



Klimaatneutrale energiescenario's 2050

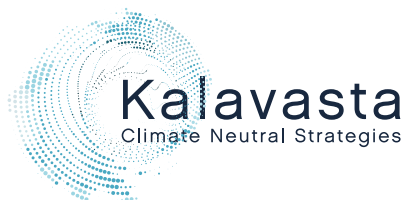
Scenariostudie

Scenariostudie ten behoeve van de integrale
infrastructuurverkenning 2030-2050

61689 – Openbaar

Maart 2020

Berenschot



Klimaatneutrale energiescenario's 2050

Scenariostudie ten behoeve van de integrale
infrastructuurverkenning 2030-2050

Bert den Ouden, John Kerkhoven, Jan Warnaars,
Rob Terwel, Max Coenen, Thijs Verboon,
Tuuli Tiihonen & Anne Koot

Maart 2020

Inhoud

| | | | | | |
|---|--|---------------------------|--------------------------------------|--|-----|
| 1. Inleiding | 8 | 6. Regionalisering | 104 | | |
| 1.1 | Waarom dit document? | 9 | 6.1 | Uitkomsten regionalisering | 106 |
| 1.2 | Integrale infrastructuurverkenning (II3050) | 10 | 6.2 | Gebouwde omgeving | 106 |
| 1.2 | Hoe we de scenario's positioneren | 10 | 6.3 | Mobiliteit | 107 |
| 1.4 | Veranderingen in het energiesysteem | 11 | 6.4 | Landbouw | 110 |
| 1.5 | Verschillen met Net voor de Toekomst 2017 | 11 | 6.5 | Energie | 110 |
| 1.6 | Samenwerking en proces | 12 | 6.6 | Regionalisering industrie | 110 |
| 1.7 | Leeswijzer rapport | 12 | 7. Gebruik van scenario's | 128 | |
| 2. Methode | 14 | 7.1 | Gebruik scenario's | 129 | |
| 2.1 | Scenariomethodiek | 15 | 7.2 | Voorspelbaarheid energietransitie | 130 |
| 2.2 | Doorrekening | 16 | 7.3 | Lijst van aandachtspunten | 130 |
| 2.3 | Kostendoorrekening | 16 | 8. Bijlagen | 132 | |
| 2.4 | Regionalisering | 16 | 8.1 | Review Planbureau voor de Leefomgeving | 134 |
| 3. Introductie scenario's | 18 | 8.2 | Energievraag in de gebouwde omgeving | 135 | |
| 3.1 | Regionale sturing | 21 | 8.3 | Warmtevraagprofielen | 135 |
| 3.2 | Nationale sturing | 22 | 8.4 | Thuisbatterijen | 135 |
| 3.3 | Europese CO ₂ -sturing | 23 | 8.5 | Kosten scenario's in 2050 | 135 |
| 3.4 | Internationale sturing | 24 | 8.6 | Kapitaalskosten (WACC/discontovoet) | 138 |
| 3.5 | Overzicht van uitgangspunten en invulling per scenario | 25 | 8.7 | Elektriciteitsimport | 138 |
| | E-refinery: Synthetische kerosine & scheepsbunkers | 28 | 8.8 | Potentiëlen | 138 |
| | De behandeling van de feedstocks | | 8.9 | Overzicht geraadpleegde partijen | 143 |
| | (inzet van energiedragers als grondstof) | 30 | 9. Verwijzingen | 144 | |
| | Vergelijking Klimaatneutrale energiescenario's 2050 | | | | |
| | met Net voor de Toekomst 2017 | 32 | | | |
| 4. Overkoepelende uitkomsten | 34 | | | | |
| 4.1 | Finale energievrage | 36 | | | |
| 4.2 | Primair energieaanbod | 38 | | | |
| 4.3 | Vermogens en volumes in de elektriciteitsproductie | 38 | | | |
| 4.4 | Biomassa | 42 | | | |
| 4.5 | Waterstofbalans | 43 | | | |
| 4.6 | CO ₂ | 43 | | | |
| 4.7 | Circulair | 48 | | | |
| 4.8 | Energie-infrastructuur | 49 | | | |
| 4.9 | Kosten | 49 | | | |
| 4.10 | Gevoeligheidsanalyse weer en opslagbehoefte | 49 | | | |
| 5. Sectorale uitwerking en energietoekomstbeelden 2050 | 64 | | | | |
| 5.1 | Gebouwde omgeving | 65 | | | |
| 5.2 | Mobiliteit | 71 | | | |
| 5.3 | Industrie | 76 | | | |
| 5.4 | Landbouw | 98 | | | |
| 5.5 | Elektrisch vermogen | 100 | | | |

Management Samenvatting

Deze scenariostudie schetst vier mogelijke toekomstbeelden voor een klimaatneutrale energievoorziening in 2050. Daarbij vormt het Klimaatakkoord het startpunt voor de ontwikkelingen tot 2030. De scenariostudie omvat een integrale analyse van vrijwel alle energiedragers en alle sectoren in de Nederlandse samenleving.

Dit rapport vormt de afsluiting van fase 1 van het project Integrale Infrastructuurverkenning 2030-2050 (II3050), dat de netbeheerders gezamenlijk en met input van EZK, de industrie, duurzame sector, energiebedrijven en vele anderen, uitvoeren in het kader van het Klimaatakkoord. In deze fase zijn vier klimaatneutrale energiescenario's voor Nederland in 2050 ontworpen, die er voor zorgen dat op iedere moment vraag en aanbod van de energiedragers op elkaar aansluiten. In fase 2, die nu gaat beginnen wordt de benodigde flexibiliteit verder uitgewerkt en gekwantificeerd en de bijbehorende infrastructuur bepaald. In fase 3, die in de tweede helft van 2020 start, staat de ontwikkeling van infrastructuurpaden tussen 2030 en 2050 centraal.

De vier toekomstbeelden, alle volledig CO₂-neutraal, schetsen op basis van verschillende governance structuren voor de energietransitie hoe Nederland wat betreft energievraag en -aanbod er in 2050 uit kan gaan zien. De toekomstbeelden zijn zodanig gekozen/ingevuld dat ze de "hoekpunten van het speelveld" geven, opdat de netbeheerders in het vervolgtraject kunnen beoordelen wat er nodig kan zijn aan flexibiliteit en infrastructuur. Het gaat dan niet alleen om de energiedragers gas en elektriciteit, maar ook om warmte, waterstof en CO₂. De toekomstbeelden schetsen zowel op landelijk als regionaal niveau (buurt, gemeente of industriecluster) de energievraag en het energieaanbod. Daarmee kunnen de scenario's ook bruikbaar zijn voor andere organisaties, die plannen maken voor de transitie verder dan het Klimaatakkoord 2030.

In alle scenario's zijn ramingen gemaakt voor de voorzieningen nodig voor de leveringszekerheid (o.a. back-up vermogen en opslag), deze zijn in dit stadium nog slechts indicatief. Een nadere analyse van de behoefte aan benodigde voorzieningen voor leveringszekerheid, waarin alle mogelijkheden voor vraagsturing en energieopslag zijn betrokken, zal in fase 2 worden uitgevoerd.

De vier toekomstbeelden zijn in de huidige vorm toegankelijk voor iedereen.

De vier "hoekpunt" scenario's hebben een uiteenlopend karakter, niet alleen wat betreft hun uitgangspunt van de soort sturing in de transitie, maar ook in hun uitwerking qua vraag en aanbod. We duiden hier de invulling van de scenario's.

- In het scenario "regionale sturing", ligt de nadruk op sturing vanuit lokale gemeenschappen en burgers en een hoge mate van autonomie en een flinke invloed van circulariteit. Warmtenetten gevoed door geothermie en een forse elektrificatie kenmerken het scenario. Er is een stevige groei van zonne- en windenergie. Samen met een daling van de industriële activiteit leidt dit tot een Nederland dat vrijwel geheel zelfvoorzienend in energie is. Gas blijft aanwezig als piekvoorziening (hulpketels en centrales) in de vorm van groen gas uit lokale biomassa en "groene" waterstof uit voornamelijk wind en zon met elektrolyse.
- Het scenario "nationale sturing", waarin de nationale overheid de regie heeft, heeft minder groei in warmtenetten, maar een zeer sterke elektrificatie in alle verbruikssectoren. Het scenario kent een zeer omvangrijk zon- en windvermogen, het grootste van alle scenario's. Ook is er import mede vanwege een stabiele industriële sector, die verduurzaamt door elektrificatie. In dit scenario blijft gas nodig voor voeding van back-up centrales en industrie, door middel van groen gas en "groene" waterstof.
- In het scenario "Europese CO₂-sturing", vindt de sturing vooral plaats door een Europese CO₂-heffing die geldt voor alle sectoren. Dit werkt uit in een grotere nadruk op groen gas in verschillende sectoren. Er is een stevige groei van zonne- en windenergie. In dit scenario groeit de industrie, maar zonder CO₂-uitstoot door een combinatie van hybride elektrificatie en CCS, waaronder de productie van "blauwe" waterstof. Mede vanwege de hybridisering geeft dit scenario een gematigde elektriciteits-piekvraag. Er is meer import, dan in de vorige twee scenario's en een blijvende rol voor gas in de wijken en andere sectoren. Dit alles in de vorm van groen gas en een mix van "blauwe" en import van "groene" waterstof.

- In het scenario “Internationale sturing”, regeert de markt en zoeken we internationaal naar de opties met de laagste kosten. In dit scenario wordt veel waterstof geïmporteerd uit landen waar dit wellicht makkelijker te produceren is. Er is minder inzet van groen gas, maar wel een sterke hybridisering met vooral waterstof als back-up, dit ook ter ondersteuning van de groei van de industrie. Door de waterstofimport is er minder windvermogen nodig voor nationale elektrolyse, en daarom is dit scenario het laagste in nationale duurzame elektriciteitsproductie. Desondanks is er nog steeds een stevige groei van de nationale elektriciteitsproductie tussen Klimaatakkoord 2030 niveau en 2050. Gas wordt voornamelijk voorzien in de vorm van geïmporteerde waterstof.

In alle scenario's wordt rekening gehouden met het deel industriële grondstoffen (feedstocks), die op termijn emissieloos moeten worden ingevuld. Soms gebeurt dit door circulariteit, soms door de grondstof te veranderen of de CO₂ af te vangen of doordat de vraag naar producten van de industrie in 2050 niet meer bestaat.

Daarnaast wordt er een CO₂-reductie bereikt door het genereren van klimaatneutrale brandstoffen voor de luchtvaart (kerosine) en internationale scheepvaart (bunkers), voor een deel op nationale basis maar in alle scenario's ook door duurzame import.

Deze scenario studie is niet bedoeld om conclusies te trekken over wat de beste klimaatneutrale toekomst is voor onze samenleving. Wel schetst deze scenariostudie duidelijk dat:

- Er meerdere mogelijkheden zijn om een CO₂-vrije energievoorziening en samenleving te creëren.
- Dit veelal kan met bestaande techniek die in de komende jaren naar verwachting nog in kosten gaat dalen door de grootschalige toepassing van die techniek en innovatie.
- Er zowel een groot volume opwek van hernieuwbare energie in Nederland kan plaatsvinden als dat er mogelijkheden zijn voor andere decarbonisatie-opties en voor de import van groene stroom en moleculen.
- Energievraag en -aanbod in alle sectoren een forse verandering zal ondergaan.

Het draft rapport van deze studie is eind januari gereviewd door PBL op verzoek van het Ministerie van Economische Zaken. Opmerkingen van PBL zijn zoveel mogelijk verwerkt in dit rapport.

Tegelijk met dit rapport komt er een studie uit van Generation Energy, in opdracht van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat; dit laat de ruimtelijke implicaties van de vier scenario's uit deze studie zien. Dit rapport heet: "Ruimtelijke Uitwerking Energiecenario's".

De onderzoekers van Berenschot en Kalavasta willen graag hun dank uitspreken aan alle betrokkenen bij het proces tot nu toe. De vele inputs en discussies hebben het rapport verrijkt en versterkt. Daarmee is het een beter uitgangspunt geworden voor fase 2 van het project II3050. Ook is daarmee de bruikbaarheid van de scenario's voor anderen, die deze vanuit een ander perspectief dan infrastructuur willen benutten toegenomen.

Berenschot en Kalavasta hopen van harte, met dit rapport en de openbare simulaties in het Energietransitiemodel, een bijdrage te hebben kunnen leveren aan de concretisering van de invulling van een klimaatneutrale samenleving.

Inleiding

Hoofdstuk 1



1.1 Waarom dit document?

De energietransitie gaat in een hogere versnelling de komende jaren, hetgeen leidt tot ingrijpende veranderingen in de energie-infrastructuren van de netbeheerders. De investeringskeuzes van de netbeheerders zullen mede richting en snelheid van de energietransitie bepalen. Zicht op hoe de energietransitie kan gaan verlopen en welke infrastructuren daarbij dienen te worden aangepast of zelfs geheel nieuw moeten worden ontwikkeld is daarom niet alleen belangrijk voor de netbeheerders, maar ook voor alle partijen betrokken bij de uitvoering van het Klimaatakkoord en het realiseren van de 2050-klimaatdoelstelling. De facto dus de hele maatschappij.

De weg naar een volledig CO₂-neutrale energievoorziening en bijbehorende infrastructuur moet in 30 jaar worden afgelegd. Ondanks deze “korte” tijd zijn er nog meerdere transitiepaden mogelijk. Daarom publiceerde Netbeheer Nederland in november 2017 een vervolg van de studie Net voor de Toekomst. Het doel van deze studie was om scenario's te presenteren die zicht geven op de aard en omvang van de energietransitie en consequenties voor de energienetten. Daarnaast had de studie ook als doel het informeren en voeren van de dialoog met de maatschappij, en het uitnodigen van de stakeholders tot het maken van systeemkeuzes.

Sinds de publicatie van Net voor de Toekomst (2017) is er veel gebeurd. Zo zijn de onderhandelingen voor het Klimaatakkoord gestart (uitmondend in het op vrijdag 30 juni 2019 gepresenteerde Klimaatakkoord) en lanceerden Gasunie en TenneT in februari 2019 de Infrastructure Outlook 2050. Naast de landelijke onderhandelingen in het kader van het Klimaatakkoord zijn er 30 regio's aan de slag gegaan met de Regionale Energie Strategieën (waar ook de netbeheerders nauw bij zijn betrokken). Daarnaast zijn gemeenten bezig met het realiseren van de eerste aardgasvrije wijken en het opstellen van gemeentelijke transitievisies warmte. Ook is er het inzicht ontstaan dat sommige onderwerpen die in de 2017-studie nog niet of nauwelijks werden benoemd nu ook onderdeel van de scenario's zouden moeten worden. Door de enorme leercurve die eenieder betrokken bij het Klimaatakkoord heeft doorgeemaakt en daarmee het inzicht dat de scenario's uit 2017 toe zijn aan een update is deze “Klimaatneutrale energiescenario's 2050” studie ontstaan.

1.2 Integrale infrastructuurverkenning (II3050)

Deze studie is onderdeel van de afspraken die in het Klimaatakkoord staan. In dit akkoord staat het volgende te lezen:

“Gasunie en TenneT nemen samen met de regionale netbeheerders in 2019 het initiatief om een integrale infrastructuurverkenning 2030-2050 op te stellen waarin inzichten vanuit de energiesector, vraagontwikkeling in de industrie en bevindingen vanuit de regionale energiestrategieën (RES'en) worden meegenomen. Daarbij worden relevante stakeholders betrokken, waaronder marktpartijen.

Deze infrastructuurverkenning 2030-2050 dient als leidraad voor onder andere de investeringsplannen van de netbeheerders en voor investeringen door marktpartijen. De verkenning is gereed in 2021.”

Deze studie maakt dus deel uit van dit overkoepelende project genaamd “integrale infrastructuurverkenning 2030-2050” (II3050). De eerste fase hiervan, uitgewerkt in deze studie, omvat de actualisatie en regionalisatie van de 2050-scenario's uit Net voor de Toekomst 2017. Deze fase wordt opgevolgd door fase 2 (Q1-Q3 2020), het bepalen van de bijbehorende infrastructuur in 2050, en fase 3 (Q4 2020-Q1 2021), het traject van de infrastructuurontwikkeling tussen 2030 en 2050 en tevens datgene wat al voor 2030 moet gaan gebeuren om deze ontwikkeling mogelijk te maken.

1.2 Hoe we de scenario's positioneren

Deze scenario exercitie schetst vier mogelijk toekomstbeelden voor een klimaatneutrale energievoorziening in 2050. Daarbij is het Klimaatakkoord in 2030 als startpunt genomen. In deze exercitie zijn alle energiedragers en alle sectoren in onze samenleving integraal meegenomen.

De vier toekomstbeelden zijn zodanig gekozen/ingevuld dat ze de hoekpunten van het “speelveld” geven voor de netbeheerders zodat de netbeheerders kunnen beoordelen wat er nodig kan zijn aan infrastructuur. Het gaat dan niet alleen om de energiedragers gas en elektriciteit, maar ook om warmte, waterstof en CO₂. De toekomstbeelden schetsen zowel op landelijke als regionaal niveau (buurtniveau, gemeente of industriecluster) wat er aan energievraag en -aanbod ontstaat en welke implicaties dit heeft.

De toekomstbeelden van een Nederlandse klimaatneutrale samenleving in 2050 schetsen, hoe Nederland wat betreft energievraag en -aanbod er uit kan gaan zien. En daarmee kunnen de scenario's ook bruikbaar zijn als “speelveld” voor andere organisaties, die plannen maken voorbij het Klimaatakkoord

2030. Daarvoor willen we nog enkele zaken onder de aandacht brengen:

- De scenario's geven vier verschillende uiterste toekomstbeelden, maar zijn niet bedoeld om daartussen te kiezen. Ze zijn ook goed combineerbaar en de praktijk zal naar alle waarschijnlijkheid ook ergens tussen deze beelden in kunnen liggen, met accenten naar de vier hoekpunten die overigens ook per sector of energiedrager of omzetting kunnen verschillen. Het is dus goed denkbaar dat oplossingen die in één van de scenario's voorkomen ook in de praktijk voor kunnen komen bij andere scenario's; vele soorten mixen zijn denkbaar. De scenario's zijn alleen met opzet als uiterste projecties gekozen zodat de netbeheerders met alle mogelijkheden rekening kunnen houden.
- De scenario's zijn gesimuleerd met het Energie Transitie Model (ETM). Omdat de doorgerekende scenario's op een aantal punten verder gingen dan wat binnen dit model mogelijk was, zijn na de ETM simulatie steeds enkele aanvullende berekeningen nodig geweest om tot een representatieve uitkomst te komen. Iedereen die verder met het model wil rekenen, wordt ook vriendelijk verzocht om hiermee steeds rekening te houden.
- Verdere optimalisatie van de scenario's is nog nodig, zoals ook in fase 2, volgend op deze eerste fase, zal plaatsvinden. Dit niet alleen wat betreft de technieken (zie hiervoor), maar ook wat betreft de wijze waarop de leveringszekerheid wordt verzorgd. Zo konden in het bestek van deze scenario's in dit simulatiemodel nog niet alle mogelijkheden van vraagsturing en flexibiliteit helemaal worden verkend. Een voorbeeld is, dat een deel van het back-up vermogen wellicht vermeden kan worden bij andere stookpatronen in geëlektrificeerde woningen, en door sturing van hybride warmtepompen. Ook in de industrie zou door hybridisering extra flexibiliteit kunnen ontstaan. Zo zijn er vele andere optimalisaties nog denkbaar, ter nadere bestudering.
- De scenario's geven projecties van vraag en aanbod in 2050 van de energiedragers in verschillende sectoren en omzettingen en opslag daartussen zowel qua volume als capaciteit. Ze zijn echter nog wel anders in te vullen wat betreft de precieze technische invulling en schaalgrootte, op diverse terreinen zoals back-up vermogen, opslagmogelijkheden, duurzame warmtebronnen en wellicht ook andere. In de ETM projecties zijn hiervoor de technieken gekozen die praktisch goed doorrekenbaar waren, maar dit zijn geen beleidskeuzes. Andere technieken (ook wanneer deze niet

expliciet genoemd worden in dit rapport) zijn ook goed denkbaar zolang deze maar dezelfde functionaliteit betreffen en dus dezelfde soort omzetting, opwek of verbruik per sector geven; en uiteraard mits deze in de periode naar 2050 voldoende ontwikkeld, doelmatig en beschikbaar worden. We geven nog enkele voorbeelden hiervan verderop in het rapport. Er is dus nog alle ruimte voor verdere inhoudelijke invulling met andere alternatieven.

1.4 Veranderingen in het energiesysteem

De energietransitie zorgt nu al voor grote veranderingen in het energiesysteem. Denk hierbij aan grootschalige zonnevelden in Drenthe, nieuwe datacenters in Haarlemmermeer, windmolens op de Noordzee, lokale groengas invoeding in Rilland, etc. De komende jaren richten de plannen zich in het kader van het Klimaatakkoord op het behalen van 49%eq CO₂-uitstootreductie in 2030. Terwijl de inspanningen gepleegd worden voor het behalen van het 2030-doel moeten we ook aan de slag met de voorbereidingen voor 2050. Daarbij zal het doel worden om een geheel (100%) CO₂-neutrale samenleving te realiseren om binnen de 2 graden Celsius opwarming te blijven.

Het is evident dat de 2030-doelen, maar zeker ook de 2050-doelen alleen gehaald kunnen worden met aangepaste elektriciteits- en gasnetten, maar soms ook geheel nieuwe infrastructuren voor warmte, waterstof en CO₂.

Grote veranderingen van het energiesysteem worden verwacht. Om een aantal voorbeelden te noemen:

- Elektriciteit neemt een groter aandeel in de energiemix. Dit levert bijvoorbeeld een noodzaak voor uitbouw van het elektriciteitsnet zoals uit alle scenario's zal blijken.
- De inpassing van grote hoeveelheden decentrale duurzame opwek. Dit levert bijvoorbeeld de noodzaak voor vraagsturing, intelligente aansturing van aangesloten apparaten, opslag, conversie of afschakeling. Ten dele meegenomen in deze studie, uitdrukkelijk onderdeel van fase 2 van II3050.
- Opslag met verschillende tijdshorizonnen om periodes van tekorten en overschotten op te vangen. Dit levert de noodzaak voor verschillende vormen van opslag zowel op periodes van minuten, uren en dagen als seizoenen. Iedere tijdshorizon kent waarschijnlijk zijn eigen vorm van opslag-techniek. Ten dele meegenomen in deze studie, uitdrukkelijk onderdeel van fase 2 van II3050.

- Gebruik van waterstof als brandstof, als feedstock of als flexibiliteitstoepassing via power-to-gas en gas-to-power. Indien we deze waterstof maken uit aardgas (blauwe waterstof) dan levert dit de noodzaak op voor zowel een waterstof- als een CO₂-infrastructuur. Indien we deze waterstof maken uit hernieuwbare elektriciteit dan is er zowel een noodzaak voor een waterstofinfrastructuur als sterk verzwaarde midden- en laagspanningsnetten. Maar het is ook mogelijk dat we de waterstof of daarvan afgeleide moleculen importeren.
- Synthetische brandstoffen voor wegtransport, scheepvaart en luchtvaart. Dit leidt tot een "E-refinery" die mogelijk vraagt om nieuwe productielocaties en een andere infrastructuur.
- Import en export van synthetische energiedragers. In de toekomst zijn het niet (alleen) de landen met olie en aardgas die geopolitiek onze interesse hebben, maar juist de landen met mogelijkheden voor export van emissie-loze energiedragers.

1.5 Verschillen met Net voor de Toekomst 2017

Ten opzichte van Net voor de Toekomst 2017 is een aantal aanpassingen gedaan om een beter inzicht te krijgen in de energie-infrastructuur anno 2050. In de eerste plaats zijn de technische doelen zoals gesteld in het Klimaatakkoord, het startpunt voor deze studie. Dit betekent dat de 2030-waardes de ondergrens vormen voor de 2050-scenario's in deze studie. Sommige technische doelen van het Klimaatakkoord voor 2030, zoals opgesteld vermogen wind of zon, komen uit boven de waardes die gesteld waren in sommige 2050-scenario's van Net voor de Toekomst 2017.

De opzet van de bestaande scenario's is licht aangepast. Het scenario Generieke Sturing heet nu Europese CO₂-sturing. Ieder scenario kent daarmee een geografisch bepaalde focus op de aansturing van de energietransitie. De scenario's heten: Regionale sturing, Nationale sturing, Europese CO₂-sturing en Internationale sturing. Een uitgebreide toelichting van de scenario's wordt gegeven in hoofdstuk 3.

In deze studie is afgestapt van de indeling naar energiefuncties en overgestapt op een sectorbenadering, welke direct te koppelen is aan de klimaattafels genoemd in het Klimaatakkoord. Deze keuze is gemaakt om meer inzicht te krijgen in de ontwikkelingen van elke sector.

Daarnaast is een uitgebreide focus op de verschillende industriële sectoren toegevoegd, waar toekomstbeelden van de verschillende clusters zijn meegenomen.

De internationale scheepvaart en luchtvaart maakten geen onderdeel uit van Net voor de Toekomst 2017. In deze update is deze sector wel meegenomen en wordt deze separaat getoond. Hierdoor is zichtbaar hoe groot deze sector is en wat ervoor nodig is om deze emissievrij te maken. Ten behoeve van de internationale scheepvaart en luchtvaart is er ook aandacht voor synthetische brandstoffen.

1.6 Samenwerking en proces

De scenario's in deze studie zijn door Berenschot en Kalavasta opgesteld in samenwerking met werkgroep integraal Netwerk en Energiesysteem van de Toekomst (iNET) van Netbeheer Nederland. Daarnaast zijn externe stakeholders (zoals industrie, duurzame sector en energiebedrijven) gevraagd om te reflecteren op de opgestelde scenario's in interviews en in klankbordgroepbijeenkomsten (zie paragraaf 8.9 voor een overzicht van geraadpleegde partijen).

In opdracht van het ministerie van Economische Zaken en Klimaat is parallel aan deze studie gekeken naar de ruimtelijke impact van de Klimaatneutrale Energiescenario's 2050. Deze studie is uitgevoerd door Generation Energy en heet "Ruimtelijke Uitwerking Energiescenario's"

In opdracht van het ministerie van Economisch Zaken en Klimaat is ook door Berenschot en Kalavasta separaat onderzoek gedaan naar de inpassing van nucleaire energie in 2050. Hiervoor is een variant gecreëerd op het scenario Europese CO₂-sturing. Dit onderzoek heet "Systeemeffecten van nucleaire centrales, in Klimaatneutrale Energiescenario's 2050".

1.7 Leeswijzer rapport

Dit rapport bestaat uit negen hoofdstukken en probeert in detail de vier klimaatneutrale energiescenario's voor 2050 toe te lichten.

- Hoofdstuk 1 geeft de context weer van deze scenario's. Hoe deze tot stand zijn gekomen en hoe u ze kunt gebruiken. Daarnaast worden de raakvlakken met bijbehorende studies toegelicht.
- In hoofdstuk 2 wordt de methode van het onderzoek toegelicht: het proces rond de totstandkoming van dit rapport, hoe de scenario's zijn opgesteld en hoe de doorrekening is gedaan.

- In hoofdstuk 3 volgt een beschrijving van de scenario's op hoofdlijnen. Hierin wordt de verhaallijn per scenario beschreven, de uitgangspunten die hierbij horen en op hoofdlijnen de keuzes die hieruit opgemaakt zijn.
- Hoofdstuk 4 laat vervolgens de overkoepelende uitkomsten zien van de scenario's. Hierin worden de algemene landelijke uitkomsten gepresenteerd en besproken. Dit hoofdstuk laat primair energieaanbod, finale energievraag en opgesteld elektrisch vermogen zien. Daarnaast zoomt dit hoofdstuk in op CO₂, biomassa en waterstof. Dit hoofdstuk sluit af met de impact van verschillende weerjaren op de scenario's en de benodigde opslag van gas en waterstof.
- Hoofdstuk 5 is een verdieping van de invulling van de scenario's per sector. Per sector wordt daarnaast ook de finale energievraag per sector gepresenteerd.
- Hoofdstuk 6 behandelt de regionalisering van de scenario's naar buurt- en gemeenteniveau. Hierbij beschrijven we de regionalisering van de verschillende vraagsectoren en de decentrale opwek van duurzame elektriciteit. Paragraaf 6.6 gaat specifiek in op de regionalisering van de industrieclusters.
- Hoofdstuk 7 bediscussieert de resultaten van deze studie en hoe deze te gebruiken zijn.
- Hoofdstuk 8 bevat de bijlagen
- Hoofdstuk 9 bevat de literatuurlijst



Methode

Hoofdstuk 2

In dit hoofdstuk lichten wij de methode van deze studie toe. We gaan in op de methodiek die is gevolgd om te komen tot de totstandkoming van de scenario's. Deze scenario's zijn vervolgens doorgerekend, de methode van berekening en verdere analyse worden behandeld in dit hoofdstuk. We staan kort stil bij de kostendoorrekening die in fase 2 van II3050 verder wordt uitgewerkt. Tot slot behandelen we de methode van regionalisering op hoofdlijnen.



2.1 Scenariomethodiek

Voor de update van de scenario's hebben wij een sociotechnisch scenarioraamwerk¹⁾ gehanteerd, dat is gebaseerd op Elzen, Geels en Hofman. Deze scenario's zijn zogenaamde backcasting scenario's, waarbij het uitgangspunt is dat het doel klimaat-neutraal in 2050 behaald wordt. Daarnaast is er gekeken of de realistische "hoekpunten" van het energiesysteem in de scenario's goed tot hun recht kwamen. Dit framework heeft als leidraad gediend om de bestaande scenario's uit Net voor de Toekomst samen te voegen met de nieuwe informatie en inzichten die sinds 2017 zijn opgedaan.

1. De hoofdcontouren van de scenario's zijn overgenomen uit Net voor de Toekomst 2017 en verder uitgediept waar nodig.
2. Vervolgens zijn verschillende eindbeelden opgesteld voor vijf sectoren: Gebouwde Omgeving, Industrie, Mobiliteit (incl. internationale luchtvaart en scheepvaart), Landbouw en Elektriciteit (incl. duurzame opwek). In samenspraak met EZK zijn de ruimtelijke grenzen verkend voor duurzame opwek, deze grenzen zijn meegenomen in deze studie (zie ook "Ruimtelijke Uitwerking Energiecenario's"). De eindbeelden zijn bijgesteld aan de hand van actuele inzichten uit de markt en op basis van het Klimaatakkoord. Deze eindbeelden vormen daarmee realistische uithoeken van het speelveld.
3. Deze eindbeelden zijn verdeeld over de scenario's in samenhang met de verhaallijn uit de hoofdcontouren.
4. In dialoog met verschillende industriepartijen en energiepartijen (zie 8.9 voor een overzicht van geraadpleegde partijen) zijn de eindbeelden aangescherpt.

1) Elzen, B., F.W. Geels, P.S. Hofman (2002). Sociotechnical Scenarios. Development and evaluation of a new methodology to explore transitions towards a sustainable energy supply Universiteit Twente, Centre for Studies of Science, technology and Society: Enschede.

2.2 Doorrekening



De doorrekening van de scenario's is gedaan met

het Energietransitiemodel van Quintel Intelligence. Het ETM stelt de gebruiker in staat om, uitgaande van de huidige situatie, per toepassing en per verbruikssector in het energiesysteem de wijzigingen in de vraag naar energie te kwantificeren en te relateren aan onderliggende processen zoals bevolkingsgroei, nieuwbouw/sloop van huizen, efficiëntieverbeteringen, toepassing nieuwe technieken, etc. Hiermee ontstaat een samenhangende invulling van de mogelijke energievraag van Nederland in de toekomst, alsook systeemveranderingen waarbij dwarsverbanden tussen energiedragers en functionaliteiten (zoals mobiliteit en ruimteverwarming) automatisch worden meegenomen.

Het ETM kwantificeert voor de energiedragers (elektriciteit, gas en waterstof) op uurbasis hoe de vraag en het aanbod gebalanceerd worden. Deze kwantificering vindt plaats voor de volumes en de totale vermogens van de diverse energiedragers, aanbod, eindgebruik en conversies in de verschillende scenario's.

Het ETM is open source en openbaar beschikbaar. Hierdoor is de uitwerking van de scenario's in deze studie voor iedereen beschikbaar en herleidbaar. Voor sommige zaken die niet direct te modelleren zijn in het ETM hebben wij in deze studie soms bepaalde keuzes moeten maken. Houd dus vooral ook dit rapport naast de scenario's in het ETM. Dat geldt ook voor de nadere duiding van sommige cijfermatige uitkomsten. Bij gebruik van het ETM, kunt u Berenschot vragen voor een lijst met aandachtspunten behorende bij de modellering in het ETM.

Een verdere verdieping, en uitwerking van benodigde energie-infrastructuur, in samenhang met de nog te variëren schaal van sommige technieken (zoals elektriciteitsopwekking, opslag en elektrolyse) zal als verdere uitwerking van de scenario's aansluitend in fase 2 van II3050 (optimalisatiefase) door de netbeheerders worden uitgevoerd. In de voorliggende scenario's van deze fase 1 hebben we nog gerekend met zekere standaardoplossingen hiervoor, maar deze zullen dus in fase 2 verder worden gedetailleerd en geoptimaliseerd, en kunnen dan dus qua technische invulling en schaalniveau anders uitkomen. Voor deze fase 2 worden per scenario de volumes en capaciteiten van vraag, aanbod en omzettingen per energiedrager uit fase 1 als beginpunt genomen.

Alle volumes in deze studie zijn gegeven op basis van de onderwaarde, tenzij expliciet anders aangegeven. De doorrekening houdt rekening met de energetische CO₂-emissies, emissie van overige broeikasgassen zijn niet expliciet meegenomen. In deze

studie nemen wij de energetische grondstoffen mee, verdere toelichting hierop staat in het tekstkader op pagina 25.

2.2.1 Weersinvloeden en analyse voorzieningszekerheid

Het ETM voorziet ook in een viertal verschillende weerjaren inclusief bijzondere situaties die voor het energiesysteem van belang zijn, zodat ook in deze situaties steeds de energievraag kan worden afgedekt. Deze weerjaren zijn afgestemd met Gasunie en TenneT gedurende dit traject. De invloed van deze weerjaren is bekeken op energetisch gebied. De benodigde hoeveelheid piekcentrales om ook in andere weerjaren de elektrische vraag te kunnen dekken is doorgevoerd in de algemene scenario's. Kwantitatief is de omvang van de gasvormige reserves bekeken.

In hoofdstuk 4.10 vindt u een overzicht van de weerjaren en vervolgens de invloed die zij hebben op de scenario's.

2.3 Kostendoorrekening

Een volledige uitwerking van de kosten kan alleen gedaan worden als de benodigde energie-infrastructuur exact bekend is, dit zal worden uitgevoerd in fase 2. De kostendoorrekening zal daarom ook onderdeel zijn van de vervolgfases van II3050 en maakt geen onderdeel uit van deze rapportage. In de ETM-projecties die openbaar toegankelijk zijn worden de kosten wel berekend, maar deze zijn dus nog niet compleet.

2.4 Regionalisering

Om de benodigde infrastructuur te bepalen in fase 2 van II3050, willen de netbeheerders hun netten op een zo laag mogelijk niveau doorrekenen. Om dit te kunnen doen worden de landelijke uitkomsten uit het ETM vertaald naar gemeente en buurtniveau.

De regionalisering is uitgevoerd op een gelijksoortige wijze als de Infrastructure Outlook 2050. Door gebruik te maken van verdeelsleutels zijn de energetische uitkomsten van het ETM te alloceren naar buurten. Deze verdeelsleutels zijn opgesteld uit publiek toegankelijke data van Nederland. Voor sommige delen van de regionalisering was het slechts mogelijk om op gemeentenniveau een allocatie uit te voeren, omdat de toekenning naar buurten vanuit landelijke data te onzeker zou zijn. Voor de grote industriële clusters is een aparte regionalisering uitgevoerd. Deze regionalisering dient ter input van de netwerkberekening van de netbeheerders.

In hoofdstuk 6 vindt u een uitgebreide uiteenzetting van de regionalisering.

Introductie scenario's

Hoofdstuk 3

In de eerste plaats zijn de technische doelen zoals gesteld in het Klimaatakkoord c.q. het ontwerp Klimaatakkoord voor 2030 het startpunt voor deze studie. Dit betekent dat de 2030-waardes uit het Klimaatakkoord de ondergrens vormen voor de 2050-scenario's in deze studie. Ieder scenario kent een geografisch bepaalde focus op de aansturing van de energie-transitie. De scenario's heten: Regionale sturing, Nationale sturing, Europese CO₂-sturing en Internationale sturing. Om deze 2050 scenario's in perspectief te plaatsen maken we gebruik van de uitwerking van het energiesysteem in 2015 uit het ETM en het Klimaatakkoordscenario (technisch streefbeeld) voor 2030 van Kalavasta.



In deze studie wordt verder gewerkt met een sectorbenadering, welke direct te koppelen is aan de klimaattafels genoemd in het Klimaatakkoord. De internationale scheepvaart en luchtvaart is ook meegenomen en wordt separaat getoond. Hierdoor is zichtbaar hoe groot deze sector is en wat ervoor nodig is om deze fossielvrij te maken. Ten behoeve van de internationale scheepvaart en luchtvaart is er ook aandacht voor synthetische brandstoffen.

Door de omvang van ons energiegebruik en de mogelijkheden tot internationale handel worden afhankelijk van het scenario de mogelijkheden van import en export van duurzame energie nadrukkelijk meegenomen.

Omdat de energievoorziening in de scenario's weersafhankelijk wordt (groot opgesteld vermogen zon-pv en wind), gaan we dieper in op de consequenties van het weer op de voorzieningszekerheid. Zo onderzoeken we wat de impact is van hele koude jaren, jaren met een lange periode zonder zon en wind, en jaren waarin er als geheel een "misoogst" is van zonne- en windenergie.

Ook maken we een eerste aanzet tot regionalisering van de vier scenario's. Voor de gebouwde omgeving en personenvervoer gaan we tot op buurtniveau. Voor logistieke voertuigen en bedrijven die vallen onder het ETS gaan we tot op gemeentenniveau. Bijzondere aandacht is er voor de vijf industrieclusters in Nederland, waarbij we niet alleen kijken naar de bedrijven in het cluster, maar ook naar hun onderlinge energetische samenhang.


Behalve een verhaallijn (kwalitatief) voor alle scenario's presenteren we ook een samenhangend kwantitatief beeld dat we opstellen met behulp van het Energietransitiemodel (ETM). Met name dit laatste stelt de lezer van dit rapport in staat om, indien de aannames die wij hebben gemaakt dienen te worden bijgesteld doordat er nieuwe inzichten zijn of men zich niet kan vinden in onze aannames, zelf te onderzoeken wat de invloed van andere aannames is op de uitkomsten van de scenario's. Deze scenario's zijn openbaar toegankelijk en te bereiken via deze links:

| Scenario | ETM-link |
|--|---|
| Klimaatakkoordscenario (technisch streefbeeld) voor 2030 ²⁾ | https://pro.energytransitionmodel.com/scenarios/405526 |
| Regionale sturing | https://pro.energytransitionmodel.com/scenarios/606411 |
| Nationale sturing | https://pro.energytransitionmodel.com/scenarios/606415 |
| Europese CO ₂ -sturing | https://pro.energytransitionmodel.com/scenarios/606418 |
| Internationale sturing | https://pro.energytransitionmodel.com/scenarios/606388 |

In de komende paragrafen worden de vier 2050-scenario's nader beschreven.

2) Het Klimaatakkoordscenario (technisch streefbeeld) voor 2030 gaat ervan uit dat de doelen van het Klimaatakkoord worden gehaald, zelfs als daar (nog) niet bestaand/voorzien beleid voor is (NB. PBL heeft in haar doorrekening het Klimaatakkoord getoetst aan bestaand en voorzien beleid). Uitgebreide documentatie over hoe dit scenario tot stand gekomen is en welke aannames en bronnen er achter schuilen is online beschikbaar. Via <https://kalavasta.com/assets/reports/Kalavasta2030KEAenergiesysteemNL.pdf> vindt u een meer verhalend document dat dit beschrijft.

3.1 Regionale sturing

| Scenario Regionale sturing | Algemene uitgangspunten |
|--|--|
|  | <ul style="list-style-type: none"> • Nederland haalt CO₂-doelen door regionale ontwikkeling • 100% CO₂-reductie • Zelfvoorzienend • Geen importen • Krimp van energie-intensieve industrie • Regionale projecten • Burgers zeer gedreven • Circulariteit speerpunt voor goederen en voedselproductie |

Figuur 1 Scenario regionale sturing

In dit scenario geeft de Nederlandse overheid de sturing van de energietransitie grotendeels aan de lokale en regionale overheidsorganen. De opdracht is om als Nederland volledig te verduurzamen en zelfvoorzienend te worden. Regionale overheden krijgen de middelen en de verantwoordelijkheid om de energietransitie te leiden. De regionale overheden nemen veel initiatieven om het regionale potentieel maximaal te benutten, maar regio's zijn niet noodzakelijk autonoom in hun energievoorziening. Daar waar de activiteiten bij uitstek een nationaal karakter hebben, zoals de industrieclusters en de luchthavens, werken regionale overheden samen met de nationale overheid.

Omdat er veel op lokaal niveau gebeurt, zijn burgers zich bewust van de initiatieven en resultaten van de regionale overheden. Dit werkt vanuit twee kanten. Ten eerste worden bedrijven en burgers actief betrokken bij projecten geïnitieerd door lokale overheidsorganen. Er worden energiecorporaties opgericht, waarin de overheden, bedrijven en burgers nauw samenwerken om duurzame initiatieven op korte termijn te realiseren. Denk hierbij aan zon-PV-oplossingen, collectieve warmtenetten, geothermie en wind-op-land. Ten tweede worden bedrijven en burgers ondersteund door de decentrale overheid om hun duurzame initiatieven te verwezenlijken. Burgers worden bijgestaan wanneer zij hun huis isoleren en de vrijwillige overgang op elektrisch vervoer wordt vergemakkelijkt, bijvoorbeeld door het faciliteren van een laadinfrastructuur.

Burgers veranderen hun levensstijl waardoor zij meer behoefte hebben aan duurzame producten. "Consuminderen" is onderdeel van die levensstijl. Dit betekent dat de vraag naar duurzame producten stijgt en de vraag naar traditionele fossiele producten daalt. Op deze manier oefenen de burgers druk uit om de industrie te verduurzamen ('Buyer-power'). De druk vanuit de samenleving en regio's op de nationale overheid om strikte regels op te leggen aan de industrie, wat betreft duurzaamheid en circulariteit, zal toenemen. Op dezelfde wijze wordt ook de kringlooptandbouw een feit. De vraag naar kunstmest verdwijnt

hierdoor grotendeels in Nederland, de productie van kunstmest voor de export blijft deels bestaan. Daarnaast zullen fossiele industrieën genoodzaakt zijn over te stappen naar circulaire pyrolyseolie, te sluiten of naar het buitenland te verhuizen. Ook is er in zekere mate sprake van "vliedschaamte". Hierdoor krimpt de energie-intensieve industrie in Nederland.

Vanwege de regionale sturing zijn energieprojecten met grote investeringskosten minder voor de hand liggen. Het openbaar vervoer is een sector waar regionale overheden veel zeggenschap over hebben. Dit betekent dat er veel geïnvesteerd wordt in het openbaar vervoer, waardoor het op korte termijn volledig geëlektrificeerd zal worden.

Doordat de regionale overheden veel inzetten op het zelfvoorzienend zijn, is opslag in dit scenario op grote schaal aanwezig. Mocht er voor een langere tijd een verlaagd elektriciteitsaanbod zijn, dan wordt dit opgevangen met geproduceerde waterstof (en groen gas), waarvoor reserves zijn aangelegd.

3.2 Nationale sturing



Figuur 2 Scenario nationale sturing

In dit scenario neemt de Rijksoverheid het voortouw. De energietransitie wordt hierdoor een taak van het Rijk, zij streeft in hoge mate tot een zelfvoorzienend, duurzaam en circulaire Nederland. Het gevolg hiervan is een reductie in het aantal kleinschalige initiatieven dat tot stand komt vanuit burgers en bedrijven.

De krachtige sturing vanuit het Rijk zorgt voor een duidelijke transitie richting een autonome energievoorziening. Door een duidelijke klimaatneutrale visie tot 2050 komen grootschalige projecten tot stand waar het Rijk de risico's afdekt. Hierdoor zullen projecten met hoge aanloopkosten tot stand komen. Grootschalige wind-op-zee, al dan niet met energiehub, in de Noordzeeregio is één van de streefpunten in dit scenario om zelfvoorzienend te kunnen zijn. Daarnaast zal het Rijk sturen op projecten die indirect gemoeid zijn met de energietransitie, zoals de overgang naar elektrisch personenvervoer en een landelijke waterstofinfrastructuur met tankpunten om waterstofaangedreven vrachtovervoer tot stand te brengen.

Het uiteindelijke doel om autonoom te zijn in hernieuwbare energieopwekking heeft grote gevolgen voor het ruimtelijke beleid van regionale overheden. Doordat het Rijk de touwtjes in handen heeft, kan zij beslissingen maken, die lokaal veel impact kunnen maken op de burgers en industrie. De bouw van grootschalige windparken op zee, windparken op land en zonneweides zijn voorbeelden van maatregelen die ruimtelijk veel impact kunnen hebben.

Door de industrie te verplichten tot elektrificatie, hernieuwbare grondstoffen en circulariteit, met daarnaast ondersteuning door middel van subsidies voor verduurzaming, stuurt het Rijk de industrie, maar dekt het ook gedeeltelijk de risico's af. Hierdoor wordt de industrie vanuit twee richtingen meegenomen in de energietransitie. De industrie groeit in omvang nauwelijks.

Onbalans in het energieaanbod wordt in dit scenario ook opgevangen door nationale opslag o.a. door middel van waterstof.

3.3 Europese CO₂-sturing



Figuur 3 Scenario Europese CO₂-sturing

In dit scenario laat de nationale overheid veel vrijheden hoe de energievoorziening er in 2050 uit zou moeten zien. In Europees verband wordt er wel een algemene CO₂-belasting ingevoerd. Deze belasting betreft alle sectoren en gaat dus verder dan het huidige ETS, dat alleen voor de energie-intensieve industrie en elektriciteitsproducenten geldt. Deze CO₂-heffing neemt progressief toe richting 2050, waardoor CO₂-emitterende producten en processen steeds onaantrekkelijker worden en uiteindelijk verdwijnen. De snelheid van de energietransitie is daardoor direct gecorreleerd met de toename van de CO₂-belasting en de beschikbaarheid en prijs van hernieuwbare alternatieven.

Maatregelen vinden daar in Europa plaats waar dat het meeste nut heeft en de business case het meest gunstig is. Europa ondersteunt de eigen industrieën en onderlinge solidariteit tussen landen is hoog. Daardoor wordt de pentalaterale elektriciteitsmarkt versterkt. Nederland zal energie importeren uit het buitenland, met een voorkeur voor duurzame energie van Europese oorsprong.

Projecten en initiatieven zullen alleen tot stand komen wanneer dit onderbouwd kan worden door een positieve business case. Met andere woorden, alleen wanneer een duurzaam alternatief voordeliger is dan de huidige aanpak, zal dit alternatief verkozen worden boven het huidige. Hoewel de klimaatkosten meegenomen worden in investeringsbeslissingen, wordt dus niet altijd een CO₂-neutrale techniek verkozen. Alle energieoplossingen die op enig moment nog een onrendabele top lijken te hebben, ook na de CO₂-beprijzing, vallen daardoor af. Dit zal ertoe leiden dat er in de nabije toekomst ook hybride technologieën en CCS toegepast zullen worden, daar waar deze techniek relatief goedkoop is en kan schakelen tussen meerdere energiedragers. Hybride technologieën zijn daarom minder

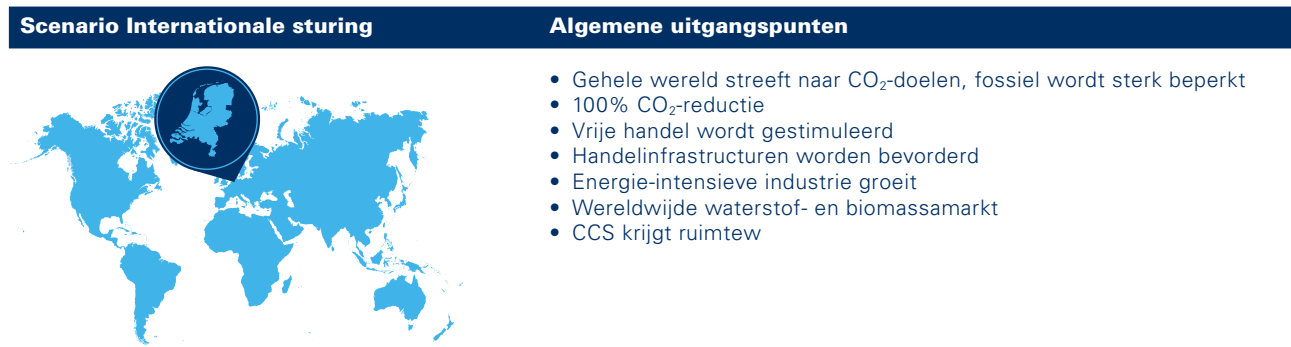
gevoelig voor prijsstijgingen van zowel fossiele als hernieuwbare energiedragers.

Ook voor het vervoer betekent dit dat de goedkoopste opties worden gebruikt. In de eerste jaren als de CO₂-taks nog laag is, zal er nog veel gebruik worden gemaakt van fossiel vervoer. Maar naarmate deze taks omhoog gaat, zal elektrisch en waterstofvervoer aantrekkelijker worden en deze markt overnemen.

Om te voorkomen dat de concurrentiepositie van de Europese industrie verslechtert ten opzichte van de rest van de wereld als gevolg van de CO₂-belasting, worden de opbrengsten van de CO₂-belasting gecompenseerd aan de grens van de EU. Ook wordt de opbrengst van de CO₂-belasting teruggegeven aan de betrokken sectoren. In de industrie gebeurt dit door duurzame processen, feedstock en circulariteit te subsidiëren. De industrie groeit in dit scenario gestaag.

In dit scenario zal er tot aan 2050 gebruik worden gemaakt van gas met CCS, aangezien er wordt aangenomen dat dit goedkoper is dan veel alternatieve technologieën. Een ander deel van de installaties die op gas draaien zullen uiteindelijk overgaan op groen gas (mogelijk geïmporteerd). Dit zal ook als back-up worden gebruikt als er op korte of langere termijn problemen zijn met de energievoorziening.

3.4 Internationale sturing



Figuur 4 Scenario internationale sturing

Dit scenario gaat uit van een volledig open internationale markt op mondiaal niveau, waarbij er tevens op mondiaal niveau een krachtig klimaatbeleid wordt gevoerd. Dit betekent dat er geen invoertarieven, quota's of andere maatregelen binnen of buiten Europa van kracht zijn die handel kunnen belemmeren. Nederland is niet zelfvoorzienend, waardoor het afhankelijk is van import. Ook zal er in dit scenario sprake zijn van sterke internationale samenwerkingen. Het resultaat hiervan is een geavanceerde internationale infrastructuur (binnen Europa) voor de uitwisseling van energiedragers (waterstof, biomassa, biobrandstof). Om leveringszekerheid hierin te kunnen garanderen zal het Rijk zich richten op het onderhouden van internationale handelsrelaties. Daarnaast krijgt Nederland state-of-the-art infrastructures met strategische reserves om het transport en opslag van verschillende hernieuwbare energiedragers in zeer grote volumes mogelijk te maken.

Nederland focust zich op zijn kenniseconomie, zodat de technieken die hier ontwikkeld worden in het buitenland ingezet kunnen worden. Hierdoor behoudt Nederland zijn (goede) concurrentiepositie, waardoor het als marktleider kennis exporteert en hernieuwbare energiedragers op grote schaal importeert. Op techno-economisch strategische locaties wereldwijd wordt hierdoor hernieuwbare energie grootschalig opgewekt. Binnen Nederland betekent dit dat er vooral wind-op-zee gerealiseerd zal worden, omdat dit vanwege de gunstige omstandigheden op de Noordzee op prijs internationaal kan concurreren. Buiten Nederland resulteert dit bijvoorbeeld in grootschalige zonneweides en/of biomassaproductie in dunbevolkt gebied.

Burgers en bedrijven zullen zich vanwege het internationale karakter met name richten op het ontwikkelen van nieuwe technologieën, omdat het aanbod van fossiel sterk gereduceerd wordt. Prijstechnisch worden hernieuwbare energiedragers vanwege grote volumes steeds interessanter richting 2050. In de nabije toekomst zal het aanbod traag toenemen, maar naarmate er mondiaal meer overeenstemming is bereikt en grootschalige projecten zijn gerealiseerd, neemt dit volume exponentieel toe. Import zorgt voor een grote diversiteit aan energiedragers, wat is terug te zien in zowel het personen- als vrachtovervoer. Hoewel elektrisch vervoer dominant is, zal er ook gebruik gemaakt worden van waterstof, biogas en biobrandstoffen.

De groeiende industrie zal zich in eerste instantie focussen op aardgas + CCS vanwege prijstechnische overwegingen (laagste CAPEX en OPEX). Later wordt hier ook waterstof aan toegevoegd, wanneer dit in grote hoeveelheden voorhanden is. De huidige fossiele feedstock zal in veel industrieën blijven bestaan.

