden ervaren, vormt dit een risico voor het draagvlak van de energietransitie als geheel.

7.3 Varianten voor nader onderzoek

De vier scenario's zijn samengesteld op basis van een groot aantal uitgangspunten en aannames, rondvraag, aanbod en flexibiliteit. Het geheel van deze uitgangspunten en aannames bepaalt de uitkomsten van de scenario's. Daardoor is het niet goed mogelijk om de impact van specifieke ontwikkelingen en keuzes direct te verbinden aan de resultaten van de scenario's.

In aanvulling op de vier scenario's worden daarom ook diverse *variantanalyses* uitgevoerd. In deze variantanalyses zijn de aannames c.q. volumes van een specifiek onderwerp aangepast en vergeleken met de resultaten binnen één of meer van de basisscenario's. De variantanalyses zijn daarmee gevoeligheidsanalyses op diverse relevante ontwikkelingen en keuzes.

De analyses van de vier scenario's leveren veel aanknopingspunten om een visie te ontwikkelen op mogelijke toekomstige knelpunten in de huidige infrastructuur. Sommige aannames hebben echter zo'n wezenlijke impact dat ze tot heel andere uitkomsten kunnen leiden, wanneer ze zich anders ontwikkelen dan aangenomen. Het is niet haalbaar om alle variabelen uit te diepen. Daarom beperken we ons tot het onderzoeken van de onderstaande varianten, die naar verwachting aanvullende duiding bieden op de benodigde transitie van het systeem. De uitkomsten van de variantenanalyse worden beschreven in het eindrapport van I13050.

A. Optimalisatie van de hoeveelheid opwekking

De hoeveelheid opwek is als een van de eerste aannames binnen de scenario's vastgeklekt. Het betreft de omvang van het aanbod van duurzame energie en werkt door in veel andere aannames. Zo is de hoeveelheid opwek dermate sterk verweven met parameters als de minimale vollasturen, dat aanpassen ongewenste effecten met zich meebracht. Daarom is ervoor gekozen om het verminderen van opwek mee te wegen als variant. In variant A1 vindt geen nucleaire opwek plaats en wordt een extra aandeel zon/wind op land geplaatst; in variant A2 wordt er minder wind op zee geplaatst. Deze varianten zijn toegepast binnen het scenario Nationaal Leiderschap.

B. Impact van locaties voor duurzame opwek

De locaties van opwek hebben grote invloed op de aard van de knelpunten in de infrastructuur. In de varianten B1 (PEH-regionalisering) en B2 (centralere productie) worden er verschillende locaties voor opwek gekozen. Deze varianten worden vergeleken met het scenario Decentrale Initiatieven. De PEH-regionalisering komt uit het Programma Energie Hoofdstructuur van de overheid. Bij variant B2 wordt er minder wind op land en meer wind op zee geplaatst. Ook is er zon op zee toegevoegd en komen er meer centrale zonneparken op land in plaats van decentraal op de daken van gebouwen.

C. Verkennen bandbreedte flexibiliteit hoeveelheden

Een conclusie van de vorige en ook deze tweede editie van I13050 is dat er veel soorten flexibele middelen benodigd zijn om het energiesysteem over de ketens heen te balanceren. Een deel ervan kan onderling

uitgewisseld worden. Met de varianten C1, C2 en C3 worden respectievelijk batterijen, power-to-gas en power-to-heat gemaximaliseerd om de effecten hiervan te onderzoeken. Zo gaat bij het maximaliseren van power-to-gas een deel van het vermogen power-to-heat en batterijen af en omgekeerd. Dit geeft een indicatie van de benodigde en mogelijke bandbreedtes voor deze flexibiliteitsmiddelen. Gezien de relevantie van dit inzicht, wordt dit onderzocht voor zowel het scenario Decentrale Initiatieven als Nationaal Leiderschap.

D. Flexibiliteitsbehoefte bij andersoortige klimaatjaren

Hernieuwbare opwek door zon en wind betekent een grotere afhankelijkheid van weersinvloeden. Het aantal vollasturen van wind-op-zee, wind-op-land en zon-PV varieert aanzienlijk per jaar. Ook de energievraag wordt sterk beïnvloed door het weersprofiel. Dit maakt dat de benodigde flexibiliteit, waaronder back-upgeneratie en -opslag, per jaar aanzienlijk kan verschillen. Het 'standaard' jaar 2012 omvat periodes met veel opwek en weinig opwek in combinatie met veel vraag en weinig vraag. Om het effect van weerjaren in kaart te brengen, zal er over alle vier de scenario's heen een analyse worden gedaan. Variant D1 is gebaseerd op een uitdagend weerjaar waarin het koud was in de winter, heet in de zomer en er weinig opwek plaatsvond. Deze variant geeft inzicht in de benodigde back-upenergie die dan beschikbaar moet zijn. Variant D2 is gebaseerd op een makkelijker jaar waarin het warm was in de winter, koel in de zomer en er veel opwek plaatsvond. Deze variant geeft inzicht in de implicaties van veel overproductie. Met behulp van het ETM zijn eenvoudig vele jaren te analyseren en is goed te identificeren wat uiteindelijk het moeilijkste of makkelijkste weerjaar is. De varianten zijn aan elkaar gerelateerd via het opslagvraagstuk en kunnen samen een indicatie geven van de minimaal en maximaal benodigde opslag over de jaren.

E. Inzicht in het effect van flexibel gedrag

Flexibel gedrag is moeilijk in te schatten en afhankelijk van heel veel factoren. Om de bandbreedte ervan in kaart te kunnen brengen, zijn twee varianten onderzocht. In variant E1 – gedrag volgt balans volledig – is aangenomen dat het voor alle vraagsectoren haalbaar is om grote flexibiliteit te tonen en dat opslag zich redelijk voorspellend gedraagt door de pieken en dalen te voorzien. Ook is aanbodrespons meer geaccepteerd. Variant E2 – geen flexibel gedrag – maakt het effect zichtbaar wanneer er helemaal niet gereageerd wordt op prijs- of balansprikkels. Ook gedraagt de opslag zich minder efficiënt vanwege minder inzicht in de verwachte pieken en dalen en wordt er al gehandeld bij een klein prijsverschil. Deze varianten worden uitgevoerd als marktanalyse voor de scenario's Decentrale Initiatieven en Nationaal Leiderschap.

F. Optimalisatie flexlocaties

De benodigde inzet van flexibele middelen neemt toe. De fysieke locatie waar deze flexibiliteit zich gaat bevinden, heeft grote impact op de uitkomsten. In variant F1, grid-optimized, wordt de standaard regionalisering van flexibiliteit losgelaten en wordt de flexibiliteit geconcentreerd in gebieden waar die de impact op infrastructuur helpt verminderen. Het doel is het effect van goed geplaatste flexibiliteit in kaart te brengen en inzicht te geven in welke gebieden flexibiliteit uit het oogpunt van infrastructuur de meeste toegevoegde waarde heeft. Dit vermindert de noodzaak van uitbreiding van de energie-infrastructuur. Daarnaast biedt variant F2 – onshore/offshore flex – de mogelijkheid om conversie, opslag en aanbodrespons exclusiever bij offshore opwekking te plaatsen en het effect hiervan te beschouwen. De vergelijking van deze varianten is het interessantst bij het meest geëlektrificeerde scenario, Nationaal Leiderschap, en wordt daarvoor uitgevoerd.

G. Inzicht in de impact van de hoeveelheid synthetische-brandstofproductie in Nederland

Voor synthetische brandstoffen gelden twee varianten. In variant G1, geen synthetische brandstoffen, is alle energievraag naar synthetische-brandstoffenproductie uit het scenario gehaald en in variant G2, uitgevraagde synthetische brandstoffen, worden alle synthetische brandstoffen die in het consultatietraject naar voren kwamen in Nederland geproduceerd. Beide varianten worden onderzocht in de scenario's Nationaal Leiderschap en Europese Integratie.