3.5 Overzicht van uitgangspunten en invulling per scenario

In Tabel 1 staan per scenario nogmaals de uitgangspunten samengevat. Daaronder vindt u per scenario hoe deze cijfermatig worden ingevuld, zie hiervoor Tabel 2. Enkele cijfers zijn tot stand gekomen in de energetische doorrekening van de scenario's, paragraaf 3.5.1 licht dit verder toe. Daarbij zijn de meeste cijfers aannames, die behoren bij de algemene uitgangspunten per scenario. Deze zijn bovendien zodanig gekozen dat met de vier scenario's de "hoeken van het speelveld" worden verkend.

3.5.1 Bepaling van het vermogen aan windturbines en back-upcentrales met duurzame gassen

Aangezien er niet altijd duurzame elektriciteit voorhanden is, wordt eveneens in elk scenario een vermogen aan back-upcentrales voorzien, voldoende om altijd de elektrische vraag te dekken (andere oplossingen zoals elektriciteitsopslag of vraagsturing zijn wel in de scenario's aanwezig maar werken slechts op korte termijn en volstaan dus niet voor langere schaarsteperioden). Dit back-upvermogen wordt per scenario in totale omvang berekend en wordt in deze fase 1, rapportage en bijbehorende ETM projecties, ingevuld met standaard STEG-centrales op basis van groen gas en/of waterstof. Afhankelijk van het scenario wordt de waterstof geheel of gedeeltelijk geproduceerd uit duurzame elektriciteit en elektrolyse, hierop is het wind-op-zeevermogen aangepast. Hiervoor geldt de eerdere opmerking dat in de optimalisatiefase (fase 2) van het proces dit STEG-vermogen eventueel ook alternatief technisch invulbaar is, zoals met gasturbines of kleinschaliger lokale opwekeenheden.

Voor het bepalen van het vermogen wind-op-zee voor de productie van synthetische bunkers en kerosine in 2050 is gekeken naar het scenario Nationale sturing, waarbij het vermogen wind-op-zee voor productie van elektriciteit en waterstof het grootst is met ongeveer 52 GW. Voor het totale potentiële vermogen van wind-op-zee op de Nederlandse Noordzee is in deze scenario's, op ruimtelijke gronden in een studie voor het Klimaatakkoord³⁾, uitgegaan van een hoge waarde van 72 GW. Deze waarde ligt boven waarden genoemd in andere studies van o.a. PBL (60 GW), rondom het Noordzeeakkoord, waarbij verschillende belangen meegewogen worden.⁴⁾ Om voor deze scenario's goed de uiterste waarden van de mogelijke ontwikkelingen te verkennen, is er gekozen voor de hoge waarde van 72 GW op basis van ruimtelijke gronden uit te gaan. Hierdoor worden deze mogelijke ontwikkelingen meegenomen in de infrastructuurramingen, zodat men later niet voor verrassingen komt te staan. Voor het scenario Nationale sturing is dus additionele ruimte van 20 GW, oftewel circa 40% extra windvermogen voor productie van synthetische bunkers en kerosine. Ditzelfde percentage is toegepast op de overige scenario's. Hieruit volgt dat naast de binnenlandse productie van bunkers en kerosine in ieder scenario een behoefte blijft voor import van klimaatneutrale bunkers en/of kerosine.

Tabel 1 Uitgangspunten scenario's

| | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|-------------------------|--|--|---|---|
| Algemene uitgangspunten | Nederland haalt CO ₂ -doelen door regionale ontwikkeling 100% CO ₂ -reductie Zelfvoorzienend in beginsel Minimale importen Krimp van energie-intensieve industrie Regionale projecten Burgers zeer gedreven Circulariteit speerpunt voor goederen en voedselproductie | Nederland haalt CO ₂ -doelen nationaal als koploper in Europa 100% CO ₂ -reductie Zeer hoge mate zelfvoorziening Minimale importen Energie-intensieve industrie blijft gelijk aan de huidige omvang Grote nationale projecten Circulariteit belangrijk voor goederen en voedselproductie | Europa haalt CO ₂ -doelen en is daarin koploper in de wereld 100% CO ₂ -reductie Algemene CO ₂ -heffing, importheffingen & compensatie aan de grenzen van Europa Energie-intensieve industrie groeit Wereldwijde waterstof- en biomassamarkt CCS krijgt veel ruimte | Gehele wereld streeft naar CO ₂ -doelen, fossiel wordt sterk beperkt 100% CO ₂ -reductie Vrije handel wordt gestimuleerd Handelinfrastructuren worden bevorderd Energie-intensieve industrie groeit Wereldwijde waterstof- en biomassamarkt CCS krijgt ruimte |

3) Dit is de ondergrens van het "theoretische potentieel" wat ruim ligt boven het "meer realistisch potentieel", zie pagina 64 van "Ruimtelijke verkenning energie en klimaat" januari 2018, link: https://www.klimaatakkoord.nl/binaries/klimaatakkoord/documenten/publicaties/2018/02/21/ruimtelijke-verkenning-energie-en-klimaat/180221_Ruimtelijke_verkenning_Energie_en_Klimaat_LQ.pdf

4) PBL (2018). De toekomst van de Noordzee

Tabel 2 Overzicht invulling per scenario

| | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ - sturing | Internationale sturing |
|--|---|--|---|---|
| Gebouwde omgeving | Isolatie label A/B 45% warmte (geothermie + groengas/biomassa) 35% all-electric WP 20% hybride WP groengas 42 GW zon-PV op daken* 38 PJ zonthermie\ LED-verlichting, inductiekoeken, efficiëntie-verbetering apparaten, groei aantal apparaten Bevolkingsgroei | Isolatie label A 55% all-electric WP 25% warmte (geothermie + groengas/biomassa) 20% hybride WP groengas 35 GW zon-PV op daken* 18 PJ zonthermie LED-verlichting, inductiekoeken, efficiëntie-verbetering apparaten, groei aantal apparaten Bevolkingsgroei | Isolatie label B 40% hybride WP groengas 20% hybride WP waterstof 25% all-electric 15% warmte (restwarmte + groengas/biomassa) 17 GW zon-PV op daken* 16 PJ zonthermie LED-verlichting, inductiekoeken, efficiëntie-verbetering apparaten, groei aantal apparaten Bevolkingsgroei | Isolatie label B 60% hybride WP waterstof 25% all-electric WP 15% warmte (restwarmte + groengas/biomassa) 13 GW zon-PV op daken* 12 PJ zonthermie LED-verlichting, inductiekoeken, efficiëntie-verbetering apparaten, groei aantal apparaten Bevolkingsgroei |
| Mobiliteit | Personenvervoer: 100% elektrisch Vrachtovervoer: 75% elektrisch, 15% waterstof, 10% groengas | Personenvervoer: 95% elektrisch, 5% waterstof Vrachtovervoer: 50% waterstof, 25% elektrisch, 25% biobrandstoffen | Personenvervoer: 70% elektrisch, 30% waterstof Vrachtovervoer: 25% elektrisch, 25% waterstof, 25% groengas, 25% biobrandstoffen | Personenvervoer: 50% elektrisch, 40% waterstof, 10% biobrandstoffen Vrachtovervoer: 50% biobrandstoffen, 25% waterstof, 25% elektrisch |
| Industrie | Krimp 1% per jaar Efficiency 1% per jaar Sterk circulair Sterke elektrificatie, inzet groen gas ICT groeit sterk Circulaire feedstock | Gelijk aan huidig Efficiency 1% per jaar Circulariteit belangrijk, CCS mogelijk Sterke elektrificatie inzet waterstof ICT groeit sterk Circulaire feedstock | Groei 1% per jaar Efficiency 1% per jaar CCS belangrijk Sterke elektrificatie en inzet waterstof ICT groeit sterk Fossiele feedstock | Groei 1% per jaar Efficiency 1% per jaar CCS belangrijk Sterke elektrificatie, inzet waterstof en fossiel+CCS ICT groeit sterk Fossiele feedstock |
| Landbouw | Sterke elektrificatie Nadruk op geothermie en groengasketels voor warmte | Sterke elektrificatie Nadruk op geothermie en WP met WKO voor warmte, biomassaketels en enkele groengas-WKKS | Sterke elektrificatie Nadruk op WP met WKO en geothermie voor warmte | Sterke elektrificatie Deels geothermie, daarnaast WP met WKO voor warmte, biomassa ketels en groengas-WKKS |
| Elektriciteit⁵⁾ | 35-39 GW waterstof 3 GW groengas + CCS 47 GW grootschalig zon ¹ 43 GW wind-op-zee ² 20 GW wind-op-land | 39-45 GW waterstof 0,4 GW AVI's (deel CCS) 41 GW grootschalig zon ¹ 72 GW wind-op-zee ² 20 GW wind-op-land | 39-47 GW groengas 6 GW groengas + CCS 0,7 GW AVI's (deel CCS) 25 GW grootschalig zon ¹ 42 GW wind-op-zee ² 10 GW wind-op-land | 41-48 GW waterstof 5 GW groengas + CCS 0,7 GW AVI's (deel CCS) 25 GW grootschalig zon ¹ 38 GW wind-op-zee ² 10 GW wind-op-land |
| Conversie, opslag en import⁵⁾ | 42 GW Elektrolyse 26 GW Power to heat 6 GW batterijopslag 26 TWh waterstofopslag 5 TWh groengasopslag 15 GW interconnectie | 45 GW Elektrolyse 17 GW Power to heat 17 GW batterijopslag 16 TWh waterstofopslag 2 TWh groengasopslag 15 GW interconnectie | 3 GW Elektrolyse, 13 GW ATR+CCS, 170 PJ import H2 6 GW Power to heat 4 GW batterijopslag 48 TWh waterstofopslag 114 TWh groengasopslag 15 GW interconnectie | 3 GW Elektrolyse, 580 PJ import H2 7 GW Power to heat 1 GW batterijopslag 193 TWh waterstofopslag 5 TWh groengasopslag 15 GW interconnectie |
| Scheepvaart & luchtvaart brandstoffen | Krimp 1% per jaar Uit 12 GW (113 PJ ³⁾ wind-op-zee + 391 PJ Import | Gelijk aan huidig Uit 21 GW (188 PJ ³⁾ wind-op-zee + 495 PJ Import | Groei 1% per jaar Uit 12 GW (110 PJ ³⁾ wind-op-zee + 844 PJ Import | Groei luchtvaart 2%, scheepvaart 1% per jaar 11 GW (100 PJ ³⁾ wind-op-zee + 938 PJ Import |

1 Gebaseerd op 1224 vollasturen per jaar (om een efficiëntieverbetering van 17% naar 24% te simuleren)

2 Inclusief het vermogen wind-op-zee voor genereren waterstof voor brandstoffen scheep- en luchtvaart, maximale potentieel gebaseerd op Ruimtelijke verkenning Energie en Klimaat opgesteld ten behoeve van het Klimaatakkoord.

3 Gebaseerd op 4500 vollasturen per jaar & een elektrolyse efficiëntie 66%

Naast de bovengenoemde technieken zijn er ook opslagmogelijkheden in thuisbatterijen, wijkbatterijen en grootschalige elektriciteitsopslag. Deze hebben wij voor nu niet meegenomen in onze berekeningen in het ETM, omdat deze technieken in de huidige versie van het ETM niet nog optimaal zijn gemodelleerd. Hiervoor geldt echter dat dat verdere optimalisatie met een grotere diversiteit van technische invulling en schaalniveaus mogelijk is, en deze technieken zijn dus zeker denkbaar voor verdere doorrekening in fase 2 van de integrale infrastructuurverkenning 2030-2050.

5) Fase 2 van II3050 zal dieper ingaan op mogelijke flexibiliteitsopties en de behoefte aan aan/uit-schakelbaar vermogen

Mogelijk vervangend of extra flexvermogen voor doorrekening fase 2 van de integrale infrastructuurverkenning 2030-2050

Voor fase 2 van de integrale infrastructuurverkenning stellen wij de volgende verdeling van overige flextoepassingen voor. Deze flextoepassingen kunnen in de meer gedetailleerde doorrekening van de netten zeker van nut zijn. De nadruk per flextoepassingen staat per scenario aangegeven in Tabel 3. De redeneerlijn per scenario is als volgt: In een regionaal scenario wordt er veel geïnvesteerd in batterijen in huishoudens, bewoners willen de energie die ze met hun zon-PV op daken opwekken opslaan en zelf gebruiken. In het nationale scenario wordt er landelijk veel geïnvesteerd in wijkbatterijen. Daarnaast wordt er een ondergrondse pompaccumulatiecentrale gebouwd. In het Europese scenario wordt er door sommige bewoners geïnvesteerd in de huisbatterijen omdat dit zich in korte tijd terugbetaald. Daarnaast worden er meerdere grootschalige elektriciteitsopslagen geïnstalleerd. Het internationale scenario heeft het minste opslag in huishoudens en wijken, aangezien er hier vanuit wordt gegaan dat tekorten altijd ingevuld kunnen worden met import. Er staat één grootschalige elektriciteitsopslag om de elektriciteitsmarkt te balanceren. Invloed op het opgesteld vermogen aan aan/uit-schakelbare centrales is ook onderdeel van fase 2. Zie paragraaf 4.3.2 voor een uitgebreidere toelichting op de back-up centrales.

Tabel 3 Potentie flexibel vermogen per scenario

| | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|---|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Batterij huishoudens (GW) | ++ | + | + | + |
| Batterij wijken (GW) | + | ++ | 0 | 0 |
| Grootschalige elektriciteitsopslag (GW) | 0 | + | ++ | + |

E-refinery: Synthetische kerosine & scheepsbunkers

Een deel van de huidige raffinage produceert nu fossiele brandstoffen voor de lucht- en scheepvaart. Dit deel zal verdwijnen in een volledig duurzaam scenario. Wel blijft er brandstofvraag bestaan vanuit de luchtvaart en scheepvaart. Deze zal deels geïmporteerd worden en deels in Nederland geproduceerd worden. In de scenario's is er met een groei van de scheepvaart gerekend van -1%, 0%, 1% en 1% per jaar en voor de luchtvaart van -1%, 0%, 1% en 2% per jaar voor respectievelijk het regionale, nationale, Europese en internationale scenario inclusief mogelijke efficiëntieverbeteringen.

De brandstoffen voor internationaal transport worden in de regel niet meegenomen in landelijke energiestudies, aangezien deze sector niet onder het klimaatverdrag van Parijs valt. Toch zal de lucht- en scheepvaart in hoge mate gebruik moeten maken van synthetische brandstoffen en mogelijk ook biobrandstoffen om te verduurzamen en de doelstellingen van Parijs binnen bereik te brengen.

In deze studie nemen we deze brandstoffen daarom wel mee. Deze analyse richt zich in eerste instantie op synthetische brandstoffen. Mogelijkheden voor elektrificatie van de luchtvaart (korte afstanden) en scheepvaart (kustvaart) laten we voor nu buiten beschouwing, omdat dit naar onze mening een kleine impact heeft op de totale vraag naar brandstoffen voor de lucht- en scheepvaart.

Synthetische brandstoffen worden gemaakt uit waterstof en een koolstofstroom: bijvoorbeeld uit CO₂ die afgevangen wordt uit de lucht en een omzetting van CO₂ naar CO met PEM-elektrolyse (nog behoorlijk fundamenteel onderzoek), of via CO₂-afvang bij industrie of elektriciteitsproductie.

In Tabel 4: Duurzame brandstoffen voor internationaal transport, is de toekomstige vraag berekend in Peta joule, door de groeipercentages te vermenigvuldigen met de huidige vraag naar brandstoffen. Een deel van deze toekomstige vraag kan in Nederland geproduceerd worden en een belangrijk deel zal geïmporteerd worden (synthetisch of op basis van biomassa).

Om de vraag van bijvoorbeeld 714 PJ naar synbunkers en synkerosine volledig autonoom op te wekken zou er 67 GW wind-op-zee extra nodig zijn, plus nog 17 GW voor Direct Air Capture en de omzetting van CO₂ naar CO met behulp van PEM-elektrolyse. Die ruimte is er niet zonder zeer ingrijpende veranderingen in de combinatie van functies op de Noordzee en derhalve zal er voornamelijk worden geïmporteerd.

Om te bepalen hoeveel synthetische brandstoffen voor scheepvaart en luchtvaart in Nederland kunnen worden geproduceerd, is er gekeken naar hoeveel capaciteit wind-op-zee er kan worden toegevoegd in het nationale scenario. We gaan ervan uit, op basis van analyses voor het Klimaatakkoord, dat er maximaal 72 GW wind-op-zee geplaatst kan worden in 2050⁶⁾. Er staat al 51,5 GW wind-op-zee in het nationale scenario voor andere elektrische toepassingen dan synthetische brandstoffen. Dit betekent dat er nog 20,5 GW wind-op-zee geplaatst kan worden ten behoeve van de Nederlandse duurzame internationale scheepvaart en luchtvaart.

Ditzelfde percentage extra wind-op-zee wordt gebruikt in de andere scenario's. Dit is gedaan om het onderscheid tussen de scenario's te behouden en niet in ieder scenario op 72 GW wind-op-zee uit te komen. Dit is te zien in Tabel 4.

Om deze duurzame brandstoffen te kunnen produceren is koolstofmonoxide nodig. Aangezien er ook energie verbruikt wordt om koolstofmonoxide te verkrijgen (via Direct Air Capture – DAC - en PEM-elektrolyse van CO₂ naar CO) is de benodigde energie 25% hoger dan de energie van de brandstoffen die geproduceerd worden.⁷⁾ Oftewel, 80% van het vermogen kan gebruikt worden voor waterstofproductie en 20% is benodigd voor DAC.

Deze E-refinery kan in principe overal in Nederland plaatsvinden. Wel blijkt uit de interviews dat sommige clusters er meer mee bezig zijn dan andere. Het grootste deel van de bunkers bevindt zich nu in Rotterdam en Amsterdam. Daarnaast is Groningen bezig met een fabriek die duurzame biokerosine produceert. In Rotterdam staan dergelijke fabrieken al en kunnen de bestaande raffinaderijen een rol spelen in de productie van synthetische brandstoffen (o.a. door aanwezigheid van hydrocrackers). Ook zijn er bunkers aanwezig in de haven van Antwerpen. Gezien de korte afstand tussen cluster Zeeland en de haven van Antwerpen in combinatie met de aanwezigheid van DOW chemical en Arcelor Mittal is het denkbaar dat 'E-refinery'/productie van synthetische brandstoffen in dit clusters kan plaatsvinden.

6) Ondergrens theoretisch potentieel windvermogen op Noordzee uit Ruimtelijke verkenning Energie en Klimaat, opgesteld ten behoeve van het Klimaatakkoord

7) Kalavasta (2018). Carbon neutral aviation with current engine technology

Tabel 4 Duurzame brandstoffen voor internationaal transport

| | Huidig | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|--|--------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Omvang luchtvaart (t.o.v. 2015) | 100% | 78% | 107% | 145% | 197% |
| Omvang scheepvaart (t.o.v. 2015) | 100% | 78% | 107% | 145% | 145% |
| Omvang luchtvaart (PJ) | 160 | 125 | 170 | 232 | 315 |
| Omvang scheepvaart (PJ) | 510 | 398 | 543 | 740 | 740 |
| Totaal (PJ) | 670 | 523 | 714 | 972 | 1055 |
| Equivalent vermogen aan WOZ | | 49 | 67 | 91 | 99 |
| Extra wind-op-zee mogelijk (GW) t.b.v internationale lucht-/scheepvaart | | 12 | 20,5 | 12 | 11 |
| Energie voor DAC (PJ)* | | 28 | 47 | 27 | 25 |
| Productie synthetische brandstoffen (PJ)* ** | | 113 | 188 | 110 | 100 |
| Import van duurzame brandstoffen voor internationaal transport (PJ) | | 410 | 526 | 862 | 954 |

*Uitgaand van 4500 vollasturen per jaar

** 66% efficiency naar waterstof meegenomen

1 PJ aan waterstof is in deze berekening benodigd voor de productie van 1 PJ synthetische brandstoffen

De behandeling van de feedstocks (inzet van energiedragers als grondstof)

Bij de inzet als grondstof zijn er twee categorieën, verschillend voor klimaatemissies als inbegrepen in "Parijs" en het Klimaatakkoord:

Scope 1 en 2: Inzet van feedstock (steeds in de industrie) waarbij meteen CO₂ wordt uitgestoten. Dit is vooral inzet van aardgas voor de huidige waterstofproductie (ammoniak/kunstmest en raffinaderijen) en kolen voor staalproductie; eventueel ook elektriciteit voor aluminiumproductie, waarbij ook CO₂ vrijkomt. Dit alles valt onder "Parijs" en onder het Klimaatakkoord, onder scope 1 en 2, en moet dus terug naar nul in 2050.

In onze scenario's wordt deze categorie (feedstocks met CO₂-emissies scope 1 en 2) op dezelfde wijze behandeld als het energetisch verbruik. We maken voor deze categorie in onze presentaties vaak wel onderscheid tussen het energetisch en het non-energetisch verbruik, maar voor beide gaat de directe CO₂-uitstoot terug naar nul. Voorbeeld: het maken van waterstof voor de ammoniaindustrie, waaronder kunstmest, wordt gedecarboniseerd, hetzij met CCS, hetzij door waterstof uit elektrolyse van duurzame stroom, dit afhankelijk van het scenario.

Scope 3: Inzet van feedstock voor de productie van basischemicaliën, grotendeels bestemd voor de productie van kunststoffen. Dat produceert geen directe CO₂ (N.B. het energieverbruik bij deze productie natuurlijk wel, maar dat valt al onder brandstofinzet). Deze inzet van feedstock (scope 3) valt niet onder "Parijs" en het Klimaatakkoord. Het komt deels terug in later stadium, afhankelijk van de levensduur van de kunststoffen, wanneer deze als afval verbrand wordt (althans in Nederland), en is dan scope 1, maar veel lager dan de oorspronkelijke feedstockinzet.

Deze emissies in scope 3 zijn geen onderdeel van "Parijs" of het Klimaatakkoord en wordt door ministerie EZK niet meegeteld in de beleidskaders. Dat neemt niet weg dat de industrie wellicht zelf activiteiten zou willen ondernemen in deze sfeer, dan kan dat namelijk toch gevolgen hebben voor de netinfrastructuur. We willen dus wel rekening houden met de directe CO₂-impact van wat de industrie zelf aan scope 3 zou willen doen. Zo hebben bijvoorbeeld veel recyclingsprocessen extra energie nodig, of waterstof. Dat is natuurlijk zeer relevant voor de netbeheerders.

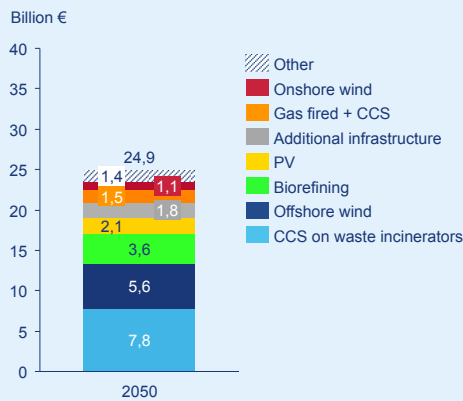
Er zijn dan diverse manieren waarop de industrie deze inzet van fossiele feedstock (scope 3) zou kunnen vermijden. Deze zijn uitputtend behandeld in de roadmap voor de chemische industrie (i.o.v. VNCI) door Ecofys en Berenschot in drie "thematic pathways":

- Biomassa en circulair;
- Elektrificatie;
- CCS.

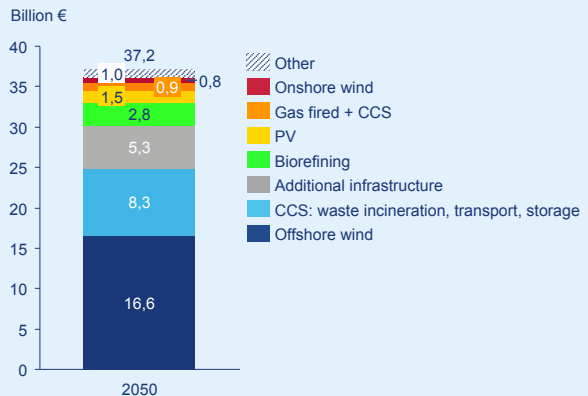
Deze zijn terug te vinden op pagina's 89 van het rapport, te vinden op https://www.berenschot.nl/publish/pages/6055/vnci_routekaart_2050_chemische_sector.pdf

Zie hieronder de uitkomsten qua benodigde investeringen, separaat voor de energiesector (inclusief energie-infrastructuur), N.B. de schaal bij elektrificatie is 10x de schaal bij de andere twee varianten.

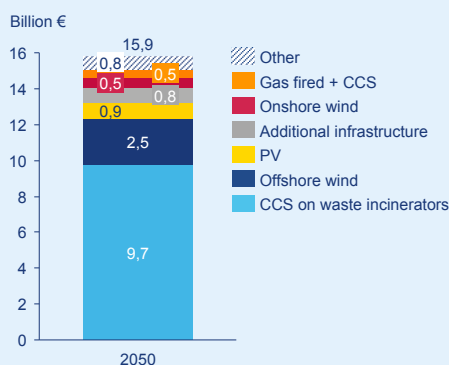
Total investments (by energy sector):
€24,9 BLN



Total investments (by energy sector):
€37,2 BLN



Total investments (by energy sector):
€15,9 BLN



Daaruit blijkt dat de investeringen in de energiesector bij de elektrificatievariant van scope-3-emissies een factor 10 groter zijn dan in de andere varianten. Mede om deze reden komt elektrificatie van (scope-3-) grondstoffen nauwelijks in de VNCI-hoofdvarianten voor uitvoering in de industrie, wel voor scope 1 en 2.

We zien dit ook in een inventarisatie gedaan onder de 5 grote industriële clusters. Deze plannen focussen enerzijds op elektrificatie en waterstof in de scope-1-en-2-emissies; anderzijds wat betreft de feedstocks vooral op circulair en biomassa, waarbij in sommige gevallen ook extra duurzame waterstof vereist is. Deze zijn geplaatst in de scenario's, waar mogelijk scenarioafhankelijk. Er is echter vrijwel nergens sprake van elektrificatie in scope 3; dat is wel logisch omdat er noch de beleidsdoelen voor zijn, noch de business case.

Derhalve blijft de feedstock voor plastics (in enkele scenario's met aftrek van de gerecyclede feedstocks, maar deze is nooit volledig) gebaseerd op aardolie. Daardoor, en vanwege de doorvoer naar het buitenland, blijft aardolie in 2050 in de scenario's voorkomen als non-energetisch, dus niet voor Nederlandse brandstoffen; het wordt ingezet voor de productie van kunststoffen, dus zonder directe CO₂-emissies. Omdat voor de uiteindelijke afvalverwerking van deze kunststoffen in Nederland nog afvalverbrandingsinstallaties kunnen voorkomen, zijn deze dan voorzien van CCS zodat ook de indirecte CO₂-emissies worden voorkomen. Daarnaast worden, zoals eerder gememoreerd, alle feedstocks die wel directe CO₂-emissies veroorzaken (waterstof voor de chemie en kolen voor de staalindustrie), geheel gedecarboniseerd met duurzaam geproduceerde waterstof en/of CCS.



Vergelijking Klimaatneutrale energiescenario's 2050 met Net voor de Toekomst 2017

Deze studie is een actualisering van het rapport "Net voor de Toekomst" uit 2017. Zoals in het Klimaatakkoord afgesproken was deze actualisering nodig vanwege de sterk gewijzigde omstandigheden, zowel wat betreft beleid als techniek. Zo zijn in het Klimaatakkoord afspraken gemaakt voor 2030, die op onderdelen al verder gaan dan in de scenario's "2017 Net voor de Toekomst" voor 2050 – deze onderdelen zijn dus qua doelstelling zowel hoger als eerder in de tijd. Ook zijn in de afgelopen jaren grote kostenreducties geboekt met bepaalde technieken, en zijn er nieuwe inzichten over bijvoorbeeld de systeemintegratie-aspecten en de mogelijke rol van nieuwe energiedragers zoals waterstof.

Om dit nader te illustreren volgt hieronder een korte selectie van enkele hoofdkenmerken uit de "oude" en de "nieuwe" scenarioverkenning. De laatste wordt in de navolgende hoofdstukken nog uitvoerig toegelicht.

Tabel 5 Geselecteerde uitkomsten 2017 Net voor de Toekomst

| 2017 Net voor de Toekomst (voor 2050) | Regionale sturing | Nationale sturing | Generieke sturing | Internationale sturing |
|---------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------------|
| Elektriciteitsverbruik (PJ) | 573 | 528 | 528 | 424 |
| Waterstofeindverbruik (PJ) | 280 | 465 | 116 | 308 |
| Waterstofinzet centrales (PJ) | 17 | 13 | 24 | 18 |
| Windvermogen (GW) | 42 | 67 | 10 | 11 |
| Zon-PV vermogen (GW) | 84 | 38 | 18 | 16 |
| Regelbaar vermogen (GW) | 30 | 23 | 24 | 22 |

Tabel 6 Geselecteerde uitkomsten 2020 Klimaatneutrale energiescenario's 2050

| 2020 Klimaatneutrale energiescenario's 2050 | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|---|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Elektriciteitsverbruik (PJ) | 690 | 763 | 863 | 842 |
| Waterstofeindverbruik (PJ) | 121 | 266 | 421 | 518 |
| Waterstofinzet centrales (PJ) | 145 | 64 | 0 | 73 |
| Windvermogen (GW) | 63 | 92 | 52 | 48 |
| Zon-PV vermogen (GW) | 125 | 106 | 42 | 38 |
| Backup vermogen (GW) | 38-42 | 39-45 | 45-53 | 46-53 |

Enkele zaken, die hierbij opvallen, zijn bijvoorbeeld de volgende, verwoord op hoofdlijnen:

- Het geraamde elektriciteitsverbruik is hoger dan in de oude verkenningen. Dit heeft vele oorzaken. Ten eerste, wordt in deze scenario's expliciet rekening gehouden met de groei. Zo wordt overal gerekend met groei van het aantal inwoners en woningen, en in sommige scenario's groeit ook de industrie en het transport. Aangezien, al deze sectoren thans elektriciteit verbruiken, maar daarbij ook gaan elektrificeren, werkt dat door in het stroomverbruik. Ten tweede, zijn we in deze scenario's voorzichter met het inboeken van besparingen op het elektriciteitsverbruik, om niet te optimistisch te zijn voor de vervolgfase, waarin deze projecties worden gebruikt voor de raming van de netinfrastructuur. Ten derde, hebben we rekening gehouden met de preferenties van de industrie, wat betreft hun voornemens in de energietransitie; deze kwamen relatief sterk op elektrificatie uit. Tenslotte, kan dit hogere elektriciteitsverbruik volumematisch in grote mate worden gedekt door een omvangrijk park duurzame elektriciteitsopwekking, waarvan de perspectieven groter zijn en de kosten per eenheid lager dan voorheen.
- Voor waterstof geldt in twee scenario's (Regionale sturing en Nationale sturing) dat dit qua eindverbruik lager uitkomt, dan in de oude scenario's; onder andere door minder waterstof in de woningen. Terwijl, het waterstofvolume in de scenario's Europese CO₂-sturing en Internationale sturing juist hoger is: vooral vanwege de rol voor waterstof als grondstof in de groeiende industrie in deze scenario's, meer aangenomen waterstofinzet in het transport en ook de bestaande woningen (hybride warmtepompen met waterstof-piek-CV).
- In de meeste nieuwe klimaatneutrale scenario's wordt waterstof meer ingezet in de elektriciteitsopwekking, dan in de oude scenario's waarin de back-up voor de centrales meer bestond uit groen gas, biomassa en aardgas met CCS. Alleen het nieuwe Europese CO₂-sturing scenario lijkt wat dat betreft nog op de oude scenario's.

- Het vermogen windenergie is aanzienlijk groter dan in de oude verkenningen. Dit geldt voor alle scenariovarianten. De successen en de kostendalingen van vooral wind op zee leidt in het Klimaatakkoord en andere plannen tot een forse toename van het verwachte windvermogen. Daarnaast wordt in de klimaatneutrale energiescenario's 2050 ook voorzien voor synthetische brandstoffen voor vliegtuigen en schepen, deels binnenlands opgewekt deels geïmporteerd. Het windvermogen is inclusief de opwekking, die omgerekend daarvoor uiteindelijk binnenlands wordt voorzien.
- Ook het vermogen zonne-energie is fors groter dan in de oude verkenningen, voor alle scenariovarianten. De voortdurende kostendaling van zonnepanelen leidt tot hogere prognoses. En daarnaast is gerekend met de ontwikkeling naar hogere rendementen van zonnepanelen, zodat per oppervlakte steeds meer wordt opgewekt.
- Tenslotte, is het vermogen aan stuurbare back-up centrales groter. Dit hangt samen met het hogere elektriciteitsverbruik: om te voorzien in deze hoge vraag ook op momenten zonder zonne-of windenergie - zeker bij langere tekortperioden - is een stevige reserve nodig. Daarbij, wordt er minder dan voorheen uitgegaan van biomassa-import, zodat vrijwel de hele back-up moet komen uit duurzame-gascentrales (op groen gas of waterstof, afhankelijk van het scenario).
- De merites van deze uitkomsten worden in de volgende hoofdstukken nader uiteengezet. Het is wel duidelijk dat de actualisatie zoals in het Klimaatakkoord overeengekomen, tot andere inzichten leidt die belangrijk kunnen zijn voor de raming van de benodigde infrastructuur.

Overkoepelende uitkomsten

Hoofdstuk 4

In dit hoofdstuk worden de algemene uitkomsten van de scenariodoorrekening uiteengezet. In de grafieken die in dit hoofdstuk worden gebruikt, staat als eerste het jaar 2015 zoals deze in het Energietransitiemodel is gemodelleerd, daarnaast staat het scenario KA 2030 – het technische streefbeeldscenario op basis van het Klimaatakkoord. Vervolgens staan de uitkomsten van de vier klimaatneutrale scenario's voor 2050 weergegeven. De scenario's voor 2015 en 2030 worden getoond om de 2050 scenario's in perspectief te plaatsen.



- Paragraaf 4.1 bespreekt de uitkomsten wat betreft finale energievraag.
- Paragraaf 4.2 gaat in op de primaire energie-inzet die benodigd is om de finale energievraag te dekken.
- Paragraaf 4.3 zoomt in op het opgesteld elektrisch vermogen voor de elektriciteitsvoorziening.
- Paragraaf 4.4 bekijkt de biomassavraag voor de 2050-scenario's.
- Paragraaf 4.5 beschouwt de waterstofbalans in de 2050-scenario's.
- Paragraaf 4.6 gaat verder in op de resterende CO₂-uitstoot en negatieve emissies.
- Paragraaf 4.7 bespreekt de circulariteit van de scenario's.
- Paragraaf 4.8 geeft uitleg voor de energie-infrastructuur die in fase 2 wordt behandeld.
- Paragraaf 4.9 gaat kort in op de kosten van de scenario's die nader worden onderzocht in de volgende fases.
- Paragraaf 4.10 laat de invloed van verschillende weerjaren zien op de scenario's.

Raadpleeg hoofdstuk 3 voor de verhaallijnen, uitgangspunten en de invulling op hoofdlijnen van de scenario's. Hoofdstuk 5 gaat verder in op de uitkomsten per sector, alsmede de onderbouwing van de scenariokeuzes per sector. Hoofdstuk 6 bespreekt de regionalisering van de landelijke scenario's per sector.

4.1 Finale energievraag

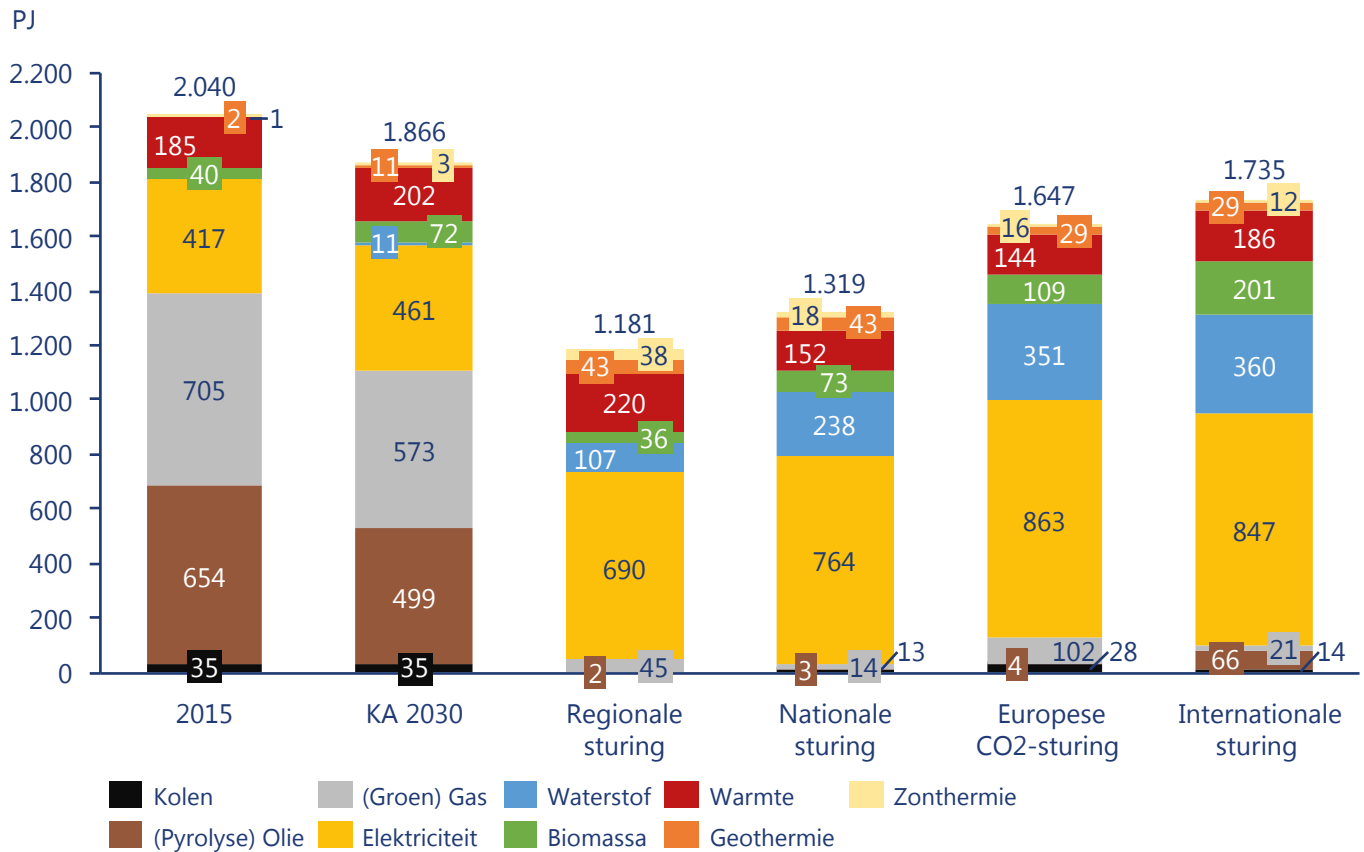
De totale finale energievraag (Figuur 5) is voor alle scenario's in 2050 lager dan nu en de Klimaatakkoordprojectie voor 2030; dit komt door de verhoogde efficiëntie in alle scenario's en alle sectoren. Wel is de eindvraag hoger in de scenario's met hogere industrieproductie (Europees en Internationaal) en lager bij het Regionale scenario, dat een daling van de industrieproductie veronderstelt. In alle scenario's is een groot percentage en volume elektriciteitsvraag zichtbaar. Deze is hoger dan in veel andere, eerder gepubliceerde scenario's; dat geldt ook voor de totale energievraag. Er zijn drie hoofdredenen daarvoor:

- Voor de totale vraag gaan we uit van groei van de bevolking, wat doorwerkt in veel sectoren, inclusief vervoer, en een (scenarioafhankelijke) groei van de industriële output; dat is in veel andere scenario's minder meegenomen.
- We gaan bij elektriciteit uit van substantiële maar realistische jaarlijkse besparingen, terwijl sommige andere scenario's uitgaan van meer daling door een sterkere besparing. Onze scenario's zijn iets minder optimistisch.
- Op grond van de input vanuit de industrie, met name de vijf grote industriële clusters, is de industrietransitie relatief sterk met elektrificatie vormgegeven. Dat zorgt uiteraard voor een groter percentage elektriciteit.

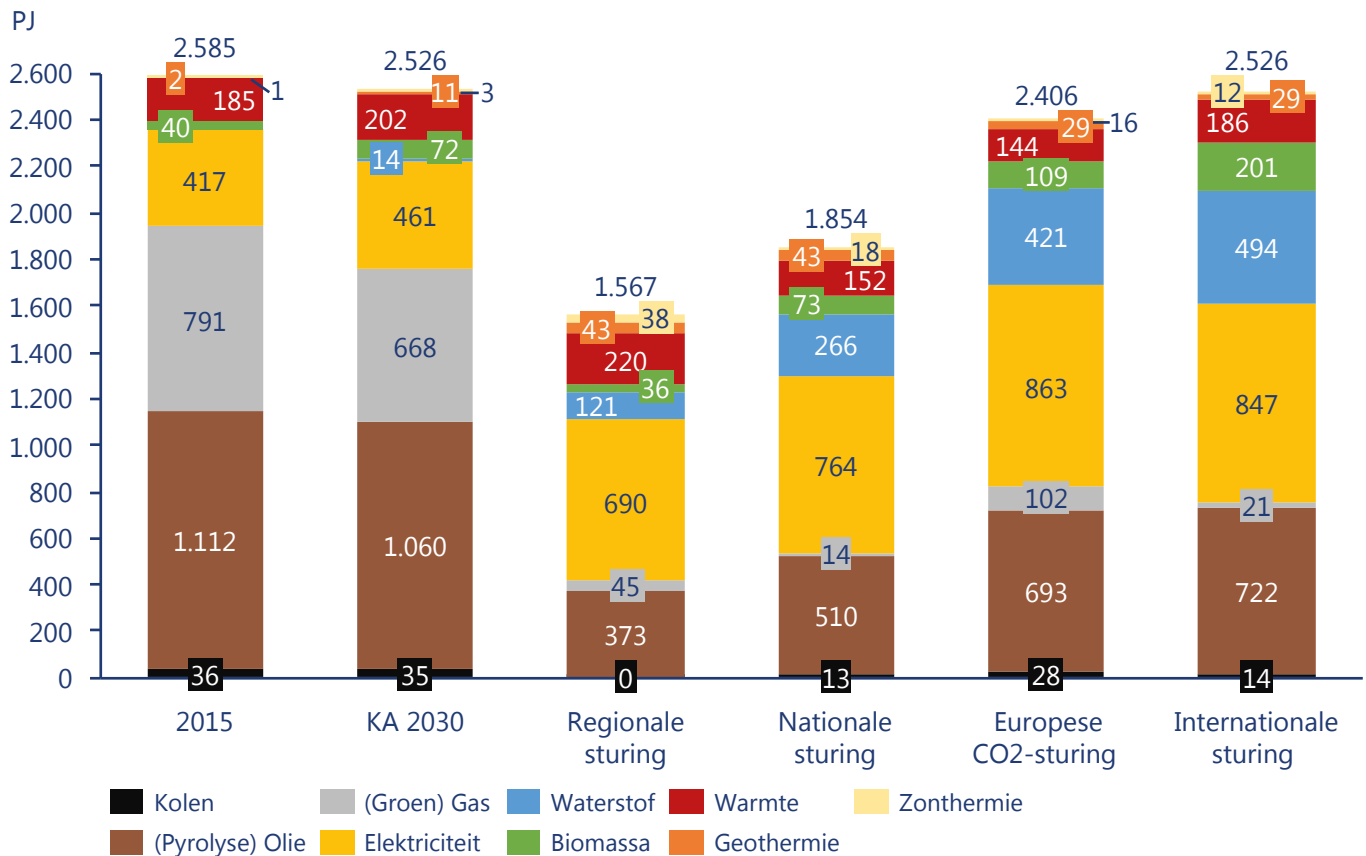
We zien tevens een substantiële eindvraag voor waterstof; deze varieert per scenario naar gelang de industriële groei en het aandeel hybride met waterstof in de gebouwde omgeving (vooral in scenario's Europees en Internationaal); daardoor zit in deze laatste scenario's de grootste waterstofvraag. De grootste warmtelevering via warmtenetten is in het Regionale scenario, grotendeels via geothermie dat ook in alle scenario's voorkomt; zowel als directe bron (eindlevering) als in de primaire voorziening voor de warmtenetten.

In het Nationale scenario zit meer biomassa, elektriciteit en waterstof dan het regionale scenario en minder warmtelevering. Daarnaast stijgt het gebruik van alle energiedragers, behalve gas en warmte. In het Europese scenario wordt ook aardgas ingezet voor reformers die blauwe waterstof produceren met CCS, AVI's met CCS en centrales op groen gas met CCS zorgen voor negatieve emissies.

Navolgend is hetzelfde plaatje voor de eindvraag, maar nu inclusief de non-energetische vraag. Deze is gelijk aan energetisch met drie additionele elementen: olie die blijft voor de productie van kunststoffen, inzet van kolen voor de staalproductie (met CCS), en de waterstofvraag vanuit raffinage, ammoniakindustrie (waaronder productie van kunstmest), en kraakprocessen (inclusief kraken voor omzet van circulaire reststromen in nieuwe grondstoffen). Deze waterstofvraag is er grotendeels nu al, maar uit aardgasreforming, en blijft daardoor thans vaak onzichtbaar.



Figuur 5 Finale behoefte aan energiedragers (exclusief non-energetisch, exclusief synthetische bunkers en kerosine)



Figuur 6 Finale behoefte aan energiedragers (inclusief non-energetisch, exclusief synthetische bunkers en kerosine)

4.2 Primair energieaanbod

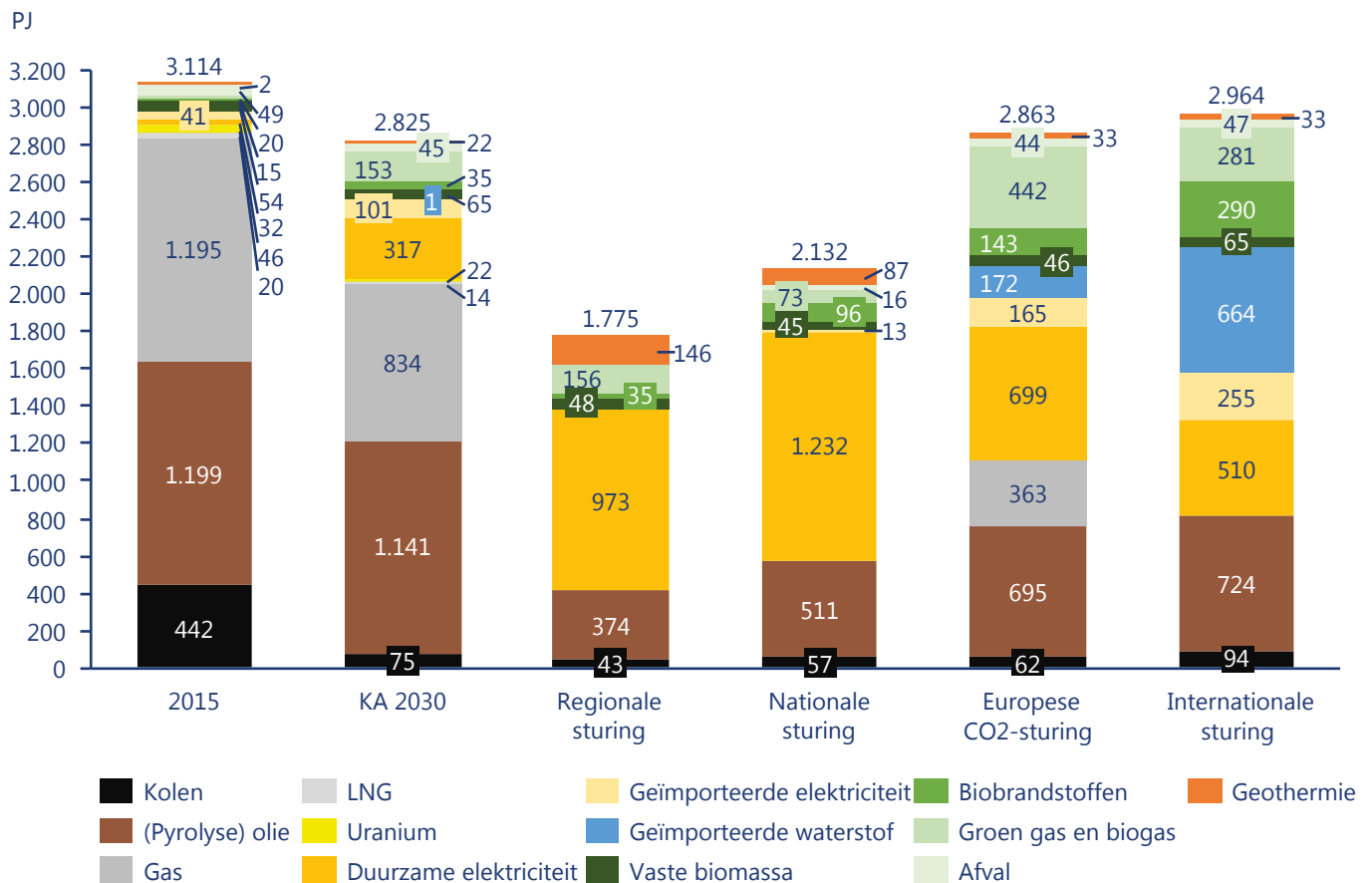
In de primair-energieaanbod-grafiek (Figuur 7) is goed te zien hoe de meest belangrijke energiedragers veranderen van gas, olie en kolen in 2015, via meer elektriciteit in het Klimaatakkoord 2030, naar een totaal veranderd beeld in 2050: hoofdzakelijk duurzame elektriciteit plus waterstof en biogelateerde brandstoffen. Belangrijk is ook de vergelijking met de eindvraag (Figuur 6): zo blijkt dat in het Regionale en (nog meer) het Nationale scenario de belangrijkste primaire bron uit duurzame elektriciteit bestaat, waarvan een deel in waterstofeindvraag wordt omgezet. In het Europese scenario en het Internationale scenario is het meer divers: naast elektriciteit zijn er ook diverse moleculen als primaire bron, waarvan een klein deel netto juist in elektriciteitseindvraag wordt omgezet. Zo is er in het scenario Europese CO₂-sturing een groot aandeel groen gas dat voor het grootste gedeelte ingezet wordt voor elektriciteitsproductie, maar ook voor warmteproductie in warmtenetten, industrie en in hybride warmtepompen in huishoudens. Daarnaast wordt er in het scenario Europese CO₂-sturing ook een deel aardgas ingezet voor de productie van blauwe waterstof met CCS, en is er een groter deel biomassa, zowel biobrandstoffen als vaste biomassa. Daarnaast wordt meer geïmporteerd, zowel elektriciteit, biomassa als waterstof. In het internationale scenario is de diversiteit aan energiedragers het grootste. Er wordt in dit

scenario de meeste waterstof geïmporteerd naast een aandeel biomassa in zowel vaste als in vloeibare vorm. Dit zorgt voor een heel divers energiesysteem. Daarbij moet worden bedacht dat hierbij importwaterstof wordt gebruikt, die in andere landen weer uit duurzame stroom wordt geproduceerd: die elektriciteit is er dus wel als primaire bron, maar elders.

4.3 Vermogens en volumes in de elektriciteitsproductie

4.3.1 Vermogens in de reguliere elektriciteitsvoorziening (zonder synthetische brandstoffen)

In alle scenario's is het totale vermogen een optelsom van het niet-schakelbaar duurzame vermogen (voor het overgrote deel zon-PV en wind), en aan/uitschakelbare centrales gedimensioneerd op de totale piekvraag in het respectievelijke scenario zodat de levering altijd gewaarborgd is. Deze centrales draaien op waterstof en groen gas, de laatste deels met CCS voor negatieve emissies. Afhankelijk van het scenario wordt de waterstof geheel of gedeeltelijk geproduceerd uit duurzame elektriciteit en elektrolyse, hierop is het wind-op-zee-vermogen aangepast. In overleg met de opdrachtgever is wel het totale volume berekend van deze centrales maar niet de schaal van deze centrales: het kunnen zowel grootschalige als kleinschalige units zijn.



Figuur 7 Primair energieaanbod voor binnenlandse behoefte (exclusief synthetische bunkers en kerosine.)

In het regionale scenario is gekozen voor opties die kunnen ontstaan uit lokale initiatieven. Zon op daken en wind-op-land hebben hierin een hoofdrol: overal waar zon op daken mogelijk is, wordt dit toegepast. Kleinschalige zonneweides worden regionaal aangelegd. Op dagen dat er te weinig zon en wind is wordt de elektriciteitsvraag opgevangen met STEG-waterstofcentrales. Hiervoor is op lokaal niveau waterstof geproduceerd.