H. Afhankelijkheid van grote Industrie

Voor de industrie is een uiteenlopende groei of krimp verondersteld in de verschillende scenario's. Dit heeft een grote impact op waar knelpunten in de infrastructuur tot stand komen. In variant H1, industrie vertrekt niet, wordt gekeken naar de impact als de industrie toch zou blijven. Dit wordt onderzocht binnen het scenario met de kleinste industriële vraag, omdat (tussen)producten gedeeltelijk elders worden geproduceerd (Internationale Handel). In variant H2, industrie vertrekt wel, wordt voor het scenario met de grootste industriële vraag (Europese Integratie) gekeken naar wat er zou gebeuren wanneer de industrie toch zou vertrekken.

I. Impact warmte bij huishoudens

Huishoudens hebben gezamenlijk een grote warmtevraag die op meerdere manieren ingevuld kan worden. De aannames binnen de verschillende scenario's hieromtrent lopen uiteen. Om beter het effect van de warmtenetten te duiden, is er voor het scenario met de minste warmtenetaansluitingen een variant I1 gemaakt met meer warmtenet. Deze is uitgevoerd binnen het scenario Internationale Handel. Daarnaast wordt in variant I2 het effect van meer airco's in de toekomst onderzocht.

J. Import doorvoer van verschillende duurzame gassen

In elk scenario wordt een (verschillende) hoeveelheid waterstof door Nederland heen gevoerd. Dit sluit aan bij de scenario's van de Europese TSO's van het TYNDP. Deze doorvoer heeft geen effect op de binnenlandse vraag en aanbod van waterstof, maar wel op de benodigde waterstofinfrastructuur. In variant J1, hogere waterstoftransit, is gekeken naar het effect van een grotere lokale vraag in het scenario Nationaal Leiderschap, in combinatie met een hogere waterstofdoorvoer. In variant J2 wordt de impact van ammoniak in plaats van waterstof als energiedrager voor import en doorvoer verkend. Dit doen we voor de scenario's Nationaal Leiderschap en Europese Integratie.

K. Impact van andere marktreguleringen op de infrastructuur

Extra energie-infrastructuur is niet de enige oplossing voor knelpunten. Door slimme inzet van de energiemarkt en/of met de juiste regelgeving omtrent het aansluiten van partijen, zijn deze eveneens te voorkomen. Bijvoorbeeld door het mogelijk te maken om partijen aan te sluiten die alleen gebruik maken van de energie-infrastructuur wanneer er ruimte beschikbaar is. Dit door afspraken te maken over flexibel gedrag, gebruik te maken van 'cable pooling' of via andere nog onvoorzien manieren. Zo kan een mismatch tussen vraag en aanbod die nu in de berekeningen een knelpunt veroorzaakt, anders gedefinieerd worden. In variant K1, tijdsgebonden contracten, wordt er gekeken naar het samenvoegen van profielen, het effect van de mogelijkheid van balanceren van het net en de infrastructuur tot het uiterste gebruiken (actieve N-1) voor het scenario Nationaal Leiderschap.

Alle beschreven varianten zijn samengevat in Tabel 14.

Tabel 14. Overzicht van de varianten.

#	Inzicht variant	Kwantificatie	Scenario
A	Optimalisatie van de hoeveelheid opwekking	A1: Zonder nucleair, minder zon/wind op land	NAT
		A2: Minder wind op zee	
B	Impact van locaties voor duurzame opwek	B1: PEH-regionalisering	DEC
		B2: Centralere productie	
C	Verkennen bandbreedte flexhoeveelheden	C1: Maximaliseren batterijen	DEC & NAT
		C2: Maximaliseren Power to gas	
		C3: Maximaliseren Power to heat	
D	Flexibiliteitsbehoefte bij andersoortige klimaatjaren	D1: Moeilijk jaar (koud in winter, heet in zomer, weinig opwek)	DEC & NAT & EUR & INT
		D2: Makkelijk jaar (warm in winter, koel in zomer, veel opwek)	
E	Inzicht in het effect van flexibel gedrag	E1: Gedrag volgt balans volledig	DEC & NAT
		E2: Geen flexibel gedrag	
F	Optimalisatie flexlocaties	F1: Grid-optimized	NAT
		F2: Onshore/offshore flex	
G	Inzicht in de impact van de hoeveelheid synthetische brandstoffenproductie in Nederland	G1: Geen synfuels	NAT & EUR
		G2: Uitgevraagde synfuels	
H	Inzicht afhankelijkheid van grote Industrie	H1: Industrie vertrekt niet (Int met Industrie Europees)	INT
		H2: Industrie vertrekt wel (Eur met Industrie Internationaal)	EUR
I	Impact warmte bij huishoudens	I1: Meer warmtenet I2: Meer airco's	INT
J	Impact doorvoer van verschillende duurzame gassen	J1: Hogere waterstof transit (INT hoeveelheid in NAT) J2: Aanlanding ammoniak en transport als ammoniak	NAT & EUR
K	Impact van marktreguleringen op de infrastructuur	K1: Tijdgebonden contracten	NAT

Niet elke variant wordt op hetzelfde niveau uitgewerkt. Zo wordt de impact van de verschillende weerjaren over alle scenario's bekeken om op hoog niveau te analyseren tot welke effecten dit leidt qua vraag, aanbod en flexibilitateinszet, maar wordt hiervoor geen netberekening uitgevoerd. Voor marktgerelateerde effecten is ook geen netberekening nodig, al beïnvloeden marktgerelateerde effecten naar verwachting wel het knelpuntenoverzicht. Andere varianten, zoals de impact van duurzame opweklocaties, vergen wel een volledige balancering en netberekening. De impact en analyses van de gekozen varianten volgen in het eindrapport van II3050.

Bijlage A: Invloed van het weerjaar

De transitie van fossiele naar hernieuwbare energie betekent een grotere afhankelijkheid van weersinvloeden. Het weer heeft namelijk grote invloed op de productie van hernieuwbare elektriciteit en andere duurzame energiedragers waarvoor hernieuwbare elektriciteit benodigd is. Meer wind resulteert in een hogere productie van hernieuwbare elektriciteit door windturbines, en meer zonuren betekent een hogere elektriciteitsopbrengst door zon-PV. Het aantal vollasturen van wind-op-zee, wind-op-land en zon-PV varieert echter sterk per jaar, wat leidt tot variatie in de productie van hernieuwbare elektriciteit.

Naast wind en zon speelt de buitentemperatuur een belangrijke rol. In tegenstelling tot wind en zon heeft de buitentemperatuur weinig invloed op de aanbodzijde van hernieuwbare energie, maar vooral op de vraagzijde. Bij een lagere buitentemperatuur neemt de vraag naar warmte sterk toe. Dit is met name zichtbaar in de gebouwde omgeving. De impact van lage buitentemperaturen op de gebouwde omgeving wordt vaak uitgedrukt in gewogen graaddagen, want daarmee kan berekend worden hoeveel energie er benodigd is om een woning of gebouw te verwarmen.

Ook is er veel variatie binnen elk weerjaar. In sommige periodes is de buitentemperatuur erg laag (veel gewogen graaddagen), waait de wind weinig en schijnt de zon nauwelijks. Dergelijke periodes kunnen problemen opleveren voor duurzame-energiesystemen, omdat het aanbod van energie sterk afneemt en de vraag naar energie stijgt als gevolg van lage buitentemperaturen. Het aanbod van hernieuwbare energie is in deze periodes niet toereikend, waardoor opgeslagen energie aangewend moet worden om toch in de vraag te kunnen voorzien.

Weerjaren met extreme periodes zijn interessant voor analyses, omdat hiermee de scenario's robuust gemaakt kunnen worden. Hierin onderkennen we drie extremen:

1. Hoog aanbod en hoge vraag: hoe krijgen we het aanbod direct naar de markt getransporteerd?
2. Hoog aanbod en lage vraag: hebben we voldoende opslag om de overschotten te bewaren?
3. Laag aanbod, hoge vraag: hebben we voldoende energie in opslag om dit magere jaar door te komen?

Voor de berekeningen in dit rapport is het weerjaar 2012 als standaard gehanteerd, met een correctie voor verwachte klimaatverandering (1,5 graad warmer dan in het weerjaar 2012). In de tweede versie van het eindrapport II3050 wordt de impact van het weer op de resultaten (aanbod elektriciteit en waterstof) nader toegelicht en worden de implicaties ervan in beeld gebracht.

Bijlage B: Cijferbijlage

Resultaten voor 2035 en 2040

Tabel 15 bevat de voornaamste kengetallen en uitkomsten van de scenario's, met 2019 ter referentie.

Tabel 15 - Overzicht voornaamste kengetallen I13050-2e editie: 2035 en 2040

			2019	2035			2040			
			Referentie	KA	ND	IA	DEC	NAT	EUR	INT
Vraag	Elektriciteitsvraag	TWh	119	234	314	209	290	327	259	230
	w.v. Gebouwde omgeving	TWh	56,0	57,6	57,2	58,4	62,4	59,0	63,0	64,1
	w.v. Transport	TWh	2,4	33,4	42,5	21,2	38,9	49,4	41,1	28,1
	w.v. Industrie	TWh	41,3	64,9	78,9	55,3	80,3	88,0	73,5	66,6
	w.v. Landbouw, ICT, energie	TWh	19,0	29,9	34,5	26,5	30,8	34,1	34,0	30,5
	w.v. Flex: p2x en opslag	TWh	0,0	48,3	101,1	47,8	77,9	96,1	47,6	40,3
	Methaanvraag	TWh	374	155	126,4	138	85,0	72,4	116,3	81,4
	w.v. Gebouwde omgeving	TWh	109	46,8	40,8	61,1	24,7	24,1	40,0	34,9
	w.v. Transport	TWh	1	0,0	0,0	0,0	2,3	0,2	3,7	0,2
	w.v. Industrie	TWh	104	50,7	46,9	44,7	41,5	26,9	50,5	28,7
	w.v. Landbouw	TWh	10,5	2,1	0,0	2,2	0,0	1,0	1,1	1,1
	w.v. Flex: centrales en piekketels	TWh	150,5	55,2	38,6	30,0	16,5	20,2	20,9	16,5
	Waterstofvraag	TWh	0,0	69,0	65,8	107,9	87,3	77,7	91,6	142,1
	w.v. Gebouwde omgeving	TWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,3	11,9
	w.v. Transport	TWh	0,0	6,6	4,3	17,6	8,1	5,9	6,4	24,4
w.v. Industrie	TWh	0,0	54,9	47,4	63,9	52,9	50,5	60,6	72,8	
w.v. Landbouw	TWh	0,0	0,0	0,0	2,3	0,0	0,0	0,0	3,2	
w.v. Flex: centrales en piekketels	TWh	0,0	7,6	14,0	24,1	26,4	21,4	22,2	29,8	
Productie	Windenergie	GW	4	41	44,2	40	48	66	40	47
	w.v. op land	GW	3,5	10,6	12,7	8,1	12,1	15,1	8,7	8,7
	w.v. op zee (elektrisch)	GW	1,0	27,5	29,5	25,5	32,0	41,5	31,5	31,5
	w.v. op zee (waterstof)	GW	0,0	3,0	2,0	6,0	4,0	9,0	0,0	7,0
	Zon PV*	GW	6,2	75,9	98,2	52,6	126,1	122,7	92,6	68,2
	w.v. op land en water	GW	0,7	26,3	33,9	19,5	41,8	41,8	29,2	24,6
	w.v. gebouwen en woningen	GW	5,5	49,6	64,3	33,1	84,3	80,9	63,4	43,6
	Overig hernieuwbaar	GW	1,0	1,1	1,2	1,1	0,3	0,3	0,5	0,5
	Groengas	TWh	1,7	26,4	14,5	41,0	32,4	21,6	57,7	27,4
	Aardgaswinning	TWh	278	16,7	16,7	16,7	7,2	7,2	7,2	7,2
	Waterstof groen	TWh	0,0	23,3	51,3	37,6	48,5	76,3	22,9	38,4
	Waterstof blauw	TWh	0,0	41,9	39,8	38,1	33,2	33,2	42,8	37,0
	Waterstof import	TWh	0,0	49,9	15,5	106,9	47,8	14,7	112,1	169,8
	Waterstof export	TWh	0,0	46,0	40,3	73,5	41,2	45,8	85,3	101,6
	Flexibiliteit	Methaan opslag	TWh	nb	26,6	21,9	27,2	13,0	13,7	20,0
Gas	Waterstof opslag	TWh	0,0	2,6	7,3	6,3	11,1	8,5	9,6	15,3
Centrales	Nucleair	GW	0,5	0,5	0,5	0,5	0,0	1,5	4,0	0,0
	Kolen (incl. meestook)	GW	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Gas (aard-/groen)	GW	20,1	12,3	9,6	8,2	6,8	6,3	5,5	4,0
	Waterstof	GW	0,0	3,5	6,0	8,5	10,6	8,9	8,9	10,6
Flexibiliteit	Power-to-gas	GW	0,0	4,0	13,6	5,6	14,5	16,8	8,5	7,8
Elektriciteit	Power-to-heat	GW	0,0	5,3	8,5	3,7	9,9	10,0	4,5	3,7
	Batterijen incl. EV	GW	0,0	22,7	31,5	13,7	42,4	42,0	29,2	24,7
	Vraagsturing (industrie)	GW	0,0	2,0	2,5	1,7	4,7	5,1	2,6	2,5
	Interconnectie (E)	GW	5,9	13,8	13,8	13,8	14,8	14,8	14,8	14,8
	Totaal	Totaal hernieuwbaar vermogen	GW	15,2	131,7	158	107,4	190,7	212,7	141,9
	Totaal conventioneel vermogen	GW	24,6	16,3	16,1	17,2	17,3	16,8	18,4	14,6
	Totaal flex vermogen	GW	5,9	47,8	69,9	38,4	86,2	88,6	59,6	53,5
Emissies	Indicatie restemissies	Mt CO ₂ eq	183	71	60	65	38	40	44	39
	Indicatie reductie t.o.v. 1990	%	20%	69%	74%	71%	83%	82%	81%	83%