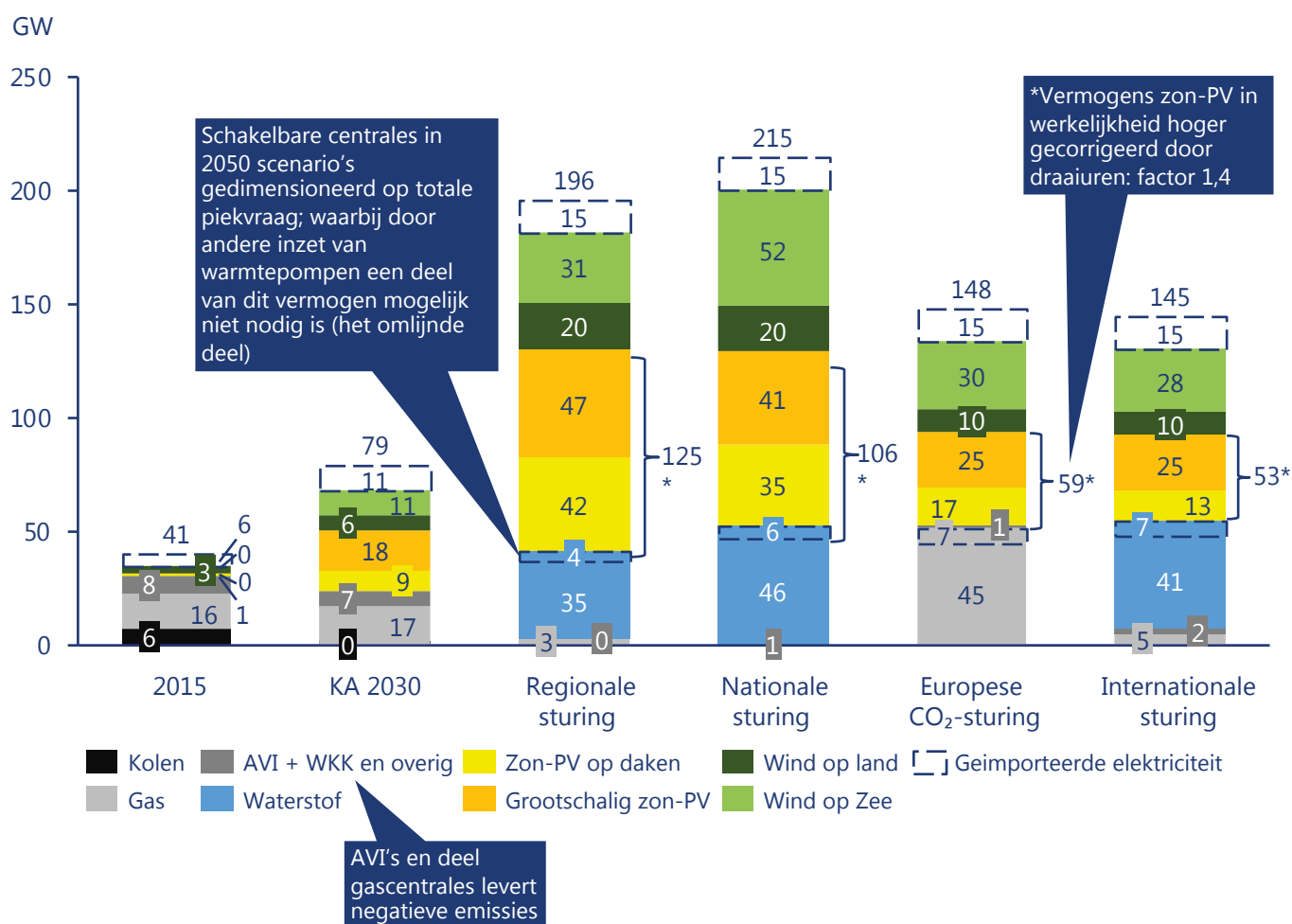
In het nationale scenario ligt de nadruk op het opgestelde vermogen wind-op-zee en grootschalige zonneparken. Dit komt omdat wind-op-zee en zonneparken goed nationaal geregeld kunnen worden. Op dagen dat er te weinig zon en wind is wordt de elektriciteitsvraag opgevangen met STEG-waterstofcentrales.

In het Europese scenario wordt er een deel wind-op-zee kosteneffectief gerealiseerd. Daarnaast is er meer

interconnectiecapaciteit met het buitenland. De piekvraag wordt in dit scenario opgevangen door gascentrales op groen gas, deels met CCS dus met negatieve emissies, om daarmee de CCS van industrie en blauwe waterstofproductie volledig CO₂-neutraal te maken.

In het internationale scenario wordt er meer geïmporteerd. Naast een grote afhankelijkheid van elektriciteitsimporten wordt er veel biomassa en waterstof geïmporteerd. In dit scenario zal de piekvraag worden opgevangen met behulp van waterstofcentrales.

Overigens staat in de meeste scenario's nog een deel van de huidige AVI's, met CCS voor zowel stroomproductie als bron voor warmtenetten, behalve in scenario Regionaal dat geheel circulair is. Daarnaast is in enkele scenario's nog een beperkt aandeel tuinbouw-WKK (gedaald ten opzichte van huidig) op groen gas.



Figuur 8 Opgesteld elektrisch vermogen per scenario (exclusief het extra vermogen wind op zee voor de productie van synthetische bunkers en kerosine). Zie toelichting vollasturen omrekening zon-PV.⁸⁾

8 In alle scenario's staat het vermogen aan zon-PV genoemd dat uit het ETM (Energie Transitie Model) komt. Omdat dit ETM werkt met een maximaal zonnerenderement van 17% terwijl wij voor 2050 rekenen met 24%, is de zon-PV productie berekend met een fictief hoger aantal draaiuren en een lager fictief opgesteld vermogen in het ETM. Voor de juiste vermogens in de praktijk moeten de waarden in de grafiek worden vermenigvuldigd met 1224/867 oftewel ca. 1,4: 40% hoger dan in de figuur.

4.3.2 Back-upcentrales

In alle scenario's en in alle weerjaren zijn er uren waarbij het opgestelde zon- en windvermogen niet beschikbaar is. In de scenario's is ook bepaald welk uur de hoogste piekvraag heeft op ieder netvlak. Het is mogelijk dat de uren met een hoge piekvraag samenvallen met momenten waarop er geen of nauwelijks zon- of windvermogen beschikbaar is.

Daarom moeten we in de scenario's voldoende emissieloze "aan/uitschakelbare" elektriciteitscentrales opnemen. Het gaat hier om elektriciteitscentrales op waterstof of groen gas. Dit is met het ETM gedaan, door naar de indicator "Loss of Load" te kijken en het opgesteld vermogen aan centrales precies af te stemmen op het punt dat deze indicator begint op te lopen (minder dan 2 uur). Hierbij hanteren we het uitgangspunt dat Nederland zelfstandig haar elektriciteitssysteem overeind kan houden, in alle uren.

Door de elektrificatie van de maatschappij in 2050 in de scenario's en als gevolg van deze aanpak is de noodzaak voor back-upcentrales fors. In alle scenario's komt het opgesteld vermogen aan elektriciteitscentrales op 38 – 53 GW. Dit is flink meer dan het opgesteld vermogen vandaag de dag (een kleine 30 GW). Deze centrales draaien in 2050 vaak maar een paar honderd uur per jaar. In een korte analyse in het ETM hebben we gekeken naar mogelijke andere inzet van warmtepompen: een eerder omslagpunt naar gas bij hybride warmtepompen, een andere warmtevraagprofiel zonder nacht-verlaging bij alle warmtepompen. Het effect hiervan hebben we weergegeven in de figuren met het omliggende deel van het vermogen aan gas/waterstof centrales. Dit scheelt mogelijk al 4 tot 7 GW aan back-up centrales.

In fase 2 van de I13050-studie gaan de netbeheerders kijken of dit inderdaad een realistisch perspectief is. Met flexibiliteitsmaatregelen zal het naar verwachting wel mogelijk zijn om de hoeveelheid centrales, die als back-up aanwezig moeten zijn, te verlagen. Wij zijn hier voorshands een viertal mogelijkheden voor (niet uitputtend):

- **Buitenlands vermogen:**

Afspraken maken met ("aan/uitschakelbare") vermogen in het buitenland zodat het buitenland kan bijspringen indien Nederland zelf niet voldoende back-upvermogen heeft. In theorie kan de reductie van het back-upvermogen in Nederland oplopen tot 15 GW. De back-upcentrales zouden dan kunnen worden beperkt tot 27-38 GW. We hebben hier nu niet voor gekozen omdat we niet weten of dergelijke afspraken mogelijk zijn in 2050. Omdat dit soort afspraken

waarschijnlijk ook beïnvloed worden door het weer. Als de momenten dat zon- en windvermogen niet beschikbaar is in Noord-West Europa een grote gelijktijdigheid kennen, is de behoefte aan schakelbare centrales in heel Noord-West Europa groot. Dus als alle ons omringende landen een gelijktijdig tekort aan zon- en/of wind-elektriciteit hebben, in dat geval is de genoemde 15 GW waarschijnlijk niet beschikbaar voor Nederland.

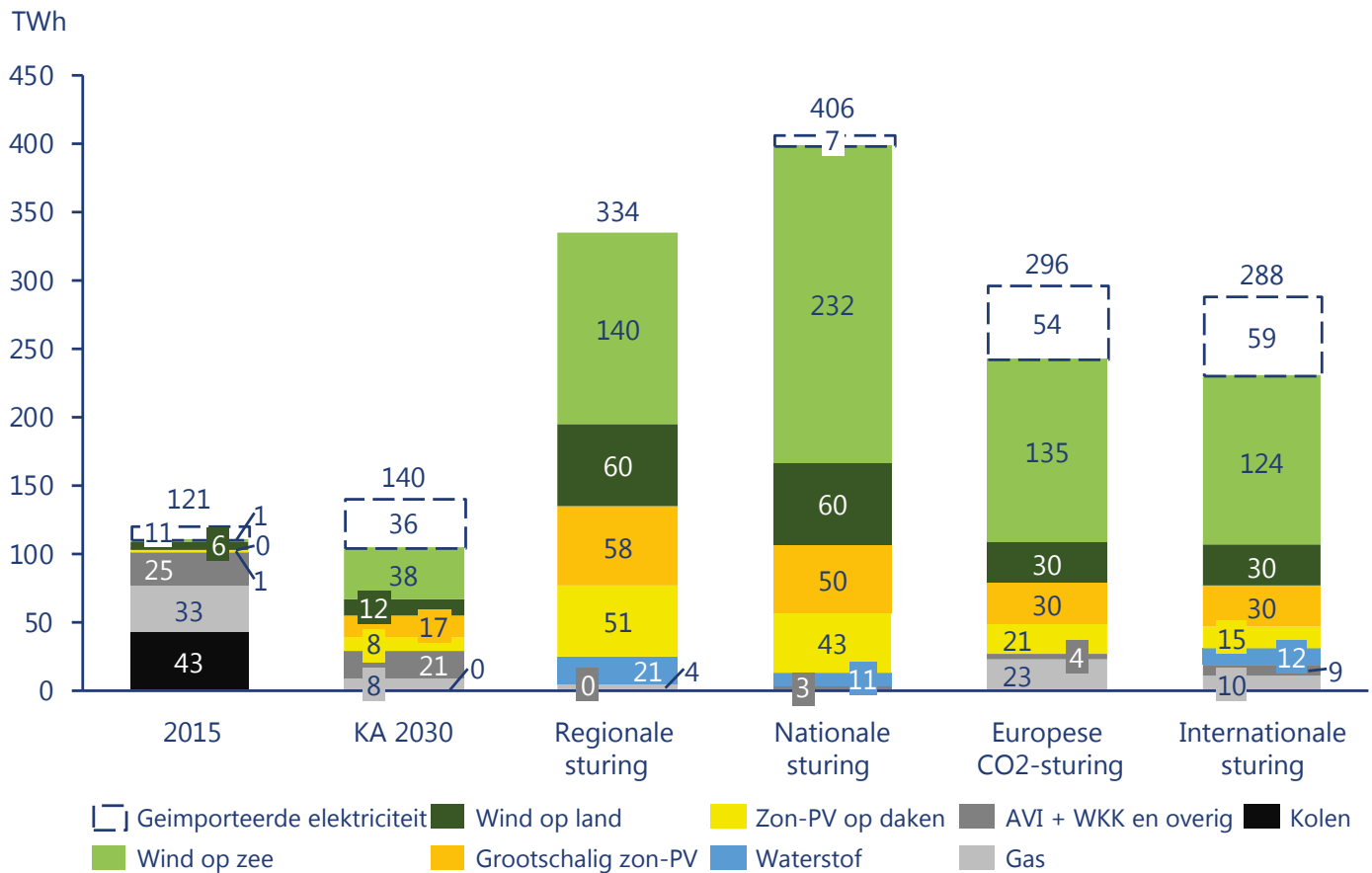
- **Congestievermijding:**

Een aanzienlijk deel van de piekvraag komt door de gebouwde omgeving (warmtepompen en de elektrische voertuigen). Door het uitrusten van deze apparaten met een mogelijkheid om af te regelen op basis van nationale APX-prijzen (bij een hoge prijs) of een signaal (congestiealert) te ontvangen van een wijkcentrale, kunnen deze apparaten worden aangestuurd op vermindering van de piek. Wij schatten dat deze functionaliteit ook zo'n 10 GW of meer piek- en bijbehorend back-upvermogen kan vermijden. Daar staat dan wel mogelijk enig comfortverlies van een elektriciteitsklant tegenover. Voor een korte periode, bijvoorbeeld 1 of 2 uur, is dit wellicht acceptabel, maar voor langere periodes waarin zon- en windvermogen niet beschikbaar zijn, zoals bij een "Dunkelflaute", zal er toch voldoende elektriciteitsvermogen beschikbaar moeten zijn. Je kunt warmtepompen en elektrische auto's misschien 1 of 2 uur afregelen maar niet 1 of meerdere dagen. Vandaar dat we ook deze optie nu niet in de scenario's hebben meegenomen. Deze congestievermijdende functionaliteit moet in de komende periode in onze optiek verplicht worden voor alle zon-PV-inverters, warmtepompen, elektrische laadpalen en elektrische boilers om te voorkomen dat tijdens de uitrol van deze technologieën in een straat of op een industrieterrein de elektriciteit uitvalt, terwijl de netbeheerders nog niet fysiek in staat zijn geweest om het elektriciteitsnetwerk tijdig te verzwaren.

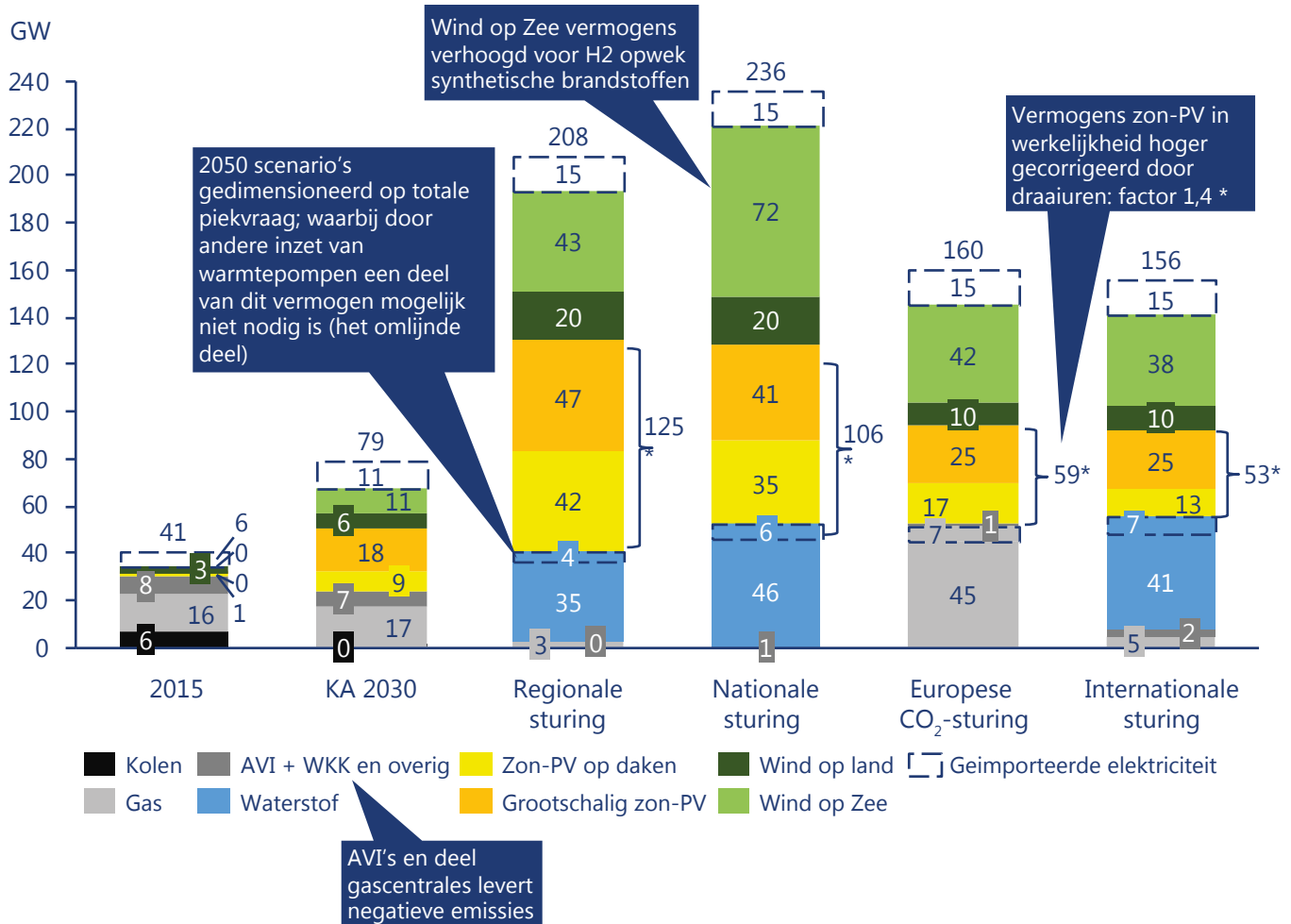
Het eerste prototype om congestie te vermijden met een laadpaal op basis van stuursignalen uit een wijkcentrale is in 2019 ontwikkeld door Elaad. Laadpalen en warmtepompen die reageren op de APX-prijzen zijn al eerder beschikbaar gekomen.

- **Effectiever benutten van kortetermijnflex:**

In de scenario's staat afhankelijk van het scenario minimaal 1.5 GW (Internationaal) en maximaal 17 GW (Nationaal) aan batterij vermogen. In potentie kan dit een bijdrage leveren die groter is dan in de huidige Energietransitiemodel-modellering. In het Energietransitiemodel laden en ontladen batterijen en



Figuur 9 Elektriciteitsproductie per scenario (exclusief de extra productie uit wind op zee voor de productie van synthetische bunkers en kerosine). Zie toelichting vollasturen omrekening zon-PV.⁸⁾



Figuur 10 Opgesteld elektrisch vermogen en productie per scenario (inclusief het extra vermogen wind-op-zee voor de productie van synthetische bunkers en kerosine). Zie toelichting vollasturen omrekening zon-PV.

andere korte termijn flex-opties namelijk op het eerstvolgende moment waarop voldoende elektriciteit beschikbaar is danwel een tekort. Deze inzet is niet geoptimaliseerd over het jaar heen door naar de meest extreme jaarpiek te kijken bijvoorbeeld. Daardoor zijn deze flex opties niet altijd beschikbaar op het moment dat er een piek in de stroomvraag is.

Wellicht dat deze opties slimmer ingezet kunnen worden in het ETM en ook daarmee een aantal pieken kunnen worden vermeden. Echter in situaties waarin twee of meer pieken elkaar in relatief korte tijd opvolgen, treedt alsnog de situatie op dat de batterij al leeg of al vol zal zijn en zal er nog steeds moeten worden teruggevallen op dispatchable backup vermogen.

Sommige flex opties zijn nu niet meegenomen in de scenario's vanwege complicaties die deze opties in het ETM geven als gevolg van de klimaatneutrale eis aan de scenario's. Het is ook denkbaar dat in fase 2 van de II3050 studie andere en meer van deze flex opties worden toegepast.

- **Demand response industrie:**

De elektriciteitsvraag van de industrie is ongeveer 300 – 500 PJ in 2050 afhankelijk van het scenario. Daarmee komt de directe elektriciteitsvraag van de industrie (excl. flexopties en conversie naar waterstof en warmte) op 30-40% van de totale directe elektriciteitsvraag in Nederland. De industrie zou gecontracteerd kunnen worden om bij vraagpieken af te schakelen. We weten echter zo weinig over deze mogelijkheden in 2050 dat we deze optie niet hebben kunnen modelleren.

4.3.3 Vermogens (met synthetische brandstoffen)

Voor het bepalen van het vermogen wind-op-zee voor de productie van synthetische bunkers en kerosine in 2050 is gekeken naar het scenario Nationale sturing, waarbij het vermogen wind-op-zee voor productie van elektriciteit en waterstof het grootst is met ongeveer 52 GW. Het totale potentiële vermogen van wind-op-zee op de Nederlandse Noordzee is bepaald op 72 GW⁹⁾. Voor het scenario Nationale sturing wordt dus 40% extra windvermogen geplaatst voor productie van synthetische bunkers en kerosine. Ditzelfde percentage is toegepast op de overige scenario's. Hieruit volgt dat naast de binnenlandse productie van bunkers en kerosine er in ieder scenario een behoefte blijft voor import voor bunkers en kerosine. Wel

wordt in de meeste scenario's zo een groot waterstofvolume geproduceerd, indien prioritair voor synthetische kerosine, om bijna en in het Europese scenario volledig te voldoen aan de uitgesproken doelstelling van directie Schiphol voor volledige verduurzaming in 2050.¹⁰⁾

4.4 Biomassa

N.B. Voor de productie van groen gas en biobrandstoffen hebben wij buiten het ETM om een correctie doorgevoerd. Getallen over finale vraag naar groen gas en biobrandstoffen in het ETM zijn correct, getallen voor primair energieaanbod voor biomassa komen niet overeen met de rapportage. De getallen in de rapportage zijn correct.

4.4.1 Productie van groengas/biogas/biobrandstoffen

We nemen aan dat in 2050 50% van de omzetting van groen gas gebeurt via superkritische watervergassing en 50% via vergisting. Hierdoor stijgt de efficiëntie van de omzetting van biomassa naar groen gas van 60% naar 77,5%, overeenkomstig met de conversierendementen in Tabel 7.

Voor de productie van brandstoffen nemen we een gemiddeld conversierendement van 60% aan (zie Tabel 7). Deze productie-efficiëntie kon niet meegenomen worden in het ETM en zijn achteraf buiten het ETM om in deze rapportage gecorrigeerd. Hierdoor zullen de getallen in het ETM dus afwijken van de getallen die hier worden gerapporteerd. De getallen in de rapportage zijn correct.

Tabel 7 Conversierendementen voor verschillende biomassaproducten

| Categorie | Conversierendement | Bron |
|--------------------------------|--|---|
| Vergisting | 60% natte biomassa naar groen gas | CE Delft, Contouren en instrumenten voor een Routekaart Groengas 2020-2050, 2018 |
| Superkritische watervergassing | 95 (tot 99%) natte biomassa naar groen gas | CE Delft, Contouren en instrumenten voor een Routekaart Groengas 2020-2050, 2018 |
| Productie biobrandstoffen | 60% (gemiddeld groen gas, bio-ethanol, biodiesel uit meerdere bronnen) | Benchmarking biofuels—a comparison of technical, economic and environmental indicators, Franziska Müller-Langer, Stefan Majer & Sinéad O'Keeffe (2018). Energy, Sustainability and Society. |

De efficiëntie van superkritische watervergassing is nog onzeker. In een samenvattende studie uit 2015 van huidige

9) Ondergrens van theoretische potentiële vermogen op de Nederlandse Noordzee, op basis van Ruimtelijke verkenning energie en klimaat, <https://www.klimaatakkoord.nl/documenten/publicaties/2018/02/21/ruimtelijke-verkenning-energie-en-klimaat>

10) Hermanides (2019). Schiphol luchtvaart moet CO₂ neutraal zijn in 2050. Trouw.

experimenten met superkritische watervergassing ligt de totale energie-efficiëntie van superkritische watervergassing op dit moment tussen de 55% en 70%.¹¹⁾ Deze huidige getallen zijn lager dan de conversierendementen waar CE Delft voor de toekomst rekening mee houdt. Het kan dus zijn dat een 95% conversierendement niet geheel haalbaar zal blijken. Echter verbeteringen in de efficiëntie van vergisting zijn niet uitgesloten, een andere verdeling tussen deze technieken is ook mogelijk. Een gemiddeld efficiëntie van omzetting van biomassa van 77,5% schatten wij daarom toch in als haalbaar.

Voor deze studie gaan wij dus uit van een hoge efficiëntie voor biomassa-omzetting. Mocht dit in de toekomst toch tegenvallen, dan zal er hiervoor extra biomassa benodigd zijn. In de scenario's Regionale sturing en Nationale sturing is het binnenlandse potentieel aan biomassa nog niet volledig benut. Een tegenvallende efficiëntie is hierbij tot op zekere hoogte op te vangen. Voor de scenario's Europese CO₂-sturing en Internationale sturing zal er bij tegenvallende efficiëntie meer biomassa uit het buitenland betrokken moeten worden (al dan niet al geconverteerd naar de uiteindelijk gewenste energiedrager).

4.4.2 Biomassaverbruik

In Figuur 11 staat de biomassaverdeling per scenario. Ieder deelfiguur is opgebouwd uit het aanbod en de verliezen voor omzetting. Aanbod kan bestaan uit natte biomassa, droge biomassa en afval (biogeen), deze worden of direct gebruikt in de sectoren of eerst omgezet in biobrandstoffen en groen gas. De aanbodzijde bestaat alleen uit eigen potentieel in het regionale en nationale scenario. In het Europese en internationale scenario is er aan de invoerkant ook een importcomponent. Deze import kan zowel bestaan uit vaste biomassa of uit groen gas.

Als er wordt gekeken naar de allocatie van deze biomassastromen valt op dat ze in de verschillende scenario's voor verschillende doeleinden biomassa wordt gebruikt. In het regionale scenario ligt de nadruk van het biomassagebruik in de verwarming van warmtenetten. Dit zal gebeuren met groen gas en biomassa. In het nationale scenario wordt de meeste biomassa gebruikt in het transport. Daarnaast wordt ook een groot deel in de centrale warmtevoorziening gebruikt. In het Europese scenario en het Internationale scenario ligt de nadruk op het biomassagebruik in de transportsector. Daarnaast gaat

een groot gedeelte van het biomassagebruik naar transport. In alle gevallen zijn er grote verliezen in het biomassagebruik, omdat de gemiddelde efficiëntie, zowel van de productie van groen gas als van de productie van biobrandstoffen, tamelijk laag blijft. De introductie van superkritische vergassing verbetert dit wel enigszins.

4.5 Waterstofbalans

In Figuur 12 staat de waterstofallocatie per scenario inclusief het gebruik voor feedstocks. Dit is nog exclusief de vraag naar waterstof voor bunkers voor internationale scheep- en luchtvaart (deze is te vinden in Figuur 13). Bij het transport van waterstof is er rekening gehouden met kleine verliezen die optreden door lekken in waterstofleidingen of bij het transport in voertuigen.

In het regionale en nationale scenario wordt het merendeel van de waterstof opgewekt uit duurzame elektriciteit. In het Europese scenario is het grootste deel van de waterstofproductie blauwe waterstof. In het internationale scenario ligt de nadruk op de import van waterstof.

In het regionale scenario gaat het grootste gedeelte van de waterstof naar elektriciteitsproductie. Dit gebeurt in waterstofcentrales. Daarnaast is er in het regionale scenario veel waterstof nodig voor industriële warmte.

In het nationale scenario is de meeste waterstof nodig voor industriële warmte. Daarnaast is er een grote vraag van de transportsector en de elektriciteitsproductie.

In het Europese scenario wordt er veel waterstof gebruikt voor industriële verwarming en feedstock voor kunstmestproductie, daarnaast gaat er een groot deel van de waterstof naar mobiliteit. In het internationale scenario gaat het grootste deel van de waterstof naar industriële verwarming en feedstock voor kunstmestproductie. Daarnaast gaat er een groot deel naar mobiliteit, elektriciteitsproductie en verwarming in de gebouwde omgeving. Wat opvalt is dat in het internationale scenario de allocatie van waterstof het meest divers is.

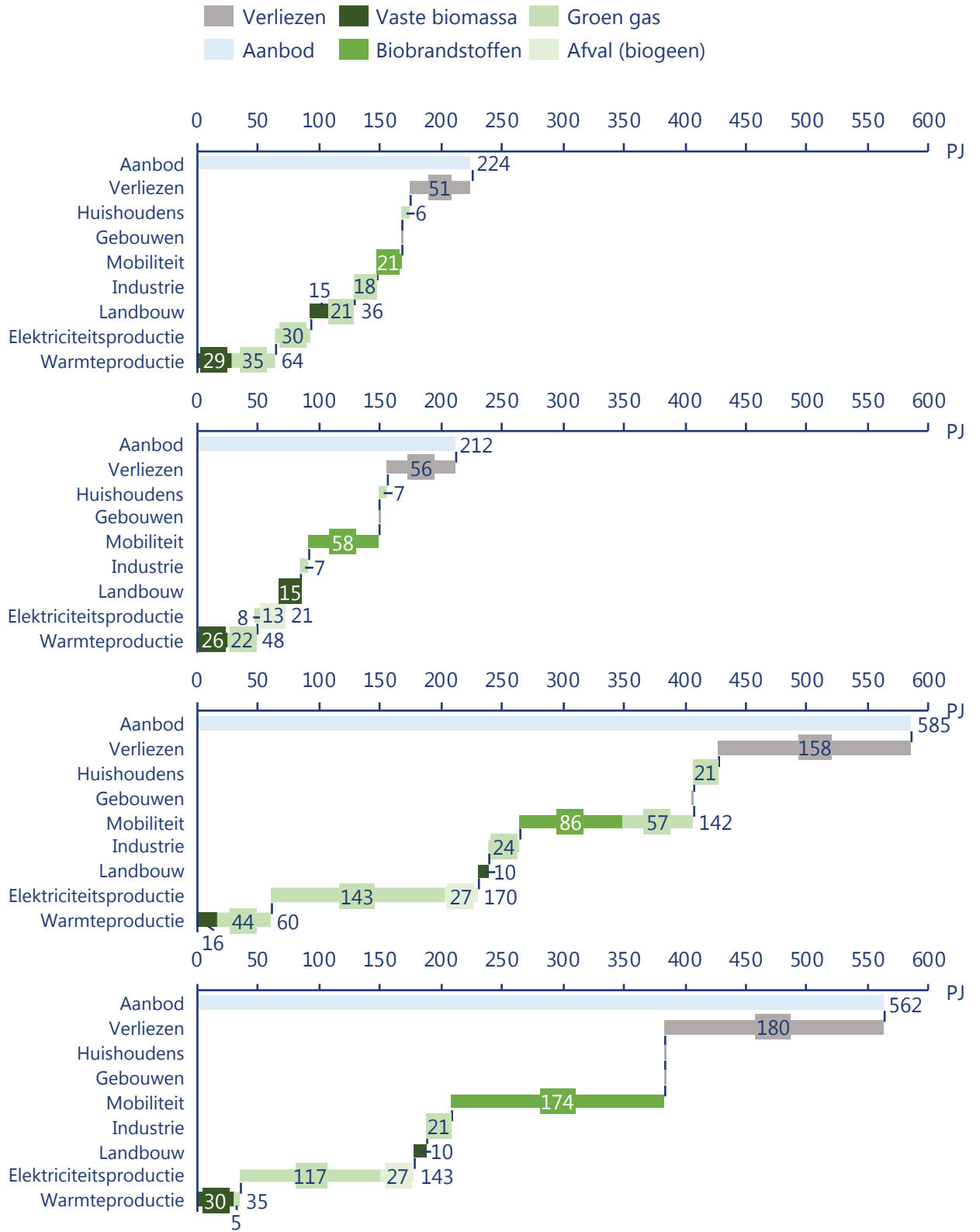
4.6 CO₂

In de verschillende scenario's wordt verschillend naar CO₂-afvang en -opslag gekeken. In dit hoofdstuk wordt de opvatting en het doeleinde van CCS per scenario toegelicht.

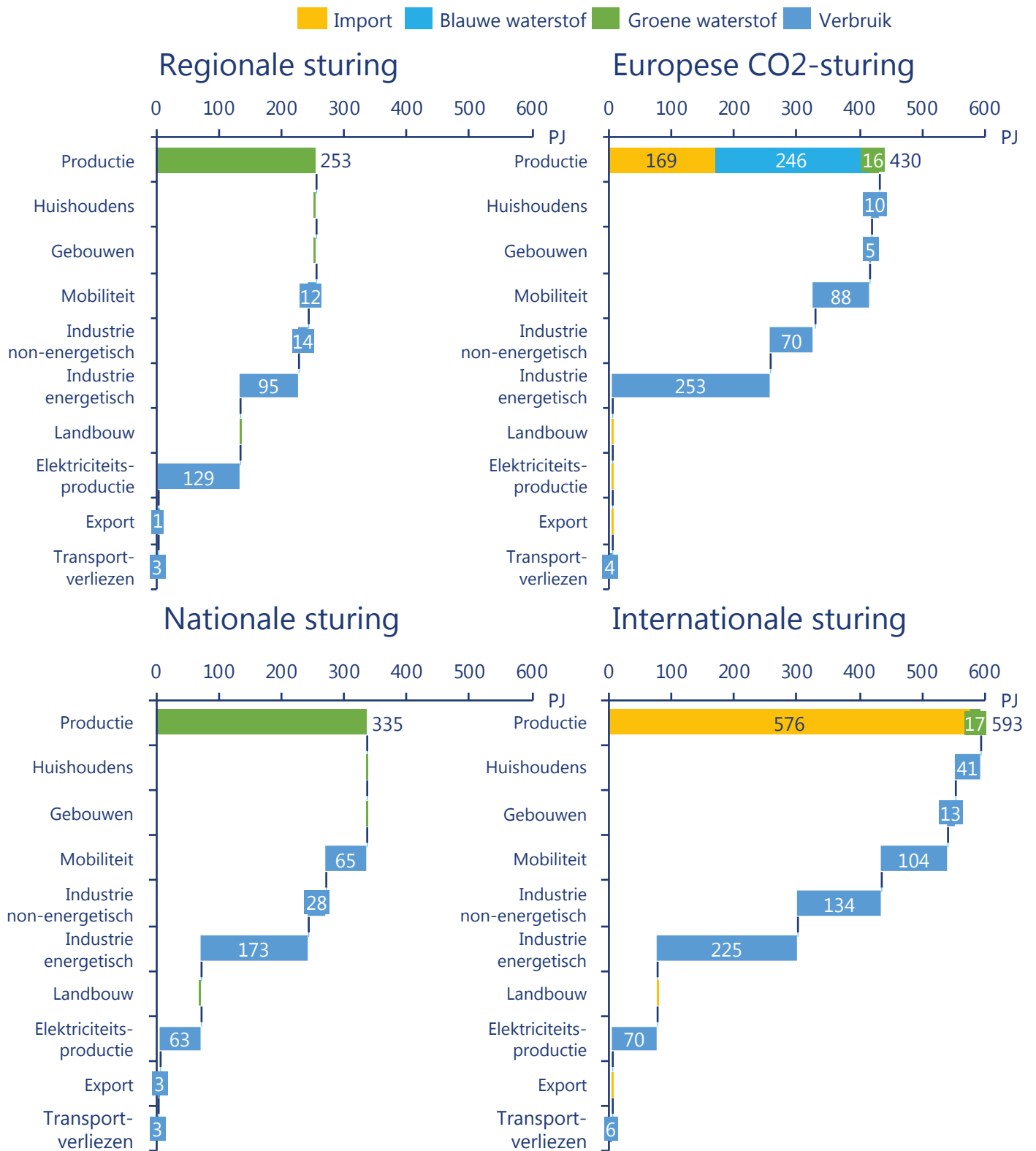
In het regionale en nationale scenario wordt zo min mogelijk CCS toegepast. In deze scenario's wordt CCS niet gezien als langdurige duurzame oplossing, en daarom alleen toegepast als

11) Yakaboylu, Onursal & Harinck, John & Smit, K.G. & Jong, W. (2015). Supercritical Water Gasification of Biomass: A Literature and Technology Overview

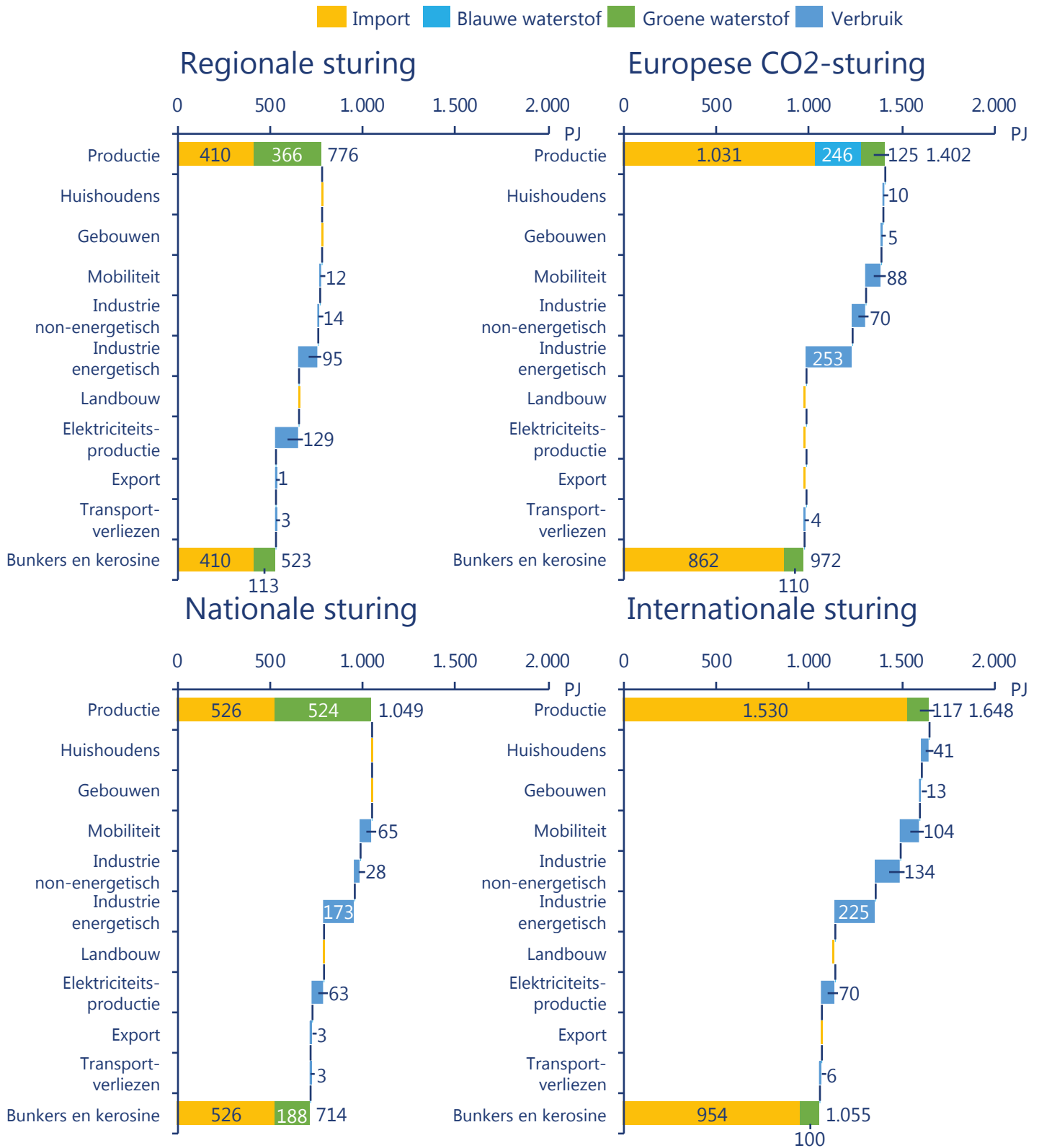
Regionale sturing
Nationale sturing
Europese CO2-
sturing
Internationale
sturing



Figuur 11 Biomassa allocatie per scenario



Figuur 12 Waterstof allocatie per scenario



Figuur 13 Waterstofallocatie per scenario inclusief waterstof voor bunkers en kerosine

Tabel 8 Overzicht Koolstofstromen in 2050 door CCS per scenario

| CCS | Regionale sturing | | | Nationale sturing | | | Europese CO ₂ -sturing | | | Internationale sturing | | |
|---|-------------------|---------------------------|--------------------|-------------------|---------------------------|--------------------|-----------------------------------|---------------------------|--------------------|------------------------|---------------------------|--------------------|
| | CCS | CO ₂ -uitstoot | Negatieve emissies | CCS | CO ₂ -uitstoot | Negatieve emissies | CCS | CO ₂ -uitstoot | Negatieve emissies | CCS | CO ₂ -uitstoot | Negatieve emissies |
| Waterstofproductie (Mton/a) | 0 | | | 0 | | | 12,3 | 3,1 | | 0 | 0 | |
| Industrie (Mton/a) | 3,2 | 0,8 | | 3,7 | 0,9 | | 3,4 | 0,8 | | 10,1 | 2,5 | |
| Elektriciteitsproductie (Mton/a) | 1,4 | | 1,4 | 2,1 | 0,5 | 1,5 | 6,2 | 1,6 | 5,5 | 5,7 | 1,7 | 4,2 |
| België en/of Duitsland (Mton/a) | 0 | | | 0 | | | 5 | | | 0 | | |
| Totaal (Mton/a) | 4,6 | 0,8 | 1,4 | 5,9 | 1,4 | 1,5 | 26,8 | 5,5 | 5,5 | 15,8 | 4,2 | 4,2 |
| Aantal jaar opslag beschikbaar | 367 | | | 289 | | | 63 | | | 108 | | |

er geen andere mogelijkheid is. Enkele processen in de industrie blijven CO₂ uitstoten, deze zullen in deze scenario's wél voorzien worden van CCS. Een voorbeeld hiervan is de staalproductie. Bij staalproductie komt met de bekende technieken veel CO₂ vrij, deze wordt in de scenario's afgevangen en opgeslagen. Voor de resterende uitstoot na CCS wordt de CO₂-uitstoot gecompenseerd door middel van CCS op groengaselektriteitscentrales in het regionale scenario en CCS op AVI's in het nationale scenario. In Regionaal en Nationale sturing gaat het om ongeveer 1,5 megaton negatieve CO₂-emissies.

In het Europese scenario is er veel ruimte voor CCS. CCS levert een voordeel ten opzichte van andere verduurzamingstrategieën: het productieproces en verwarmingsproces hoeft namelijk niet veranderd te worden. Dit houdt ook in dat veel infrastructuur die er nu ligt gebruikt kan blijven worden, de energiedragers blijven namelijk hetzelfde. Wel betekent dit dat er een CO₂ netwerk moet ontstaan om alle CO₂ die afgevangen wordt te transporteren en uiteindelijk op te slaan. Voorbeelden van toepassingen het Europese scenario zijn gasturbines voor de elektriciteitsvoorziening uitgerust met CCS, SMR/ATR met CCS, en enkele verbrandingsprocessen in de industrie die voorzien worden van een CCS-installatie. De resterende CO₂-uitstoot na CCS wordt gecompenseerd door middel van CCS op groengascentrales, wat resulteert in 4,0 megaton negatieve emissies, en door CCS op AVI's voor 1,5 megaton negatieve emissies. In totaal 5,5 megaton negatieve emissies

In het internationale scenario wordt er minder gebruik gemaakt van 'Carbon Capture' dan in het Europese scenario. Door de intensivering van internationale handel zijn er meer duurzame energiedragers beschikbaar en is de noodzaak voor CCS lager. Een deel van de verwarmingsprocessen in de industrie zal nog wel CCS gebruiken, dit gebeurt voornamelijk bij processen met

een geconcentreerde CO₂-stroom. De resterende CO₂-uitstoot na CCS wordt gecompenseerd door middel van CCS op groengascentrales, wat resulteert in 3,7 megaton negatieve emissies, en door CCS op AVI's voor ongeveer 0,5 megaton negatieve emissies. In totaal 4,2 megaton negatieve emissies

CCS

In Tabel 8 staan de afgevangen CO₂-stromen per jaar. Voor deze doorrekening hanteren we de volgende aannames voor CCS, 80% van de CO₂-uitstoot wordt afgevangen in de industrie, 85% wordt afgevangen bij SMR/ATR's met CCS, 85% bij elektriciteitscentrales en 90% bij AVI's.

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 zee¹²⁾. Hierdoor is het mogelijk te berekenen hoe lang deze opslagplaatsen kunnen voorzien als alle CO₂ die we afvangen wordt opgeslagen. In het scenario met het meeste CCS, het Europese scenario, betekent dit dat de opslaggebieden tot 63 jaar kunnen voorzien voor de opslag van CO₂.

Wat betreft de infrastructuur betekent dit dat er in het regionale en nationale scenario enkele leidingen richting de Noordzee moeten worden aangelegd. Deze leidingen worden aangelegd vanaf de plekken die niet zonder CCS kunnen verduurzamen, bijvoorbeeld de hoogovens in IJmuiden. In het Europese scenario is er door meer toepassing van CCS een veel grotere CO₂-infrastructuur nodig. Hier moet een infrastructuur ontstaan langs alle chemische clusters en alle gascentrales

12) van Gessel et al., (2018). Ondergrondse Opslag in Nederland Technische verkenning. TNO.

richting de Noordzee. Voor het internationale scenario volstaat een infrastructuur langs de chemische cluster, aangezien er geen elektriciteitsopwekking met CCS plaatsvindt. Dit scheelt aanzienlijk in de omvang van het netwerk.

In het Europese scenario wordt ook rekening gehouden met het transport van CO₂ uit België en Duitsland.¹³⁾

CCU

Op verschillende plekken in het energiesysteem kan afgevangen CO₂ ook gebruikt worden. Een grote gebruiker van CO₂ is nu de glastuinbouw. In de glastuinbouw wordt CO₂ gebruikt om gewassen sneller te laten groeien. Echter wordt deze CO₂ maar deels opgenomen en er wordt dus alsnog 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. Dit zou een plek zijn waar de afgevangen CO₂ gebruikt kan worden. Echter, aangezien de CO₂ in deze sector uiteindelijk toch uitgestoten wordt, betekent dit dat er elders in Nederland negatieve emissies behaald moeten worden. Een andere optie is om afgevangen CO₂ uit groengas 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. Hierdoor moet er een CO₂-leiding ontstaan naar de plekken waar in Nederland pyrolyse op plastics toegepast wordt.

Daarnaast is er in de toekomst een vraag aan koolstofatomen voor de E-refinery. Deze industrie produceert duurzame brandstoffen en hiervoor zijn koolstofatomen nodig. Als deze koolstofatomen niet uit een duurzame bron afkomstig zijn, zal er mogelijk ook compensatie elders nodig zijn.

Overige broeikasgassen en negatieve emissies

Overige broeikasgassen zijn niet beschouwd in deze studie. In de scenario's zijn technieken voor negatieve emissies meegenomen. In de meeste scenario's is het volume van deze negatieve emissies op te voeren om desgewenst en tot zover als nodig de emissies van overige broeikasgassen te mitigeren. Wij doen hier geen uitspraken over het afwegingskader hiervoor.

4.7 Circulair

In deze studie wordt in twee scenario's uitgegaan van een hoge mate van circulariteit. In het regionale scenario is de verhaallijn dat burgers meer bewust worden van hun footprint en daarom aandringen op meer circulariteit. In het nationale scenario worden er circulaire eisen gesteld aan de industrie door een nationale overheid. Hoewel, dit niet direct gemodelleerd kan worden in het ETM is de impact van de circulaire economie wel terug te zien in de krimp/stagning van de industrie in deze scenario's. Daarnaast bestaat er in het regionale scenario nog maar weinig kunstmestproductie, aangezien de bemesting in de landbouw ook circulair gebeurt. In dit hoofdstuk wordt er toegelicht wat voor impact de circulaire economie in het regionale en nationale scenario nog meer met zich meebrengt.

In de staal- en aluminiumindustrie is het effect van meer recycling te zien in de productieprocessen die worden gebruikt. Zo zal er in de staalindustrie in het regionale scenario veel meer gebruik worden gemaakt van technieken als EAF en HIsarna. In de huidige staalindustrie wordt er vooral geproduceerd aan de hand van traditionele hoogovens. In deze traditionele hoogovens is het niet mogelijk om gerecycled staal (scrap metal) toe te voegen. Dit kan in een EAF of een HIsarna wel. Er kan worden opgemerkt dat deze technieken voor een groter deel de productie van staal bepalen in de desbetreffende scenario's. In het regionale en nationale scenario zal in de aluminiumindustrie het percentage smeltoven waarin gerecycled kan worden toenemen ten opzichte van het huidige elektrolyseproces. Op deze manier komt het circulaire wereldbeeld terug in de staal- en aluminiumindustrie.

Een onderdeel van de circulaire economie in het regionale en nationale scenario is het gebruik van pyrolyseolie in plaats van nafta. Pyrolyseolie is een product dat gemaakt kan worden van gerecyclede plastics. Daarnaast zijn er grootschalige installaties nodig waar deze plastics gepyrolyseerd worden. Tijdens het pyrolyseproces is er altijd een deel van de plastics dat niet omgezet kan worden. Om de productie op hetzelfde peil te houden moet de grondstof dus aangevuld worden. In beide scenario's is er voor gekozen om dit restant aan te vullen met biomassa. Hierdoor kan de productie op hetzelfde peil blijven.

Zowel voor de metaalindustrie als de chemische industrie is een groot deel recyclingmaterialen nodig. Dit betekent dat er een grote hoeveelheid materiaal ingezameld, opgeslagen en gedistribueerd moet worden. Dit behoeft een grote (nieuwe) infrastructuur, die misschien wel grensoverschrijdend is. Hoewel dit een grote invloed kan hebben op het landgebruik in Nederland is er voor gekozen om deze infrastructuur in rapport niet dieper

13) Op basis van concept testcases OCTO studie (nog niet gepubliceerd)

te analyseren, omdat dit geen directe gevolgen heeft voor het energiesysteem van Nederland.

4.8 Energie-infrastructuur

Een verdere verdieping en uitwerking van benodigde energie-infrastructuur bij de scenario's zal aansluitend in fase 2 van II3050 door de netbeheerders worden uitgevoerd.

4.9 Kosten

Een uitwerking van de kosten kan alleen gedaan worden als de benodigde energie-infrastructuur bekend is. De kostendoorrekening zal daarom ook onderdeel zijn van de vervolgfases van II3050.

Voor de kostendoorrekening in het vervolg van II3050 hebben wij in paragraaf 8.5 die in het ETM staan onderbouwd. In paragraaf 8.5 vindt u daarnaast ook aannames voor een gevoeligheidsanalyse. Zo'n gevoeligheidsanalyse is mogelijk om inzicht te krijgen in de invloed van deze prijzen en kosten op de scenario's. Hiervoor hebben wij verschillende categorieën van onzekerheden voorzien.

4.10 Gevoeligheidsanalyse weer en opslagbehoefte

4.10.1 Weerjaren

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 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, waardoor variatie in de productie van hernieuwbare elektriciteit ontstaat.

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 met gewogen graaddagen kan berekend worden hoeveel energie er benodigd is om een woning of gebouw te verwarmen.

Ook vindt er grote variatie plaats binnen elk weerjaar. Zo zijn er periodes waarbij de buitentemperatuur erg laag (veel gewogen

graaddagen) is, de wind weinig waait en de zon nauwelijks schijnt. Periodes zoals deze kunnen problemen opleveren voor duurzame energiesystemen, omdat het aanbod van energie sterk reduceert en de vraag naar energie toeneemt als gevolg van lage buitentemperaturen. Het aanbod van hernieuwbare energie zal in deze periodes niet toereikend zijn, waardoor opgeslagen energie aangewend zal moeten worden om toch in de vraag te kunnen voorzien.

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

Hoog aanbod en hoge vraag: hoe krijgen we het aanbod direct naar de markt getransporteerd?

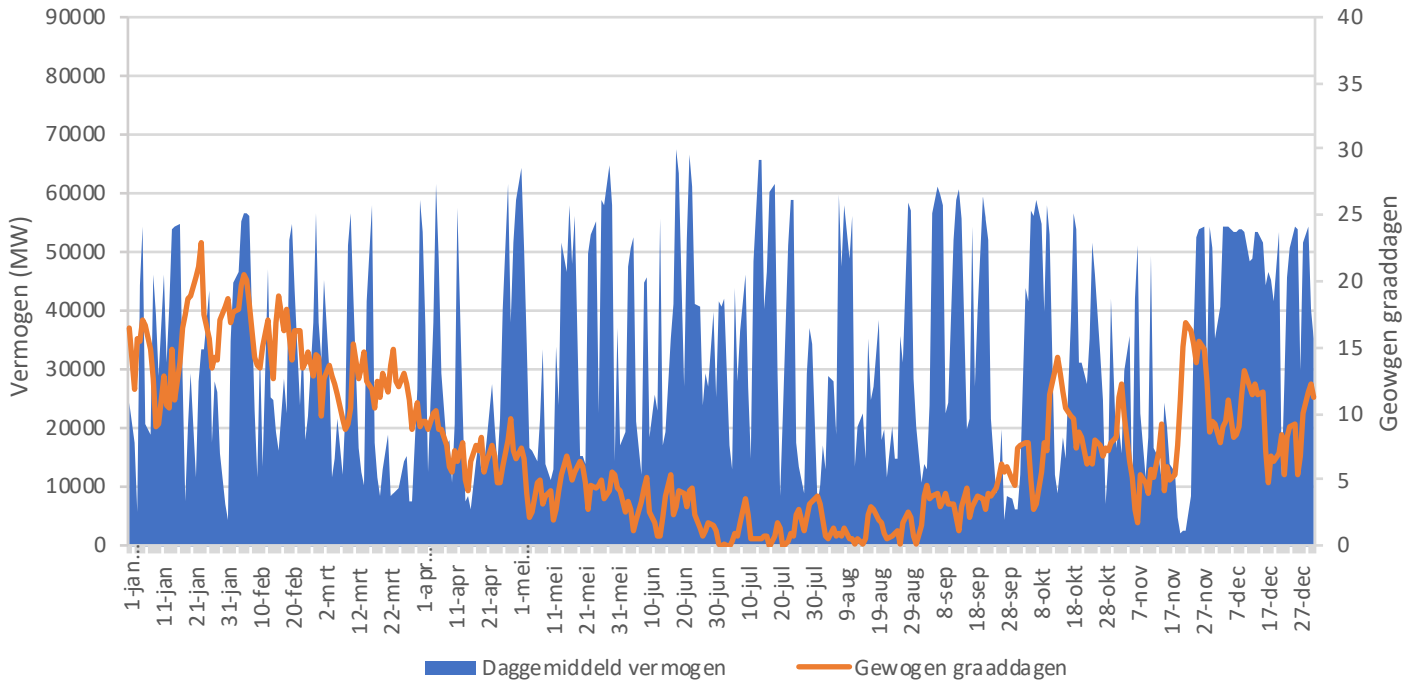
Hoog aanbod en lage vraag: hebben we voldoende opslag om de overschotten te bewaren?

Laag aanbod, hoge vraag: hebben we voldoende energie in opslag om dit magere jaar door te komen?

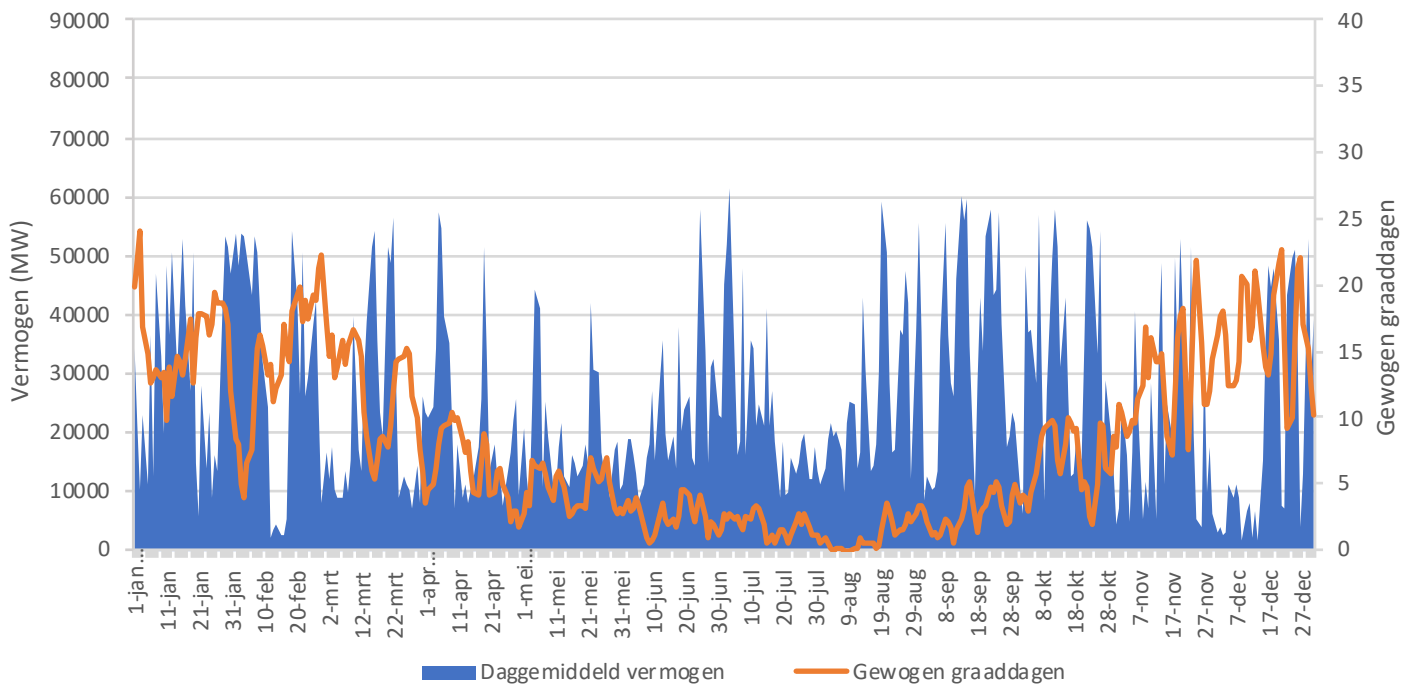
Voor alle scenario's zijn een aantal analyses uitgevoerd waarbij extreme weerjaren zijn gehanteerd, zodat er een minimale betrouwbaarheid in energievoorziening in elk van de scenario's is verwerkt. Er is onderscheid gemaakt in vier typen weerjaren op basis van in het Energietransitiemodel beschikbare weerjaren. Eén weerjaar, 2015, is gehanteerd als standaard jaar en drie weerjaren om extreme jaren na te bootsen. Geen van alle in het Energietransitiemodel beschikbare weerjaren zijn extremen, maar moeten worden gezien als een aanzet voor verdere analyse. De in het Energietransitiemodel beschikbare "extreme" weerjaren zijn:

2015, Standaard weerjaar. Dit jaar wordt door het ETM als standaard gebruikt voor alle berekening, waaronder dus weersinvloeden. Weerjaar 2015 is een warm jaar waarin het veel waait. Hierdoor ontstaat een hoog aanbod en lage vraag. Zie Figuur 14 voor het profiel van hernieuwbare elektriciteitsopwekking en gewogen graaddagen.

2004, Overschotten en tekorten. In dit weerjaar zijn door het hele jaar heen grote tekorten aan hernieuwbare energie. Echter, in september van dit weerjaar zijn er grote overschotten. De opwek van hernieuwbare energie is hierdoor niet gelijkmatig verdeeld over het jaar. Een situatie als deze veroorzaakt problemen voor de energiesector, omdat grote opslag en back-upinstallaties nodig zijn om de tekorten in te vullen en de overschotten op te slaan. Weerjaar 2004 kenmerkt zich



Figuur 14 Hernieuwbare elektriciteitsopwekking en buitentemperatuur standaard weerjaar 2015



Figuur 15 Hernieuwbare elektriciteitsopwekking en buitentemperatuur weerjaar 2004

hierdoor als een weerjaar met laag aanbod met een normale vraag. Zie Figuur 15 voor het profiel van hernieuwbare elektriciteitsopwekking en gewogen graaddagen.

1997, “Misooogst”. In dit weerjaar ligt de opwek van hernieuwbare energie onder het langjarig gemiddelde, waardoor een langdurig tekort aan hernieuwbare energie ontstaat. Daarnaast is er in dit weerjaar ook een zeer koude periode met daarin weinig opwek. Dit wordt ook wel een “Dunkelflaute” genoemd en wordt nader uitgelegd in het jaar 1987. Een misooogst veroorzaakt problemen in een duurzaam energiesysteem omdat grote hoeveelheden opslag en back-up installaties nodig zijn om de tekorten in te vullen. Daarnaast betreft een “misooogst” een lange periode waardoor opgeslagen energie lange tijd bewaard moet blijven en daardoor weinig roundtrips heeft. Dit resulteert een opslag van een behoorlijk formaat. Zie Figuur 16 voor het profiel van hernieuwbare elektriciteitsopwekking en gewogen graaddagen.

1987, “Dunkelflaute”. Een “dunkelflaute” wordt gedefinieerd als een zeer koude periode waarin weinig hernieuwbare energieopwekking plaatsvindt. In 1987 was er van 6 tot 21 januari een zeer koude periode in Nederland. De gemiddelde buitentemperatuur in De Bilt was $-6,5^{\circ}\text{C}$. De gemiddelde etmaaltemperatuur was zelfs $-13,2^{\circ}\text{C}$, met een absoluut minimum van $-15,2^{\circ}\text{C}$ op 14 januari 1987 in De Bilt¹⁴⁾ ($T_{\text{effectief}}$ van $-17,7$ graden). Door de lage buitentemperatuur neemt de vraag naar warmte sterk toe. Tegelijkertijd is er maar weinig duurzame elektriciteitsopwekking, waardoor de warmtevraag moeilijk ingevuld kan worden. Zie Figuur 17 voor het profiel van hernieuwbare elektriciteitsopwekking en gewogen graaddagen.

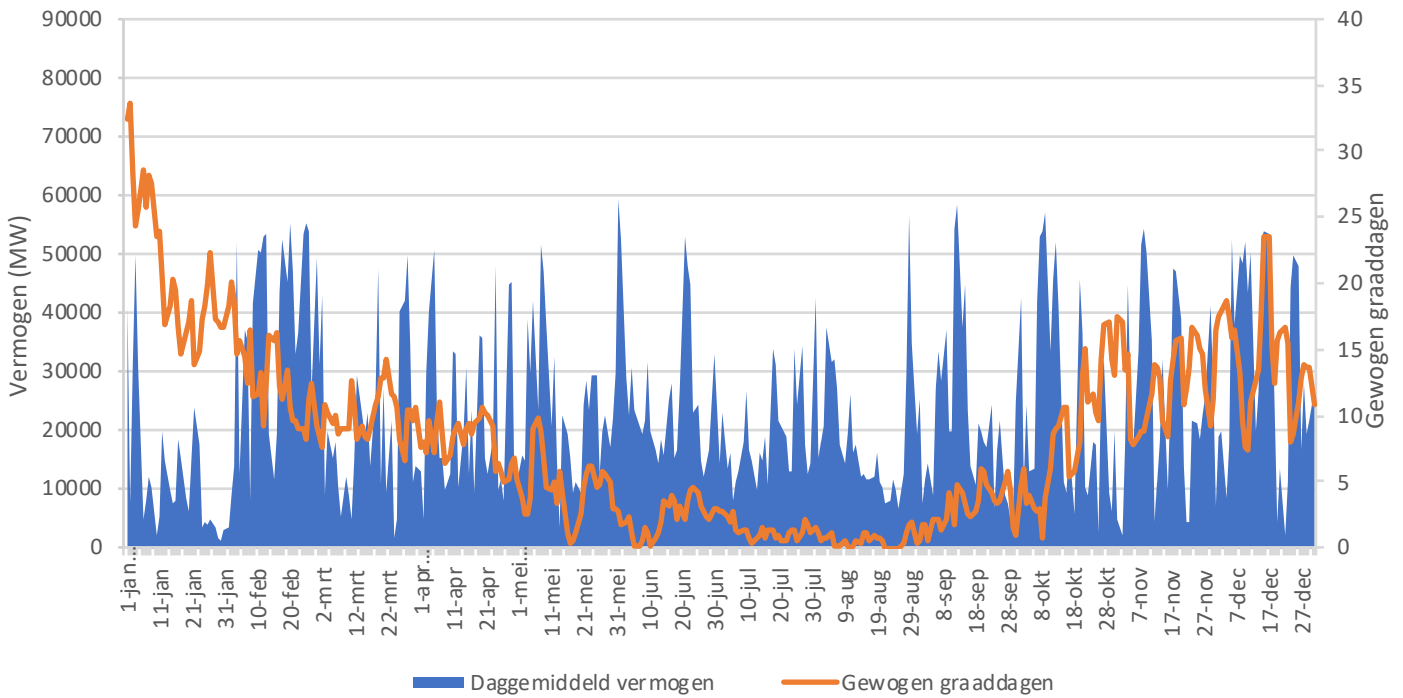
Lage buitentemperaturen zorgen voor een hoger energieverbruik en een andere samenstelling van de energiemix in de gebouwde omgeving. Het hogere energieverbruik wordt met name veroorzaakt door een grotere warmtevraag, welke volledig te wijten is aan een groter verschil tussen de buiten- en binnentemperatuur. Aan de hand van het scenario Nationale sturing wordt de impact van lagere buitentemperaturen beschreven. Het standaard weerjaar 2015 verschilt het meest van weerjaar 1987. Er zijn echter historische weerjaren waarin de volumevraag naar aardgas groter was dan 1987 omdat de gemiddelde temperatuur in deze weerjaren lager lag dan in 1987. Dit wordt geïllustreerd door het figuur in sectie 8.8.5 Deze weerjaren waren helaas niet voorhanden in het Energietransitiemodel en konden daarom niet meegenomen worden in de analyse.

In weerjaar 1987 was de jaaropbrengst van hernieuwbare energie beduidend lager. Ook de gemiddelde buitentemperatuur lag fors lager dan het standaard weerjaar. De lagere buitentemperatuur heeft vooral invloed op de energievraag van de gebouwde omgeving. Ten opzichte van 2015 is er in het weerjaar 1987 circa 42 PJ extra vraag naar energiedragers binnen de gebouwde omgeving. Dit wordt weergegeven in Figuur 18. Belangrijk om te vermelden is dat de isolatiewaarden van de gebouwde omgeving vele malen hoger liggen dan in 1987. Het is daarom niet mogelijk om de extra vraag te vergelijken met het verschil in de gemeten aardgasvraag van 2015 en 1987 omdat in deze jaren de isolatiewaarden verschillen.

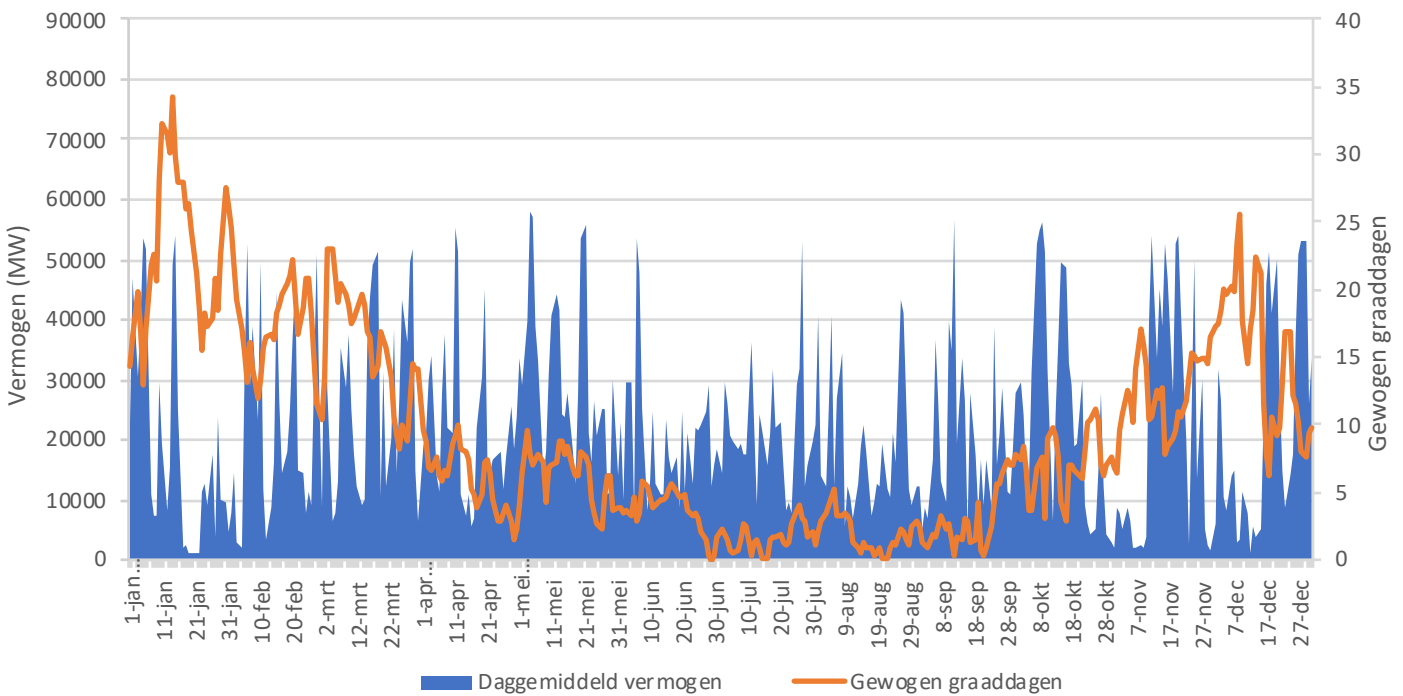
De extra energievraag is een mix van verschillende energiedragers. Er is veel vraag naar warmte. Door de lagere buitentemperaturen moeten warmtenetten meer warmte transporteren. Deze extra warmte is modelmatig afkomstig van gasketels, warmtepompen en geothermie in een zelfde verhouding die als beginwaarde is aangenomen. Onze verwachting is wel dat het grootste gedeelte van de extra finale warmtevraag zal worden ingevuld door gasketels. Dit effect wordt mogelijk onderschat in de modellering van het Energietransitiemodel. Dit is verder niet in detail meegenomen in deze studie. Naast warmtenetten zijn er ook (hybride-) warmtepompen aanwezig binnen de gebouwde omgeving. Bij lagere buitentemperaturen loopt de coëfficiënt of performance van deze warmtebronnen terug met als gevolg dat er meer energievraag ontstaat. Dit geldt zowel voor warmtepompen als hybridewarmtepompen. Hybridewarmtepompen zullen echter bij een te lage coëfficiënt of performance overschakelen van elektriciteit naar waterstof of groen gas. Deze flexibiliteitsoplossing zorgt voor een verandering de energiemix.

De extra elektriciteitsvraag door weerjaar 1987 ten opzichte van weerjaar 2015 is beperkt in Figuur 18. Dit figuur geeft de extra elektriciteitsvraag over het hele jaar, waardoor een vertekend beeld ontstaat. In de winter wordt namelijk meer elektriciteit gebruikt voor verwarming, terwijl in de zomer minder elektriciteit wordt gevraagd, omdat er minder behoefte is aan koeling. De stijging in elektriciteitsvraag door verwarming wordt grotendeels teniet gedaan door de reductie in elektriciteitsvraag voor koeling. Het effect van extra vraag naar elektriciteit ten behoeve van koeling wordt weergegeven in Figuur 19. De extra elektriciteitsvraag voor verwarming wordt geïllustreerd door Figuur 20. In Figuur 19 daalt de vraag naar elektriciteit voor koeling met 14 PJ, omdat de zomer in weerjaar 1987 koeler was dan de zomer van standaard weerjaar 2015. De winter van weerjaar 1987 is echter veel strenger dan de winter van het standaard weerjaar 2015. De elektrische vraag voor verwarming

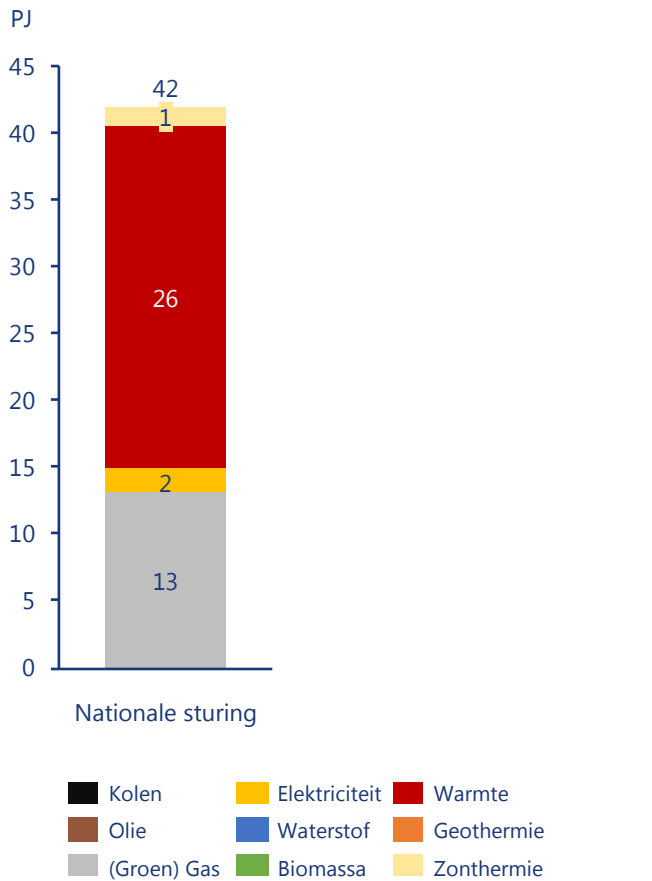
14) KNMI daggegevens



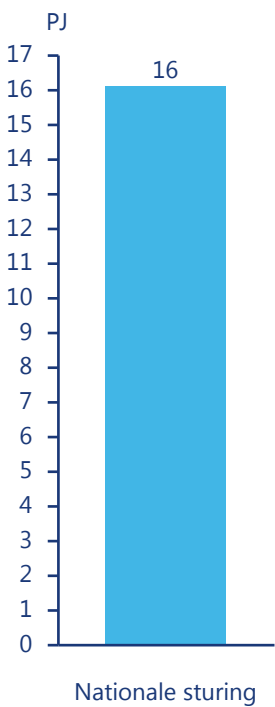
Figuur 16 Hernieuwbare elektriciteitsopwekking en buitentemperatuur weerjaar 1997



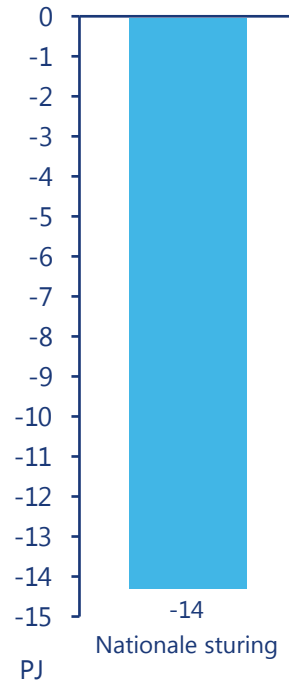
Figuur 17 Hernieuwbare elektriciteitsopwekking en buitentemperatuur weerjaar 1987



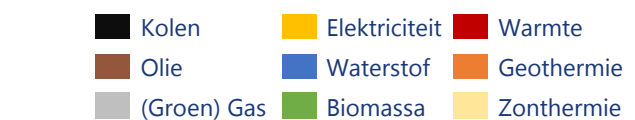
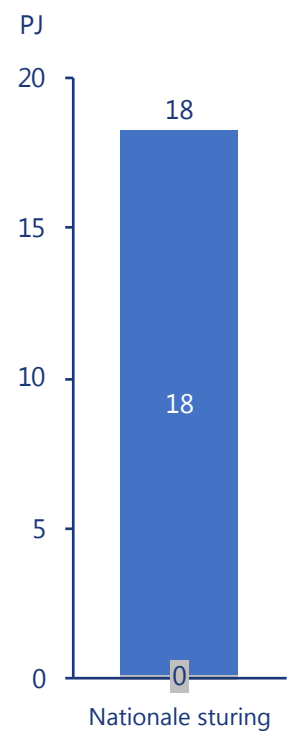
Figuur 18 Extra finale energievraag van de gebouwde omgeving door extreem weerjaar 1987 t.o.v. 2015 in scenario Nationaal



Figuur 20 Extra elektriciteitsvraag voor verwarming 1987 t.o.v. 2015



Figuur 19 Extra elektriciteitsvraag voor koeling 1987 t.o.v. 2015



Figuur 21 Extra finale energetische energievraag van de industrie door extreem weerjaar 1987 t.o.v. 2015 in scenario Nationaal

neemt daarom met 16 PJ toe. Op jaar basis resulteert dit in een netto stijging van 2 PJ van de finale elektrische energievraag in de gebouwde omgeving in scenario Nationale sturing.

Buiten de gebouwde omgeving neemt de energetische vraag ook toe. Doordat de overschotten hernieuwbare elektriciteit minder vaak voorkomen, schakelen power-to-heat technologieën in de industrie minder vaak aan. Hierdoor blijven deze sectoren dus over het jaar heen vaker op gas of waterstof draaien. Dit wordt weergegeven door Figuur 21.

Figuur 22 geeft de samenstelling van de totale extra finale vraag als gevolg van het extreme weerjaar 1987. Alleen de gebouwde omgeving en de industrie genereren extra finale vraag. Dit komt enerzijds omdat de buitentemperatuur daalt, waardoor de vraag toeneemt in de gebouwde omgeving. Anderzijds zorgt de kleinere mogelijkheid om power-to-heat in te zetten voor een grotere waterstof/gasvraag, omdat er minder overschotten aan duurzame elektriciteit zijn.

Ook in andere scenario's is de impact van het extreme weerjaar 1987 goed terug te zien, zie Figuur 23. De warmtevraag is in het regionale scenario het hoogst omdat in dit scenario het percentage warmtenetten aanzienlijk hoger is dan in overige scenario's. Het aandeel warmtenetten in de gebouwde omgeving neemt in de andere scenario's geleidelijk af (van regionaal naar internationaal). De warmtevraag in het nationale scenario is echter kleiner dan de warmtevraag in het Europese scenario, ondanks dat er meer warmtenetten aanwezig zijn. Dit komt omdat de gebouwen en woningen in het nationale scenario de hoogste isolatiewaarden hebben. In het Europese en internationale scenario ligt deze isolatiewaarde lager, waardoor de warmtevraag hoger is. Tevens zijn de flextechnologieën in het Europese en internationale scenario duidelijk zichtbaar. In het Europese scenario zijn hybridewarmtepompen aanwezig op zowel groengas als waterstof. In het internationale scenario is dit alleen op waterstof.

De extra elektriciteitsvraag is in het regionale, Europese en internationale scenario negatief. Dit komt omdat extra elektriciteitsvraag voor koeling de extra elektriciteitsvraag voor verwarming overschrijdt in deze scenario's. Hierdoor ontstaat een netto reductie in de vraag naar elektriciteit op jaarbasis. De extra vraag naar elektriciteit ten behoeve van koeling wordt weergegeven door Figuur 24 en de extra elektriciteitsvraag ten behoeve van verwarming in Figuur 25. De getallen zijn afgerond, waardoor het optellen van de extra elektriciteitsvraag voor koeling en verwarming niet op hetzelfde getal uit komt als weergegeven is in Figuur 23.

Ook in de industrie neemt de energievraag toe in het weerjaar 1987. Dit wordt weergegeven in Figuur 26. In het regionale scenario neemt de energievraag minder toe dan in de overige scenario's. Dit komt omdat het scenario de kleinste absolute energievraag heeft. Hierdoor is de extra energievraag als gevolg van weerjaar 1987 kleiner in het regionale scenario's dan de overige scenario's

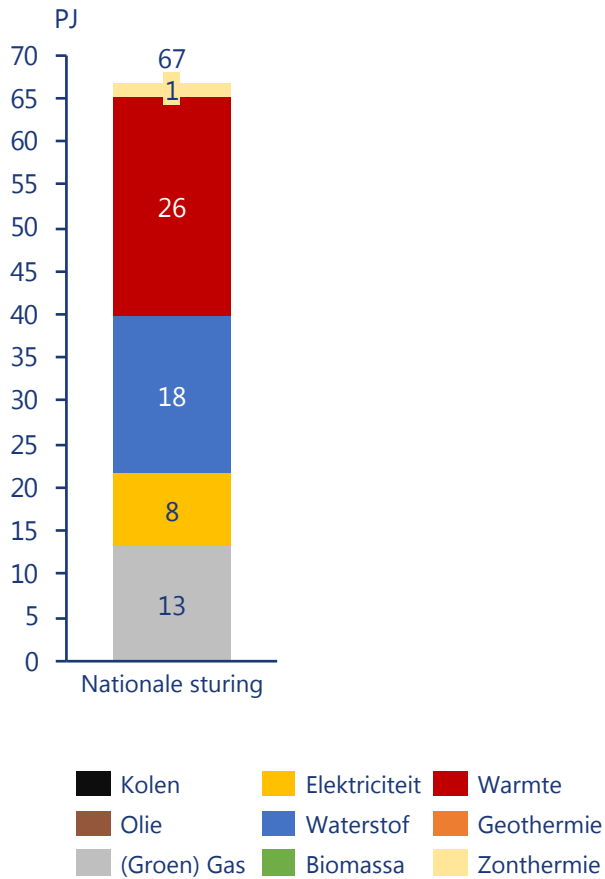
Het effect in het nationale scenario is het grootst. Hiervoor zijn drie oorzaken aan te wijzen. Ten eerste, heeft het nationale scenario het grootste aanbod van duurzame energie, in het weerjaar 1987 neemt dit dus het hardst af. Ten tweede, is dit het scenario waarin het meest geëlektrificeerd wordt, hierdoor blijft de vraag naar elektriciteit groot in het weerjaar 1987. Ten derde, is de mogelijkheid voor elektriciteitsimporten ook laag in dit scenario, waardoor er niet geleund kan worden op het buitenland om de elektriciteitstekorten in te vullen.

In het Europese en internationale scenario is de absolute energievraag groter dan in het regionale en nationale scenario, maar vindt er minder elektrificatie plaats. Hierdoor is de extra vraag naar energiedragers beperkt. Deze zal ten dele ingevuld moeten worden uit import en reserves. De samenstelling van de energiemix van deze extra vraag voor alle scenario's wordt weergegeven in Figuur 27.

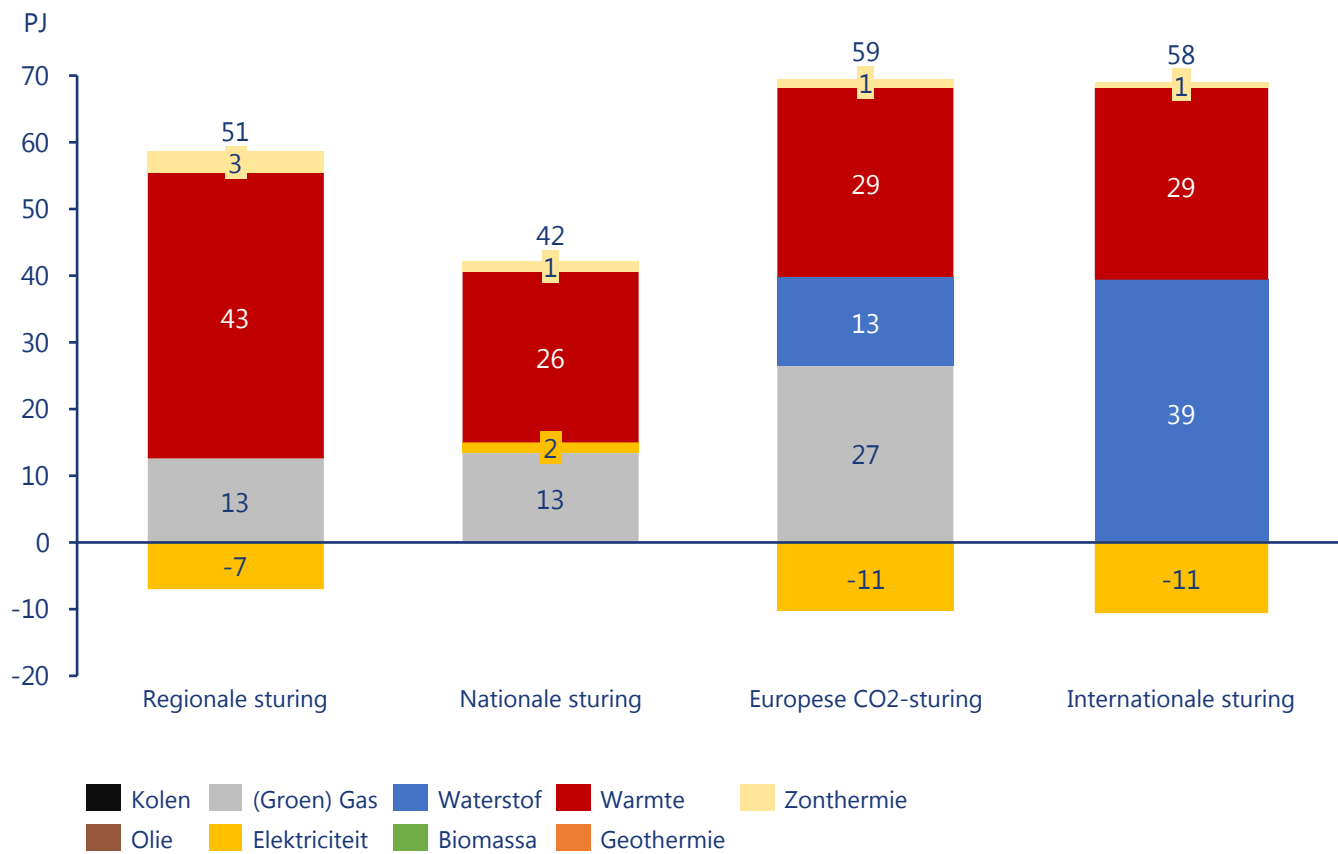
In extreme weerjaren neemt het totale de productie van hernieuwbare elektriciteit af. Als gevolg hiervan reduceert het elektriciteitsoverschot, zie Figuur 28.

Dit heeft directe gevolgen voor de hoeveelheid waterstof die er in een dergelijk weerjaar geproduceerd wordt. Hernieuwbare elektriciteit wordt namelijk in eerste instantie direct geleverd aan vragers van elektriciteit. Wanneer het aanbod de vraag overschrijdt wordt de resterende hernieuwbare elektriciteit omgezet in waterstof middels elektrolyse. Er is dus geen baseload waterstofproductie. In magere weerjaren overstijgt het aanbod de vraag minder vaak, waardoor minder hernieuwbare elektriciteit beschikbaar is voor de productie van waterstof. Dit veroorzaakt problemen voor het energiesysteem aangezien er tekorten aan waterstof ontstaan hierdoor.

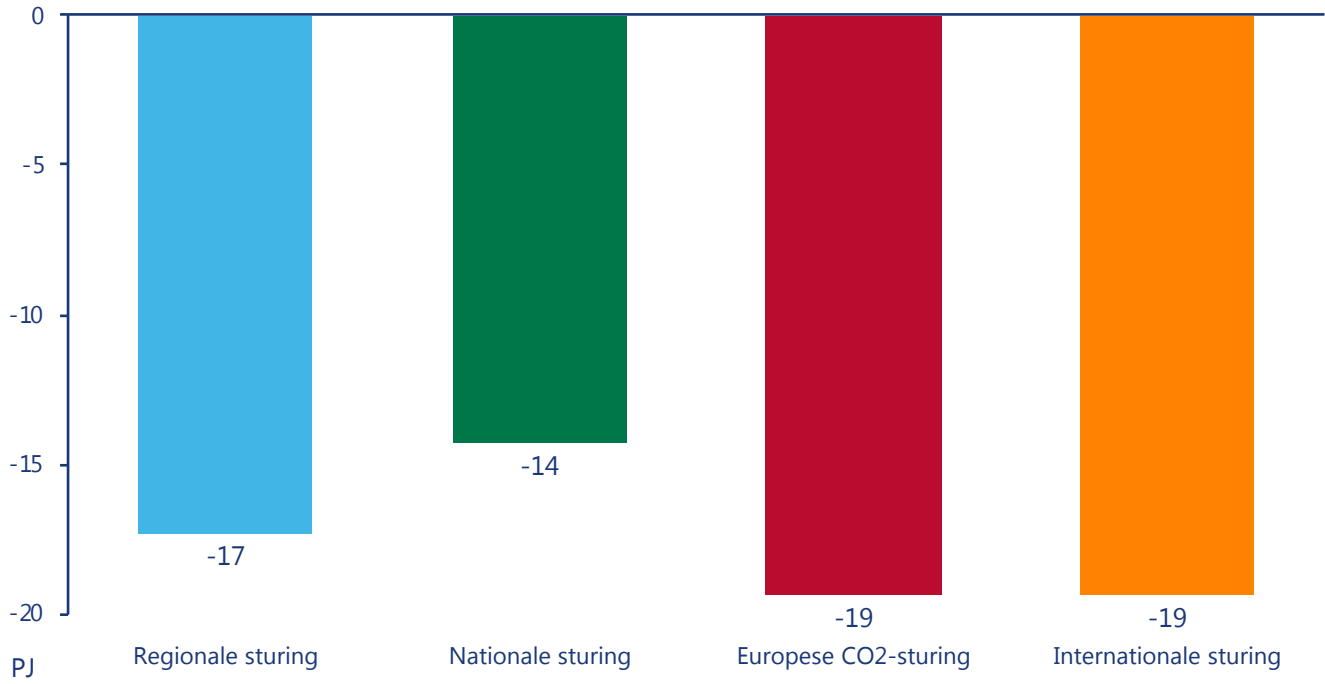
In geen enkel scenario wordt direct elektriciteit geleverd voor de productie van waterstof. Dit heeft gevolgen voor de bedrijfstijd van elektrolyzers, omdat deze alleen worden ingezet wanneer er elektriciteitsoverschotten zijn. Wanneer het aanbod de vraag naar hernieuwbare elektriciteit minder vaak overstijgt, neemt de bedrijfstijd van de elektrolyzers af.



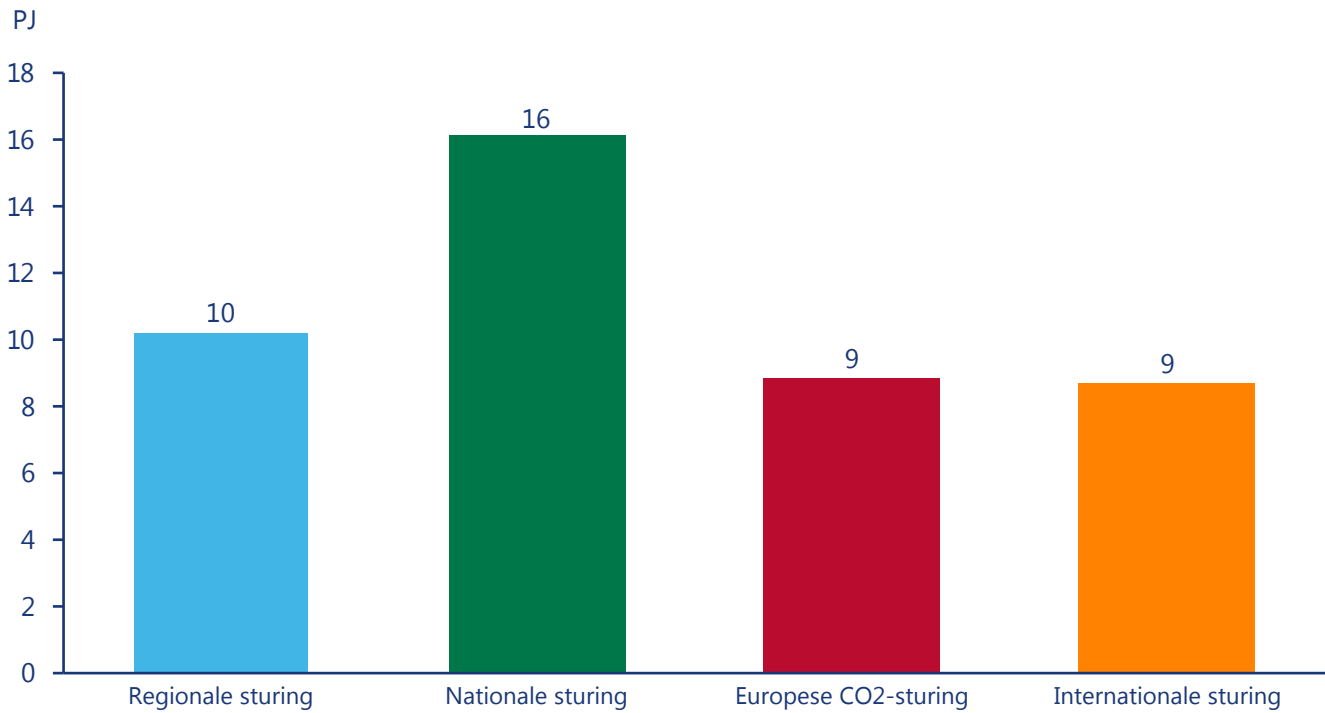
Figuur 22 Samenstelling extra finale energetische energievraag door extreem weerjaar 1987 t.o.v. 2015 in scenario Nationaal



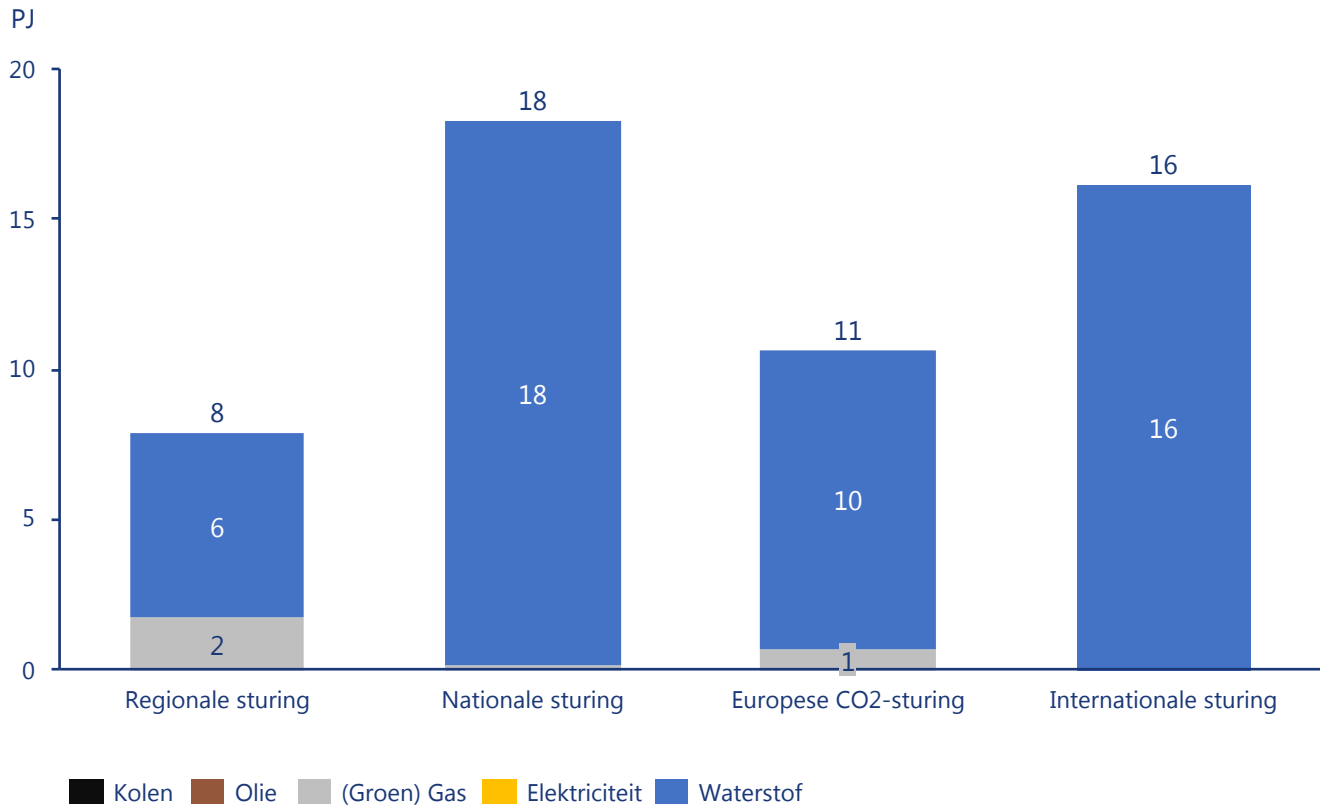
Figuur 23 Samenstelling extra finale energetische energievraag gebouwde omgeving door extreem weerjaar 1987 t.o.v. 2015



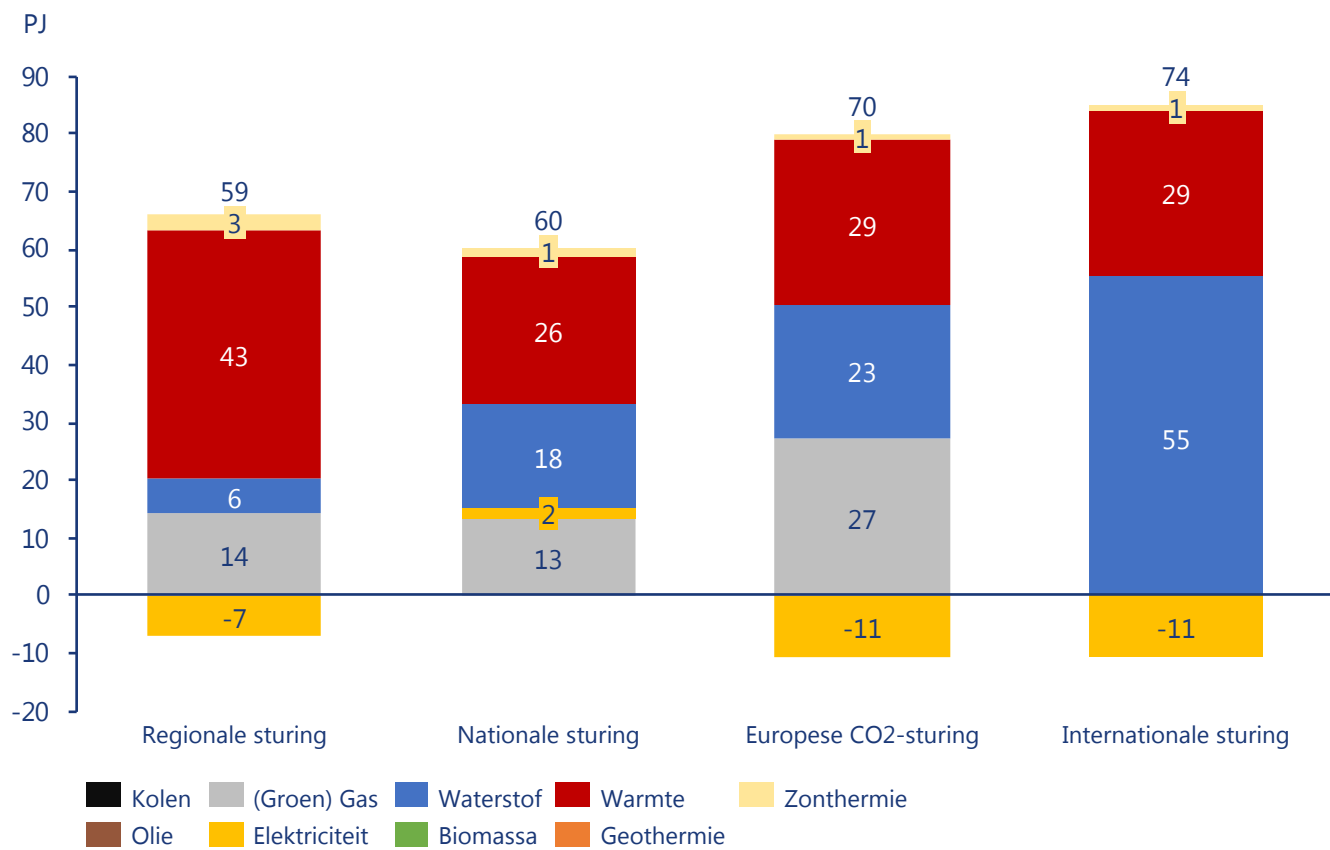
Figuur 24 Elektrische energievraag koeling extreem weerjaar 1987 ten opzichte van standaard weerjaar 2015



Figuur 25 Elektrische energievraag verwarming extreem weerjaar 1987 ten opzichte van standaard weerjaar 2015



Figuur 26 Samenstelling extra finale energetische energievraag industrie door extreem weerjaar 1987 t.o.v. 2015



Figuur 27 Samenstelling extra finale energetische energievraag door extreem weerjaar 1987 t.o.v. 2015

In Figuur 29 is de productie van waterstof per weerjaar per scenario te zien. In dit figuur wordt de meeste waterstof geproduceerd in het nationale scenario als gevolg van de grote hoeveelheid wind op zee, wind op land en zon-PV. Ook in het regionale scenario wordt een aanzienlijke hoeveelheid waterstof geproduceerd. Ook nu komt dit vanwege het grote productievermogen van hernieuwbare energie. In het Europese en internationale scenario is de productie van waterstof beperkt. Hier ligt aan ten grondslag dat het elektrolyse-vermogen van waterstof kleiner is dan in de zelfvoorzienende scenario's. Men leunt immers meer op blauwe waterstof productie of import in het Europese en internationale scenario. Door het kleine productievermogen zijn er minder elektriciteitsoverschotten en kan er minder waterstof geproduceerd worden.

Doordat waterstofproductie afhankelijk is van elektriciteitsproductie, is er geen constant aanbod. Toch moet de vraag naar waterstof altijd ingevuld kunnen worden. Zeker omdat waterstof ook wordt ingezet in waterstofcentrales wanneer het aanbod van hernieuwbare elektriciteit de vraag naar elektriciteit niet dekt. Om deze continuïteit te kunnen bieden zal opslag noodzakelijk zijn. Omdat er in sommige scenario's waterstof wordt geïmporteerd naast de eigen productie zijn er drie mogelijke soorten opslag te onderscheiden:

- **Seizoen afhankelijke opslag:** Dit type opslag is benodigd om fluctuaties in de productie van groene waterstof op te vangen en om de winter door te komen. Op momenten met veel wind, zon of een combinatie van beide wordt er zeer veel waterstof geproduceerd en zal deze gebufferd moeten worden. In periodes waarbij de productie nihil is en de vraag naar waterstof groot moet er waterstof aangevoerd worden vanuit buffers. Deze sterke vraag komt voort uit lage buitentemperaturen, waardoor een grotere warmtevraag ontstaat. Zo zullen hybridetechnologieën overschakelen van elektriciteit naar waterstof en genereren all-electric warmtepompen een grotere elektriciteitsvraag omdat de coëfficiënt of performance reduceert. Wanneer deze elektriciteit niet direct geleverd kan worden zal deze opgewekt moeten worden in een waterstof- of gascentrale, waardoor behoefte is aan seizoen afhankelijke opslag.
- **Weer afhankelijke opslag:** De totale jaarproductie van waterstof is afhankelijk van het weerjaar. Er zijn weerjaren waarin de totale jaarproductie beduidend lager ligt dan in andere weerjaren. Zo is de jaarproductie in 1987 vele malen lager dan de jaarproductie van 2015. Wanneer een energiesysteem wordt ontworpen op het weerjaar 2015 dient er rekening gehouden te worden met weer afhankelijk opslag

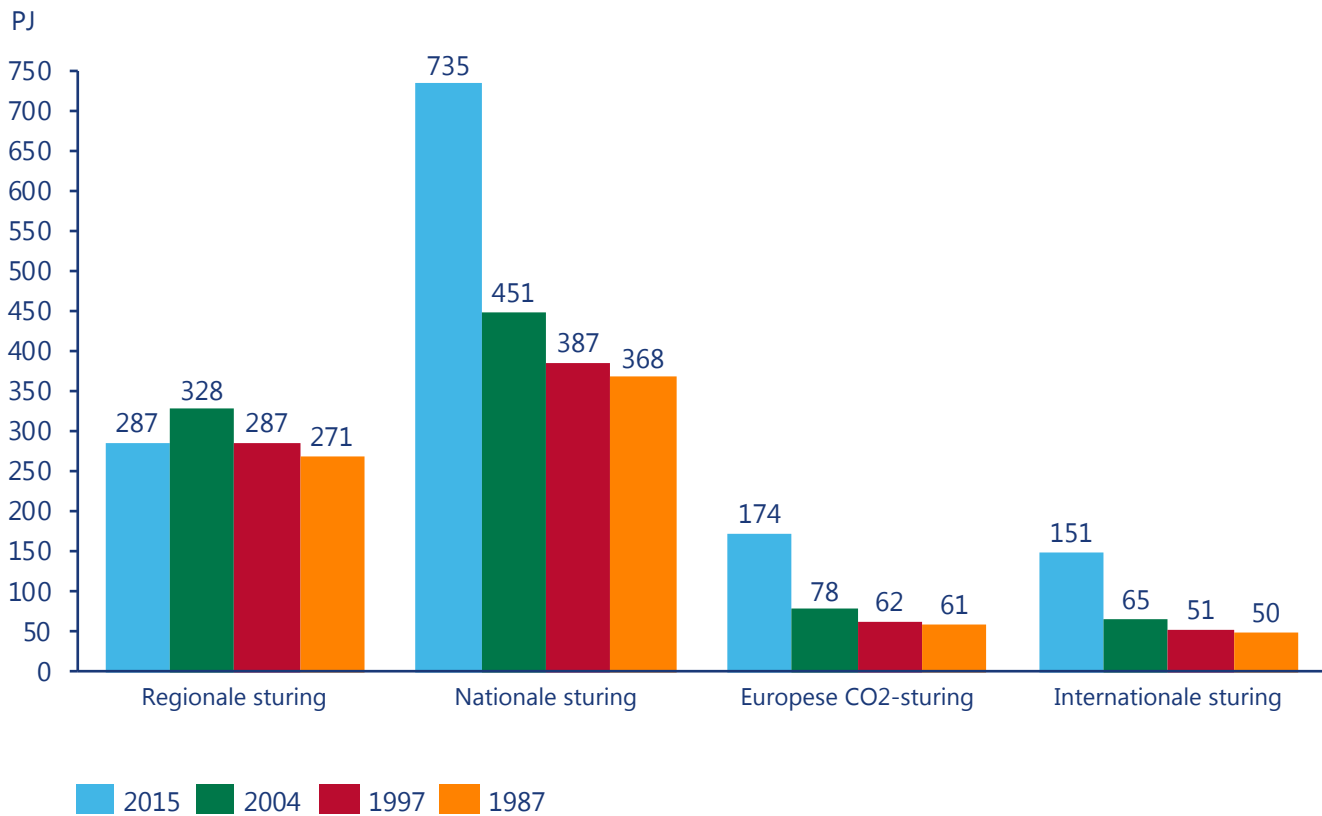
om te compenseren voor weerjaren waarin de jaarproductie lager ligt dan normaal.

- **Strategische opslag:** Wanneer er over een jaar heen netto geïmporteerd wordt, betekent dat er een afhankelijkheid is van het buitenland. Wanneer er een daling is in de productie van waterstof dan zal dit hoogstwaarschijnlijk ook het geval zijn in buurlanden, omdat weerinvoeden ten slotte grensoverschrijdend zijn. Om te voorkomen dat import van waterstof stil valt, omdat er in nabij gelegen landen geen waterstof meer geëxporteerd kan worden, zullen er strategische reserves moeten worden aangelegd. De capaciteit van deze strategische reserves is een politieke keuze en geen onderdeel van deze studie. Om toch een indicatie te geven van de mogelijke omvang is uitgegaan van een jaarreserve aan import.