Kostenparameters

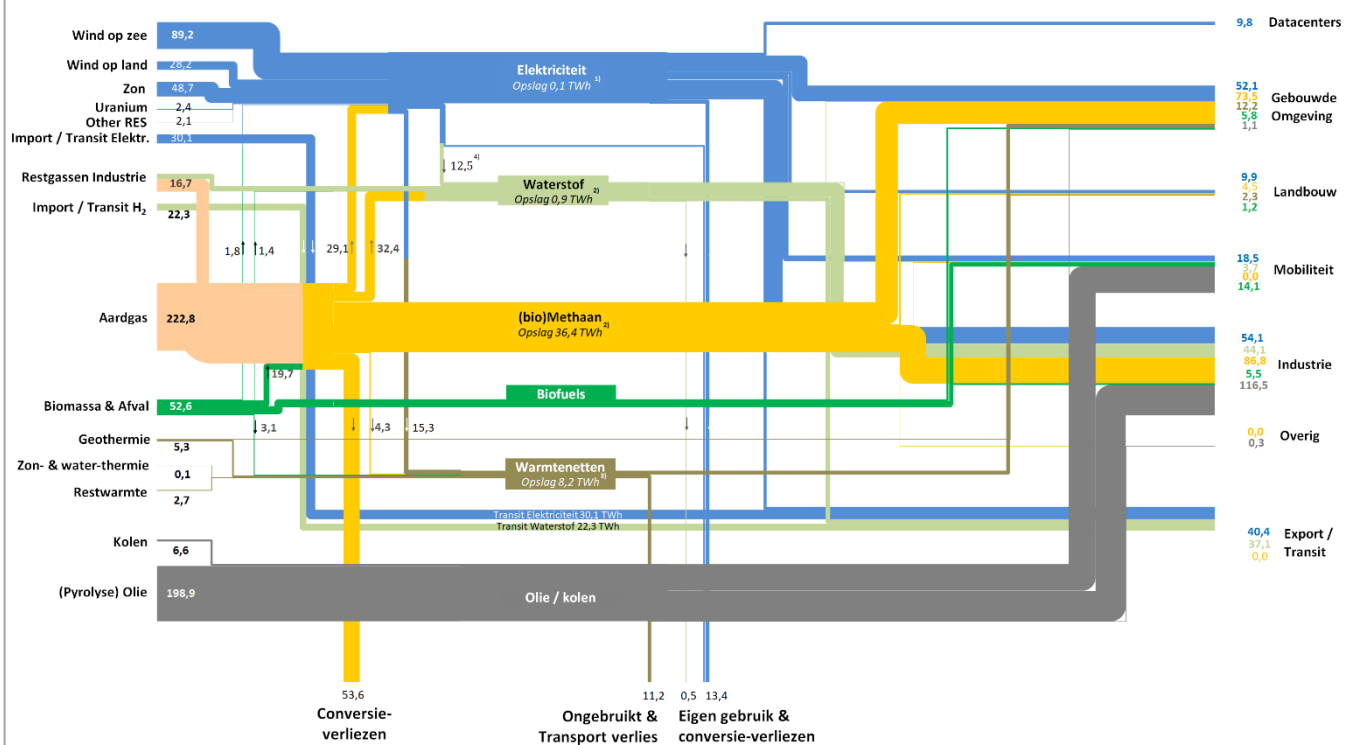
De onderstaande tabel toont de kostenparameters. De basis komt uit het Ten Year Network Development Plan (TYNDP) zoals opgesteld door de Europese netbeheerders van de ENTSOs. Daarna zijn een aantal parameters aangepast met eigen inzichten.

Categorie	Type prijs	Eenheid	2030	2040	2050	Bron
CO2	CO2	€/tonne	78	123	168	TYNDP2022
Nucleair	Brandstof	€/kg	69	69	69	TYNDP2022
Kolen		\$/tonne	57,7	56,3	54,8	TYNDP2022
Olie		\$/barrel	64,4	61,3	58,2	TYNDP2022
Methaan		€/MWh	14,5	14,7	14,7	TYNDP2022
Biomethaan		€/MWh	74,7	61,0	50,3	TYNDP2022
Synthetische methaan		€/MWh	104,3	84,1	65,1	TYNDP2022
Waterstof		€/MWh	57,0	30,0	30,0	Eigen aanname
Power-to-gas		Willingness-to-pay	€/MWh	30,0	30,0	30,0
Power-to-heat	€/MWh		25,0	25,0	25,0	Eigen aanname
DSR (metaalindustrie)	Willingness-to-accept	€/MWh	200,0	100,0	100,0	Eigen aanname
DSR (chemie-industrie)		€/MWh	200,0	100,0	100,0	Eigen aanname
DSR (overige industrie)		€/MWh	200,0	100,0	100,0	Eigen aanname
DSR (datacenters)		€/MWh	200,0	100,0	100,0	Eigen aanname

Sankey-diagrammen 2030 en 2040

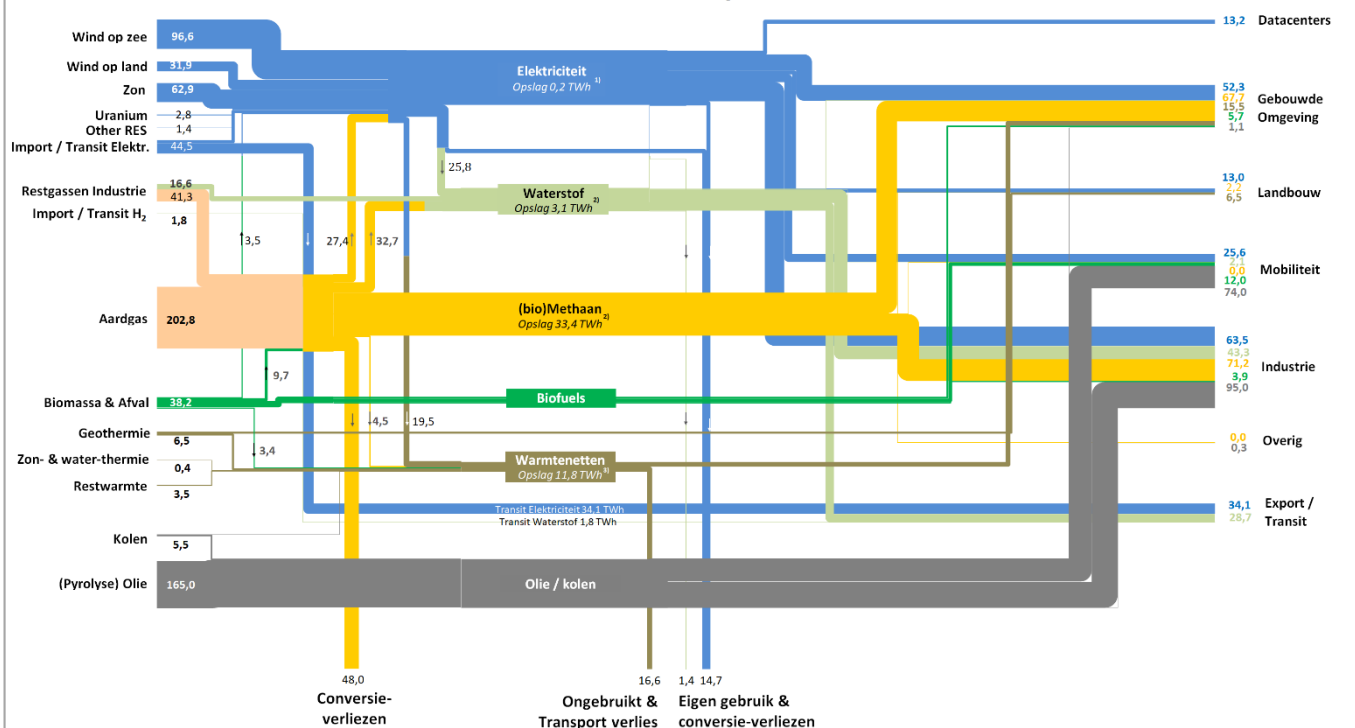
Onderstaande Sankey-diagrammen tonen de energiestromen voor 2030 en 2040 voor de verschillende scenario's. Merk op dat de Sankey-diagrammen voor 2030 enigszins kunnen afwijken van de figuren in het IP2024-rapport. Reden hiervoor is een enigszins gewijzigde weergave alsmede correcties van onnauwkeurigheden.