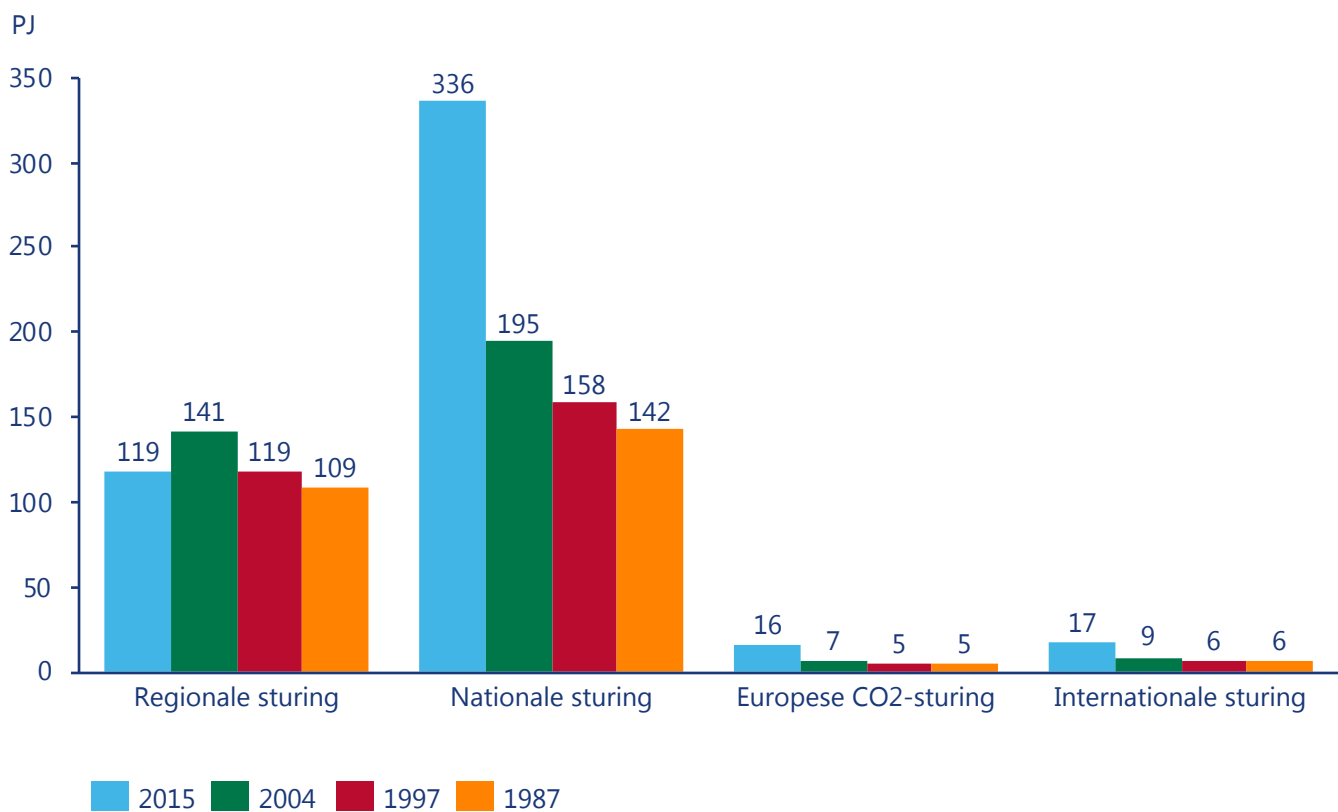
Naast waterstofopslag vindt ook (groen)gas opslag plaats.

De opslag van (groen)gas kent drie mogelijk soorten:

- **Seizoen afhankelijke opslag:** De productie van (groen)gas is niet afhankelijk van hernieuwbare energieproductie. Wel wordt de vraag naar (groen)gas groter wanneer de opwek van hernieuwbare elektriciteit daalt. Ten eerste, omdat gascentrales meer elektriciteit zullen produceren als gevolg van lagere hernieuwbare elektriciteitsproductie. Gas voor deze gascentrales is afkomstig uit de seizoen afhankelijke opslag. Ten tweede, omdat de hybridetechnologieën in de industrie de switch zullen maken van elektriciteit naar groen(gas). Hierbij moet wel de kanttekening gemaakt worden dat de inzet van hybridetechnologieën de vraag naar gas verkleint vergeleken met de huidige situatie, omdat er door deze technologieën deels de overstap wordt gemaakt van gas naar elektriciteit. Ten derde, zorgen de lagere buitentemperaturen voor meer vraag in de gebouwde omgeving naar groengas voor de hybride warmtepompen. De aanname is dat het productie van biomassa zeer gering wordt beïnvloed door weerinvoeden, wel zal in een koud jaar met weinig duurzame opwek eventueel extra biomassa moeten worden geïmporteerd.
- **Weer afhankelijke opslag:** De productie van groengas is afhankelijk van de beschikbaarheid van biomassa en niet van het aanbod hernieuwbare elektriciteit. De invloed van een lagere productie van elektriciteit is hierdoor terug te vinden in de grotere seizoen afhankelijke opslag.
- **Strategische opslag:** Hiervoor geldt een gelijk redenering als voor waterstof. Wanneer er over een jaar heen netto



Figuur 28 Overschot aan elektriciteit per weerjaar in alle scenario's



Figuur 29 Waterstofproductie per weerjaar in scenario Nationaal

geïmporteerd wordt, betekent dat er een afhankelijkheid is van het buitenland. Om deze afhankelijkheid te beperken kunnen strategische reserves worden gehouden, om te voorkomen dat er geen (groen)gas beschikbaar is wanneer de import stil valt. Om toch een indicatie te geven van de mogelijke omvang is uitgegaan van een jaarreserve aan import.

Tabel 9 geeft de reserves die moeten worden aangehouden in weerjaar 2015 per scenario. Dit weerjaar is zoals eerder genoemd mild. De gemiddelde buitentemperatuur ligt hoog en er is voldoende duurzame opwek. Dit betekent dat de reserves relatief klein zijn. Er blijft natuurlijk een seizoen afhankelijke opslag om de winter door te komen. Er is echter voldoende waterstofproductie voor het gehele jaar, afgezien van de baseload aan geïmporteerde waterstof die in enkele scenario's voorkomt.

De seizoen afhankelijke opslag wordt sterk beïnvloed door het weerjaar. Om dit te verduidelijken is de seizoenafhankelijke opslag van waterstof voor alle weerjaren in scenario nationaal weergegeven in Figuur 30. Een duidelijke trend in alle weerjaren is dat de vraag naar waterstof in de winter het aanbod overstijgt, wat geïllustreerd wordt door een dalende curve. In het voorjaar en zomer is dit omgekeerd. Het aanbod overstijgt de vraag wat te zien is door de stijgende curve. De totale seizoen afhankelijke opslag is het kleinst in het standaard weerjaar 2015 omdat dit een mild weerjaar is. De grootste seizoen afhankelijke opslag is nodig in weerjaar 1987, omdat dit weerjaar extreem koude periodes kent met weinig hernieuwbare opwek. Een dergelijke periode is zichtbaar in Figuur 30, waarbij de curve van weerjaar 1987 steil afneemt eind januari. Ook 2004 is een bijzonder weerjaar omdat de eerste helft van het jaar de opwek van hernieuwbare elektriciteit laag was. Hierdoor wordt de seizoen afhankelijke opslag niet goed aangevuld. In de tweede helft van het jaar was de productie van hernieuwbare elektriciteit echter zeer groot. Naast waterstof worden er reserves aangehouden voor de opslag van (groen)gas. Het volume van de opslag is uiteraard afhankelijk van de mate waarin gebruik wordt gemaakt van (groen)gas in elk scenario. Met name in het Europese scenario wordt gebruik gemaakt van groengas in de gebouwde omgeving. Ook zijn er gascentrales aanwezig om in elektriciteit te voorzien wanneer de hernieuwbare opwek niet toereikend is. Dit is terug te zien in Tabel 9. De seizoen afhankelijke (groen)gasopslag is het grootst in het Europese scenario, omdat hier veel hybridetechnologieën op groengas aanwezig zijn. Bij het regionale en nationale scenario geldt dit ook. Het aandeel van deze hybridetechnologieën op groengas is alleen lager.

Zoals eerder aangegeven is de productie van groengas niet afhankelijk van het weer. Hierdoor vertoont de seizoen afhankelijke opslag van gas een minder grillig profiel dan de seizoen afhankelijke opslag van waterstof, zie Figuur 31. Weer afhankelijke opslag is minimaal net zo belangrijk als seizoen afhankelijke opslag. Wanneer het een scenario wordt ontworpen op het standaard weerjaar 2015 en er vindt een kouder weerjaar plaats zoals 1987 dan geeft dit problemen voor de energievoorziening omdat de totale jaarlijkse vraag naar waterstof het jaarlijkse aanbod van waterstof overstijgt. Om een situatie als deze te voorkomen moeten weer afhankelijke reserves worden gehouden. De capaciteit van deze reserves worden weergegeven in Tabel 10.

Ten slotte zijn er strategische reserves. De capaciteit van de strategische reserves die moet worden aangehouden is afhankelijk van het import volume. Dit volume loopt gestaag op van het regionale scenario naar het internationale scenario. In het Europese en Internationale worden grote hoeveelheden waterstof of (groen)gas geïmporteerd. Deze import is constant en varieert niet onder weersinvloeden, maar betekent wel een direct afhankelijkheid van het buitenland. Om deze afhankelijkheid van import in te perken kunnen strategische reserves worden aangelegd. De omvang van deze strategische reserves wordt bepaald door de gewenste afhankelijk van het buitenland. Deze kwestie is echter geen onderdeel van deze studie.

In het internationale scenario is daarom een strategische waterstof reserve nodig van 207 TWh, wanneer een jaar lang niet geïmporteerd kan worden. In het Europese scenario wordt minder gebruikt gemaakt van waterstof, maar ligt de nadruk vooral op (groen)gas. Daarom moet ook een strategische reserve voor deze energiedrager aangehouden.

Reserves

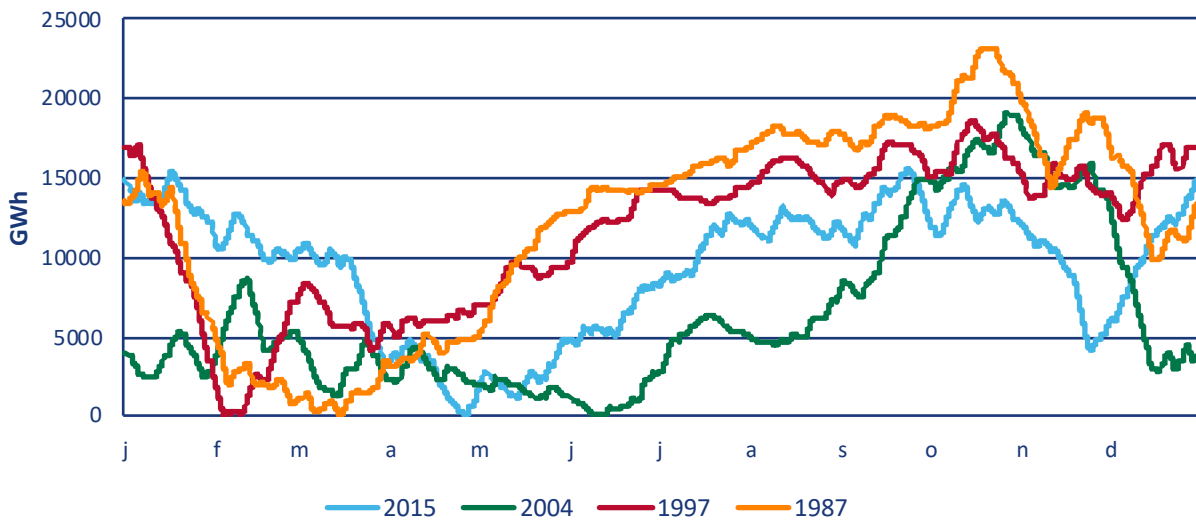
Waterstof kan worden opgeslagen in zoutcavernes en lege gasvelden op land en op zee. Hierbij gaat de voorkeur naar zoutcavernes omdat deze beter geschikt zijn voor de opslag van waterstof. (Groen)gas kan uiteraard worden opgeslagen in lege gasvelden. De totaal benodigde opslag capaciteiten staan weergegeven in Tabel 11.

Zoutcavernes in Nederland hebben een totale capaciteit van 43 TWh voor de opslag van waterstof op basis van conservatieve inschatting waarbij 50% van het theoretisch potentieel effectief kan worden benut¹²⁾. De reductie met 50% moet indicatief beschouwd worden. De uiteindelijke geschiktheid, inpasbaarheid van cavernes en het operationele ontwerp zullen met proefboringen en specifieke geologische en geomechanische

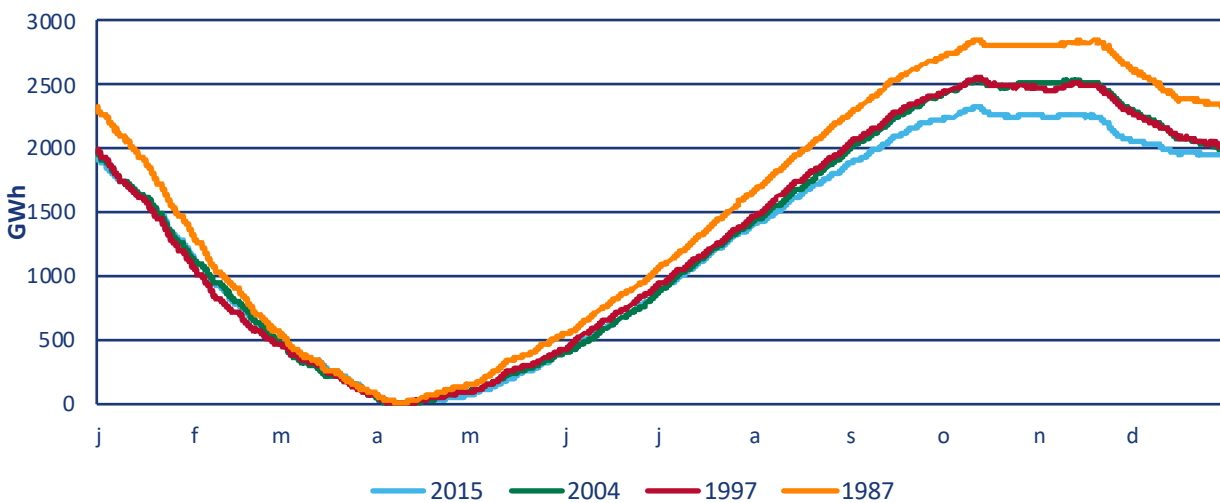
Tabel 9 Reserves voor de opslag van waterstof en (groen)gas in weerjaar 2015

| Waterstofopslag standaard weerjaar 2015 | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|---|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Seizoen afhankelijke waterstofopslag | 26 TWh | 16 TWh | 2 TWh | 12 TWh |
| Weer afhankelijk waterstofopslag | 0 TWh | 0 TWh | 0 TWh | 0 TWh |
| Strategische waterstofopslag | 0 TWh | 0 TWh | 46 TWh | 181 TWh |
| Totaal | 26 TWh | 16 TWh | 48 TWh | 193 TWh |

| (groen)gasopslag standaard weerjaar 2015 | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|--|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Seizoen afhankelijke (groen) gasopslag | 5 TWh | 2 TWh | 15 TWh | 5 TWh |
| Weer afhankelijk (groen)gasopslag | - | - | - | - |
| Strategische (groen)gasopslag | 0 TWh | 0 TWh | 99 TWh | 0 TWh |
| Totaal | 5 TWh | 2 TWh | 114 TWh | 5 TWh |



Figuur 30 Seizoen afhankelijke waterstofopslag in scenario nationaal



Figuur 31 Seizoen afhankelijk (groen)gasopslag in scenario nationaal

Tabel 10 Reserves voor de opslag van waterstof en (groen)gas in weerjaar 1987

| Waterstofopslag weerjaar 1987 | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|--|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Seizoen afhankelijke waterstofopslag | 29 TWh | 22 TWh | 2 TWh | 21 TWh |
| Weer afhankelijk waterstofopslag | 84 TWh | 88 TWh | 10 TWh | 38 TWh |
| Strategische waterstofopslag | 0 TWh | 0 TWh | 46 TWh | 181 TWh |
| Totaal | 113 TWh | 110 TWh | 58 TWh | 240 TWh |
| (groen)gasopslag weerjaar 1987 | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
| Seizoen afhankelijke (groen) gasopslag | 7 TWh | 4 TWh | 25 TWh | 6 TWh |
| Weer afhankelijk (groen)gasopslag | - | - | - | - |
| Strategische (groen)gasopslag | 0 TWh | 0 TWh | 99 TWh | 0 TWh |
| Totaal | 7 TWh | 4 TWh | 124 TWh | 6 TWh |

Tabel 11 Benodigde opslag capaciteit voor alle scenario's in weerjaar 1987

| Opslag weerjaar 1987 | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|----------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Waterstof totaal | 113 TWh | 110 TWh | 58 TWh | 240 TWh |
| (Groen)gas totaal | 7 TWh | 4 TWh | 124 TWh | 6 TWh |

analyses moeten worden onderzocht. Dit valt buiten de scope van deze studie.

De 43 TWh is onvoldoende om te voorzien in de opslag van waterstof. Dat betekent dat er gebruik zal moeten worden gemaakt van lege gasvelden op land of op zee. De totale opslagcapaciteit voor waterstof in lege gasvelden op land is gelijk aan 277 TWh¹²⁾ en op zee 179 TWh¹²⁾. Belangrijk hierbij is dat de energie-inhoud van aardgas circa 3,5 keer hoger is dan die van waterstof, waardoor de energetische capaciteit van dezelfde velden veel groter is wanneer er (groen)gas (laag calorisch) in wordt opgeslagen, namelijk 963 TWh op land en 622 TWh op zee¹²⁾. Met de inzet van lege gasvelden is er voldoende opslagcapaciteit beschikbaar voor zowel de opslag van waterstof als voor (groen)gas.

De inzet van zoutcavernes voor de opslag van waterstof is te prefereren boven opslag in lege gasvelden. De capaciteit van zoutcavernes is echter onvoldoende. De nog extra benodigde capaciteit kan worden opgevangen met behulp van lege gasvelden. Hoe opslag precies plaats zal vinden vereist verder onderzoek. Vele factoren spelen hierin een rol. Denk hierbij aan transportafstand, opslagduur, kosten om opslag te realiseren, de energiedrager die opgeslagen wordt, etc. Dit valt buiten de scope van deze studie.

Sectorale uitwerking en energietoekomst- beelden 2050

Hoofdstuk 5

In hoofdstuk 3 werden de scenario's geïntroduceerd aan de hand van hun verhaallijnen, uitgangspunten en de invulling op hoofdlijnen. In hoofdstuk 4 volgden de overkoepelende uitkomsten op hoofdlijnen.

In dit hoofdstuk wordt er in verder detail gekeken naar de verschillende sectoren in de scenario's: gebouwde omgeving, mobiliteit, industrie, landbouw en elektrisch vermogen. Na een algemene introductie, volgt per subsectoren een onderbouwing van de gekozen invulling. Hierna volgt voor de vraagsectoren het overzicht van de finale energievraag voor de verschillende scenario's.

Hoofdstuk 6 bespreekt de regionalisering van deze sectoren.



5.1 Gebouwde omgeving

Het aantal inwoners in Nederland groeit in 2050 van 17,2 miljoen tot 18,4 miljoen¹⁵⁾. Dit heeft voor de gebouwde omgeving een stijging in aantal huishoudens van 7,9 miljoen naar 8,8 miljoen huishoudens tot gevolg. Daarnaast daalt het gemiddeld aantal inwoners per huishouden.

In de gebouwde omgeving wordt er naast warmte veel elektriciteit gebruikt. Het grootste deel hiervan is in het ETM gedefinieerd als elektriciteitsgebruik van apparaten. Er wordt uitgegaan van een groei in verbruik van elektrische apparaten van 1% per jaar. Er wordt in alle scenario's een efficiëntie toename van 10% verondersteld tot 2050. Dit betekent dat het nettoverbruik stijgt, dit is in lijn met de huidige trend (zie paragraaf 8.2).

Wat betreft verlichting wordt er verwacht dat 90% van de verlichting in de huishoudens LED verlichting is. In de utiliteitsgebouwen ligt dit percentage voor alle scenario's op 95%. Er wordt aangenomen dat zowel utiliteitsgebouwen als in huishoudens veel wordt gedaan om duurzamer met elektriciteit omgegaan een gedragsverandering bewerkstelligd wordt.

Hieronder vallen technieken als bijvoorbeeld bewegingssensoren of stand-by killers, maar ook gedragsveranderingen als bijvoorbeeld kouder wassen, ramen dicht als er verwarmd wordt en het uitzetten van lichten. In alle scenario's wordt aangenomen dat er volledig elektrisch gekookt wordt.

15) CBS (2017). Prognose 18,4 miljoen inwoners in 2060

5.1.1 Huishoudens

Tabel 12 Input verdeling warmtevraag huishoudens

| | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|---|---|--|--|---|
| Inwoners | 18,4 miljoen | 18,4 miljoen | 18,4 miljoen | 18,4 miljoen |
| Huishoudens | 8,8 miljoen | 8,8 miljoen | 8,8 miljoen | 8,8 miljoen |
| Isolatie | Gemiddeld A/B | Gemiddeld A | Gemiddeld B | Gemiddeld B |
| All electric WP | 35% | 55% | 25% | 25% |
| Hybride WP (groengas) | 20% | 20% | 40% | - |
| Hybride WP (waterstof) | - | - | 20% | 60% |
| Warmtenet (eventueel ook uitwisselbaar met warmtenet gebouwen) | 45% waarvan: 100% geothermie met piek groen gas/biomassa | 25% waarvan: 70% geothermie met piek groen gas/bio- massa, 15% groen gas, 10% biomassa, 5% restwarmte AVI's | 15% waarvan: 14% geothermie met piek groen gas/bio- massa, 66% groen gas, 8% biomassa, 12% restwarmte AVI's en industrie | 15% waarvan: 14% geothermie met piek waterstof, 21% waterstof, 28% biomassa, 37% restwarmte AVI's en industrie |
| Zon-PV (percentage van beschikbaar dakoppervlak ETM, combinatie met zonthermie mogelijk) | 100% ¹⁶⁾ | 100% ¹⁶⁾ | 40% | 30% |
| Zonthermisch (percentage van beschikbaar dakoppervlak ETM, combinatie met zon-PV mogelijk) | 100% ¹⁶⁾ | 50% ¹⁶⁾ | 40% | 30% |
| Energiebesparing apparaten ten opzichte van 2015 | 10% | 10% | 10% | 10% |
| Toename aantal elektrische apparaten in huis | 1% per jaar | 1% per jaar | 1% per jaar | 1% per jaar |
| Koken | Inductie | Inductie | Inductie | Inductie |

Regionale sturing: Gemeenten willen snel hun wijken van het aardgas af. Warmtenetten bieden hiervoor een ideale uitkomst, aangezien er niet direct aanpassingen aan de woningen nodig zijn bij een hogetemperatuur warmtenet. De aanleg van warmtenetten zal opschalen in de jaren na 2030 en uiteindelijk zullen 45% van de huishoudens aangesloten zijn.¹⁷⁾ Door groot draagvlak van burgers en woningbouwcorporaties is het mogelijk deze warmtenetten in korte tijd uit te rollen. Huizen zullen vervolgens na-geïsoleerd worden, zodat veel van de warmtenetten van hoge-temperatuur naar midden-temperatuur warmtenetten veranderen. Deze warmtenetten zullen overwegend met geothermie gevoed worden (met een piek en back-up voorziening 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 geothermiebronnen om warmte beschikbaar te kunnen stellen aan hun inwoners. Daarnaast zullen gemeenten mogelijk met elkaar grootschaligere warmtenetten realiseren, zodat gemeenten met minder geothermiepotentie ook genoeg warmte beschikbaar hebben.

16) Bij volledige dakbezetting gaan wij ervan uit dat elektriciteitsopwekking en warmte opwekking gecombineerd wordt in de panelen middels PVT-panelen.

17) EBN (2018). Masterplan aardwarmte in Nederland

Op plekken waar warmtenetten minder voor de hand liggen (nieuwbouw en woningen in gebieden met een lagere woningdichtheid), zullen all-electric warmtepompen de huishoudens voorzien van warmte. Veel bewoners zijn bereid om te investeren in zeer goede isolatie, zonnepanelen en thuisbatterijen; hierdoor worden elektrische warmtepompen gunstig. Gemeenten helpen hun burgers door zachte leningen te verstrekken voor duurzame woningaanpassingen. In combinatie met elektriciteitsopwekking en wijkbatterijen regelt de gemeente dat er voor het grootste gedeelte van het jaar voldoende elektriciteit beschikbaar is om deze huizen van warmte te voorzien (in de doorrekeningen van deze studie niet meegenomen, onderdeel van fase 2 II3050).

Op de plekken waar all-electric of warmtenetten niet mogelijk zijn (denk aan oudere vrijstaande gebouwen in het buitengebied), worden hybride warmtepompen geplaatst. Deze hybride warmtepompen worden gevoed met groen gas.

Nationale sturing: De nationale overheid zet sterk in op grootschalige elektriciteitsopwekking, in het kielzog hiervan zet zij ook in op elektrificatie van de warmtevoorziening. All-electric warmtepompen zijn de meest efficiënte manier van verwarming, maar behoeven wel een sterke mate van isolatie. Nieuwbouwwoningen krijgen verplicht een all-electric warmtepomp. Een landelijk isolatieprogramma zorgt ervoor dat 55% van de woningen geschikt wordt voor all-electric warmtepompen. Woningeigenaren, woningbouwcorporaties en overige verhuurders worden verplicht hun woningen te verduurzamen. Een deel van het collectieve woningbezit kiest daarop voor het aanleggen van nieuwe warmtenetten samen met de warmtebedrijven, particuliere woningeigenaren sluiten hierbij aan. Er worden naast de bestaande warmtenetten nog enkele warmtenetten aangelegd maar in mindere mate dan in het regionale sturingsscenario. Door een algemene norm voor de efficiëntie van individuele warmtevoorziening zullen bewoners van de overige woningen (denk aan oudere vrijstaande gebouwen in het buitengebied) als resterende optie hebben om een hybride warmtepompen op groen gas te plaatsen.

Europese CO₂-sturing: Na het uitvoeren van het Klimaatakkoord is 15% van de huishoudens aangesloten op een warmtenet (1.250.000 huishoudens)^{18),19)}. Na 2030 is de CO₂ belasting van de Europese Unie het belangrijkste instrument geworden voor verduurzaming. Door verhoging van de gasprijs

(door middel van een Europese CO₂ belasting) worden alternatieven op de huidige verwarming langzaam rendabel. Voor veel inwoners van Nederland is het lange tijd voordelig om met een hybride warmtepomp het gasverbruik dusdanig om laag te brengen, dat dit nog niet opweegt tegen de extra investeringen die gedaan moeten worden voor een all-electric warmtepomp. Een deel van de hybride warmtepompen wordt gevoed met waterstof, aangezien waterstof binnen Europa opgewekt kan worden. De meeste hybride warmtepompen zullen met groen gas gevoed worden, aangezien dit eenvoudig ingevoerd kan worden in het gasnet. Voor nieuwe en goed geïsoleerde huizen, is de business case voor all-electric warmtepompen het meest gunstig.

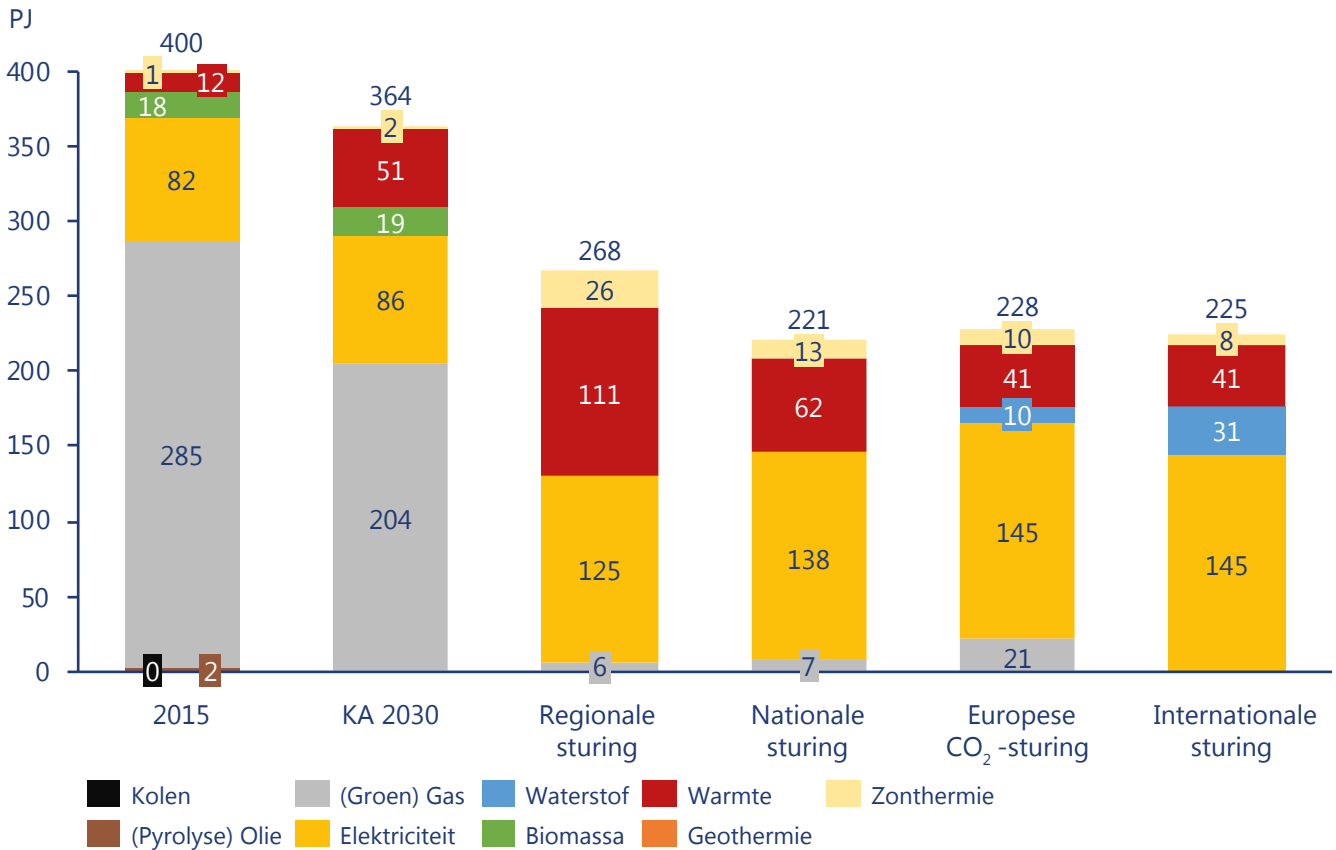
Internationale sturing: Internationaal gaan landen met goedkope stroom uit wind en zon, zich toeleggen op de productie van waterstof. Waterstof neemt hierdoor steeds meer de plek in die aardgas nu heeft. Om effectief gebruik te maken van deze waterstof beslissen veel Nederlandse huishoudens om een hybride warmtepomp op waterstof aan te schaffen. Alleen een deel van de nieuwbouw (met goede isolatie en vloerverwarming) zal gebruik maken van een all-electric warmtepomp. Warmtenetten zullen blijven steken op het niveau dat in het Klimaatakkoord is bepaald. Uit het Klimaatakkoord blijkt dat in 2030 ongeveer 1.250.000 huishoudens op een warmtenet zijn aangesloten^{18),19)}. De 1.250.000 huishoudens komen in 2050 overeen met ongeveer 15% van het totaal aantal huishoudens.

In Figuur 33 is de warmtevraag van de huishoudens weergegeven voor de scenario's. In Figuur 33 is te zien dat de finale warmtevraag in het nationale scenario lager is dan in de andere scenario's. Dit is te verklaren doordat er in dit scenario meer isolatie is toegepast. Opvallend is dat het nationale scenario dat de grootste hoeveelheid all-electric oplossingen heeft niet de grootste elektriciteitsvraag heeft. Dit is te verklaren door de grotere hoeveelheid hybride warmtepompen in het Europese en Internationale scenario en de hogere mate van isolatie in het Nationale scenario.

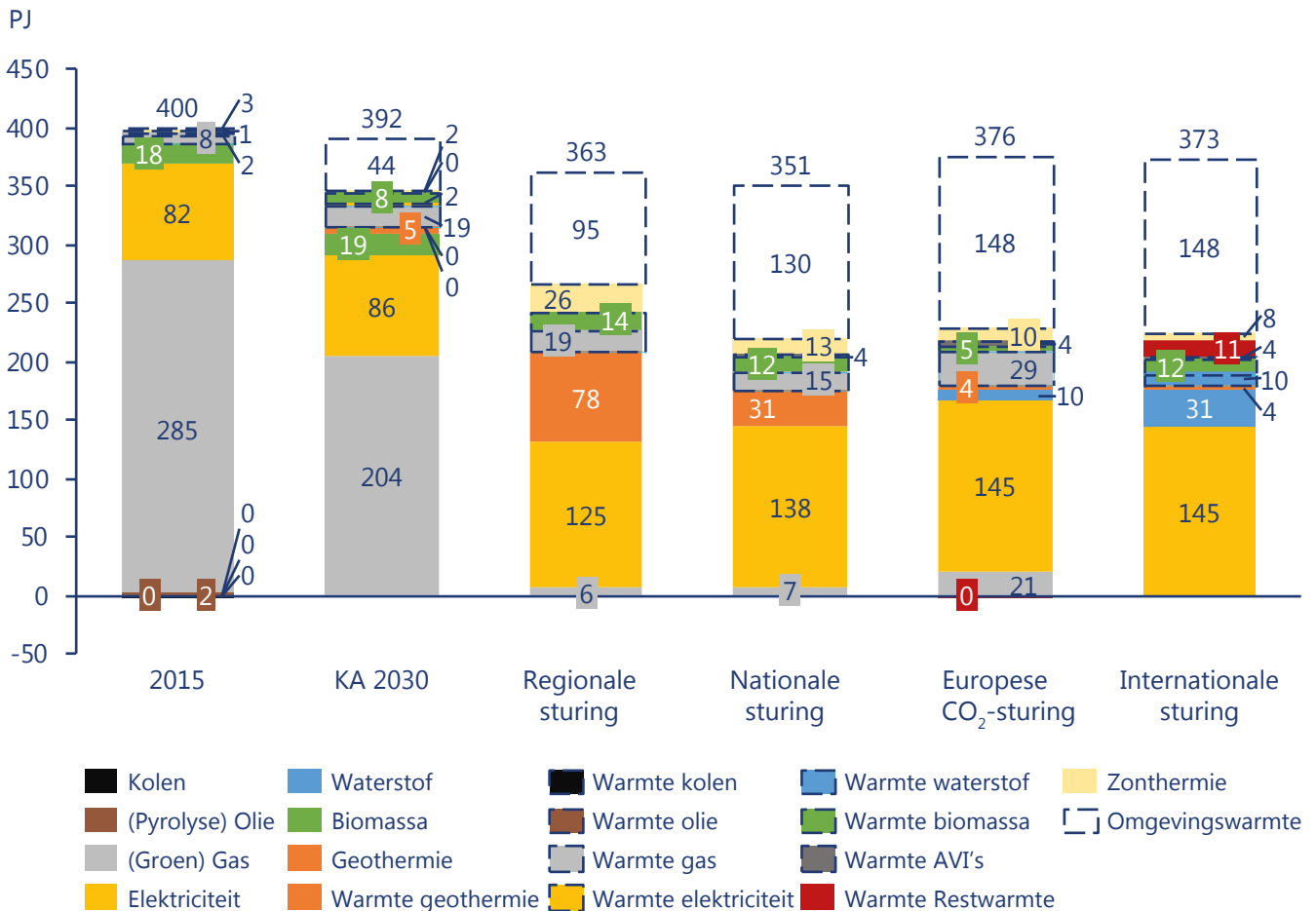
Door het kleine percentage warmtepompen is er in het regionale scenario het minste omgevingswarmte gebruikt. In het nationale scenario stijgt het gebruik van omgevingswarmte, maar door de hogere isolatiegraad is er minder warmte nodig. Hierdoor kennen het Europese en het Internationale scenario het grootste gebruik van omgevingswarmte. In deze scenario's zijn er echter veel hybride warmtepompen die niet altijd gebruik maken van omgevingswarmte, maar van groen gas of waterstof.

18) PBL (2017). Nationale energieverkenning 2017

19) Klimaatakkoord (2018). Ontwerp klimaatakkoord afspraken in sectoren C1 Gebouwde omgeving.



Figuur 32 Finale energievraag huishoudens



Figuur 33 Finale energievraag huishoudens met uitsplitsing warmtenetten (inclusief omgevingswarmte) N.B. verliezen warmtenetten en warmteproductie niet meegenomen

5.1.2 Gebouwen

Tabel 13 Input verdeling warmtevraag gebouwen

| | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|---|---|---|--|---|
| Groei aantal gebouwen | 0,2% per jaar | 0,2% per jaar | 0,2% per jaar | 0,2% per jaar |
| Isolatie | Gemiddeld A/B | Gemiddeld A | Gemiddeld B | Gemiddeld B |
| All electric (Elektrische warmtepomp met of zonder WKO) | 35% | 55% | 25% | 25% |
| Hybride warmtepomp (groen gas) | 20% | 20% | 40% | |
| Hybride warmtepomp (waterstof) | | | 20% | 60% |
| Warmtenet (eventueel ook uitwisselbaar met warmtenet huishoudens) | 45% waarvan: 100% geothermie met piek groen gas/ biomassa | 25% waarvan: 100% geothermie met piek groen gas/ biomassa | 15% waarvan: 73% biomassa, 27% restwarmte AVI's en industrie | 15% waarvan: 7% biomassa, 93% restwarmte AVI's en industrie |
| Zon-PV (percentage van beschikbaar dakoppervlak ETM, combinatie met zonthermie mogelijk) | 100% ¹⁶⁾ | 50% ¹⁶⁾ | 40% | 30% |
| Zonthermisch (percentage van beschikbaar dakoppervlak ETM, combinatie met zon-PV mogelijk) | 100% ¹⁶⁾ | 50% ¹⁶⁾ | 40% | 30% |
| Energiebesparing apparaten ten opzichte van 2015 | 10% | 10% | 10% | 10% |
| Toename aantal elektrische apparaten in huis | 1% per jaar | 1% per jaar | 1% per jaar | 1% per jaar |

Regionale sturing: De combinatie van huishoudens en gebouwen creëert een stabiele afname van warmte in een warmtenet. Gebouwen zullen daarom vaak gebruik maken van warmtenetten. Uiteindelijk zal in 2050 45% van de gebouwen op een warmtenet aangesloten worden. Op plekken waar geen warmtenetten mogelijk zijn zullen all-electric warmtepompen met WKO de grotere gebouwen voorzien van warmte, voor kleinere gebouwen zullen all-electric of hybride warmtepompen gebruikt worden.

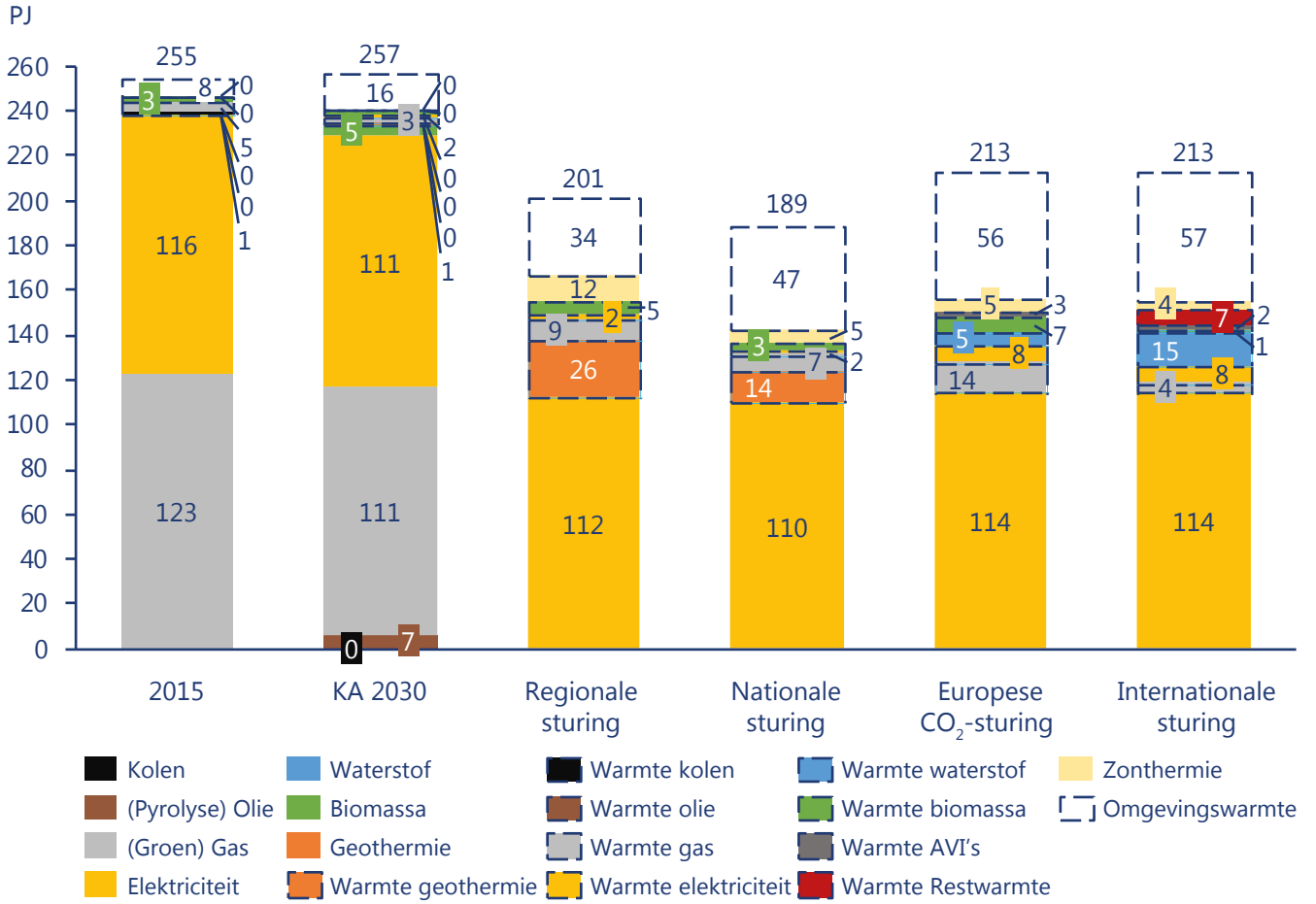
Nationale sturing: Er worden naast de bestaande nog enkele warmtenetten aangelegd maar in mindere mate dan in het regionale sturingsscenario. De nationale overheid stuurt actief op hoge mate van isolatie, hierdoor zal all-electric een groot marktaandeel in Nederland krijgen. Op de plekken waar all-electric of warmtenetten niet mogelijk zijn (denk aan oudere vrijstaande gebouwen in het buitengebied), worden hybride warmtepompen geplaatst.

Europese CO₂-sturing: Het percentage warmtenetten komt overeen met het aantal huishoudens dat op warmtenetten is gezet in dit scenario. Door verhoging van de gasprijs (door middel van een CO₂ taks) worden alternatieven op de huidige verwarming langzaam rendabel. Hierdoor en door de mogelijkheid tot import wordt een hybride warmtepomp als belangrijkste warmtebron beschouwd. Een deel van de

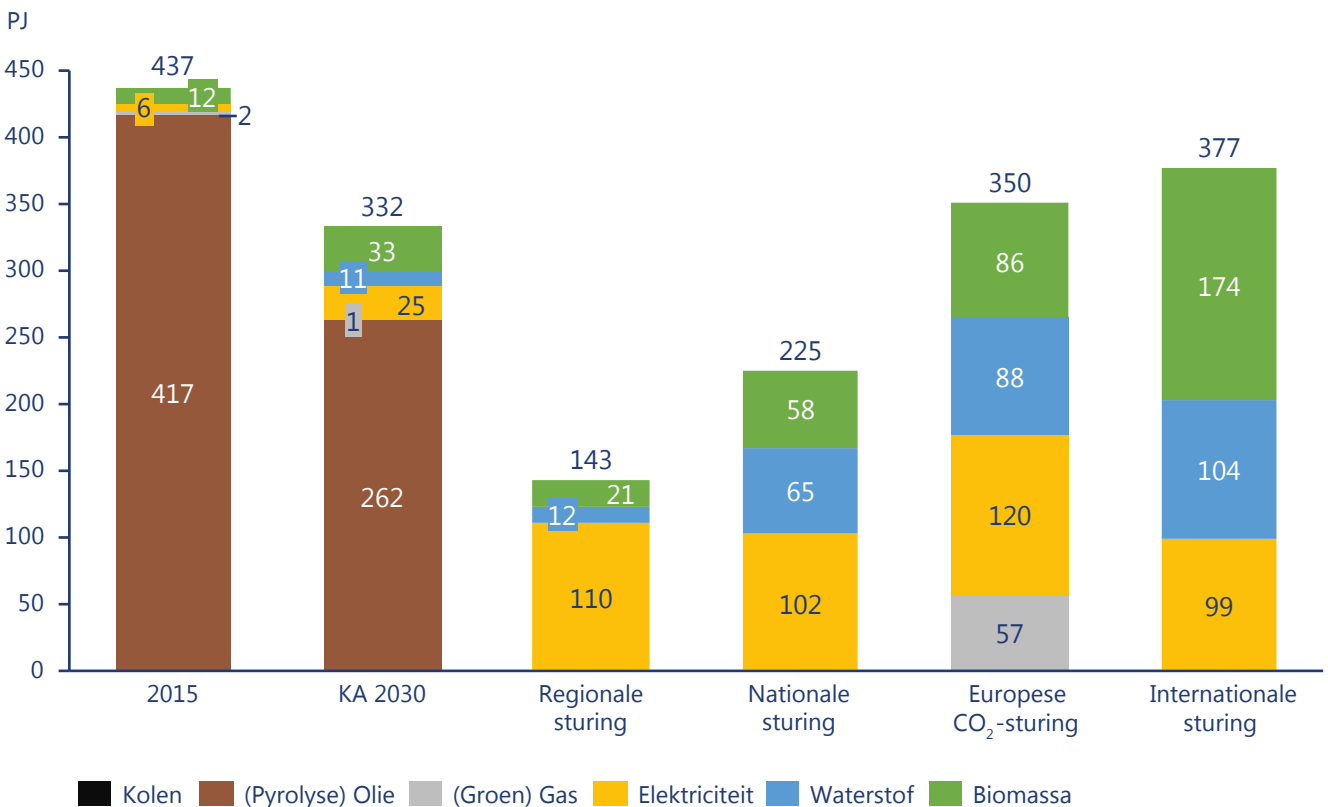
hybride warmtepompen wordt gevoed met waterstof, aangezien waterstof binnen Europa opgewekt kan worden. De meeste hybride warmtepompen zullen met groen gas gevoed worden, aangezien dit eenvoudig ingevoed kan worden in het gasnet. Nieuwere en goed geïsoleerde gebouwen, zullen all-electric verwarmd worden.

Internationale sturing: Het percentage warmtenetten in gebouwen komt overeen met het aantal huishoudens dat op warmtenetten is gezet in dit scenario. Omdat er veel import mogelijk is van waterstof worden hybride warmtepompen erg rendabel ten opzichte van all-electric warmtepompen. Daarnaast is in dit scenario mondiaal veel waterstof beschikbaar. Alleen een deel van de gebouwen, vooral de nieuwbouw (met goede isolatie en vloerverwarming) zal gebruik maken van een all-electric warmtepomp.

In Figuur 34 zien we dat de elektrisch vraag vanuit gebouwen in alle scenario's nagenoeg gelijk is. Deze elektrische vraag bestaat ook voornamelijk uit apparaten en verlichting. De warmtevraag neemt echter af met de isolatie graad. Doordat in Europees en Internationaal de meeste warmtepompen worden gebruikt is het duidelijk dat hier het gebruik van omgevingswarmte het grootst is. Geothermie is duidelijk terug te vinden bij Regionale sturing en Nationale sturing.



Figuur 34 Finale energievraag gebouwen met uitsplitsing warmtenetten (inclusief omgevingswarmte) N.B. verliezen warmtenetten en warmteproductie niet meegenomen in deze warmtenetten zijn ook de hybride technologieën meegenomen.



Figuur 35 Finale energievraag mobiliteit

5.2 Mobiliteit

5.2.1 Personenvervoer

Tabel 14 Input verdeling energievraag particulier vervoer

| | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|--|----------------------------|----------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| Groei gereden kilometers (incl. groei inwoners) | -0,75% per jaar | 0,25% per jaar | 1,25% per jaar | 1,25% per jaar |
| Efficiëntie verbeteringen | 0,2-0,4% per jaar | 0,2-0,4% per jaar | 0,2-0,4% per jaar | 0,2-0,4% per jaar |
| Elektrische-auto's | 100% | 95% | 70% | 50% |
| Waterstof-auto's | | 5% | 30% | 40% |
| Biobrandstof-auto's | | | | 10% |
| Motoren | 100% elektrisch | 100% elektrisch | 100% elektrisch | 100% elektrisch |
| Fietsen | 50% elektrisch 50% mens | 50% elektrisch 50% mens | 50% elektrisch 50% mens | 50% elektrisch 50% mens |

Tabel 15 Input verdeling energievraag openbaar vervoer

| | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|---|-------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| Groei aantal bewegingen (incl. groei inwoners) | -0,75% per jaar | 0,25% per jaar | 1,25% per jaar | 1,25% per jaar |
| Elektrisch | 100% (trein, tram, bus) | 100% (trein, tram) 75% (bus) | 100% (trein, tram) 70% (bus) | 100% (trein tram) 50% (bus) |
| Waterstof | | 25% (bus) | 30% (bus) | 40% (bus) |
| Biobrandstoffen | | | | 10% (bus) |

Regionale sturing: Gemeenten stellen milieuzones in en maken daarnaast parkeergelegenheid en laad-infrastructuur beschikbaar voor elektrisch vervoer. Bij aanbesteding van de concessies voor regionaal vervoer stellen gemeenten de eis voor 100% elektrisch vervoer. Burgers willen graag overstappen op schonere manieren van transport en schaffen daardoor elektrische auto's aan. In 2050 is al het personenvervoer daardoor elektrisch.

Nationale sturing: De nationale overheid stimuleert elektrische auto's. Voor biobrandstoffen is te weinig biomassa beschikbaar in Nederland om een relevant marktaandeel mogelijk te maken, in de jaren naar 2050 toe wordt het gebruik van biobrandstof in Nederland uitgefaseerd. Hierdoor zijn burgers aangewezen op elektrische voertuigen. Voor langere afstanden is waterstof een goed alternatief voor elektriciteit. Lease maatschappijen bieden daarom waterstof auto's aan en busmaatschappijen kiezen voor een deel voor waterstof zodat lange afstanden gemakkelijk te maken zijn en zodat ze minder last hebben van lange laadtijden bij drukke routes. Deze waterstof wordt in Nederland geproduceerd uit overschotten elektriciteit uit de grote windparken die de Nederlandse overheid heeft laten aanleggen op de Noordzee.

Europese CO₂-Sturing: De Europese CO₂-belasting zorgt er voor dat veel inwoners willen overstappen naar alternatieven voor hun benzine en diesel auto's. Autofabrikanten die de slag hebben gemist om het elektrisch vervoer gaan alternatieve modellen produceren op waterstof. Door de toename van de CO₂ prijs verandert de keuze van de consument langzaam naar de meest groene technologie. Elektriciteit en waterstof concurreren hierbij met elkaar. Goedkope waterstof maakt het aantrekkelijk om waterstof auto's aan te schaffen.

Internationale sturing: Het merendeel van Nederland rijdt elektrisch. Door de aanwezigheid van zowel waterstof en biobrandstoffen (uit import) zal er ook plaats zijn voor openbaar vervoer op waterstof en biobrandstoffen. De verwachting is dat waterstof aantrekkelijker wordt voor openbaar vervoer dan biobrandstoffen, omdat er meer mogelijkheden zijn om te tanken is de energiedichtheid minder belangrijk voor personenvervoer. Daarom zal een groter deel van het personenvervoer op waterstof rijden dan op biobrandstoffen. Voor langere trajecten zullen biobrandstof bussen worden ingezet.

De voertuigen in het regionale en nationale scenario zijn nog niet geheel autonoom. De voertuigen in het EU en internationale scenario zijn dit wel. Dit heeft met name consequenties voor de plaats en het tijdstip waar deze voertuigen laden/tanken.

Motoren zullen in alle scenario's elektrisch rijden, aangezien benzine uitgefaseerd wordt. Mogelijke andere opties zoals motoren op waterstof of biobrandstoffen hebben wij hier niet meegenomen en zullen op zichzelf een marginale invloed hebben op de uitkomsten.

De elektrische fiets maakt in alle scenario's 50% uit van de fietsers. Vooral voor langere fietsafstanden is de elektrische fiets een geschikt vervoersmiddel om de reistijd beperkt te houden.



5.2.2 Vrachtvervoer

Tabel 16 input verdeling energievraag vrachtvervoer trucks

| | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|----------------------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Groei gereden kilometers | -1% per jaar | 0% per jaar | 1% per jaar | 1% per jaar |
| Efficiëntie verbeteringen | 0,2-0,4% per jaar | 0,2-0,4% per jaar | 0,2-0,4% per jaar | 0,2-0,4% per jaar |
| Elektrisch | 75% | 25% | 25% | 25% |
| Waterstof | 15% | 50% | 25% | 25% |
| Groen gas | 10% | | 25% | |
| Biobrandstoffen | | 25% | 25% | 50% |

Regionale sturing: Gemeenten stellen strikte uitstootvrije zones in, waardoor vrachtvervoer binnen veel gemeenten volledig elektrisch zal worden. Ook wordt in het Regionale sturing scenario meer gebruik gemaakt van lokale producten, waardoor de range van elektrische vrachtwagens een minder grote belemmering vormt. Hierdoor wordt er verwacht dat het grootste gedeelte van het landelijk vervoer van EV gebruik zal maken. De trend dat vrachtvervoerders overstappen op elektrische aandrijving²⁰⁾, zet hierdoor verder door en in 2050 is 75% van het vrachtvervoer elektrisch. Voor de langere ritten binnen Nederland, voldoet de range van een elektrisch aangedreven vrachtwagen vaak niet, of zijn deze ook in 2050 te kostbaar in vergelijking met waterstof en groen gas. Hierdoor zal er een percentage van het vrachtvervoer op lokaal geproduceerd waterstof en groengas rijden. Het kost Nederland veel ruimte om zelf biobrandstoffen te produceren, daarom is het hoogst onwaarschijnlijk dat er in een scenario dat regionaal gestuurd wordt veel biobrandstoffen voor zullen komen.

Nationale sturing: In het nationale scenario zal vervoer op waterstof de meest dominante vervoersoptie zijn. Waterstof wordt grootschalig gestimuleerd als energiedrager, binnen de transportsector is dit een goede optie om lange afstanden af te leggen. Het overige vrachtvervoer rijdt op elektriciteit en biobrandstoffen. Elektrische trucks hebben de voorkeur binnen steden omdat deze weinig geluid produceren. Biobrandstoffen zijn vooral interessant voor vrachtwagens die ook over de grens ingezet moeten worden, waar zij biobrandstoffen kunnen tanken.

Europese CO₂-Sturing: Richting 2050 wordt Europees de CO₂ prijs langzaam verhoogt. Het vrachtvervoer zal in verschillende

situaties overgaan op verschillende brandstoffen. Ook hybride vrachtwagens met naast een elektromotor ook groen gas of biobrandstoffen zorgen dat vervoerders kunnen omgaan met de stijgende CO₂-prijs. Er is echter niet één doorslaggevende techniek en het wagenpark van de vrachtvervoerders is een mix van verschillende aandrijftechnieken. Dit is te zien in het gelijke marktaandeel van alle technieken.

Internationale sturing: Biobrandstoffen worden internationaal de norm voor vrachtvervoer, omdat de energiedichtheid van biobrandstoffen gelijk is aan de huidige fossiele brandstoffen. Hierdoor stapt ook het Nederlandse vrachtvervoer in hoge mate over op deze brandstoffen. Waterstof en elektriciteit vullen de resterende 50% in. Dit zijn voornamelijk vrachtwagens die in stedelijk gebied rijden, waar de uitstoot en fijnstof minimaal moeten zijn, de afstanden korter en de mogelijkheden om te tanken groter zijn.

De voertuigen in het regionale en nationale scenario zijn nog niet geheel autonoom. De voertuigen in het EU en internationale scenario zijn dit wel. Dit heeft met name consequenties voor de plaats en het tijdstip waar deze voertuigen laden/tanken.

Treinen zullen in alle scenario's elektrisch rijden, aangezien diesel uitgefaseerd wordt. Mogelijke andere opties zoals treinen op waterstof vallen buiten scope van deze studie en zullen op zichzelf een marginale invloed hebben op de uitkomsten.

Binnenvaartschepen zullen in alle scenario's op bio-LNG overgaan, aangezien diesel uitgefaseerd wordt. Mogelijke andere opties zoals binnenvaartschepen op waterstof of elektrisch vallen buiten scope van deze studie en zullen op zichzelf een marginale invloed hebben op de nationale uitkomsten. Uiteraard zijn de implicaties voor de binnenvaart en lokaal in havens wel groot.

20) Nieuwsbladtransport (s.d.). Elektrisch wegtransport: doorbraak staat voor de deur.

Tabel 17 input verdeling energievraag vrachtovervoer treinen

| | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|-------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Elektrisch* | 100% | 100% | 100% | 100% |

Tabel 18 input verdeling energievraag vrachtovervoer binnenvaart

| | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|----------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Bio-LNG* | 100% | 100% | 100% | 100% |

Tabel 19 Internationale lucht- & scheepvaart

| | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|--|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Omvang lucht & scheepvaart (tov 2015) | 78% | 107% | 145% | 145% |
| Omvang luchtvaart (PJ) | 125 | 170 | 232 | 315 |
| Omvang scheepvaart (PJ) | 398 | 543 | 740 | 740 |
| Totaal (PJ) | 523 | 714 | 972 | 1055 |
| Productie synthetische brandstoffen (PJ) | 113 | 188 | 110 | 100 |
| Import van duurzame brandstoffen voor internationaal transport (PJ) | 410 | 526 | 862 | 954 |

5.2.3 Internationaal transport

Het internationale transport is een sector die vaak niet wordt meegenomen in landelijke energiestudies, aangezien deze sector niet onder het klimaatverdrag van Parijs vallen. In deze studie is ervoor gekozen om deze sector wel mee te nemen. Alle brandstof die in Nederland wordt geleverd aan het internationaal transport, nemen we hieronder mee. Er wordt vanuit gegaan dat de luchtvaart jaarlijks groeit met -1%, 0%, 1%, 2% en de scheepvaart met -1% 0%, 1%, 1% voor respectievelijk de scenario's Regionale sturing, Nationale sturing, Europese CO₂ sturing en Internationale sturing (zie Tabel 19). Hierbij nemen we een gemiddelde groei van de afgelopen vier jaar van 1,6% per jaar mee.

Regionale sturing: De krimp in het regionale scenario is te wijten aan de vliegschaamte en de voorkeur voor lokaal geproduceerde producten.

Nationale sturing: In het nationale scenario blijft de omvang van internationale scheep en luchtvaart ongeveer gelijk. Dit komt met name doordat de Nederlandse overheid de groei van de (lucht)havens aan banden legt, waardoor de groei geremd wordt.

Europese CO₂-sturing: In het Europese scenario is er stijging van 1% per jaar, er wordt meer gereisd en vervoerd, wel wordt dit enigszins afgeremd door de Europese CO₂-belasting.

Internationale sturing: In het internationale scenario groeit de luchtvaart met 2% per jaar en scheepvaart groeit met 1% per jaar. Dit komt met name door verdere mondialisering (meer zakelijke en vakantievluchten) en de afhankelijkheid van buitenlandse producten, waaronder bijvoorbeeld biomassa dat in grote schepen aangevoerd moet worden.

Voor de verduurzaming van internationale lucht- en scheepvaart zijn er verschillende 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 dan minder uit wat die brandstoffen precies zijn).

Omdat er nog veel onduidelijk is over welke route het meest efficiënt is, is er in deze studie onderscheid gemaakt tussen twee routes: eigenproductie (synthetisch) en het importeren van brandstoffen (biogeen of synthetisch).

Er is gekeken hoeveel wind-op-zee extra kan worden geplaatst in het Nationale sturing scenario tot de maximale 72 GW voor de Nederlandse Noordzee is bereikt. Dit is 20,5 GW. Dit betekent dat er 40% extra vermogen aan wind-op-zee geplaatst kan worden voor de productie van energiedragers voor de lucht- en scheepvaart. Dit percentage is doorgetrokken naar de andere scenario's. Dit betekent dat in ieder scenario het totale opgestelde vermogen aan wind-op-zee wordt vergroot met 40% alleen voor de productie van synthetische brandstoffen voor internationale luchtvaart.

Er is in het midden gelaten op welke manier deze energiedragers gebruikt worden voor de lucht- of scheepvaart (ofwel voor de productie van brandstoffen of directe elektrische inzet). Wel is er in de berekening voor de eigenproductie rekening gehouden met de conversie van elektriciteit naar waterstof. Verdere conversieverliezen in de productie van synthetische brandstoffen middels de Fischer-Tropschreactie zijn niet meegenomen. In theorie zou er meer eigenproductie plaats kunnen vinden dan genoemd in Tabel 19, wanneer alle lucht- en scheepvaart elektrisch zou plaatsvinden omdat er dan geen sprake is van conversieverliezen.

Ondanks het extra vermogen aan wind-op-zee is er nog steeds vraag naar import van duurzame brandstoffen voor de internationale lucht- en scheepvaart. De verdeling productie en import voor de internationale lucht- en scheepvaart is weergegeven in Tabel 19.

In Tabel 17 is te zien dat we in elk scenario genoodzaakt zijn een grote hoeveelheid aan duurzame brandstoffen te importeren. Dit is te verklaren door de relatief grote internationale transportsector ten opzichte van de omvang van Nederland en bijbehorend binnenlands duurzaam potentieel. Uit deze data blijkt dat het voor Nederland onmogelijk is om het internationale transport zelf helemaal te verduurzamen.

Niet expliciet meegenomen is de productie van biobrandstoffen in Nederland, dit zou mogelijk naast synthetische productie van brandstoffen kunnen bestaan. Dit zal dan wel onder bepaalde voorwaarde zijn, bijvoorbeeld dat de productie van biobrandstoffen kan concurreren met andere vraag naar biomassa. Daarnaast hebben we niet verder gekeken naar de elektrische lucht- en scheepvaart. Hierin worden vorderingen gemaakt, maar er is nu nog niet te voorspellen hoe dit zal toenemen. De huidige beste beschikbare technologie^{21),22)} en een veronderstelde verbetering van de accuenergiedichtheid tot 2050 biedt mogelijkheid voor elektrificatie van korte vluchten. Echter zal de elektrische luchtvaart waarschijnlijk beperkt blijven 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.

21) Eviation (2019). Eviation Alice

22) Yara Birkeland (2019). Yara Birkeland presskit.

5.3 Industrie

De industrie is opgedeeld in tien sectoren. Deze sectoren zijn gespecificeerd in Tabel 20. In de industrie wordt per scenario een andere groei of krimp verondersteld. In het regionale scenario wordt ervan uit gegaan dat de industrie krimpt met 1%. In het nationale scenario stagneert de groei. Hierdoor blijft de toekomstige omvang gelijk aan de huidige omvang. In het Europese en internationale scenario wordt er een groei van 1% aangenomen.

Het ETM rekent echter niet vanaf 2019 maar 2015. Daarom moet eerst de groei van 2015 tot 2019 meegenomen worden. Vanaf 2015 tot 2019 is er volgens CBS een gemiddelde groei van 1,6% per jaar aanwezig²³⁾. Door deze groei aan te nemen voor vier jaar en daarbij de groeiafname tot 2050 te voegen (overige 31 jaar) is de omvang van de industrie ten opzichte van 2015 te berekenen. Dit is te zien in de volgende formules.

| | |
|--|-------------------------------|
| Regionale sturing | $1,016^4 * 0,99^{31} = 78\%$ |
| Nationale sturing | $1,016^4 * 1,00^{31} = 107\%$ |
| Europese CO ₂ /Internationale sturing | $1,0164 * 1,01^{31} = 145\%$ |

Ten opzichte van 2019 komt dit uit op de volgende cijfers.

| | |
|--|---------------------|
| Regionale sturing | $0,99^{31} = 73\%$ |
| Nationale sturing | $1,00^{31} = 100\%$ |
| Europese CO ₂ /Internationale sturing | $1,01^{31} = 136\%$ |

Voor de raffinage-industrie, kunstmestindustrie en ICT worden andere getallen aangenomen. Onderbouwing hiervan wordt uitgelegd bij het respectievelijke hoofdstuk.

Op basis van de groeipercentages genoemd in Tabel 20 is de finale energetische en non-energetische vraag van de industrie berekend. De finale energetische vraag wordt weergegeven in Figuur 36. Hierin is te zien dat de finale energetische vraag van de industrie afneemt in bijna alle scenario's. In het regionale scenario is dit te verklaren door de krimp van de industrie. Echter in het Europese en internationale scenario wordt er stevige groei verondersteld. Door verbetering van de procesefficiëntie, maar ook de inzet van andere energiedragers, wordt de vraag naar energie gedempt. In alle scenario's is elektrificatie duidelijk zichtbaar, met daarnaast inzet van waterstof.

Naast energetische vraag worden ook energiedragers gevraagd voor non-energetische doeleinden.

5.3.1 Staal

Uit de dialoog met de staalindustrie bleek dat er matige groei verwacht wordt. Zo wordt er een mindere vraag naar staal verwacht vanuit de automotieve industrie. Deze reductie wordt echter gecompenseerd door het toenemende gebruik van staal in windturbines en energieneutrale woningen. Daarom wordt er voor de groei in de staalindustrie een range genomen van - 1% tot + 1% per jaar krimp of groei afhankelijk van het scenario.

Daarnaast is de verwachting dat er veel CCS toegepast zal worden. Voor de infrastructuur betekent dit dat er CO₂-leidingen naar de gasvelden in de Noordzee moeten worden aangelegd en een intensiever gebruik van de huidige CO₂-infrastructuur. Naast het toepassen van CCS is Tata steel bezig met het onderzoeken van deze mogelijkheden om de koolstofmonoxide die nu als verbrand wordt in de Velserscentrale nuttiger in te zetten. Dit wordt verder toegelicht in de regionalisering van de industriecluster in sectie Noordzeekanaalgebied (NZKG) 6.6.5 .

Regionale sturing: Met een krimp van 1% per jaar zullen de hoogovens naar alle waarschijnlijkheid buiten gebruik worden gesteld. Deze zijn niet meer nodig om aan de vraag te kunnen voldoen c.q. kunnen niet rendabel blijven draaien. Een Hlsarnaoven zal worden gebruikt, in combinatie met een Electric Arc Furnace (EAF). Als gevolg van de overstap naar Hlsarna en Electric Arc Furnaces zal meer gerecycled staal geproduceerd worden. Gerecycled staal wordt geproduceerd door "scrap staal" als grondstof in te zetten, wat zowel in de Hlsarna als in de EAF kan worden verwerkt.

Nationale sturing: De omvang van de staalindustrie blijft in dit scenario gelijk aan de huidige omvang. Volgens de staalindustrie is het in een dergelijke situatie onmogelijk om deze omvang te behouden met uitsluitend nieuwe productietechnieken. Dit betekent dat één van de huidige hoogovens in gebruik zal moeten blijven. Deze hoogoven zal uiteraard wel uitgerust worden met een CCS-installatie. Omdat er meer gerecycled staal geproduceerd wordt met kleinere Hlsarna- en EAF-installaties kan de andere hoogoven gesloten worden.

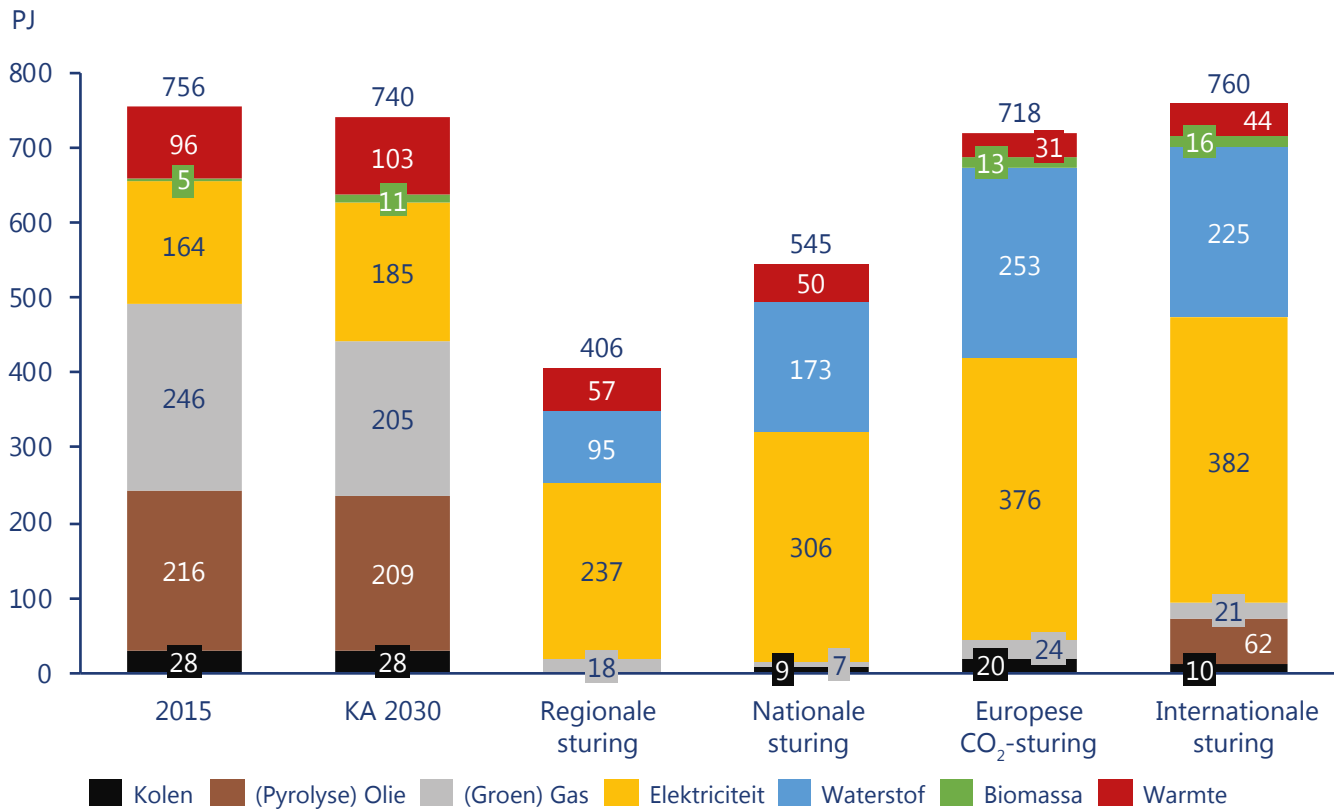
Europese CO₂-sturing: Met een groei van 1% per jaar zal de staalindustrie geen hoogovens sluiten, omdat er anders onvoldoende productiecapaciteit beschikbaar is. De twee bestaande hoogovens zullen daardoor operationeel blijven. Om de CO₂-emissie zo sterk mogelijk te reduceren zal CCS toegepast worden. Gerecycled staal zal in de EAF verwerkt worden zoals in de huidige situatie. Dit percentage zal echter groeien ten opzichte van nu.

23) Statline (2020) Energiebalans; aanbod en verbruik per sector.

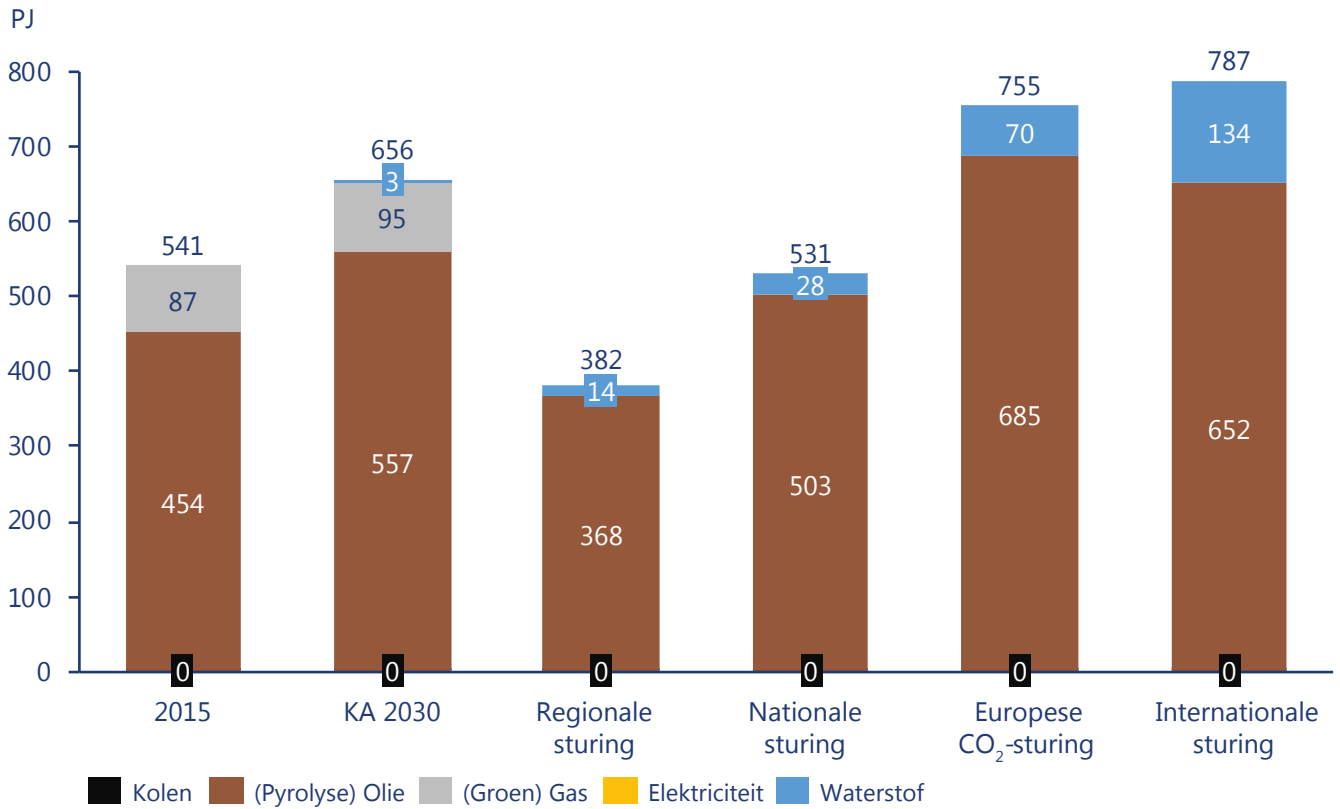
Tabel 20 Omvang industrie ten opzichte van 2015 (tevens ETM inputs)

| Industrie omvang | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ sturing | Internationale sturing |
|----------------------------|-------------------|-------------------|----------------------------------|------------------------|
| Staal | 78% | 107% | 145% | 145% |
| Aluminium | 78% | 107% | 145% | 145% |
| Overig metaal* | 78% | 107% | 145% | 145% |
| Totale Raffinage | 19% | 44% | 45% | 54% |
| Raffinage | 14% | 36% | 40% | 50% |
| "E-refinery" | 5% | 8% | 5% | 4% |
| Chemische industrie | 78% | 107% | 145% | 145% |
| Kunstmest | 20% | 40% | 100% | 145% |
| ICT | 580% | 580% | 580% | 580% |
| Voeding | 78% | 107% | 145% | 145% |
| Papier | 78% | 107% | 145% | 145% |
| Overige industrie* | 78% | 107% | 145% | 145% |

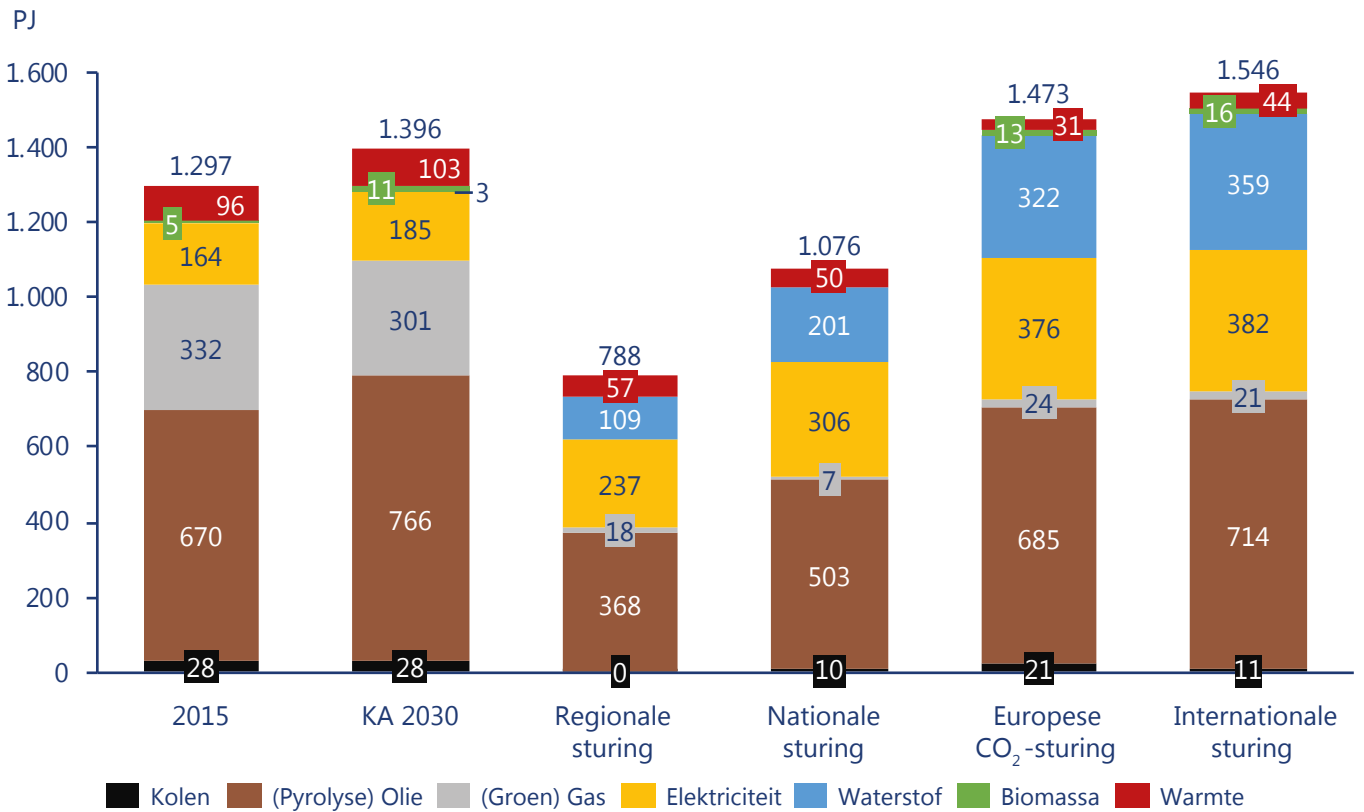
* De overige metaalsector wordt in de modellering bij de overige industrie meegenomen. Hierdoor wijkt de waarde af met de waarde die in het ETM te vinden is.



Figuur 36 Finale energievraag industrie (energetisch)



Figuur 37 Finale energievraag industrie (non-energetisch)



Figuur 38 Finale energievraag industrie (energetisch + non-energetisch)

Internationale sturing: In een internationaal scenario zal er één hoogoven in gebruik worden gehouden om staal te produceren, met daarnaast een HIsarna oven. Gerecycled staal zal in de EAF verwerkt worden. Voor dit scenario voorzien wij een mogelijk alternatieve invulling via HBI (Hot Briquetted Iron) dat elders in de wereld geproduceerd kan worden. Deze HBI wordt vervolgens geïmporteerd en in een HIsarna gebruikt om staal van te maken. Hierdoor zou het gebruik van kolen door Tata Steel in IJmuiden sterk verminderen. In de doorrekening van de scenario's is wel nog gekozen voor staalproductie in Nederland.

5.3.2 Aluminium

Aluminiumproductie is na staal de grootste energieverbruiker in de metallurgische industrie. De omvang van de aluminiumsector neemt met -1% tot +1% per jaar toe, afhankelijk van het scenario. De huidige manier van aluminiumproductie vindt plaats met behulp van elektrolyse en voor een klein deel via recycling met een smeltoven. In de toekomst zal er gebruik worden gemaakt van een efficiëntere manier van elektrolyse (BAT = Best Available Technology) en een groter deel recycling.

Regionale sturing: De aluminiumindustrie krimpt met 1% per jaar. Door het circulaire karakter van dit scenario wordt sterk ingezet op de productie van gerecycled aluminium. In dit scenario wordt daarom sterk ingezet op het gebruik van smeltovens. Voor de productie van primair aluminium zal elektrolyse-BAT gebruikt worden.

Nationale sturing: Voor het nationale scenario wordt geldt eenzelfde redenering als het regionale scenario. De omvang van de aluminiumindustrie krimpt echter niet, maar blijft gelijk aan het huidige niveau.

Europese CO₂-sturing: In dit scenario wordt er een groei verondersteld van 1% per jaar voor de aluminiumindustrie. Als gevolg hiervan neemt de vraag naar “scrap”-aluminium toe. Echter, de beschikbaarheid hiervan is beperkt, waardoor er meer primair aluminium geproduceerd zal worden door middel van elektrolyse. Procentueel vindt er hierdoor meer elektrolyse plaats dan in het regionale en nationale scenario.

Internationale sturing: Voor dit scenario geldt eenzelfde redenering als het Europese scenario.

Figuur 39 geeft de finale energetische vraag van de metallurgische industrie weer (N.B. de overige metaalindustrie wordt in de uitwerking bij de overige industrie meegenomen). Binnen de modellering van het Energietransitiemodel gebeurt in de staalindustrie echter iets bijzonders. Er wordt in de staalindustrie namelijk elektriciteit geproduceerd voor eigen gebruik, een groot deel van het kolenverbruik wordt daarom aan de elektriciteitssector toegekend. De energiedragers die benodigd zijn voor de opwek van deze elektriciteit worden niet weergegeven door Figuur 39. In plaats daarvan wordt warmtevraag weergegeven in Figuur 39. De energiedragers die benodigd zijn voor de productie van deze warmte bestemd voor de staalindustrie vallen onder de energiesector.

De warmtevraag neemt sterk toe in alle scenario's ten opzichte van de huidige situatie. Deze warmtevraag wordt ingevuld door warmte afkomstig van de staalindustrie zelf. Het non-energetische verbruik is daarmee in het energietransitiemodel dan ook nul.

Tabel 21 Omvang en verdeling staalindustrie nationale scenario's

| | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|----------------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Omvang t.o.v. heden | 73% | 100% | 136% | 136% |
| Hoogoven (+ CCS) | 0% | 50% | 80% | 40% |
| HIsarna (+ CCS) | 50% | 25% | 0% | 40% |
| EAF | 50% | 25% | 20% | 20% |

Tabel 22 Omvang en verdeling aluminium nationale scenario's

| | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|------------------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Omvang t.o.v. heden | 73% | 100% | 136% | 136% |
| Elektrolysis BAT | 50% | 50% | 75% | 75% |
| Smeltoven (recycling) | 50% | 50% | 25% | 25% |

5.3.3 Overige metaalindustrie

Binnen de overige metaalindustrie vallen de secundaire staalproductie (productie van buizen en pijpen bijvoorbeeld), (ijzer)gieterijen en non-ferro basismetaal (exclusief primair aluminium)²⁴⁾. Deze sectoren hebben allen hun eigen uitdaging om de CO₂-uitstoot te verlagen. Secundaire staalproductie vraagt voornamelijk energie voor het verwarmen van staal en het mechanische bewerken. De mechanische processen zijn vaak al elektrisch, de verhittingsprocessen kunnen voor een deel geëlektrificeerd worden of op basis van verbranding van waterstof CO₂-neutraal gemaakt worden. Gieterijen gebruiken nu nog vaak koepelovens voor de verwarming van het ijzer en het toevoegen van koolstof. Enerzijds is elektrificatie van de gieterijen mogelijk, anderzijds is het ook mogelijk om de verhitting door middel van waterstof te bewerkstelligen. De non-ferro basismetaalsector kent voornamelijk een grote energievraag vanuit de zinkproductie via elektrolyse. Overige processen zijn verhitten en smelten van het metaal en het mechanisch bewerken van het metaal.

De overige metaalindustrie heeft enerzijds mogelijkheid om verder te elektrificeren om verhittingsprocessen CO₂-neutraal te krijgen. Anderzijds liggen er juist ook mogelijkheden om de verhittingsprocessen om te zetten op waterstof.

Regionale sturing: Door samenwerking met lokale overheden stapt een groot deel van deze sector over op elektrische processen, aangezien deze geen lokale uitstoot opleveren. Voor enkele bedrijven blijkt de business case voor waterstof als brandstof net iets gunstiger te zijn en zij stappen daarom over op waterstof.

Nationale sturing: De elektrificatie van de overige metaalindustrie start door landelijk beleid van de overheid om zoveel mogelijk fossiele brandstoffen te vermijden. Voor enkele bedrijven blijkt de business case voor waterstof als brandstof net iets gunstiger te zijn en zij stappen daarom over op nationaal geproduceerde waterstof.

Europese CO₂-sturing: Fossiele installaties zoals koepelovens zullen pas op het laatste moment omgezet worden naar een CO₂-vrije brandstof door de oplopende CO₂-prijs, waterstof biedt hiervoor uitkomst. Elektrificatie van overige processen en ruimteverwarming wordt in de jaren daarvoor al gedaan.

Internationale sturing: Door een grote mogelijkheid om waterstof te importeren stapt een deel van de sector over op processen op waterstof. Elektrificatie komt daarna om de rest van de processen fossielvrij te maken.

5.3.4 Raffinage

De raffinagesector is een veel omvattende sector die in deze studie opgedeeld is in vier delen. Deze verdeling is gemaakt omdat de ontwikkelingen van de raffinage-industrie in elk van de scenario's hiermee beter te begrijpen zijn. De verdeling staat hieronder weergegeven.

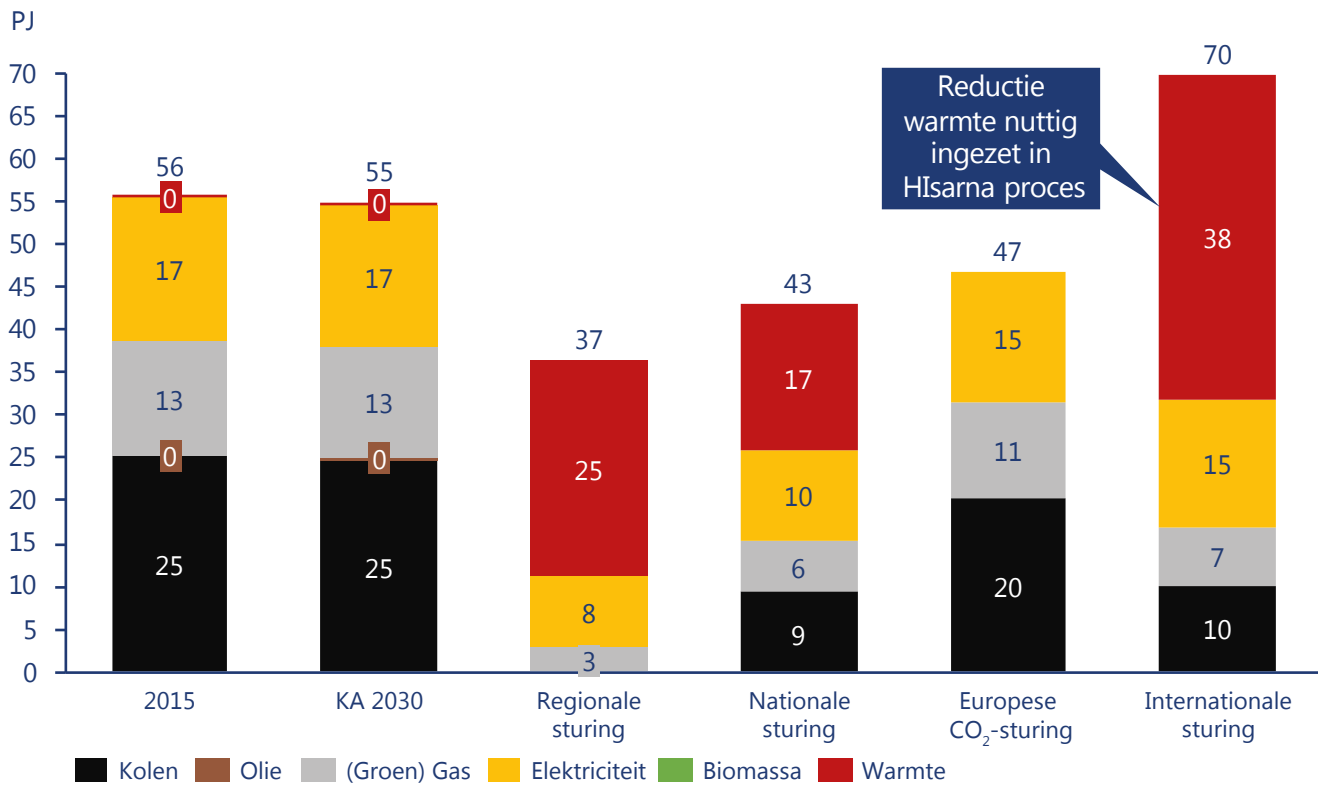
- Raffinage voor export (omvat vrijwel alle raffinageproducten)
- Raffinage voor nationaal transport (benzine, diesel, LPG)
- Raffinage voor internationaal transport (bunkers en kerosine)
- Raffinage van halffabricaten bestemd voor de chemische industrie.

De raffinage industrie groeit of krimpt niet volgens de algemeen geldende percentages. Dit komt omdat de transitie naar een CO₂-neutraal Nederland veel impact heeft op deze industrie. In alle scenario's ondervindt de raffinage-industrie krimp, welke het sterkst is in het regionale scenario en geleidelijk aan kleiner wordt naarmate het scenario internationaler wordt. Vanwege de krimp verwachten we dat de meest efficiënte en meest technologisch geavanceerde raffinaderijen over zullen blijven.

De krimp van de sector is minder heftig dan uit de tabel hierboven blijkt. Dit komt doordat er naast de "klassieke" raffinage een "E-refinery" ontstaat die synthetische brandstoffen maakt via een Fischer-Tropschproces. We tonen de omvang van deze sector bij internationale lucht- en scheepvaart.

Regionale sturing: het regionale scenario komt de raffinage-industrie niet ten goede. Mede door de hoge mate van zelfvoorziening en de transitie naar een volledig duurzaam energiesysteem is er slechts vraag naar geraffineerde halffabricaten bestemd voor de chemische industrie. Deze halffabricaten mogen niet fossiel van aard zijn. Door het hoge streven naar circulariteit bestaan deze geraffineerde producten voornamelijk uit pyrolyseolie uit gerecyclede plastics (dit betekent wel een behoefte aan import van plastics/pyrolyseolie). In het regionale scenario zal er geen export meer plaatsvinden. Daarnaast verduurzaamt het nationale transport in het regionale en nationale scenario op een dergelijke wijze, dat ook hier de raffinagevraag verdwijnt. Dit betekent dat de raffinagesector zoals hier gemodelleerd alleen bestaat voor halffabricaten voor de chemische industrie. Dit is de reden dat de raffinage in dit scenario maar een

24) Berenschot (2019). Routekaart voor CO₂-reductie in de metallurgische industrie



Figuur 39 Finale energievraag metallurgische industrie (energetisch) N.B. Overige metaalindustrie wordt meegenomen bij overige industrie

Tabel 23 Omvang en verdeling overige metaalindustrie nationale scenario's

| | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|--|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Omvang t.o.v. heden | 73% | 100% | 136% | 136% |
| Elektrolyse, elektrische verwarmen en elektro-mechanische bewerking | 80% | 80% | 70% | 70% |
| Waterstof verhitting | 20% | 20% | 30% | 30% |

Tabel 24 Omvang en verdeling raffinage nationale scenario's

| | | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|------------------------------------|--------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Omvang t.o.v. heden | | 14% | 36,4% | 40% | 50% |
| Proces (Energetisch) | Waterstof | 100% | 100% | 80% | 80% |
| | Biomassa | 0% | 0% | 20% | 20% |
| Feedstock (Non-energetisch) | Aardolie | 0% | 0% | 100% | 100% |
| | Waterstof | 0% | 0% | 0% | 0% |
| | Pyrolyseolie | 100% | 100% | 0% | 0% |

omvang heeft van 14% exclusief E-refinery van de huidige omvang. De energetische vraag in dit scenario wordt volledig ingevuld door waterstof.

Nationale sturing: In dit scenario is wel ruimte voor export. De omvang raffinage exclusief E-refinery is 36,4% van de huidige omvang. Hiervan is ongeveer de helft bestemd voor de Nederlandse chemische industrie. Het overige deel wordt geëxporteerd. Ook in het nationale scenario wordt circulariteit nagestreefd. Dit betekent dat de feedstock volledig bestaat uit pyrolyseolie. Doordat de omvang van raffinage-industrie groter is dan in het nationale scenario is er te weinig kunststof voorhanden om te voorzien in alle pyrolyseolie. Door middel van import kan het tekort aangevuld worden. De energetische vraag in dit scenario wordt volledig ingevuld door waterstof.

Europese CO₂-sturing: Ook in dit scenario wordt er geëxporteerd. De omvang van de raffinage-industrie exclusief E-refinery is gelijk aan 40% van de huidige omvang. Het Europese scenario is niet circulair georiënteerd, waardoor de feedstock bestaat uit fossiele energiedragers. De energetische vraag in dit scenario wordt grotendeels ingevuld door waterstof, het overige deel door biomassa.

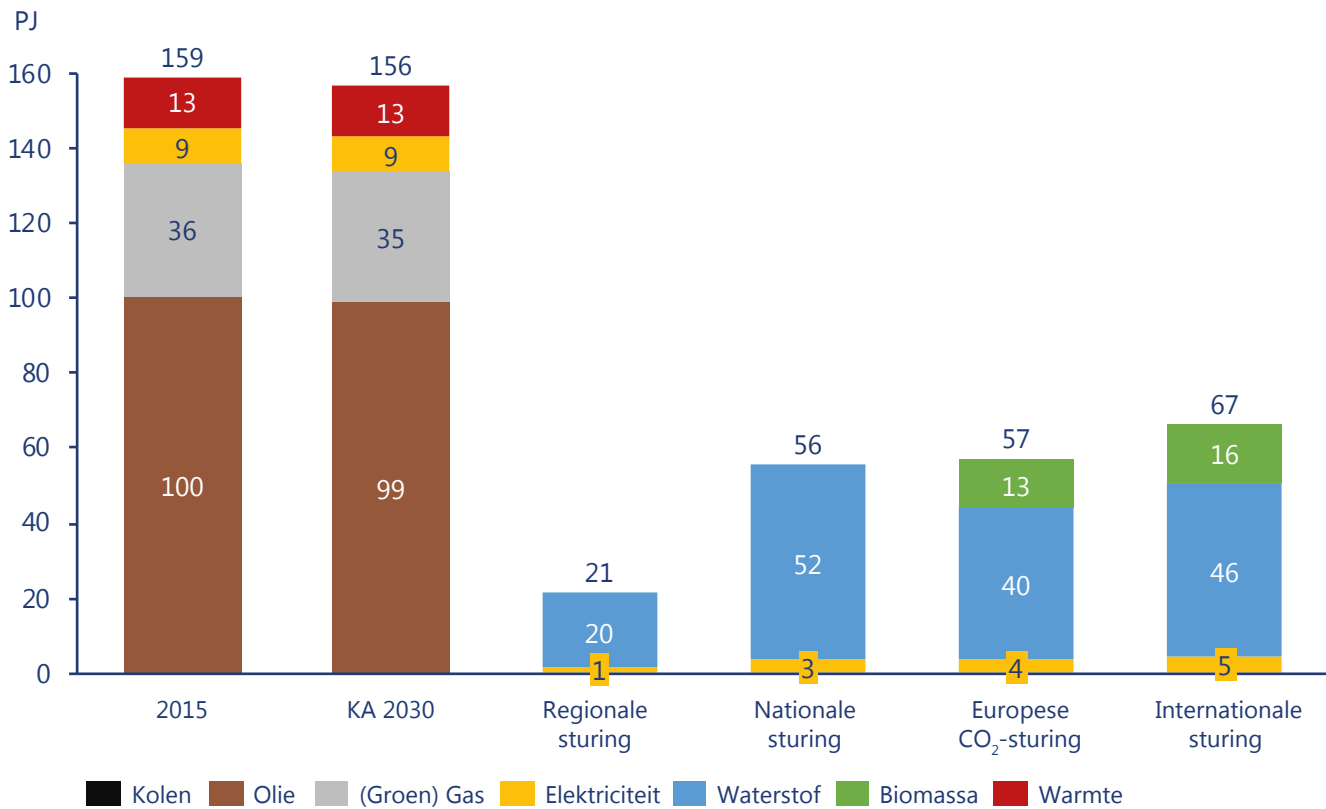
Internationale sturing: De omvang van de raffinage-industrie exclusief E-refinery in het internationale scenario is gelijk aan 50% van de huidige omvang. Daarmee komt dit scenario grotendeels overeen met het “scenario 2” van het ‘Refinery 2050: Conceptual Assessment’-rapport²⁵⁾. Bovendien liggen een groot aantal zaken van “scenario 2” van het ‘Refinery 2050: Conceptual Assessment’-rapport in lijn met het internationale scenario. Dit scenario is gebruikt omdat de vraag naar fossiele brandstoffen voor wegtransport sterk afneemt, net als in Net voor de Toekomst. Ook vaart een groot deel van de internationale scheepvaart nog steeds op fossiele energiedragers, maar wordt er wel gestreefd naar efficiëntere verbrandingsmotoren. Een verschil is dat het Refinery-2050-rapport is geschreven door Concawe en zich richt op de Europese raffinage-industrie, waardoor er in heel Europa nog CO₂-uitstoot is en mondiaal niet de intentie is om CO₂-neutraal te worden. In het internationale scenario is er in Nederland echter geen CO₂-uitstoot meer en wordt er mondiaal gestreefd naar een vermindering van de CO₂-uitstoot. Het internationale scenario is niet circulair georiënteerd, waardoor de feedstock bestaat uit

fossiele energiedragers. De energetische vraag in dit scenario wordt grotendeels ingevuld door waterstof, het overige deel door biomassa.

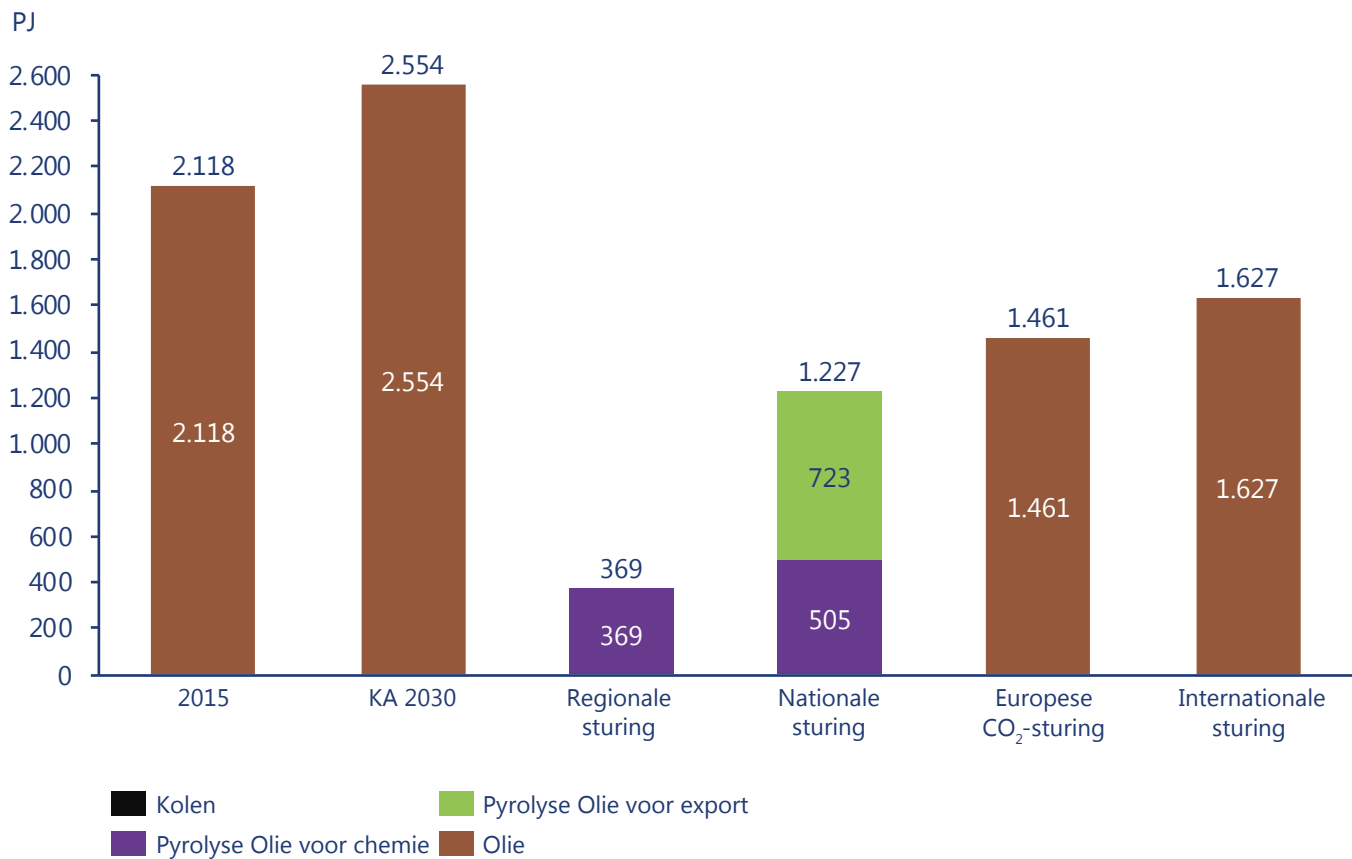
Figuur 40 geeft de samenstelling van de finale energetische energievraag weer. Hierin is te zien dat er volledige duurzaam geproduceerd wordt. Alle olie en aardgas die momenteel gebruikt wordt binnen de raffinage-industrie voor energetische doeleinden is vervangen door elektriciteit, waterstof en/of biomassa. In het regionale en nationale wordt volledig ingezet op waterstof. Er blijft echter altijd een basis vraag naar elektriciteit in de raffinage-industrie die terug te zien is in Figuur 40. De totale finale energetische vraag ligt lager in alle vier de scenario's. Hier ligt aan ten grondslag dat in alle scenario's de raffinage industrie exclusief E-refinery krimpt.

In het regionale scenario gaan we ervan uit dat de raffinage industrie niet produceert voor de export, maar slechts voor de chemische industrie. Omdat in het ETM deze export stroom niet kan worden uitgezet, hebben wij een correctie op de data uitgevoerd. De finale non-energetische vraag van de raffinage industrie in het regionale scenario komt overeen met de non-energetische vraag van chemische industrie. In Figuur 35 is daarom alleen de pyrolyse olie stroom voor de chemische industrie opgenomen voor het scenario Regionale sturing.

25) Concawe (2019). Refinery 2050: Conceptual Assessment. Exploring opportunities and challenges for the EU refining industry to transition towards a low-CO₂ intensive economy



Figuur 40 Finale energievraag raffinage industrie (energetisch)



Figuur 41 Finale energievraag raffinage-industrie (energetisch + non-energetisch)

E-refinery: Synthetische kerosine & scheepsbunkers

Een deel van de huidige raffinage produceert nu fossiele brandstoffen voor de lucht- en scheepvaart. Dit deel zal verdwijnen in een volledig duurzaam scenario. Wel blijft er brandstofvraag bestaan vanuit de luchtvaart en scheepvaart. Deze zal deels geïmporteerd worden en deels in Nederland geproduceerd worden. In de scenario's is er met een groei van de scheepvaart gerekend van -1%, 0%, 1% en 1% per jaar en voor de luchtvaart van -1%, 0%, 1% en 2% per jaar voor respectievelijk het regionale, nationale, Europese en internationale scenario inclusief mogelijke efficiëntieverbeteringen.

De brandstoffen voor internationaal transport worden in de regel niet meegenomen in landelijke energiestudies, aangezien deze sector niet onder het klimaatverdrag van Parijs valt. Toch zal de lucht- en scheepvaart in hoge mate gebruik moeten maken van synthetische brandstoffen en mogelijk ook biobrandstoffen om te verduurzamen en de doelstellingen van Parijs binnen bereik te brengen.

In deze studie nemen we deze brandstoffen daarom wel mee. Deze analyse richt zich in eerste instantie op synthetische brandstoffen. Mogelijkheden voor elektrificatie van de luchtvaart (korte afstanden) en scheepvaart (kustvaart) laten we voor nu buiten beschouwing, omdat dit naar onze mening een kleine impact heeft op de totale vraag naar brandstoffen voor de lucht- en scheepvaart.

Synthetische brandstoffen worden gemaakt uit waterstof en een koolstofstroom: bijvoorbeeld uit CO₂ die afgevangen wordt uit de lucht en een omzetting van CO₂ naar CO met PEM-elektrolyse (nog behoorlijk fundamenteel onderzoek), of via CO₂-afvang bij industrie of elektriciteitsproductie.

In Tabel 25: Duurzame brandstoffen voor internationaal transport, is de toekomstige vraag berekend in Peta joule, door de groeipercentages te vermenigvuldigen met de huidige vraag naar brandstoffen. Een deel van deze toekomstige vraag kan in Nederland geproduceerd worden en een belangrijk deel zal geïmporteerd worden (synthetisch of op basis van biomassa).

Om de vraag van bijvoorbeeld 714 PJ naar synbunkers en synkerosine volledig autonoom op te wekken zou er 67 GW wind-op-zee extra nodig zijn, plus nog 17 GW voor Direct Air Capture en de omzetting van CO₂ naar CO met behulp van PEM-elektrolyse. Die ruimte is er niet zonder ingrijpende veranderingen in de combinatie van functies op de Noordzee en derhalve zal er voornamelijk worden geïmporteerd.