IP2024: Klimaat Ambitie 2030

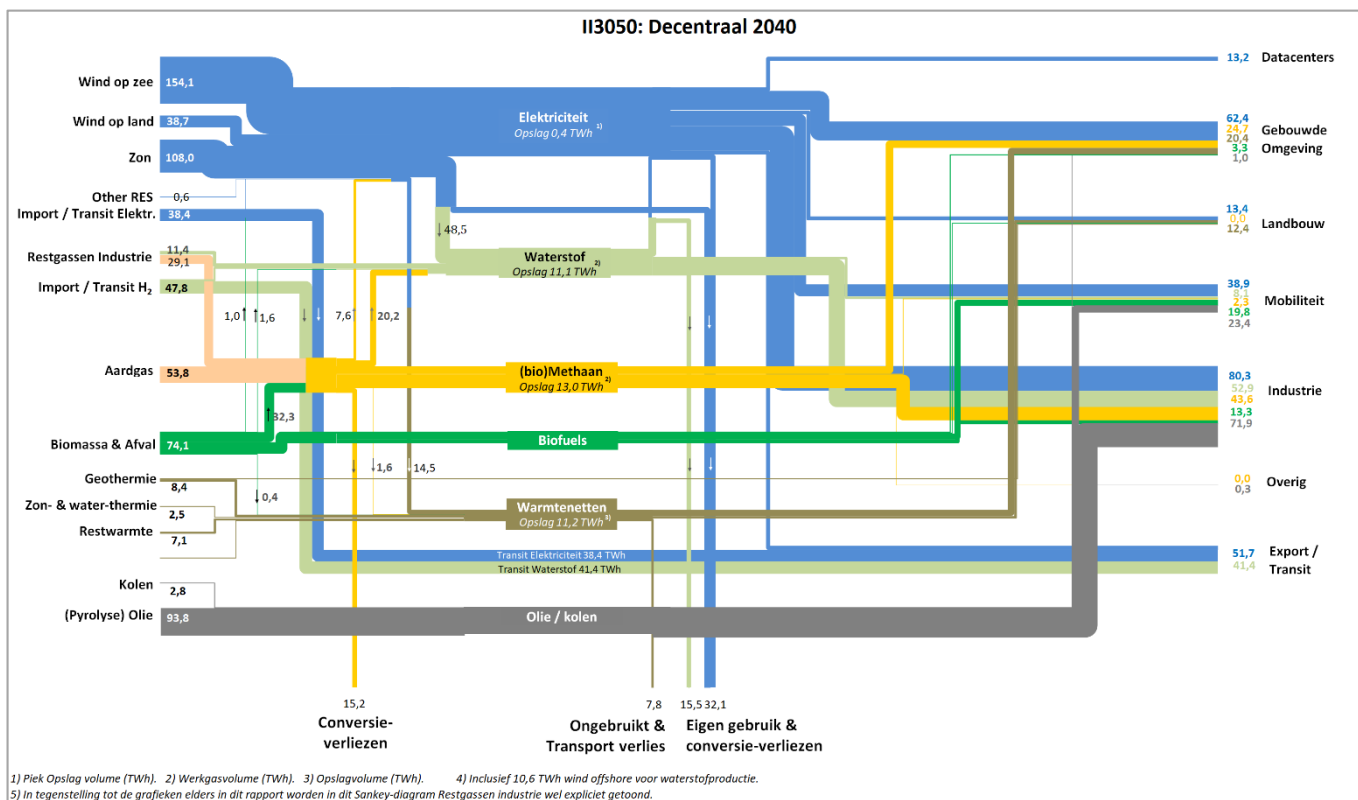
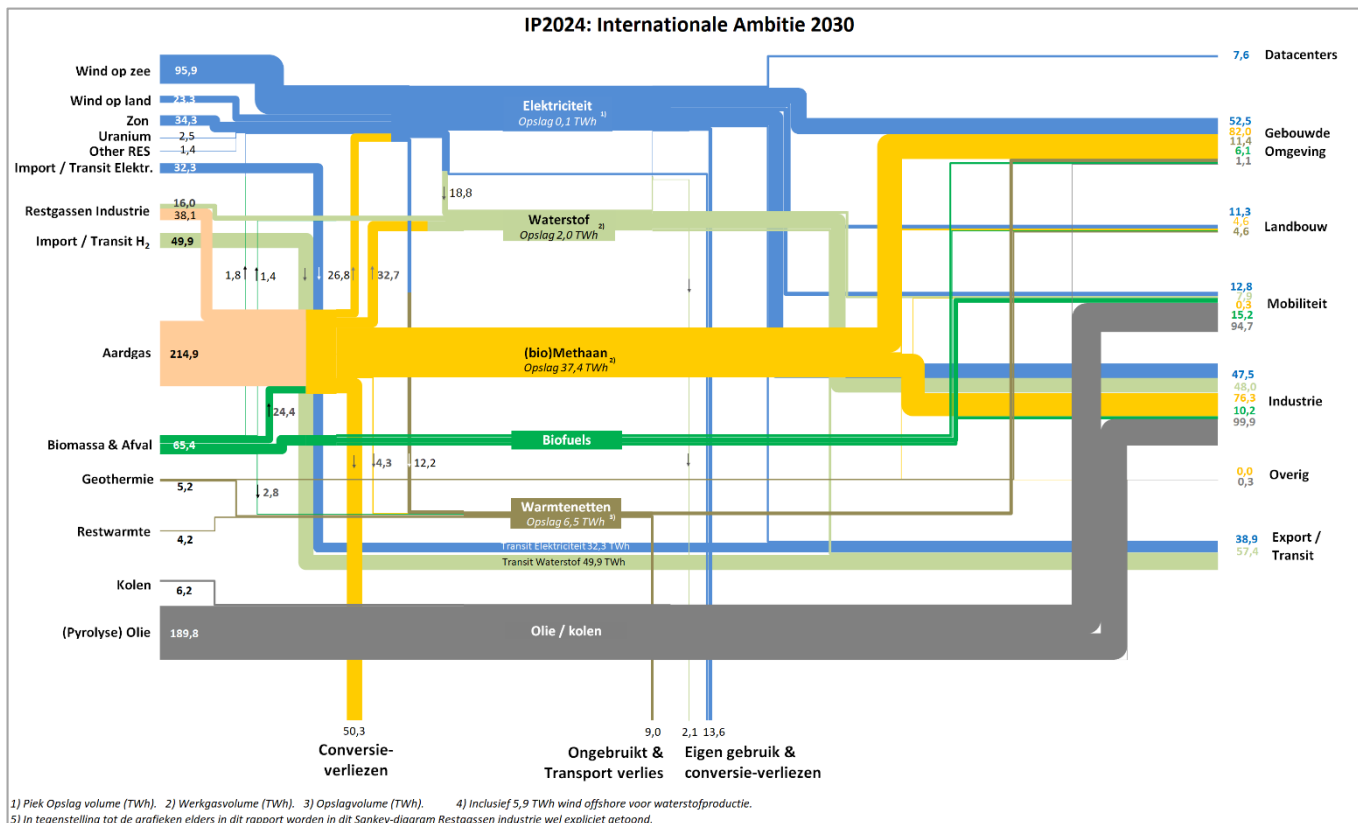


1) Piek Opslag volume (TWh). 2) Werkgasvolume (TWh). 3) Opslagvolume (TWh). 4) Inclusief 1,8 TWh wind offshore voor waterstofproductie. 5) In tegenstelling tot de grafieken elders in dit rapport worden in dit Sankey-diagram Restgassen Industrie wel expliciet getoond.