Om te bepalen hoeveel synthetische brandstoffen voor scheepvaart en luchtvaart in Nederland kunnen worden geproduceerd, is er gekeken naar hoeveel capaciteit wind-op-zee er kan worden toegevoegd in het nationale scenario. We gaan ervan uit, op basis van analyses voor het Klimaatakkoord, dat er maximaal 72 GW wind-op-zee geplaatst kan worden in 2050²⁶⁾. Er staat al 51,5 GW wind-op-zee in het nationale scenario voor andere elektrische toepassingen dan synthetische brandstoffen. Dit betekent dat er nog 20,5 GW wind-op-zee geplaatst kan worden ten behoeve van de Nederlandse duurzame internationale scheepvaart en luchtvaart.

Ditzelfde percentage extra wind-op-zee wordt gebruikt in de andere scenario's. Dit is gedaan om het onderscheid tussen de scenario's te behouden en niet in ieder scenario op 72 GW wind-op-zee uit te komen. Dit is te zien in Tabel 25.

Om deze duurzame brandstoffen te kunnen produceren is koolstofmonoxide nodig. Aangezien er ook energie verbruikt wordt om koolstofmonoxide te verkrijgen (via Direct Air Capture – DAC - en PEM-elektrolyse van CO₂ naar CO) is de benodigde energie 25% hoger dan de energie van de brandstoffen die geproduceerd worden.²⁷⁾ Oftewel, 80% van het vermogen kan gebruikt worden voor waterstofproductie en 20% is benodigd voor DAC.

Deze E-refinery kan in principe overal in Nederland plaatsvinden. Wel blijkt uit de interviews dat sommige clusters er meer mee bezig zijn dan andere. Het grootste deel van de bunkers bevindt zich nu in Rotterdam en Amsterdam. Daarnaast is Groningen bezig met een fabriek die duurzame biokerosine produceert. In Rotterdam staan dergelijke fabrieken al en kunnen de bestaande raffinaderijen een rol spelen in de productie van synthetische brandstoffen (o.a. door aanwezigheid van hydrocrackers). Ook zijn er bunkers aanwezig in de haven van Antwerpen. Gezien de korte afstand tussen cluster Zeeland en de haven van Antwerpen in combinatie met de aanwezigheid van DOW chemical en Arcelor Mittal is het denkbaar dat 'E-refinery'/productie van synthetische brandstoffen in dit clusters kan plaatsvinden.

26) Ondergrens theoretisch potentieel windvermogen op Noordzee uit Ruimtelijke verkenning Energie en Klimaat, opgesteld ten behoeve van het Klimaatakkoord

27) Kalavasta (2018). Carbon neutral aviation with current engine technology

Tabel 25 Duurzame brandstoffen voor internationaal transport

| | Huidig | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|--|--------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Omvang luchtvaart (t.o.v. 2015) | 100% | 78% | 107% | 145% | 197% |
| Omvang scheepvaart (t.o.v. 2015) | 100% | 78% | 107% | 145% | 145% |
| Omvang luchtvaart (PJ) | 160 | 125 | 170 | 232 | 315 |
| Omvang scheepvaart (PJ) | 510 | 398 | 543 | 740 | 740 |
| Totaal (PJ) | 670 | 523 | 714 | 972 | 1055 |
| Equivalent vermogen aan WOZ | | 49 | 67 | 91 | 99 |
| Extra wind-op-zee mogelijk (GW) t.b.v internationale lucht-/scheepvaart | | 12 | 20,5 | 12 | 11 |
| Energie voor DAC (PJ)* | | 28 | 47 | 27 | 25 |
| Productie synthetische brandstoffen (PJ)* ** | | 113 | 188 | 110 | 100 |
| Import van duurzame brandstoffen voor internationaal transport (PJ) | | 410 | 526 | 862 | 954 |

* Uitgaand van 4500 vollasturen per jaar

** 66% efficiency naar waterstof meegenomen

1 PJ aan waterstof is in deze berekening benodigd voor de productie van 1 PJ synthetische brandstoffen

5.3.5 Chemie

De chemische industrie groeit of krimpt volgens algemeen geldende percentages. Dit wil zeggen dat de chemische industrie in het regionale scenario krimpt met 1% per jaar. De groei van de chemie in het nationale scenario stagneert en deze industrie groeit juist met 1% per jaar in het Europese en internationale scenario. Naast een verandering in de omvang van de chemische industrie worden processen efficiënter. In alle scenario's is een efficiëntieverbetering van 1% per jaar aangenomen. Tevens is er een verschil in de gebruikte feedstock tussen de scenario's.

Regionale sturing: Het regionale scenario is gebaseerd op het VNCI-scenario²⁸⁾. Echter wordt in het regionale scenario geen gebruik gemaakt van biomassa en CCS, maar juist meer ingezet op elektriciteit en waterstof als energiedragers voor energetische doeleinden. CCS is niet toegepast omdat er geen maatschappelijk draagvlak voor CCS is. Ook is het biomassapotentieel te klein om te voorzien in de vraag van de chemie. De feedstock in het regionale scenario bestaat volledig uit pyrolyseolie vanwege het circulaire karakter (import van plastics/pyrolyseolie is hierbij waarschijnlijk noodzakelijk). Deze pyrolyseolie wordt geproduceerd door de raffinage-industrie. Zoals eerder genoemd in sectie 5.3.4 produceert de raffinage-industrie uitsluitend voor de chemische industrie in het regionale scenario.

Nationale sturing: Dit scenario vertoont de meeste overeenkomsten met het scenario 'plausible pathway 2' in de VNCI-routekaart²⁸⁾. Het enige verschil is dat een deel van de biomassa is vervangen door waterstof, aangezien de beschikbaarheid van biomassa beperkt is in dit scenario. Verder wordt er energetisch sterk ingezet op elektrificatie en krijgt waterstof ook een belangrijke rol. Het circulaire karakter van dit scenario zorgt ervoor dat de volledige feedstock van de chemische industrie door pyrolyseolie wordt ingevuld.

Europese CO₂-sturing: Ook in dit scenario wordt sterk ingezet op elektrificatie en waterstof. De omvang van de chemie is echter zodanig groot dat dit niet door pyrolyseolie ingevuld kan worden. In combinatie met het feit dat er in dit scenario niet naar een circulaire economie wordt gestreefd is alle feedstock fossiel gebaseerd.

Internationale sturing: In het internationale scenario wordt er zoals in de andere scenario's sterk ingezet op elektrificatie. Echter is het aandeel van waterstof in dit scenario minder

groot, omdat er in dit scenario ook CCS toegepast zal worden. Hierdoor kunnen processen door nafta (in Figuur 42 getoond als olie) ondervuurd blijven worden.

Figuur 42 geeft de finale energetische vraag van de chemische industrie weer. In het regionale scenario is een sterke reductie waarneembaar. Hier liggen drie zaken aan ten grondslag. Ten eerste krimpt de omvang van de chemische industrie in dit scenario. Ten tweede wordt er sterk geëlektrificeerd in elk scenario. Ten derde vinden er procesefficiëntieverbeteringen plaats. Door deze procesefficiëntieverbeteringen neemt de energetische vraag in het nationale scenario af, terwijl de omvang gelijk blijft aan de huidige omvang. In het Europese en internationale scenario groeit de omvang van chemische industrie zelfs, terwijl de uiteindelijke finale energetische vraag een fractie lager ligt dan momenteel.

In vrijwel alle scenario's wordt overgegaan van fossiele naar duurzame energiedragers. Alleen in het internationale scenario is nog een rol weggelegd voor aardolie. De CO₂ die vrijkomt tijdens de verbranding van deze aardolie wordt afgevangen met CCS.

Figuur 43 laat de non-energetische vraag van de chemische industrie zien. De non-energetische vraag is direct afhankelijk van de omvang van de chemische industrie ten opzichte van de huidige situatie. Procesefficiëntieverbeteringen hebben namelijk geen invloed op de feedstock (non-energetisch). Hierdoor krimpt de non-energetische vraag in het regionale scenario, stijgt deze incrementeel in het nationale scenario en groeit deze Europese en internationale scenario. In het Energietransitiemodel kan geen pyrolyseolie meegenomen worden in de modellering, waardoor pyrolyseolie geschaard wordt onder olie in het Energietransitiemodel. Figuur 43 geeft pyrolyse echter wel weer. Zo bestaat de non-energetische vraag in het regionale en nationale scenario uit pyrolyseolie.

Figuur 44 geeft het totaal van zowel de finale energetische als non-energetische vraag. Ook nu moet de kanttekening geplaatst worden dat pyrolyseolie niet gemodelleerd kan worden in het Energietransitiemodel en hierdoor niet zichtbaar is in het Energietransitiemodel. In Figuur 44 is dit echter wel zichtbaar.

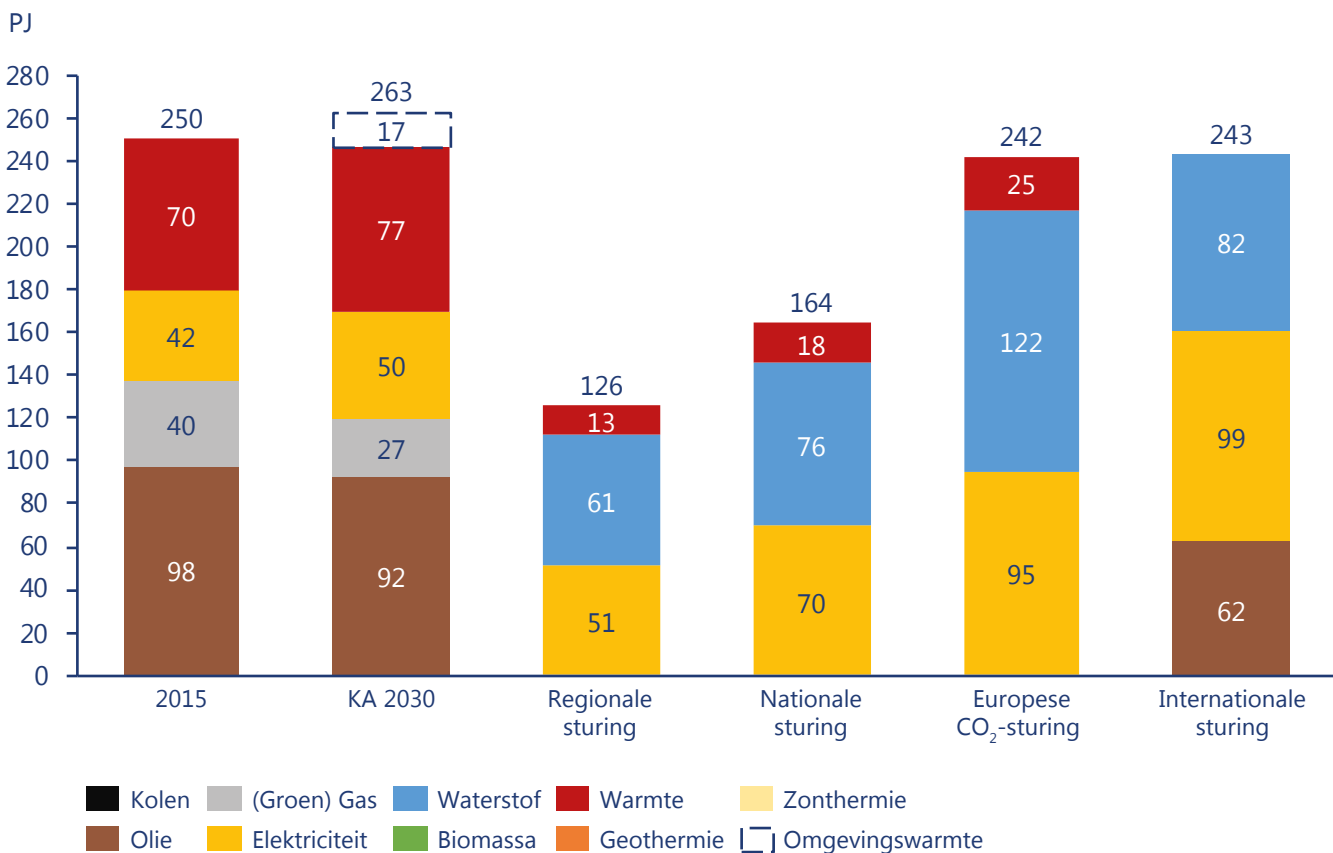
28) Ecofys & Berenschot (2018). Roadmap for the Dutch Chemical Industry towards 2050.

Tabel 26 Omvang en verdeling chemische industrie nationale scenario's

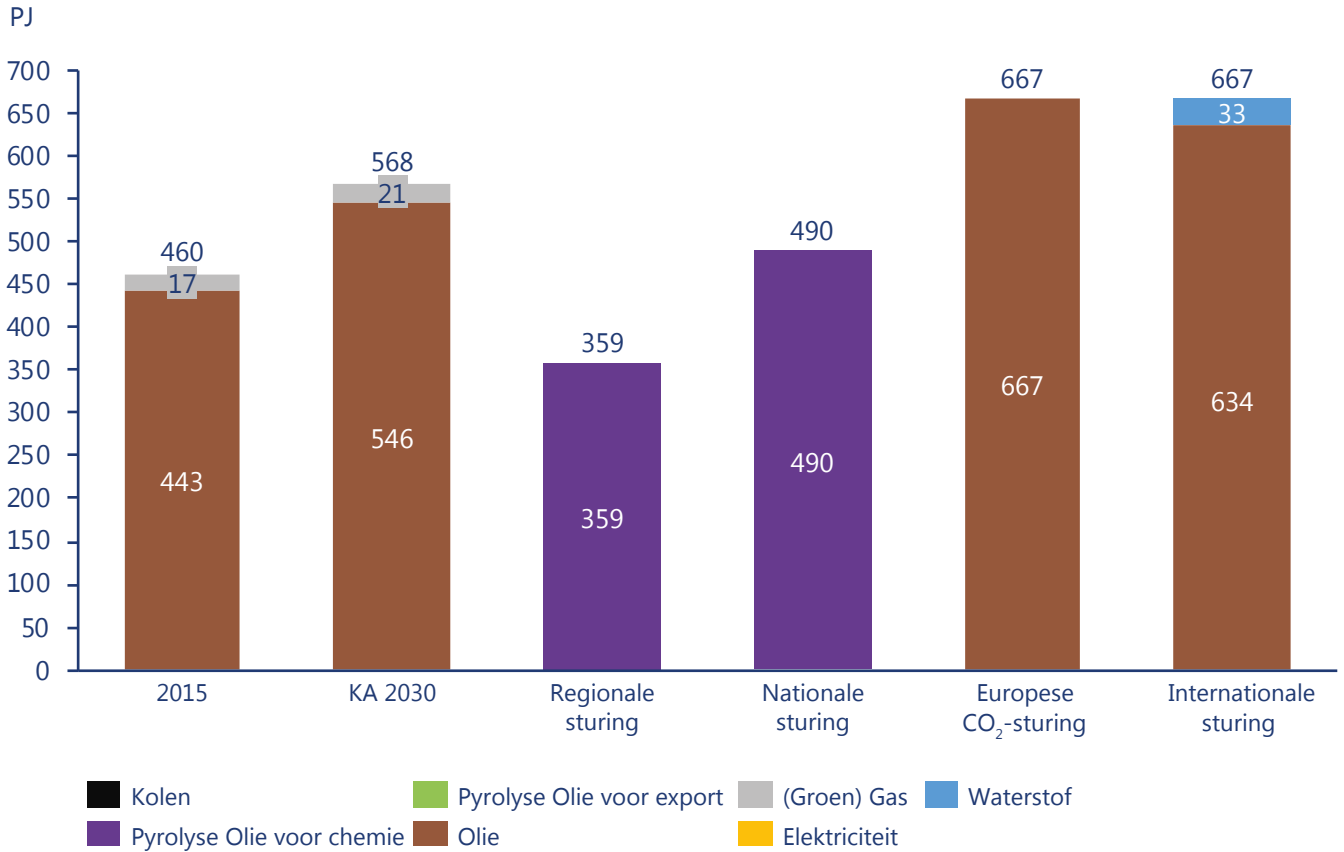
| | | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|-----------------------------|---------------------|-------------------|----------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Omvang t.o.v. heden | 73% (krimp 1%/jaar) | 100% | 136% (groei 1%/jaar) | 136% (groei 1%/jaar) | |
| Proces (Energetisch) | Fossiel + CCS | 0% | 0% | 0% | 23% |
| | Elektrificatie | 40% | 40% | 40% | 40% |
| | Waterstof | 50% | 50% | 50% | 37% |
| | Warmtenet | 10% | 10% | 10% | 0% |
| Feedstock (Non-energetisch) | Aardolie | 0% | 0% | 100% | 100% |
| | Pyrolyseolie | 100% | 100% | 0% | 0% |

Tabel 27 Omvang en verdeling kunstmest nationale scenario's

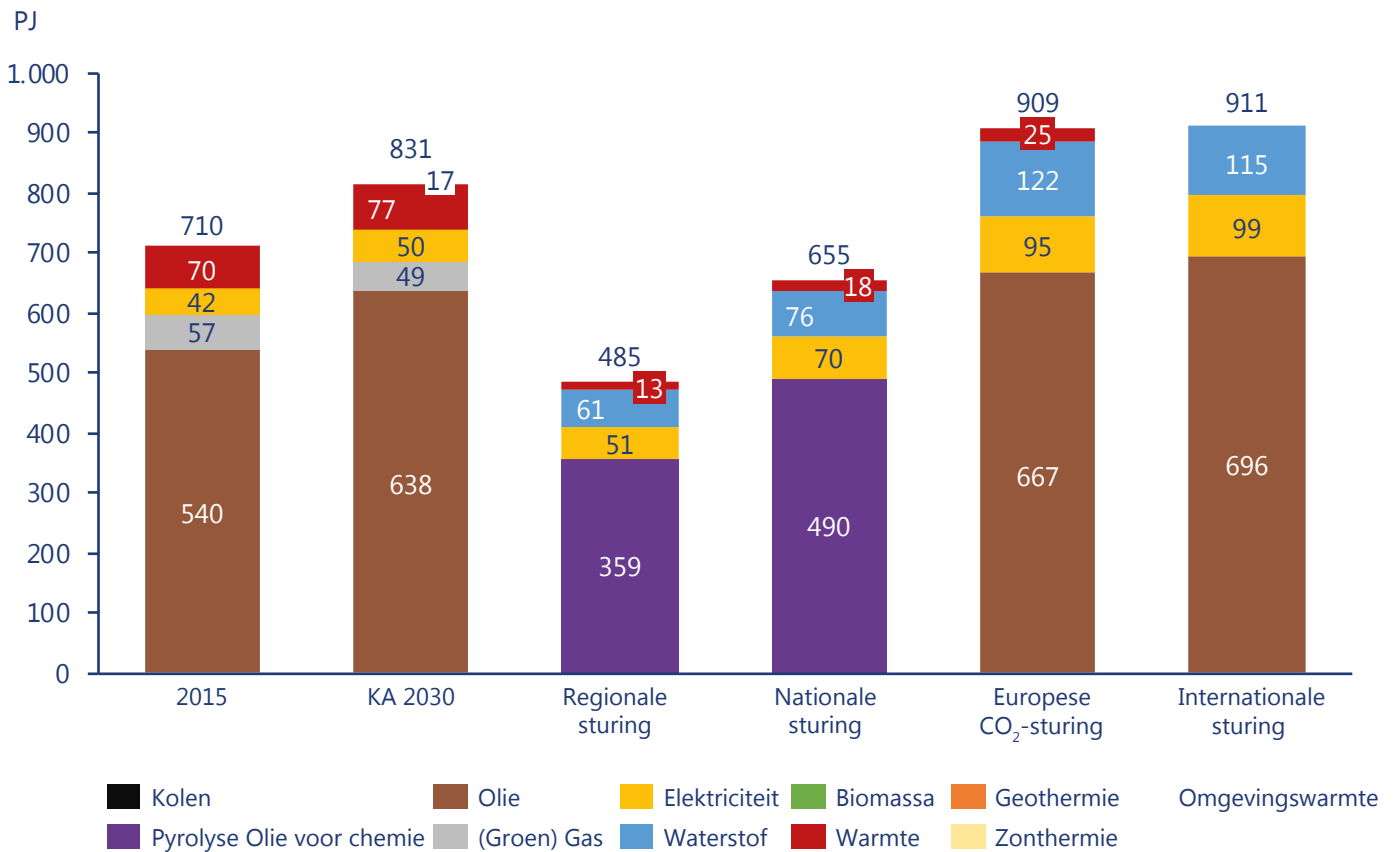
| | | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Omvang t.o.v. heden | | 20% | 40% | 100% | 136% (groei 1%/jaar) |
| Proces (Energetisch) | Fossiel met CCS | 0% | 0% | 100% | 0% |
| | Waterstof (groen of geïmporteerd) | 100% | 100% | 0% | 100% |
| Feedstock (Non-energetisch) | Fossiel met CCS | 0% | 0% | 100% | 0% |
| | Waterstof (groen of geïmporteerd) | 100% | 100% | 0% | 100% |



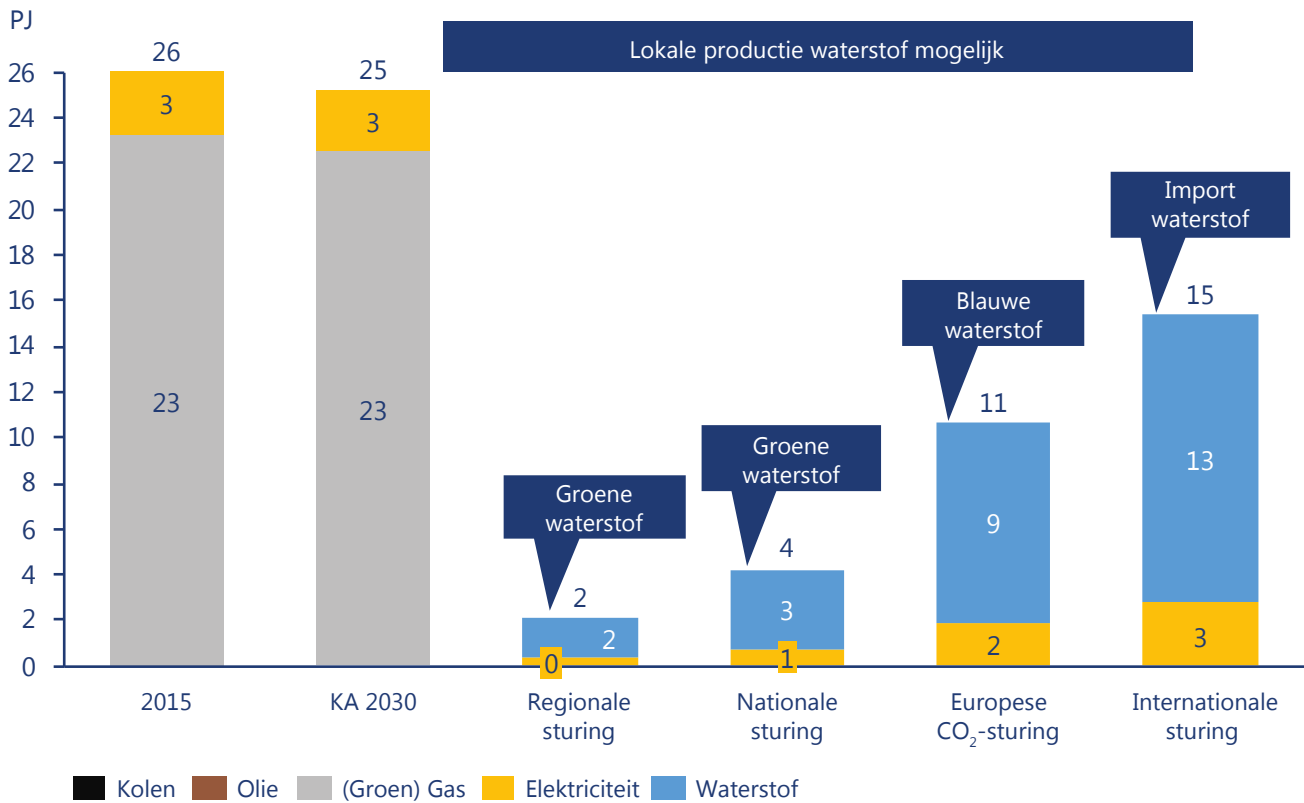
Figuur 42 Finale energievraag chemische industrie (energetisch)



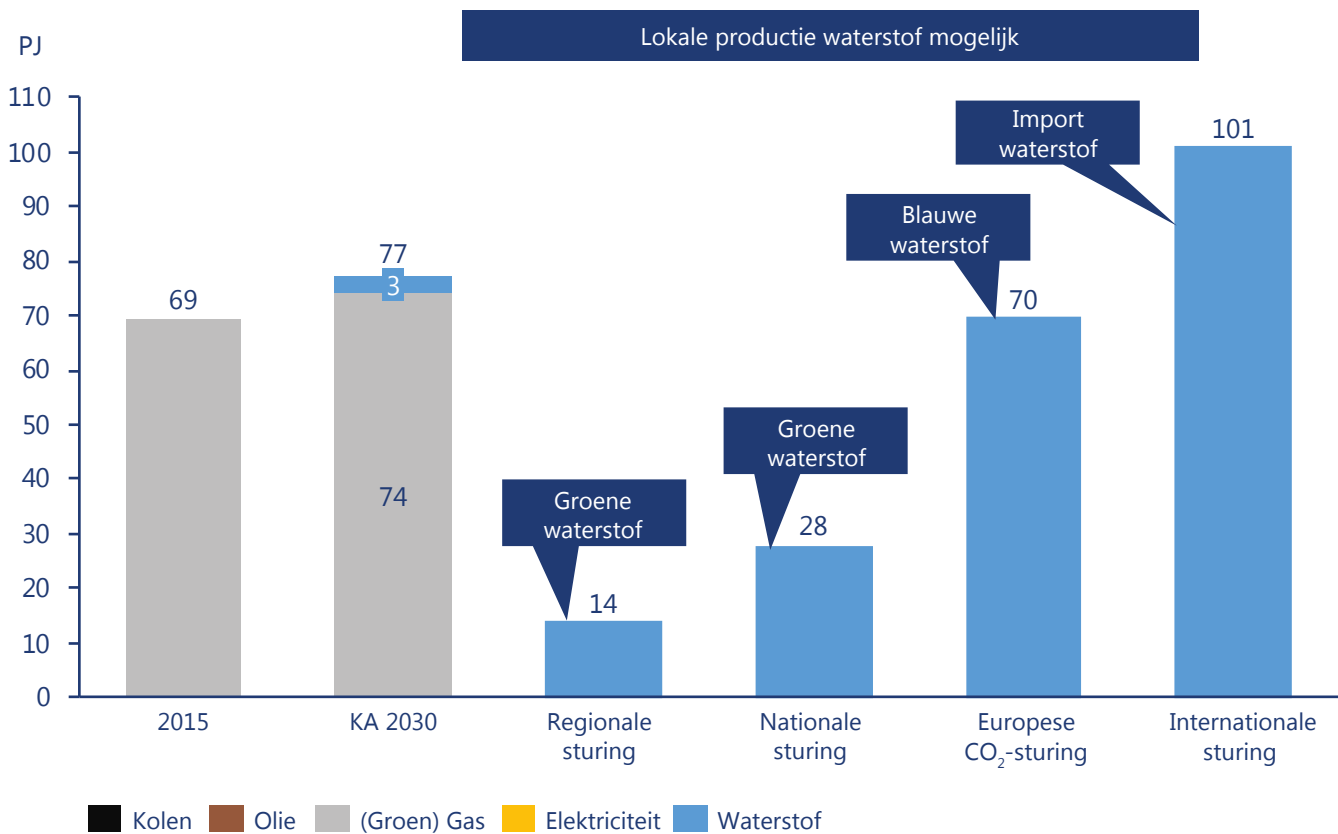
Figuur 43 Finale energievraag chemische industrie (non-energetisch)



Figuur 44 Finale energievraag chemische industrie (energetisch + non-energetisch)



Figuur 45 Finale energievraag kunstmestindustrie (energetisch)



Figuur 46 Finale energievraag kunstmestindustrie (non-energetisch)

5.3.6 Kunstmest

De kunstmestindustrie groeit of krimpt niet volgens de algemeen geldende percentages. Dit komt omdat de transitie naar een CO₂-neutraal Nederland veel impact heeft op deze industrie. De onderliggende redeneringen worden hieronder gespecificeerd. Ondanks dat de transitie veel impact heeft, wordt er geïnnoveerd binnen de kunstmestindustrie. Dit leidt tot procesefficiëntieverbeteringen, welke gelijk zijn gesteld aan 1% per jaar voor alle scenario's.

Regionale sturing: In dit scenario wordt de huidige landbouwvisie van LNV omarmd in Nederland, waardoor naar een kringlooplandbouwbeleid toegewerkt wordt. Volgens de visie van het Ministerie is er in een kringlooplandbouw nauwelijks vraag naar kunstmest. Ook neemt de noodzaak voor kunstmest af door een krimpende veestapel als gevolg van een bevolking die plantaardiger gaat eten en daarmee grote arealen vrijspeelt voor andere doeleinden. In het buitenland is het beleid minder extreem waardoor daar nog wel vraag naar kunstmest blijft. Omdat er weinig ruimte is voor biomassa wordt alle kunstmest gemaakt met groene waterstof.

Nationale sturing: In het nationale scenario wordt er strak gekeken naar een sluitende mineralenbalans voor Nederland. In het buitenland is dit relatief gezien minder streng dan in Nederland. Daarmee is het toevoegen van extra stikstof aan de bodem aan strenge voorwaarden verbonden in Nederland. De omvang van de kunstmestindustrie is daarmee een stuk kleiner dan vandaag de dag. Ook in dit scenario wordt de kunstmest gemaakt uit groene waterstof.

Europese CO₂-sturing: In dit scenario wordt blauwe waterstof geproduceerd ten behoeve van kunstmestproductie. In het Energietransitiemodel is het echter niet mogelijk om lokale productie van blauwe waterstof te modelleren, daarom staat in onderstaande grafieken altijd waterstof weergegeven. In het Europese scenario groeit de landbouwproductie in Nederland en de omliggende landen om de groeiende wereldbevolking van voedsel te kunnen voorzien vanuit gebieden met een gematigd klimaat. Wel maken de hoge CO₂-heffingen de productie van ureum onrendabel waardoor kunstmestfabrikanten overschakelen op kunstmestnitraten.

Internationale sturing: In dit scenario is er ruimte voor import van groene waterstof en ammoniak. Ook hier groeit de landbouwproductie in Nederland en de omliggende landen om de groeiende wereldbevolking van voedsel te kunnen voorzien vanuit gebieden met een gematigd klimaat.

Figuur 45 geeft de finale energetische vraag van de kunstmestindustrie weer. Er wordt vol ingezet op waterstof (al dan niet lokaal geproduceerd via elektrolyse, ATR/SMR of via geïmporteerde waterstof of ammoniak) en er resteert nog een kleine energetische behoefte aan elektriciteit. Figuur 46 geeft de finale non-energetische vraag van de kunstmestindustrie weer. Figuur 47 geeft zowel de finale energetisch als non-energetische vraag van de kunstmestindustrie weer.

5.3.7 ICT

Afgelopen jaren zijn de datacenters qua capaciteit gegroeid met gemiddeld 18% per jaar²⁹). We trekken de groei richting 2030 door met 20% per jaar. Deze groei van de capaciteit vertaalt zich echter tot op heden in een veel lagere groei van het energiegebruik door allerlei efficiëntie maatregelen. We nemen hiervoor een groei van 4% per jaar. In de jaren na 2030 laten we de groei iets afnemen tot 15% per jaar en verhogen we de groei van het energiegebruik tot 6% per jaar om aan te geven dat er grote vraagtekens zijn of de enorme efficiëntieverbeteringen die de ICT-sector jaar op jaar laat zien ook na 2030 vol te houden zijn.

Deze getallen betekenen dat het energiegebruik van datacenters tot 2050 groeit tot 580% en dat dataverkeer, opslag en reken-capaciteit groeien met ongeveer 25.000%. Uitgaande van een energiegebruik van 7,2 PJ voor datacenters in 2015³⁰) komen we dan op een energiegebruik van 41,6 PJ in 2050.

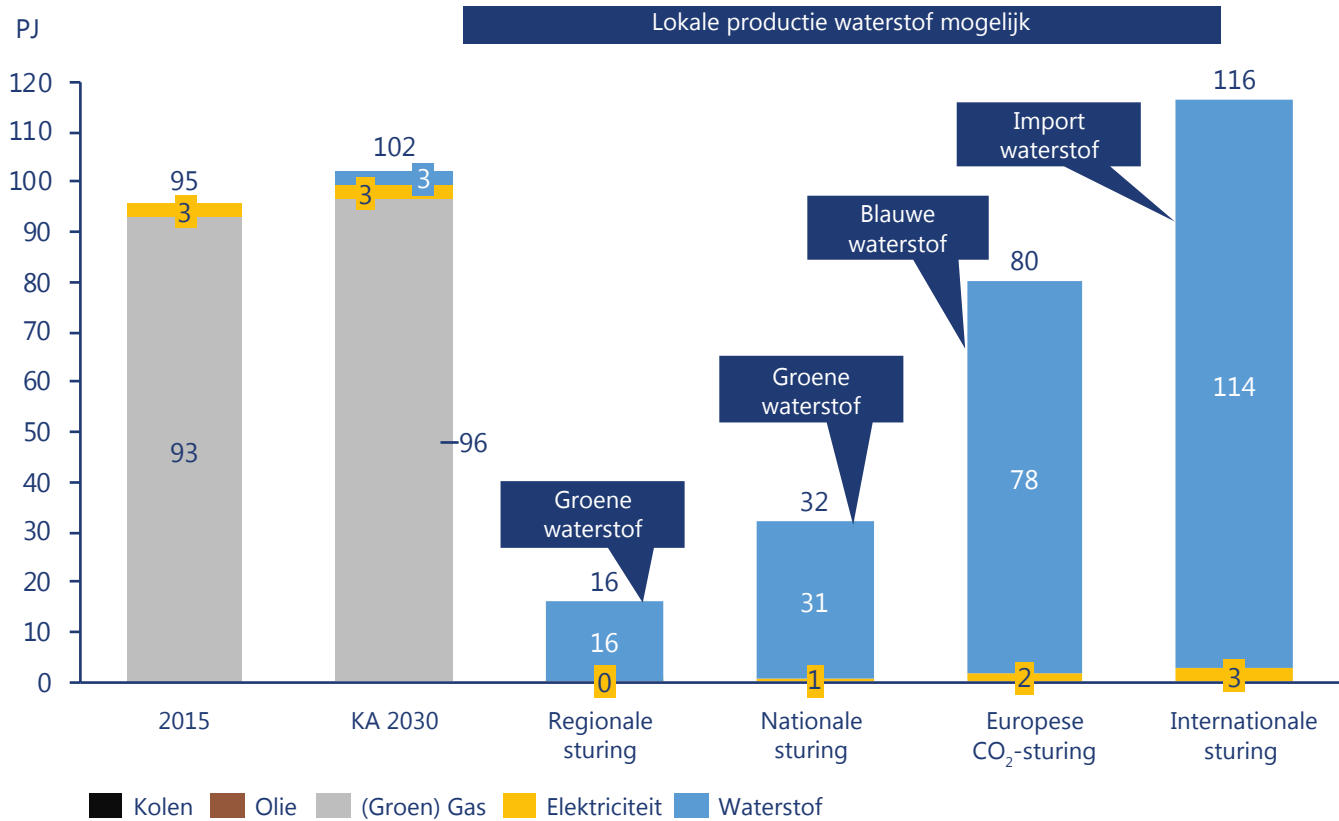
In de energiegetallen van de ICT-sector zit ook het energiegebruik van de telecomsector en overige ICT – zo'n 16,3 PJ in 2015.³¹) Naar verwachting komt er ook met de invoering van 5G en latere varianten een hoger dataverbruik in de telecomsector, maar niet in dezelfde mate als de groei van de datacenters. We gaan er vanuit dat de telecomsector groeit met zo'n 2% per jaar tot 2050 en haar energieverbruik vermindert met 2,2% per jaar. Het energiegebruik in de telecomsector zal dus de groei van de ICT-sector als geheel dempen.

| | Energieverbruik 2015 | Nettogroei tot 2050 | Energieverbruik 2050 |
|-----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| Datacenters | 7,2 PJ | 4-6% per jaar | 41,6 PJ |
| Telecom en overig ICT | 16,3 PJ | -0,2% per jaar | 15,1 PJ |
| Totaal | 23,5 PJ | 2,5% per jaar | 56,7 PJ |

29) Dutch Data Center Association (2019). Nederland is Europees koploper datacenters

30) CE Delft (2014). Energiegebruik Nederlandse commerciële datacenters 2014-2017

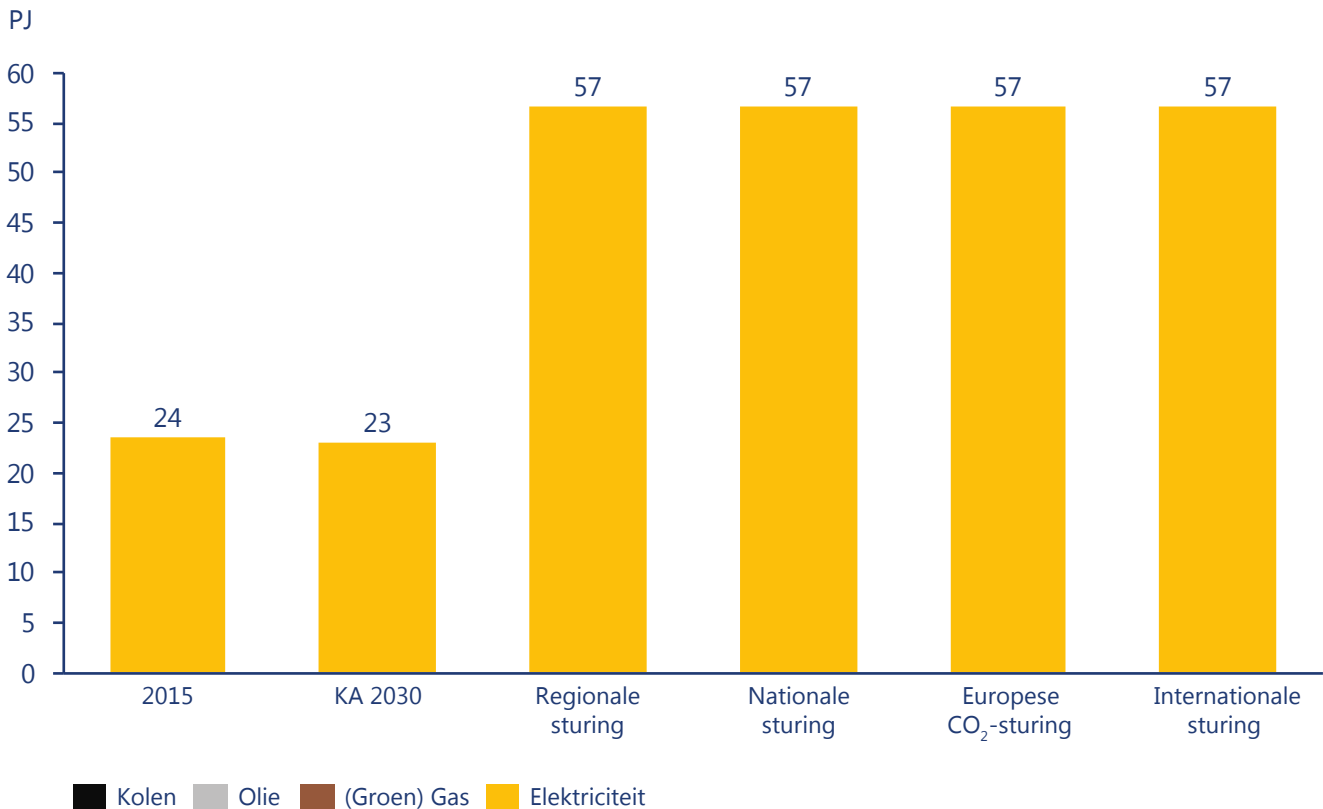
31) Gebaseerd op 2015 waarde ICT sector in het Energietransitiemodel



Figuur 47 Finale energievraag kunstmestindustrie (energetisch + non-energetisch)

Tabel 28 Omvang en verdeling ICT nationale scenario's

| | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|--|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Nettogroei datacenters t.o.v. heden in energiegebruik tot 2030 | 4% | 4% | 4% | 4% |
| Nettogroei datacenters t.o.v. heden in energiegebruik 2030-2050 | 6% | 6% | 6% | 6% |
| Groei Dataverkeer, data opslag en processing per jaar tot 2030 | 20% | 20% | 20% | 20% |
| Groei Dataverkeer, data opslag en processing per jaar 2030 - 2050 | 15% | 15% | 15% | 15% |



Figuur 48 Finale energievraag ICT (energetisch)

Totaal komt dit neer op een groei van de ICT-sector van bijna 2,5% per jaar tot 2050. Hiermee groeit de totale energievraag van 23,5 PJ in 2015 tot 56,7 PJ in 2050. Figuur 48 geeft de totale finale energetische vraag van de ICT-sector weer. Omdat binnen de ICT geen energiedragers worden gebruikt als grondstof is er geen non-energetische vraag in deze sector.

5.3.8 Voedingsindustrie

De omvang van de voedingsindustrie is gelijk aan de algemene groeiaannames voor de industrie. Dit betekent dat in het regionale scenario de omvang van de industrie zal afnemen met 1% per jaar. De oorzaak hiervan is dat Nederlanders meer regionaal geproduceerd voedsel zullen eten. Ook zal de voedingsindustrie zich oriënteren op de eigen markt. In het nationale scenario heerst deze gedachte minder. Hierdoor krimpt de voedingsindustrie niet, maar zal deze ook niet groeien i.e. de groei is gelijk aan 0% per jaar in het nationale scenario. In het Europese en internationale scenario is er een sterke focus op het buitenland, waardoor de export ten opzichte van het huidige niveau zal groeien. In zowel het Europese en internationale scenario groeit de voedingsindustrie met 1% per jaar.

Ondanks de groei van de voedingsindustrie in het Europese en internationale scenario zal de energievraag niet evenredig stijgen. Dit komt omdat er procesefficiëntieverbeteringen

worden verwacht van 1,2% per jaar in alle scenario's³²). In de voedingsindustrie wordt er gebruik gemaakt van 'hogertemperatuur'- (100-250 °C) en 'lagetemperatuurwarmte' (0-100 °C). De verhouding tussen hoge- en lagetemperatuurwarmte is ongeveer gelijk³³). Elektrische toepassing ligt bij lagere temperaturen meer voor de hand, omdat deze goed gebufferd kan worden. Het risico op de elektriciteitsmarkt wordt hierdoor beperkt en het bedrijf kan ook inspelen op de flexibiliteitsmarkt. Bij hogere temperaturen zijn deze mogelijkheden voor prijsrisico mitigatie en buffering niet voor de hand liggend. Daarom gaan we ervan uit dat voornamelijk de lagetemperatuurwarmte wordt geëlektrificeerd, het complete praktijkbeeld kan echter wel gemixt zijn en minder strikt gescheiden zijn.

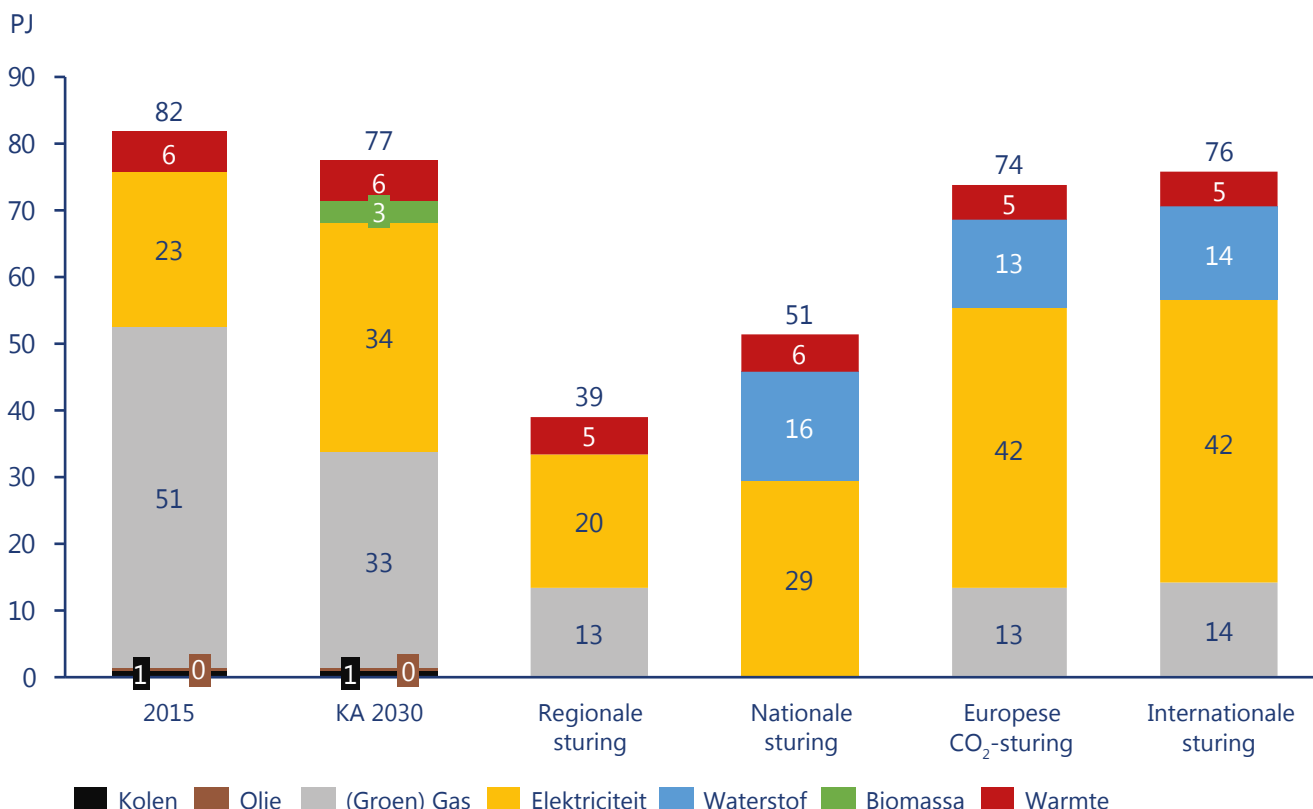
Regionale sturing: In het regionale scenario zal een aanzienlijk deel van de potentie van warmtenetten ten behoeve van de voedingsindustrie benut worden. Dit komt uit op 20%. Door lokale hernieuwbare opwek is er veel elektriciteit beschikbaar. Een groot gedeelte van de lagetemperatuurwarmte zal daarom met elektrische boilers worden opgewekt. Omdat er in het regionale scenario slechts een kleine waterstofproductie in

32) ING (2019). Foodtech: technologie in de voedingsindustrie

33) CE Delft (2015). Denktank Energiemarkt

Tabel 29 Omvang en verdeling voedingsindustrie nationale scenario's

| | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|------------------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Omvang (t.o.v. heden) | 73% | 100% | 136% | 136% |
| Elektrisch ketel | 30% | 35% | 40% | 40% |
| Waterstofketel | 0% | 50% | 25% | 25% |
| Biomassaketel | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Groengas ketel | 50% | 0% | 25% | 25% |
| Warmtenetten | 20% | 15% | 10% | 10% |



Figuur 49 Finale vraag voedingsindustrie (energetisch + non-energetisch)

Nederland aanwezig is, wordt de hogetemperatuur warmte opgewekt met behulp van groengasketels.

Nationale sturing: Ook in het nationale scenario wordt een in gedeelte van de laagtemperatuurwarmte voorzien door een warmtenet. Het overige deel van de laagtemperatuurwarmte wordt opgewekt met elektrische ketels, wat in lijn is met het elektrificatiekarakter van dit scenario. De hogetemperatuurwarmte wordt in dit scenario opgewekt met behulp van waterstofketels.

Europese CO₂-sturing: In dit scenario voorzien warmtenetten in kleiner deel van de laagtemperatuurwarmtevraag dan in de andere scenario's. Het overige gedeelte zal opgewekt worden

door elektrische ketels. Voor de hogetemperatuurwarmte wordt ingezet op groengas- en waterstofketels. De keuze voor groengas in het Europese en internationale scenario is gebaseerd op het feit dat het biomassapotentieel in deze twee scenario's aanzienlijk groter is dan in het regionale en nationale scenario.

Internationale sturing: Voor het internationale scenario gaat een gelijke redenering op als voor het Europese scenario.

Figuur 49 geeft de totale finale energetische vraag van de voedingsindustrie weer. Omdat in de voedingsindustrie geen energiedragers worden gebruikt als grondstof voor de productie van halfproducten en of eindproducten is er geen non-energetische vraag binnen deze industrie.

5.3.9 Papierindustrie

De omvang van de papierindustrie zal volgens de algemene cijfers van de industrie krimpen of groeien. In het regionale scenario wordt er gerekend met een krimp van 1% per jaar. Dit is te verklaren doordat er meermalige kartonnen verpakkingen gebruikt worden en “consuminderen” populairder wordt (er worden minder modegevoelige producten gekocht). In het nationale scenario blijft vraag gelijk aan de huidige vraag naar papier en karton. Voor het Europese en internationale scenario groeit de industrie met 1% per jaar. De papierindustrie verwacht tot 2050 een energiebesparing van 40% te realiseren dit is ongeveer 1,7% per jaar, een deel van warmtevraag verschuift van 100°C tot 250°C naar <100°C³⁴). Deze procesefficiëntieverbetering geldt voor alle scenario's.

Onderstaande verdeling is gebaseerd op lage temperatuur warmte en hoge temperatuur warmte. Het complete praktijkbeeld kan echter wel gemixt zijn en minder strikt gescheiden zijn via deze categorieën.

Regionale sturing: In een Regionale sturing scenario zal elektrificatie de grootste verandering zijn in de papierindustrie. Dit betekent dat de warmte voor het grootste gedeelte uit elektrische ketels afkomstig is. Dit is mogelijk omdat het grootste gedeelte van de warmtevraag lage temperatuur warmte betreft (<100°C), waardoor bedrijven ook kunnen inspelen op de flexibiliteitsmarkt. Ook wordt er een deel gevoed door warmtenetten en worden groengasketels ingezet. Het laatste dient voornamelijk als bron voor de temperaturen boven de 100°C. In dit scenario zullen de ketels in de papierindustrie niet gevoed worden met waterstof, omdat de (in dit scenario beperkte voorraad) waterstof voor hogetemperatuurwarmte zal worden gebruikt.

Nationale sturing: In het nationale scenario is het grootste aandeel van de warmte afkomstig van elektrische ketels. Ook zal een gedeelte van de lagetemperatuurwarmte gevoed worden door warmtenetten, maar het volledige potentieel zal niet volledig worden benut. Groengas- en waterstofketels zullen ingezet worden voor de productie van hogetemperatuurwarmte. Deze verdeling komt overeen met de verdeling geschetst door VNP³⁴).

Europese CO₂-sturing: In dit scenario ligt er een minimaal aantal warmtenetten dat tot 2030 gerealiseerd wordt, maar daarna niet meer wordt uitgebreid. Er zullen veel hybride

boilers staan waar grotendeels elektriciteit wordt gebruikt en voor pieken waterstof. Voor de hogetemperatuurwarmte wordt overwegend gebruik gemaakt van waterstofketels.

Internationale sturing: Voor dit scenario gelden dezelfde redeneringen als voor het Europese scenario.

Figuur 50 geeft de totale finale energetische vraag van de papierindustrie weer. Omdat in de papierindustrie geen energiedragers worden gebruikt als grondstof voor de productie van halffabriecaten en/of eindproducten is er geen non-energetische vraag in binnen deze industrie.

5.3.10 Overige industrie

Onder de overige industrie vallen zeer uiteenlopende bedrijven. Deze bedrijven verdelen we onder in 4 categorieën: bouw, bouwmaterialen, technologische industrie en restindustrie.

De bouwsector heeft de grootste energievraag van de vier categorieën. Deze bestaat voornamelijk uit aardolieproducten voor het aandrijven van machines. Deze machines kunnen elektrisch uitgevoerd worden (bijvoorbeeld een elektrische betonmixer³⁵), ook brandstofcellen op waterstof zouden een verduurzamingsoptie kunnen zijn³⁶). Bovendien kan elektrificatie van verwarming de vraag naar gas verregaand doen verminderen.

De bedrijven die bouwmaterialen produceren (o.a. glas, cement, gips, kalk, beton, bakstenen, dakpannen, keramiek) zijn vaak energie-intensief door het gebruik van ovens met temperaturen tot boven de 1000 graden.³⁷ Hiervoor wordt op dit moment voornamelijk aardgas gebruikt. Ondervuring van deze processen kan in een CO₂-vrije toekomst ingevuld worden door waterstof, ook elektrische ovens kunnen hun intrede doen³⁸). De energievraag door gebouwen is relatief klein ten opzichte van het energieverbruik van processen.