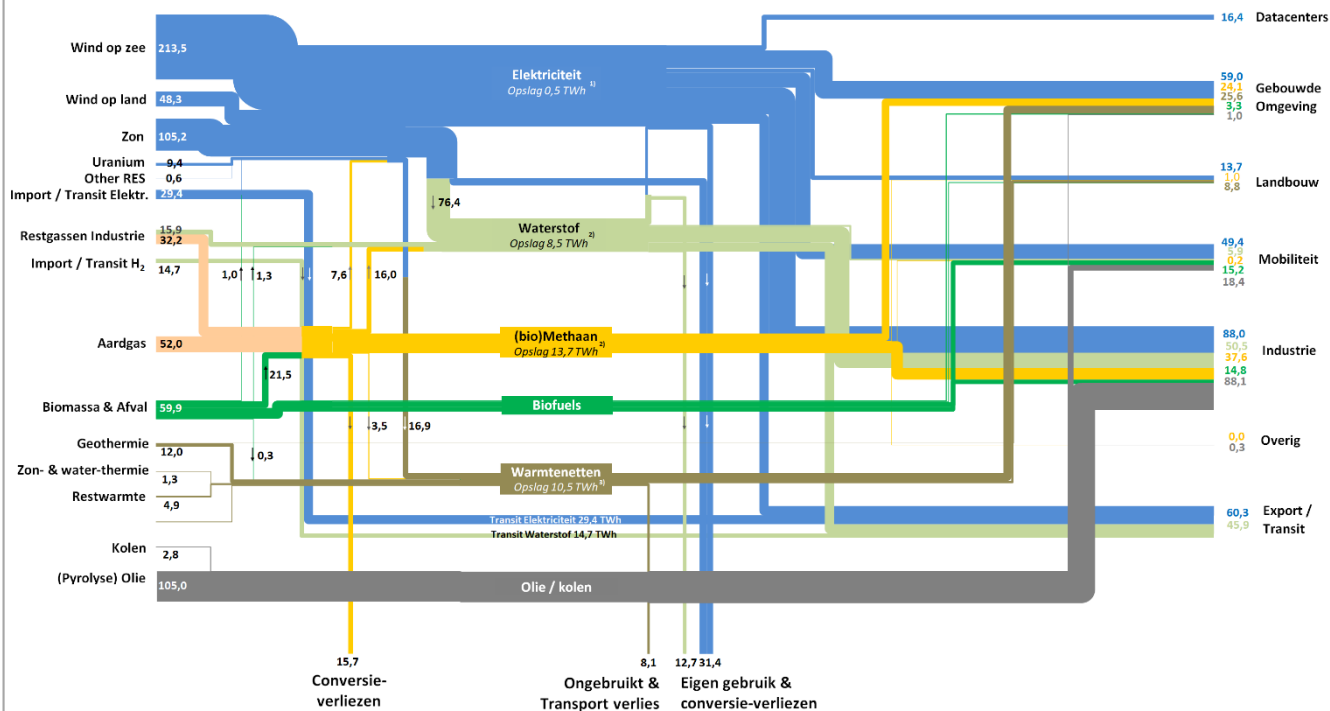
IP2024: Nationale Drijfveren 2030



1) Piek Opslag volume (TWh). 2) Werkgasvolume (TWh). 3) Opslagvolume (TWh). 5) In tegenstelling tot de grafieken elders in dit rapport worden in dit Sankey-diagram Restgassen Industrie wel expliciet getoond.

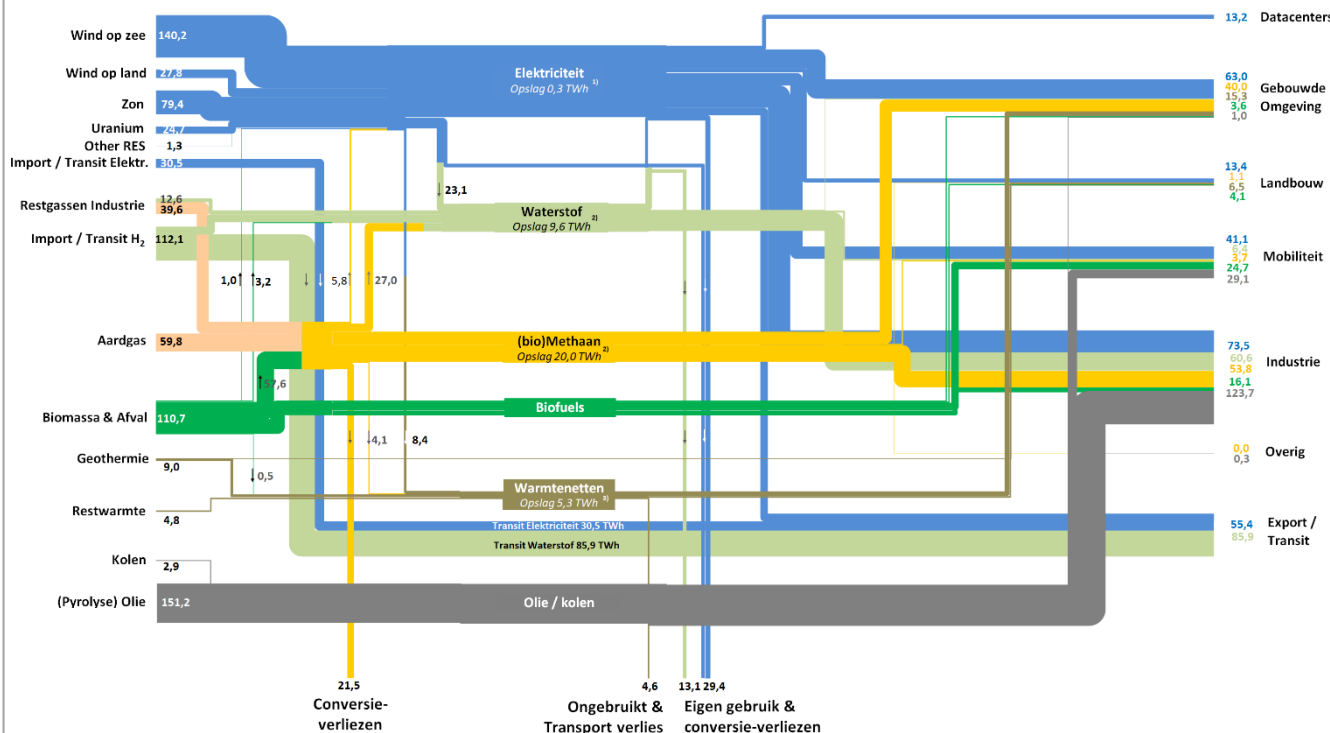


II3050: Nationaal 2040

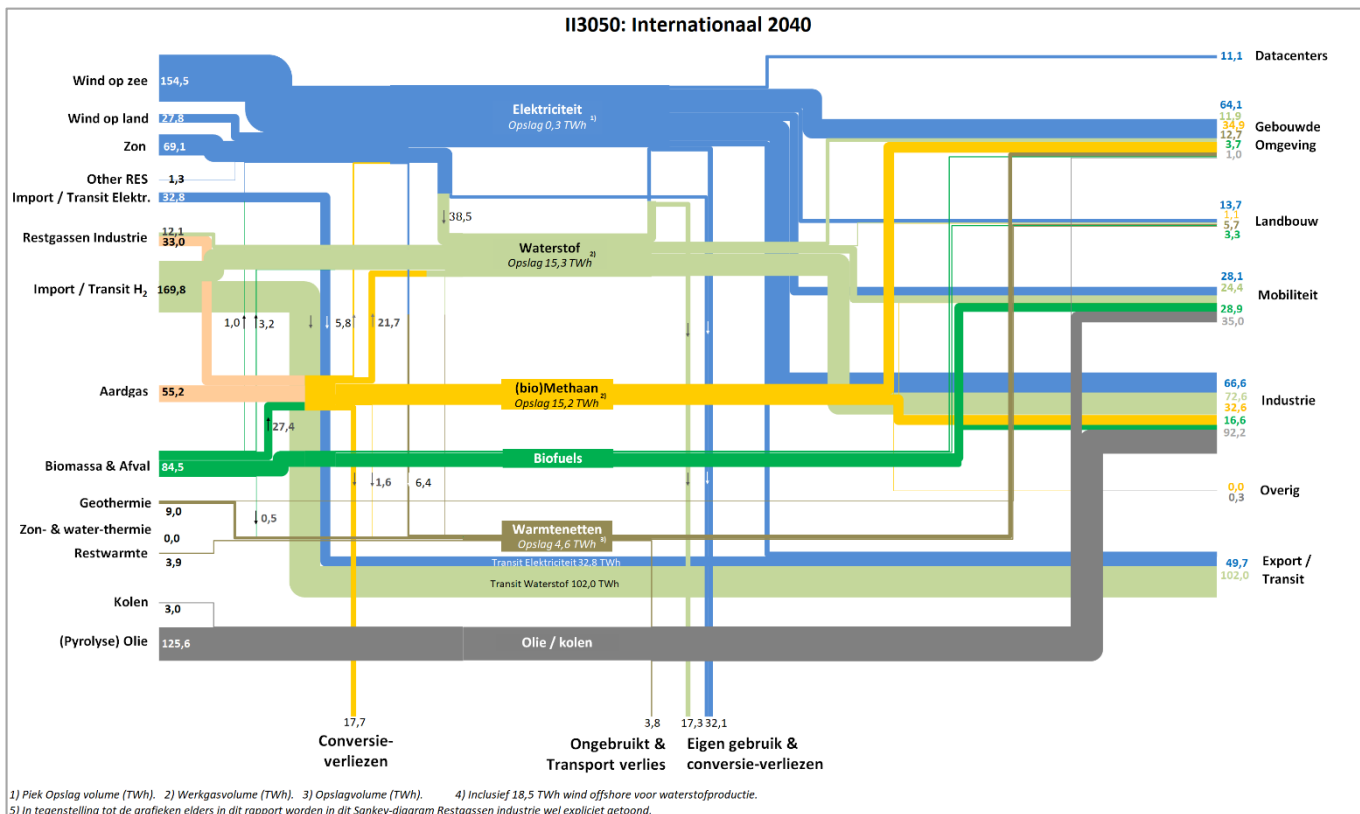


1) Piek Opslag volume (TWh). 2) Werkgasvolume (TWh). 3) Opslagvolume (TWh). 4) Inclusief 28,2 TWh wind offshore voor waterstofproductie.
 5) In tegenstelling tot de grafieken elders in dit rapport worden in dit Sankey-diagram Restgassen Industrie wel expliciet getoond.

II3050: Europees 2040



1) Piek Opslag volume (TWh). 2) Werkgasvolume (TWh). 3) Opslagvolume (TWh).
 5) In tegenstelling tot de grafieken elders in dit rapport worden in dit Sankey-diagram Restgassen Industrie wel expliciet getoond.



Bijlage C: Afkortingen en begrippen

Afkortingen

ATR	Autothermal Reforming
AVI	Afvalverbrandingsinstallatie
bcm	Billion cubic meter – miljard m ³
BECCS	Bio-energy CCS, negatieve emissies
CBS	Centraal Bureau voor de Statistiek
CCGT	Combined Cycle Gas Turbine
CCS	Carbon Capture & Storage; afvang en opslag van CO ₂
CCU	Carbon Capture & Utilisation; afvang en gebruik van CO ₂
CES	Cluster Energie Strategie
COP	Coefficient of performance
CTM	Carbon Transition Model
DAC	Direct Air Capture
DEC	Decentrale Initiatieven-scenario
DSR	Demand Side Response
DRI	Directly Reduced Iron
EAF	Electric Arc Furnace
ENTSOs	European Network of Transmission System Operators voor gas (ENTSOG) en elektriciteit (ENTSO-E)
ETM	Energie Transitie Model
ETS	Emission Trading System
EUR	Europese Integratie-scenario
EV	Elektrisch voertuig
EZK	Ministerie van Economische Zaken en Klimaat
G14	14 grootste industriële uitstoters van broeikasgassen
GW	Gigawatt
IA	Internationale Ambitie-scenario
INT	Internationale Handel-scenario
IP	Investeringsplan van de netbeheerders
KA	Klimaatambitie-scenario <i>In IP2022</i> : Klimaatakkoord-scenario
KEV	Klimaat- en Energieverkenning (PBL e.a., jaarlijkse publicatie)

LNG	Liquified Natural Gas, vloeibaar aardgas
NAL	Nationale Agenda Laadinfrastructuur
NAT	Nationaal Leiderschap-scenario
NGO	Niet-gouvernementele organisatie
ND	Nationaal Drijfveren-scenario
NPE	Nationaal Plan Energiesysteem
OCGT	Open Cycle Gas Turbine
PBL	Planbureau voor de Leefomgeving
PEH	Programma Energie Hoofdstructuur
PIDI	Programma Infrastructuur Duurzame Industrie
RES	Regionale Energie Strategie
SAF	Sustainable Aviation Fuel
SMR	Steam Methane Reforming
STEG	Stoom- en gascentrale
TVW	Transitie Visie Warmte
TYNDP	Ten Year Network Development Plan
VAWOZ	Verkenning Aanlanding Wind Op Zee
WKK	Warmtekrachtkoppeling
WKO	Warmte-koudeopslag
TWh	Terawatt-uur (= 3,6 petajoule ofwel PJ)

Begrippen

Ontwikkeling	Verandering in de tijd. Voor de netbeheerders gaat het bijvoorbeeld om de adoptie van nieuwe technieken in het energiesysteem. Er zijn zekere en onzekere (mogelijke) ontwikkelingen.
Trend	Een beweging of ontwikkeling die over langere tijd aanhoudt, veranderingen in de maatschappij, het energiesysteem, etc.
Zekerheid of onzekerheid	Zekere ontwikkeling of trend: er is een relatief vaste overtuiging (plausibel) dat de ontwikkeling of trend gaande is en doorzet. Onzekere ontwikkeling of trend: er is een mogelijkheid dat de ontwikkeling of trend zich manifesteert en/of continueert, maar er is (nog) geen vaste overtuiging. Een trendbreuk is mogelijk. De meest fundamentele onzekerheden die ook de meeste impact hebben op de netten, zijn het meest relevant in de scenario's.
Scenarioraamwerk	Een raamwerk waarmee gestructureerd de zekere en onzekere ontwikkelingen kunnen worden geanalyseerd en vervolgens worden verwerkt in scenario's die de ontwikkelingen omspannen.
Omgevingsscenario	Scenario's die vooral bedoeld zijn om de ontwikkelingen buiten de directe omgeving van de netbeheerder in kaart te brengen en daar vervolgens strategische of operationeel-tactische handelingsperspectieven aan te verbinden.
Doelscenario	Scenario's die verschillende routes in kaart brengen richting een vooraf gedefinieerd doel. De scenario's van I13050 hebben het karakter van doelscenario's. De scenario's van IP2024 hebben zowel het karakter van doelscenario's omdat het Nederlandse klimaat- en energietransitiebeleid een hard uitgangspunt is, alsook het karakter van omgevingsscenario's omdat de onzekerheden daarbij gestructureerd verkend worden.
Beleidsambitie	Een overheid heeft uiting gegeven aan de wens om een bepaalde verandering te realiseren. Een ambitie kan kwantitatief gemaakt zijn met een streefdoel. Bijvoorbeeld de ambitie om 'way below two degrees' te blijven.
Beleidsdoelstelling	Een geoperationaliseerde ambitie waar de overheid naast het opstellen van beleidsinstrumenten deze ook implementeert, opdat het doel ook daadwerkelijk gerealiseerd wordt. De -55% voor 2030 heeft het karakter van een beleidsdoelstelling via opname in de Nederlandse en Europese Klimaatwet.
Beleidsoptie	Een mogelijk beleidsinstrument dat een overheid kan inzetten teneinde haar doelen te bereiken, veelal om sturing te geven aan een maatschappelijke ontwikkeling.
Beleidskeuze	Een afweging tussen een aantal beleidsopties. Na het bepalen van de beleidskeuze ontstaat voor de maatschappij duidelijkheid over de manier waarop de overheid sturing geeft.
Vastgesteld beleid	Het geheel aan beleidsinstrumenten die reeds (zo goed als) geïmplementeerd zijn in wet- en regelgeving.

Voorgenomen beleid	De beleidsinstrumenten die in een fase van beleidsvorming zitten, maar waar nog niet toe is besloten en/of die nog niet zijn geïmplementeerd in wet- en regelgeving. Tevens voor het PBL concreet genoeg uitgewerkt om te kunnen doorrekenen in de Klimaat- en Energieverkenning (KEV). Het is nog niet 100% zeker dat het beleid ook echt wordt geïmplementeerd.
Geagendeerd beleid	De beleidsinstrumenten die in een fase van beleidsvorming zitten, maar nog niet zijn geïmplementeerd in wet- en regelgeving, en waarvan de werking nog niet concreet en helder is te bepalen. Dit type beleid wordt bijvoorbeeld ook nog niet doorgerekend in de nationale rekensystematiek van de Klimaat- en Energieverkenning (KEV).
Energiesysteemkeuze	Een expliciete keuze voor het realiseren van een aantal veranderingen in het energiesysteem. Dit is vaak (maar niet altijd) een beleidskeuze omdat een dergelijke grote verandering bijna niet door individuele spelers wordt ingezet. Voorbeelden zijn elektrificatie van de energievraag, ontwikkelen van duurzaam aanbod en het ontwikkelen van de warmteketen (warmtenetten voor de gebouwde omgeving).
Elektrificatie	Proces waarbij niet-elektrische technologieën worden vervangen door elektrische alternatieven, zoals elektrische auto's en warmtepompen als vervangers voor benzine- en dieselauto's en gasketels.
All-electric	Technologie die alleen gebruik maakt van elektriciteit, zoals een all-electric warmtepomp (in tegenstelling tot een hybride warmtepomp, die naast elektriciteit ook gas gebruikt om warmte te produceren).
Energy-hubs	Een energiesysteemconcept met veel lokale oplossingen waarbij het energiesysteem op regionaal of specifiek niveau meer in balans gehouden wordt, opdat er minder transport over grotere afstanden plaatsvindt.
Verplichtende aanpak	Beleid waarbij de overheid een energiesysteemkeuze maakt en er minder individuele keuzevrijheid is. In de gebouwde omgeving zou bijvoorbeeld een systeemkeuze voor warmtenetten in een wijk bij een verplichtende aanpak ervoor zorgen dat er niet ook duurzame gassen worden aangeboden.
Individuele aanpak	In het beleid is er veel vrije keuze voor individuele bedrijven en consumenten om zelf invulling te geven aan de energieoplossingen van hun voorkeur. In de gebouwde omgeving betekent dit bijvoorbeeld dat zowel elektrificatie- als gasoplossingen mogelijk zijn en er geen gedwongen sturing van bovenaf plaatsvindt.

Bijlage D: ETM links

Tabel 16 - ETM-links hoofdscenario's 2025, 2030, 2035, 2040 en 2050

ID	Scenario	Jaar	ETM link
KA	Klimaatambitie	2025	https://energytransitionmodel.com/saved_scenarios/14382
ND	Nationale Drijfveer	2025	https://energytransitionmodel.com/saved_scenarios/14388
IA	Internationale Ambitie	2025	https://energytransitionmodel.com/saved_scenarios/14391
KA	Klimaatambitie	2030	https://energytransitionmodel.com/saved_scenarios/14386
ND	Nationale Drijfveer	2030	https://energytransitionmodel.com/saved_scenarios/14389
IA	Internationale Ambitie	2030	https://energytransitionmodel.com/saved_scenarios/14392
KA	Klimaatambitie	2035	https://energytransitionmodel.com/saved_scenarios/14387
ND	Nationale Drijfveer	2035	https://energytransitionmodel.com/saved_scenarios/14390
IA	Internationale Ambitie	2035	https://energytransitionmodel.com/saved_scenarios/14393
DEC	Decentrale initiatieven	2040	https://energytransitionmodel.com/saved_scenarios/14548
NAT	Nationale leiderschap	2040	https://energytransitionmodel.com/saved_scenarios/14549
EUR	Europese integratie	2040	https://energytransitionmodel.com/saved_scenarios/14550
INT	Internationale handel	2040	https://energytransitionmodel.com/saved_scenarios/14551
DEC	Decentrale initiatieven	2050	https://energytransitionmodel.com/saved_scenarios/14552
NAT	Nationale leiderschap	2050	https://energytransitionmodel.com/saved_scenarios/14553
EUR	Europese integratie	2050	https://energytransitionmodel.com/saved_scenarios/14554
INT	Internationale handel	2050	https://energytransitionmodel.com/saved_scenarios/14555

Tabel 17 - ETM-links synthetische brandstoffen varianten NAT en EUR 2050

ID	Scenario	Jaar	ETM link
NAT_zero	Nationale leiderschap	2050	https://energytransitionmodel.com/saved_scenarios/14556
NAT_synfuels	Nationale leiderschap	2050	https://energytransitionmodel.com/saved_scenarios/14557
EUR_zero	Europese integratie	2050	https://energytransitionmodel.com/saved_scenarios/14558
EUR_synfuels	Europese integratie	2050	https://energytransitionmodel.com/saved_scenarios/14559

Colofon

Voorzitter en coördinatie werkgroep Integrale Energiesysteemverkenning 2030-2050:

Marijke Kellner (Gasunie)

Rob Martens (Netbeheer Nederland)

Maarten Afman (Alliander)

II3050 scenariowerkgroep en iNET werkgroep:

Bineke Visman (Alliander)

Robbert Cornelissen (Coteg)

Elke Klaassen (Enexis)

Raoul Bernards (Enexis)

Adriaan de Bakker (Gasunie)

Kees Alberts (Gasunie)

Kristina Lauxen (Gasunie)

Michiel den Haan (Gasunie)

Martijn Douwes (Gasunie)

Pieter Boersma (Gasunie)

Luuk Klinkert (Gasunie)

Jarig Steringa (Gasunie)

Marleen Selten (Netbeheer Nederland)

Anne Loes Kokhuis (Netbeheer Nederland)

Fabian Kruiper (Rendo)

Michel Bijlsma (Stedin)

Jan Warnaars (Stedin)

Arjan van Voorden (Stedin)

Wouter Terlouw (Stedin)

Julia Peerenboom (TenneT)

Tim Gaßmann (TenneT)

Martin Wevers (TenneT)

Aafke Huijbens (Westland Infra)

Dankwoord

Wij willen iedereen bedanken die een bijdrage heeft geleverd aan de totstandkoming van deze tussenrapportage van deze tweede editie van II3050. Veel van onze collega's bij de netbedrijven hebben meegewerkt aan de uitwerking van de scenario's. Berenschot en Kalavasta hebben onmisbare ondersteuning verleend bij het stakeholderproces en de verdieping van de industrie. De klankbordgroep heeft ons regelmatig van belangrijke input en feedback voorzien. Veel marktpartijen hebben via interviews hun kennis en inzichten met ons gedeeld waardoor wij de scenario's nog verder konden aanscherpen. Alleen met al deze inzichten en expertise vanuit alle sectoren konden wij onze aannames, databronnen, argumentatielijnen toetsen en verbeteren. Ons speciale dank gaat uit naar het ministerie van Economische Zaken en Klimaat voor de samenwerking gedurende de scenario-uitwerking en het opstellen van het rapport. Ook de afstemming met de Nationale Programma's zoals het NPE, is van grote waarde voor ons geweest.

Netbeheer
Nederland