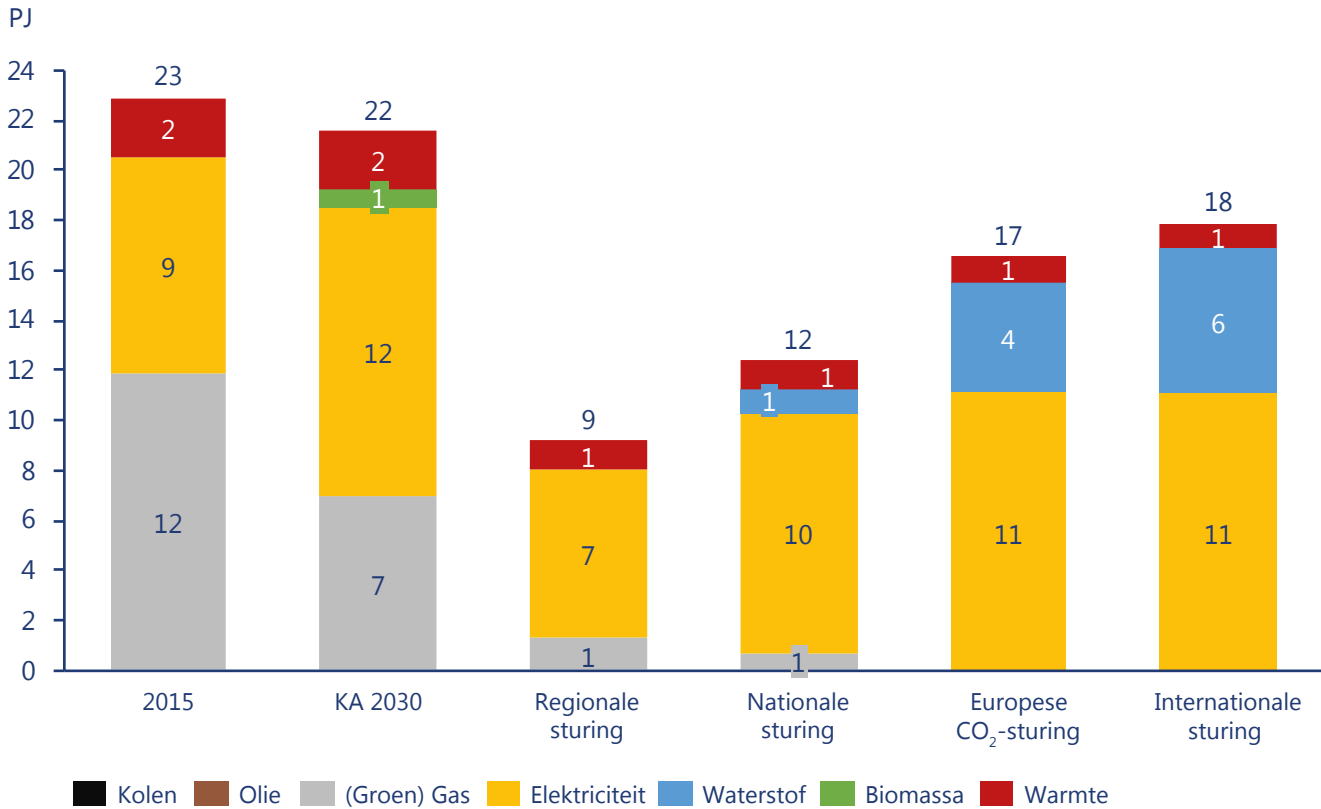
De technologische industrie laat een voorbeeldverduurzamingspad zien in haar routekaart³⁹): besparing door procesefficiëntie, LED-verlichting, isolatie, elektrificatie van verwarming, elektrificatie van processen en inzet van waterstof voor warmteprocessen. Warmtevraag voor de industriële panden bedraagt nu ongeveer 25-30% en verlichting van gebouwen neemt ongeveer 7% van de energievraag in. Elektrische processen of

35) Bouwmagazine (2018). Wereldprimeur: een volledig elektrische betonmixer!
 36) Bouwmachines (2019). Uitstoot van bouw materieel beperken: waarom, en wat zijn de oplossingen?
 37) G. Reijn (2017). Hoe een glasfabriek spectaculair minder CO₂ ging uitstoten
 38) VNG (2012). Routekaart 2030 Nederlandse glasindustrie
 39) Berenschot (2019). Routekaart voor CO₂-reductie in de technologische industrie

34) VNP (2018). Roadmap 95 procent CO₂-besparing

Tabel 30 Omvang en verdeling papierindustrie nationale scenario's

| | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|----------------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Omvang (tov Huidig) | 73% | 100% | 136% | 136% |
| Biomassaketels | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Elektrische ketels | 55% | 60% | 40% | 40% |
| Waterstofketels | 0% | 15% | 50% | 50% |
| Groengasketels | 25% | 10% | 0% | 0% |
| Warmtenetten | 20% | 15% | 10% | 10% |



Figuur 50 Finale energetische vraag papierindustrie

Tabel 31 Omvang en verdeling overige industrie nationale scenario's

| | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|--|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Omvang t.o.v. heden | 73% | 100% | 136% | 136% |
| Elektrolyse, elektrisch verwarmen en elektromechanische bewerking | 80% | 80% | 70% | 70% |
| Waterstofverhitting | 10% | 15% | 30% | 30% |
| Warmtenetten | 10% | 5% | 0% | 0% |

mechanische aandrijvingen zijn goed voor zo'n 35-45% van de energievraag, thermische bewerkingen voor zo'n 25-30%.

Overige industrie: grafische industrie, houtbewerkende industrie, lederindustrie, rubber- en kunststofverwerkende industrie, textiel- en tapijtindustrie en tabaksindustrie. In deze industrieën gaan we ervan uit dat de meeste processen mechanische bewerkingen betreffen en dus elektrisch aangedreven worden. Enkele verhittingsprocessen zouden mogelijk geëlektrificeerd kunnen worden of op waterstof omgezet kunnen worden.

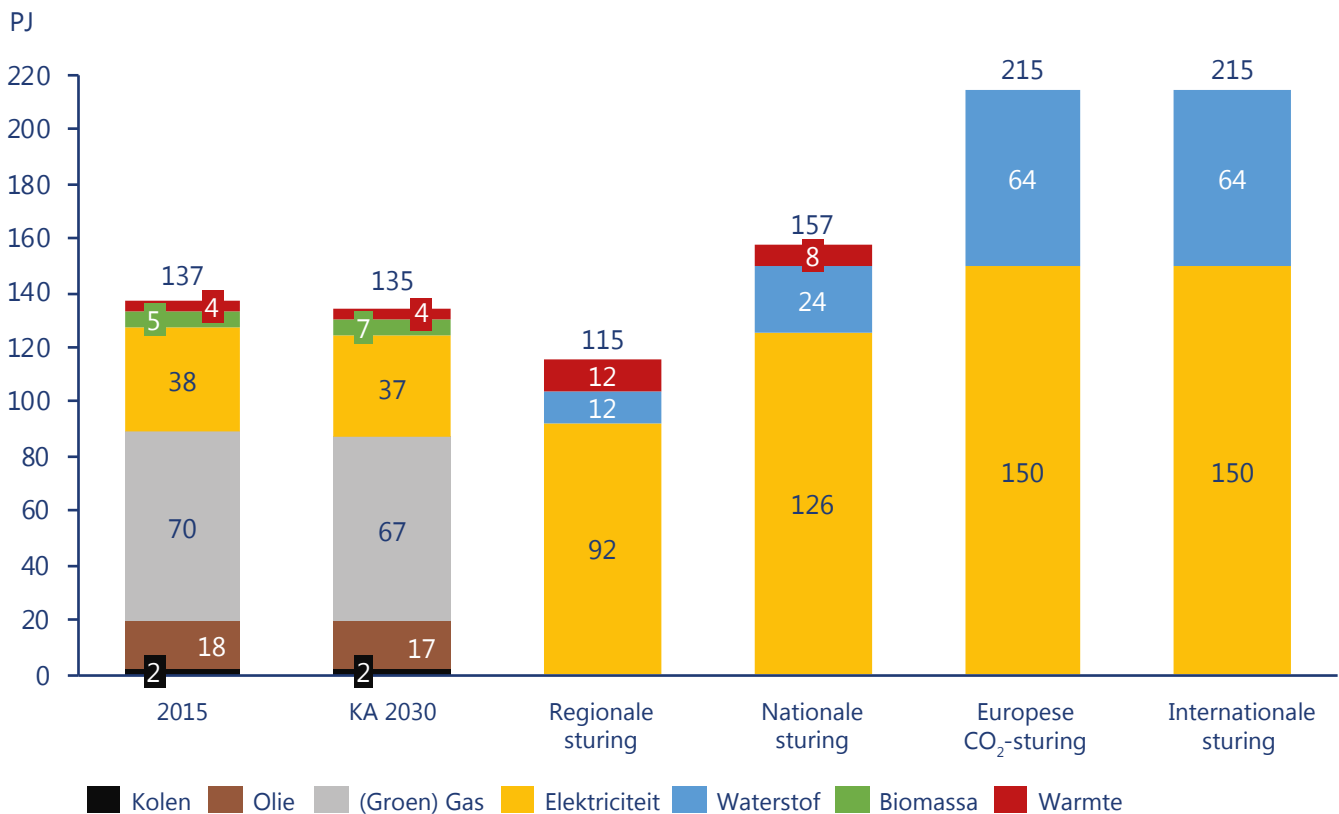
Regionale sturing: In het regionale scenario zal de impact van een circulaire economie voor grote veranderingen zorgen in deze industrieën. Via mechanische bewerkingen kunnen producten weer hergebruikt worden, thermische processen zullen echter nog steeds nodig zijn om producten te recyclen (bijvoorbeeld voor glasrecycling). De circulaire economie zorgt uiteindelijk voor een lager gebruik van grondstoffen en half-fabricaten en een verschuiving richting elektrische processen.

Voor de verwarming van gebouwen van deze industriesectoren zullen naast warmtepompen ook warmtenetten gebruikt worden. De bouwsector stapt over op elektrische machines.

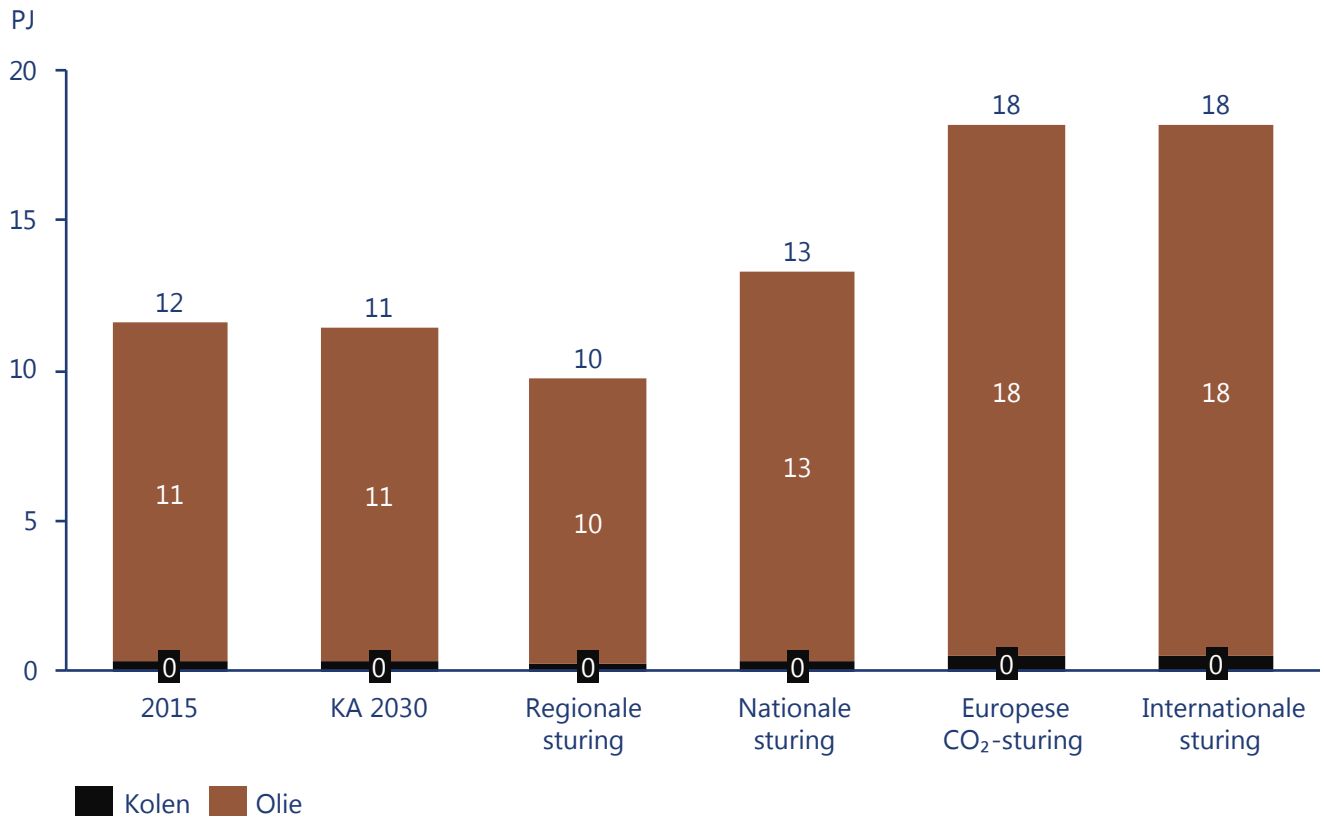
Nationale sturing: In het nationale scenario gaan we ervan uit dat er minder bedrijven op warmtenetten kunnen worden aangesloten en dus afhankelijk zijn van elektrische verwarming. Waterstof wordt grotendeels gebruikt voor verhitting en heeft een groter aandeel in de mix doordat er minder gerecycled wordt ten opzichte van het regionale scenario.

Europese CO2-sturing: In het Europese en internationale scenario gaan we ervan uit dat de industriesectoren ook meer gebruik zullen maken van waterstof en dat de elektrificatie van processen minder doorgang vindt.

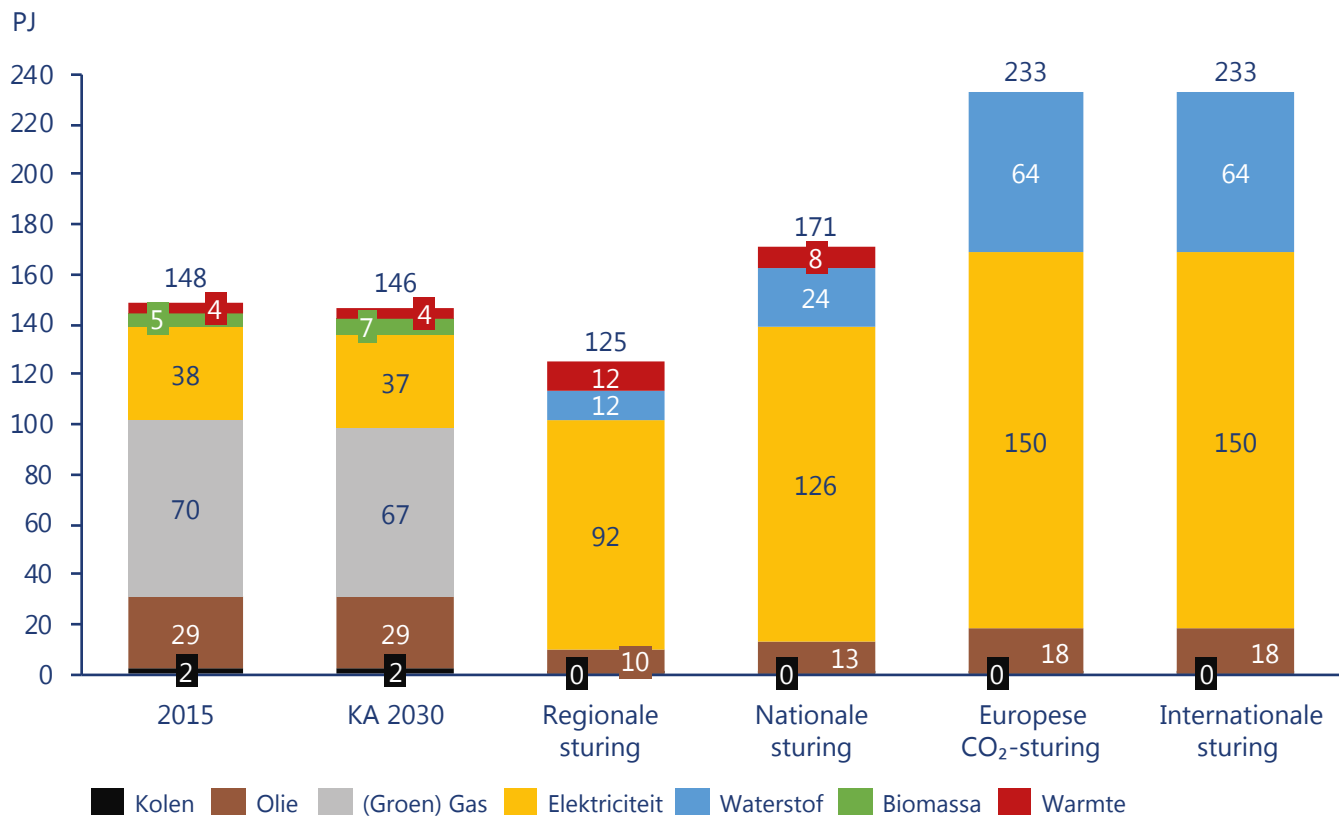
Internationale sturing: In het Europese en internationale scenario gaan we ervan uit dat de industriesectoren ook meer gebruik zullen maken van waterstof en dat de elektrificatie van processen minder doorgang vindt.



Figuur 51 Finale energetische vraag overige industrie (N.B. inclusief overige metalen)



Figuur 52 Finale non-energetische vraag overige industrie (N.B. inclusief overige metalen)



Figuur 53 Totale finale vraag overige industrie (energetisch en non-energetisch) (N.B. inclusief overige metalen)

5.4 Landbouw

Tabel 32 Omvang en verdeling Glastuinbouw nationale scenario's

| | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|----------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Geothermie | 60% | 60% | 40% | 40% |
| Warmtepomp WKO | 0% | 20% | 50% | 25% |
| Biomassaketel | 15% | 15% | 10% | 10% |
| Gasketel (groen gas) | 25% | | | |
| WKK's (groen gas) | | 5% | | 25% |

In de landbouwsector wordt ten behoeve van deze scenario-studie alleen gekeken naar CO₂-uitstoot. Het grootste gedeelte van de energie in de landbouw gaat naar glastuinbouw. Daarom zal de glastuinbouw worden toegelicht. Verder wordt de impliciete aanname gedaan dat landbouwvoertuigen geëlektrificeerd worden.

5.4.1 Glastuinbouw

In de Glastuinbouw neemt de elektriciteitsvraag toe (10%-100%) en warmtevraag neemt af (15%-30%) tot 2030⁴⁰⁾. Dit komt met name door de intensievere verlichting. In algemene zin nemen we het midden van deze ranges aan. Dit betekent voor elektriciteit een toename van 55% tot 2030, dit komt overeen met een groei van 3% per jaar. Wij nemen aan dat dit tot 2050 doorzet. Dit betekent voor warmte een afname van 22,5% tot 2030, oftewel een krimp van 1% per jaar. Deze trekken wij ook door tot 2050.

Geothermie heeft een potentie van 40 PJ voor het voorzien van de warmtevraag in de glastuinbouwsector in 2050¹⁷⁾. Geothermie kan daarmee voor ongeveer 60% voorzien in de warmtevraag in de landbouw in 2050. Dit betekent wel dat ketels nodig zijn als back-up voor langdurig koude periodes⁴¹⁾. Daarnaast vraagt deze verduurzaming vaak wel om een aanvoer van CO₂ om de productie per vierkante meter op pijl te houden (zie ook paragraaf 4.6).

Regionale sturing: In het regionale scenario zal er grootst worden ingezet op geothermie en warmtenetten. Dit levert een stabiele basisvoorziening en kan aansluiten op de regionale warmtenetten. Als piek/back-up staan er biomassaketels en groengasketels waarin mogelijk biomassa die afkomstig is van de geteelde gewassen verwerkt kan worden of vanuit de

regio kan worden geleverd. Daarnaast staan er nog groengas-/biomassaketels op plekken waar geen geothermie beschikbaar is. Waarbij ook de regio voorziet in de aanlevering van deze groengas-/biomassastromen.

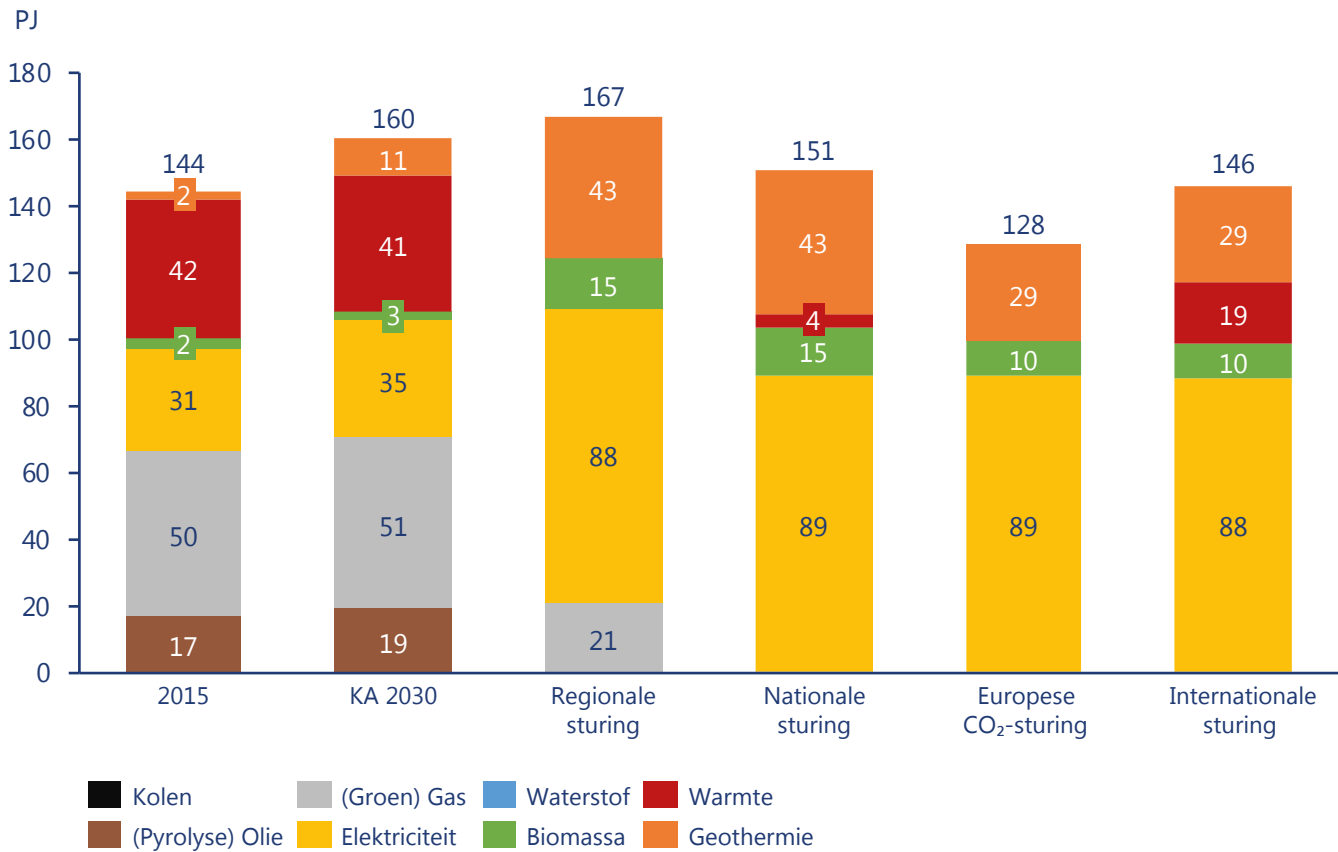
Nationale sturing: De nationale overheid zet grootschalig in op geothermie voor de tuinbouwsector. Omdat geothermie in de tuinbouw gemakkelijker te realiseren valt dan in de gebouwde omgeving, wordt het volledige potentieel benut. Als piek-/back-upvermogen staan er biomassaketels, die worden voorzien van biomassa die landelijk wordt ingezameld. Daarnaast wordt er doordat de overheid aanstuurt op elektrificatie meer gebruik gemaakt van warmtepompen met thermische opslag. Een klein percentage WKK's op groen gas blijft staan, omdat die een nuttige bijdrage leveren aan het balanceren van de regionale elektriciteitsvoorziening.

Europese CO₂-sturing: In dit scenario wordt er slechts de helft van het potentieel aan geothermie benut, de overheid en burgers zijn namelijk maar tot een bepaalde hoogte bereid hierin te investeren. Uitsluitend op plaatsen waar het rendabel is wordt geothermie ingezet. De piek- en back-upvoorziening wordt gerealiseerd door biomassaketels, voorhanden door grote biomassaimportstromen. Het grootste gedeelte van de warmte wordt opgewekt aan de hand van warmtepompen met thermische opslag.

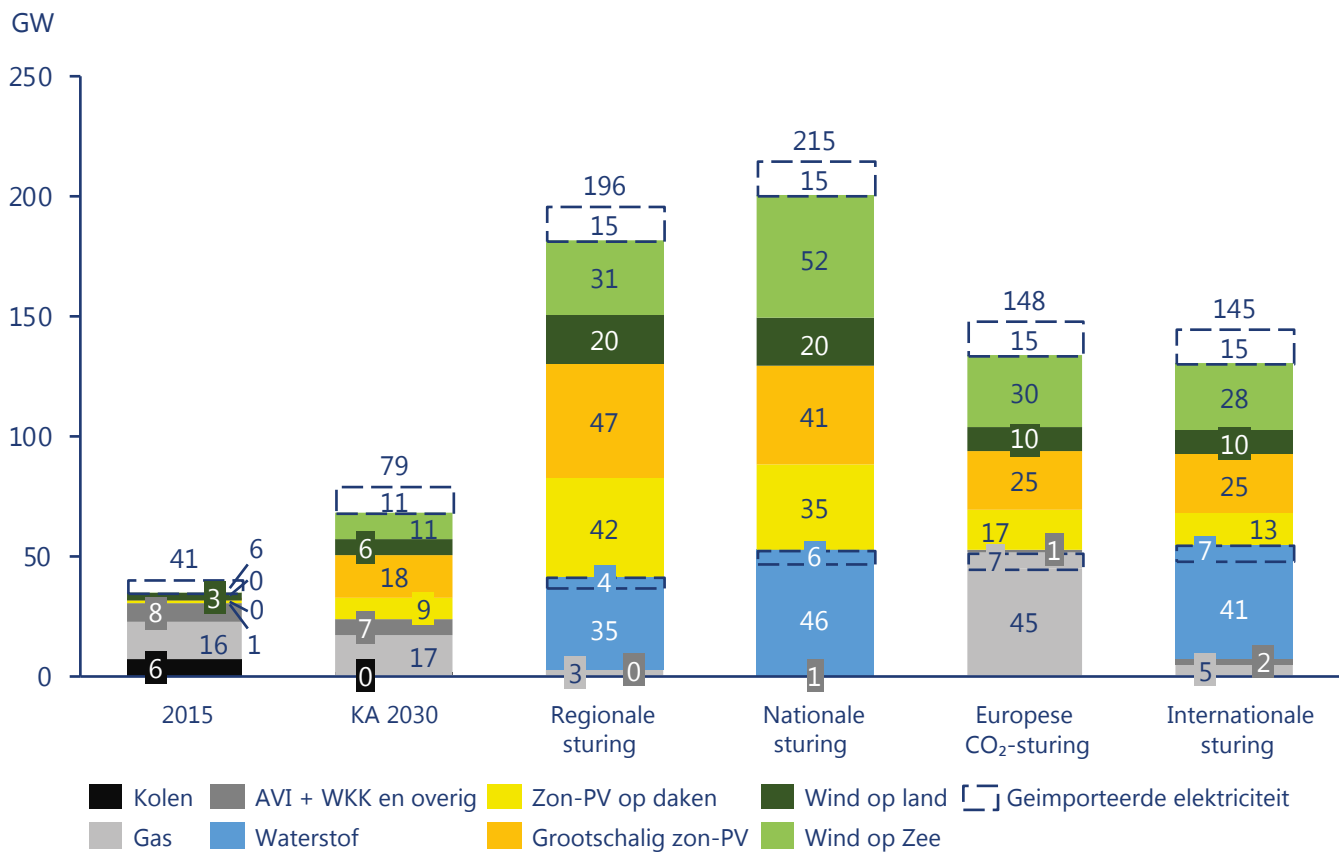
Internationale sturing: In dit scenario wordt er slechts de helft van het potentieel aan geothermie benut, de overheid en burgers zijn maar tot bepaalde mate bereid hierin te investeren. Uitsluitend op plaatsen waar het rendabel is wordt geothermie ingezet. De piek- en back-upvoorziening wordt gerealiseerd door biomassaketels, voorhanden door grote biomassaimportstromen. Daarnaast wordt er een groot percentage warmte opgewekt uit warmtepompen met thermische opslag. Ook blijft er nog een aanzienlijk percentage WKK's staan op groen gas, die ook elektriciteit leveren.

40) van der Velden, N. J. A., Smit, P. X., & Buurma, J. S. (2018). Prognoses CO₂-emissie glastuinbouw.

41) De Zwart, F., Vanthoor, B., & Koreneef, S. (2019). Tuinbouw zonder fossiele energie



Figuur 54 Totale finale vraag landbouw



Figuur 55 Opgesteld vermogen per scenario exclusief windvermogen nodig voor bunkers

5.5 Elektrisch vermogen

5.5.1 Opgesteld elektrisch productievermogen

In de volgende sectie wordt het opgestelde productievermogen toegelicht. Zie paragraaf 4.3.2 voor een toelichting op het benodigde back-upvermogen.⁴²⁾

Regionale sturing: In het regionale scenario zetten lokale overheden vol in op duurzame elektriciteit in de regio. Wind-op-land krijgt de volle ruimte en groeit naar 20 GW. Dit grote vermogen wordt deels gerealiseerd doordat de molens groter worden. Naast elektriciteitsproductie uit wind zetten de regio's ook in op grootschalige zon-PV. Deze zon-PV kan mogelijk-erwijs als zonneweides worden uitgevoerd of in combinatie met andere functies. In totaal wordt hierdoor zo'n 47 GW zon-PV opgesteld.

Bewoners en bedrijven zijn in dit scenario zeer actief en benutten hun daken optimaal voor opwek door zonnepanelen. Zij dragen nog eens 42 GW bij.

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 er zo'n 31 GW wind-op-zee geïnstalleerd.

Hiernaast worden back-upcentrales voorzien die in gevallen van tekorten aan zullen moeten schakelen. Voor een maximale te verwachten loss of load van minder dan 2 uur is 38-42 GW aan back-upcentrales benodigd. Deze centrales zijn voor het grootste gedeelte aangedreven op waterstof. Een klein deel bestaat uit groengascentrales met CCS die ingezet worden om negatieve emissies te behalen.

Afvalverbrandingsinstallaties worden niet meer gebruikt in het regionale scenario aangezien Nederland volledig circulair is.

Nationale sturing: In het nationale scenario zorgt de landelijke overheid voor grote uitbreiding van het vermogen wind-op-zee, tot 52 GW. Dit vermogen is afgestemd zodat er voldoende waterstof geproduceerd kan worden in het scenario, zonder van import afhankelijk te worden. Daarnaast verwacht de nationale overheid dan ook dat op land een grote hoeveelheid windmolens kan komen. Hiervoor worden gebieden aangewezen. Ook

voor elektriciteitsproductie door grootschalige zonopstellingen wordt door de nationale overheid gebied aangewezen. In totaal zal er zo'n 41 GW aan grootschalige zon-PV worden opgesteld. Doordat het voor particulieren aantrekkelijk blijft om zonnepanelen te installeren, zullen zij ook in het scenario Nationale sturing hun dakoppervlak blijven benutten. Voor bedrijven is dit iets minder aantrekkelijk, omdat dit vaak ook gemoeid gaat met investeringen in sterkere daken.

Hiernaast worden back-upcentrales voorzien die in gevallen van tekorten aan zullen moeten schakelen. Voor een maximale te verwachten loss of load van minder dan 2 uur is 39-45 GW aan back-upcentrales benodigd. Deze centrales zijn voor het grootste gedeelte aangedreven op waterstof. De AVI's die een deel van de overgebleven reststromen verwerken, leveren negatieve emissies doordat deze uitgevoerd worden met CCS. Dit is overeenkomstig met de ambities uit het Klimaatakkoord.

Europese CO2-sturing: In het Europese scenario wordt er slechts een deel van het duurzame vermogen gerealiseerd in Nederland. Wind-op-zee lijkt goed te passen op de Noordzee, vandaar dat Nederland daar wel grootschalig gebruik van maakt. Een groei van het aantal zonneweides, onafhankelijk van beleidskeuzes, lijkt in dit scenario ook voor de hand te liggen. Het vermogen wind-op-land groeit na het uitvoeren van het Klimaatakkoord niet verder. Ook rekenen burgers en bedrijven op elektriciteit uit het net en investeren daarom minder in eigen zonnepanelen.

Hiernaast worden back-up centrales voorzien die in gevallen van tekorten aan zullen moeten schakelen. Voor een maximale te verwachte loss of load van minder dan 2 uur is 45-52 GW aan back-upcentrales benodigd. Deze centrales worden aangedreven met groen gas. Een deel wordt uitgerust met CCS voor negatieve emissies. De AVI's die blijven bestaan in dit scenario, leveren negatieve emissies doordat een deel is uitgevoerd met CCS. Dit is overeenkomstig met de ambities uit het Klimaatakkoord.

Internationale sturing: In het Internationale scenario wordt er slechts een deel van het duurzame vermogen gerealiseerd in Nederland. Wind-op-zee lijkt goed te passen op de Noordzee, vandaar dat Nederland daar wel grootschalig gebruik van maakt. Een groei van het aantal zonneweides, onafhankelijk van beleidskeuzes, lijkt in dit scenario ook voor de hand te liggen. Het vermogen wind-op-land groeit na het uitvoeren van het Klimaatakkoord niet verder. Ook rekenen burgers en bedrijven op elektriciteit uit het net en investeren daarom minder in eigen zonnepanelen.

42) Er wordt in fase 2 van het project een gedetailleerdere analyse van de flexbehoefte uitgevoerd, wat mogelijk kan leiden tot een lagere benodigde capaciteit van back-upcentrales.

Hiernaast worden back-upcentrales voorzien die in gevallen van tekorten aangeschakeld zullen moeten worden. Voor een maximale te verwachten loss of load van minder dan 2 uur is 46-53 GW aan back-upcentrales benodigd. Deze centrales worden aangedreven met groen gas. Een deel wordt uitgerust met CCS voor negatieve emissies. De AVI's die blijven bestaan in dit scenario, leveren negatieve emissies doordat een deel is uitgevoerd met CCS. Dit is overeenkomstig met de ambities uit het Klimaatakkoord.

5.5.2 Opgesteld flexibel vermogen

Naast dat er in de scenario's vermogen voor elektriciteitsproductie is opgesteld, is er ook flexibel vermogen neergezet. Dit vermogen zorgt voor verdere mogelijkheden tot het balanceren van vraag en aanbod. In een scenario met een hoger vermogen zon en wind is er een grotere mismatch tussen vraag en aanbod, en is er dus meer behoefte aan flexibel vermogen. De technieken die in het model gebruikt worden als flexibel vermogen zijn elektrolyse, power2heat in de industrie, power2heat in huishoudens en opslag in elektrische voertuigen. De vermogens hiervan zijn weergegeven in Figuur 56. Deze vermogens kunnen ook ingevuld worden door andere technieken met soortgelijke functionaliteiten.

Het is hierin terug te zien dat er in het regionale en nationale scenario een grote hoeveelheid elektrolyse plaatsvindt. Dit is nodig door de grote overschotten elektriciteit en de waterstofpiekcentrales. Daarnaast is er in deze scenario's vermogen beschikbaar vanuit elektrische auto's. Dit komt met name omdat het percentage inwoners dat elektrisch rijdt in deze scenario's hoog is. Daarnaast is er in deze scenario's een grote hoeveelheid aan power2heat voor zowel de industrie als de huishoudens. In het Europese en internationale scenario valt op dat er veel minder flexibel vermogen benodigd is. Dit komt met name doordat er bij tekorten vaak geïmporteerd kan worden. De grootste capaciteit aan flexibel elektrisch vermogen is in deze scenario's de beschikbare batterijopslag van elektrische voertuigen.

Elektrolyse

Het elektrolysevermogen wordt voornamelijk flexibel ingezet om de overschotten elektriciteit maximaal te benutten. Hierdoor liggen de draaiuren van de elektrolyse-units tussen de 2400 en 3200 vollasturen per jaar, afhankelijk van het scenario.

Power2heatindustrie

In de industrie is er flexcapaciteit beschikbaar in de vorm van power2heat hybride ketels. In het ETM zullen er bij overschotten elektriciteit (impliciet goedkope elektriciteit) hybride

ketels in de industrie omschakelen naar elektriciteit. Deze hybride ketels kunnen waterstof- of groengasketels zijn. Dit omslagpunt wordt in het ETM bepaald op basis van overschotten en is dus niet direct afhankelijk van de elektriciteitsprijs of van de buitentemperatuur.

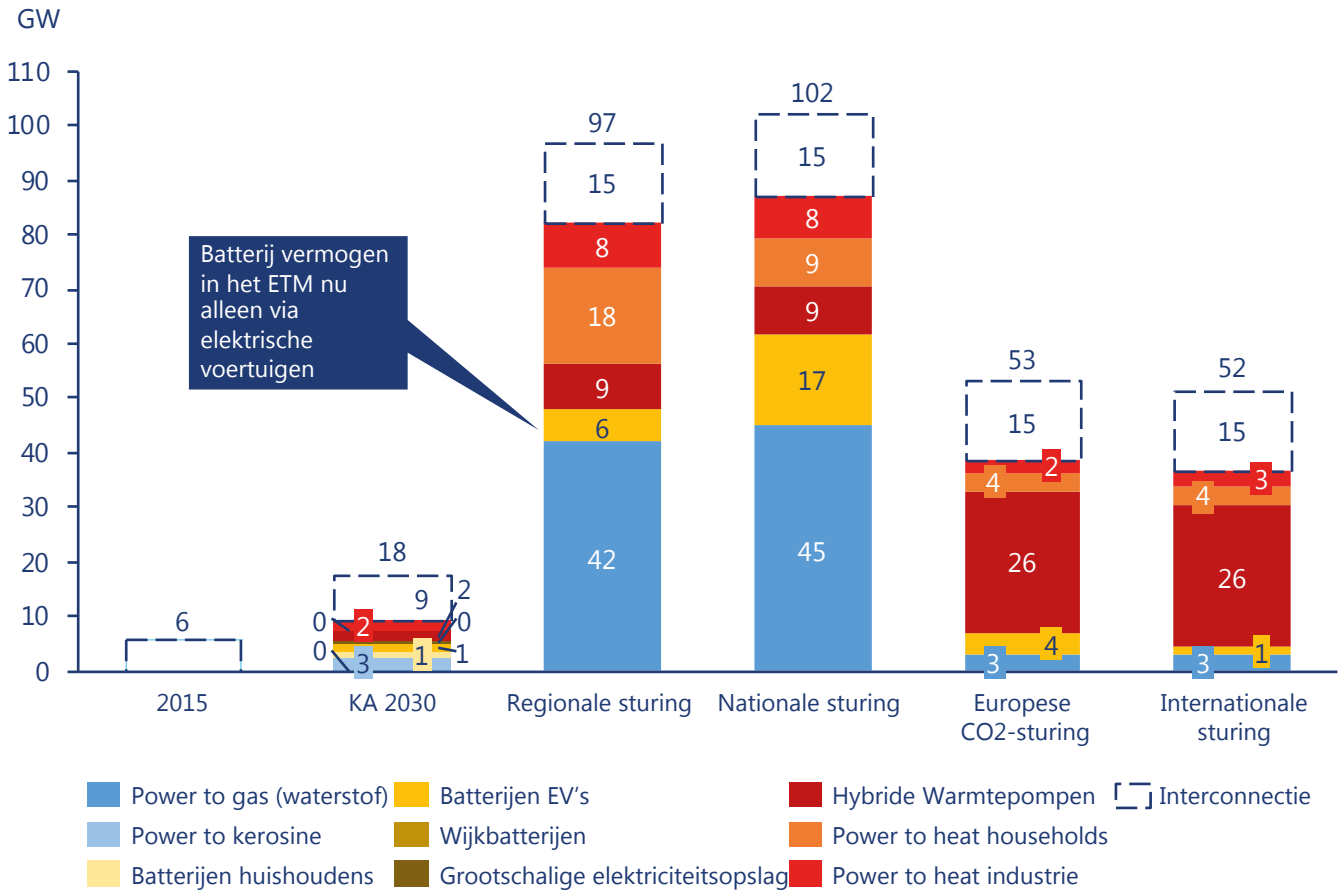
Power2heathuishoudens

In de huishoudens zijn de hybride warmtepompen temperatuurafhankelijk gemodelleerd. Dit betekent dat de hybride warmtepompen van elektriciteit omschakelen naar groen gas of waterstof als de temperatuur daalt en de COP (Coëfficiënt of Performance) onder de 3 daalt.

Vehicle2grid

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 vermogen per auto voor vehicle2grid is in het ETM 3,7 kW. Mogelijk zou dit vermogen hoger kunnen liggen doordat in de toekomst laadinfrastructuur met grotere vermogens wordt uitgerold.

Naast de bovengenoemde technieken zijn er ook opslagmogelijkheden in thuisbatterijen, wijkbatterijen en grootschalige elektriciteitsopslag. Deze hebben wij voor nu niet meegenomen in de modellering in het ETM, omdat deze technieken daar zorgden voor onrealistische effecten in de kosten en het netwerk. Deze technieken zijn echter onderdeel van de doorrekening in fase 2 van de integrale infrastructuurverkenning 2030-2050.



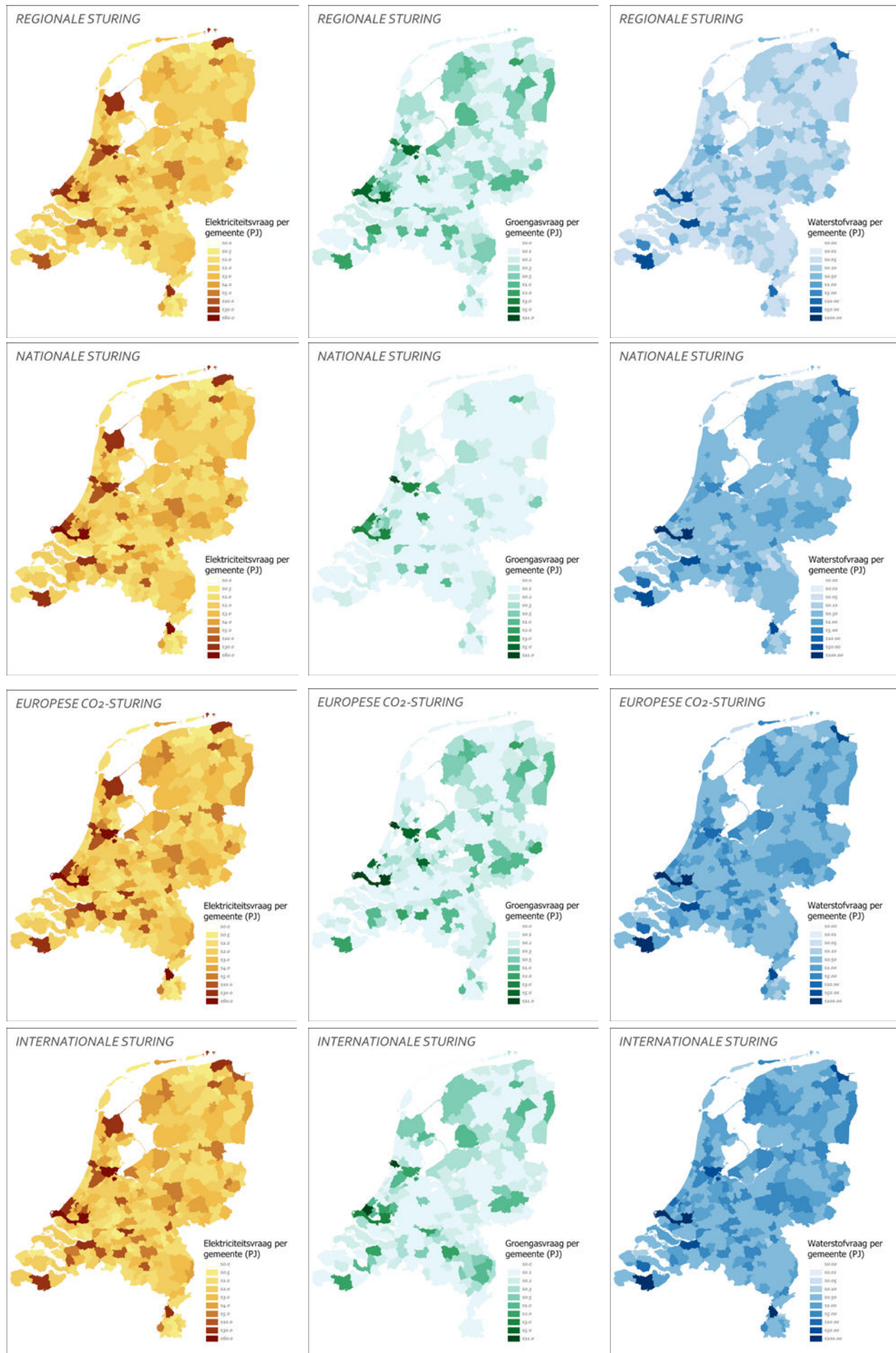
Figuur 56: Opgesteld flexibel vermogen

Mogelijk vervangend of extra flexvermogen voor doorrekening fase 2 van de integrale infrastructuurverkenning 2030-2050

Voor fase 2 van de integrale infrastructuurverkenning stellen wij de volgende verdeling van overige flextoepassingen voor. Deze flextoepassingen kunnen in de meer gedetailleerde doorrekening van de netten zeker van nut zijn. De nadruk per flextoepassingen staat per scenario aangegeven in Tabel 33. De redeneerlijn per scenario is als volgt: In een regionaal scenario wordt er veel geïnvesteerd in batterijen in huishoudens, bewoners willen de energie die ze met hun zon-PV op daken opwekken opslaan en zelf gebruiken. In het nationale scenario wordt er landelijk veel geïnvesteerd in wijkbatterijen. Daarnaast wordt er een ondergrondse pompaccumulatiecentrale gebouwd. In het Europese scenario wordt er door sommige bewoners geïnvesteerd in de huisbatterijen omdat dit zich in korte tijd terugbetaald. Daarnaast worden er meerdere grootschalige elektriciteitsopslagen geïnstalleerd. Het internationale scenario heeft het minste opslag in huishoudens en wijken, aangezien er hier vanuit wordt gegaan dat tekorten altijd ingevuld kunnen worden met import. Er staat één grootschalige elektriciteitsopslag om de elektriciteitsmarkt te balanceren. Invloed op het opgesteld vermogen aan aan/uit-schakelbare centrales is ook onderdeel van fase 2. Zie paragraaf 4.3.2 voor een uitgebreidere toelichting op de back-up centrales.

Tabel 33 Potentie flexibel vermogen per scenario

| | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|--|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Batterij huishoudens (GW) | ++ | + | + | 0 |
| Batterij wijken (GW) | + | ++ | 0 | 0 |
| Grootschalige elektriciteitsopslag (GW) | 0 | + | ++ | + |



Figuur 57 Overzicht van de regionalisering van de vraag naar elektriciteit, gas en waterstof voor alle scenario's. N.B. De verdeling is een logaritmische verdeling en deze verschilt per energiedrager, doordat de totale hoeveelheden per drager verschillen.

Regionalisering

Hoofdstuk 6

De landelijke resultaten van de scenario's zijn vertaald naar regionale uitkomsten voor de vraagsectoren en de decentrale duurzame elektrische opwek op land. Om de benodigde infrastructuur te bepalen in fase 2 van I13050, willen de netbeheerders hun netten op een zo laag mogelijk niveau doorrekenen. Om dit te kunnen doen worden de landelijke uitkomsten uit het ETM vertaald naar gemeente en buurniveau. In fase 2 zullen de flexibiliteitstoepassingen en centrale elektriciteitsopwekking bepaald worden en ook geregionaliseerd worden. Deze zijn daarom hier niet meegenomen.

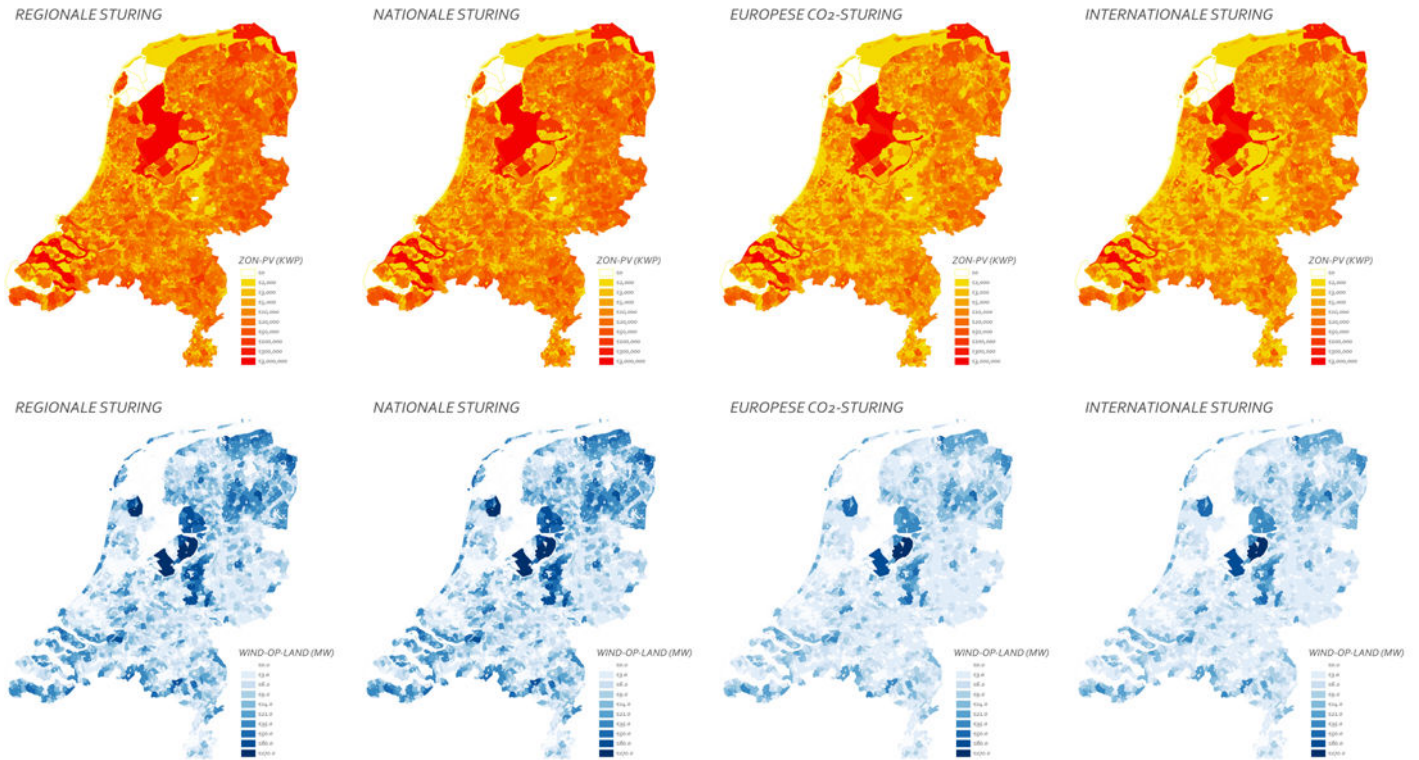


De regionalisering is uitgevoerd op een gelijksoortige wijze als de Infrastructure Outlook 2050. Door gebruik te maken van verdeelsleutels zijn de energetische uitkomsten van het ETM te alloceren naar buurten. Deze verdeelsleutels zijn opgesteld uit publiek toegankelijke data van Nederland. Voor sommige delen van de regionalisering was het slechts mogelijk om op gemeenteniveau een allocatie uit te voeren, omdat de toekenning naar buurten vanuit landelijke data te onzeker zou zijn. Voor de grote industriële clusters is een aparte regionalisering uitgevoerd.

In de rest van dit hoofdstuk wordt per sector beschreven waarop deze regionalisering is gebaseerd.

Allereerst beschrijven we uitkomsten van de regionalisering van alle sectoren en de decentrale duurzame elektrische opwek op land. Vervolgens gaan we in op de verschillende vraagsectoren:

- Gebouwde omgeving
 - Huishoudens
 - Gebouwen
- Mobiliteit
 - Personenvervoer
 - Vrachtvervoer
- Landbouw
- Energie
- Industrie



Figuur 58 Overzicht van de regionalisering van de decentrale elektriciteitsopwekking per scenario.

6.1 Uitkomsten regionalisering

De regionalisering heeft geleid tot de verdelingen die te zien zijn in Figuur 57 en Figuur 58. In dit overzicht hebben wij de resultaten geaggregeerd naar gemeentenniveau voor leesbaarheid en optelbaarheid.

De vraag van de industriële clusters is in bijna alle overzichten duidelijk herkenbaar. De wittere gebieden zijn vaak de meer dunbevolkte gebieden, waar de vraag naar energie laag is. De verdeling van de elektrische vraag lijkt in alle scenario's sterk op elkaar, dit is een logisch gevolg van het feit dat alle sectoren in alle scenario's een duidelijke elektrische vraag kennen.

6.2 Gebouwde omgeving

6.2.1 Huishoudens

Het aantal huishoudens per buurt is gekozen als verdeelsleutel voor de meeste energietoepassingen en is vastgesteld op basis van de prognose van het CBS voor groei en krimp⁴³⁾ per gemeente in 2040. Deze verdeelsleutel is toegepast op verlichting en huishoudelijke apparaten, koeling, zonthermie en batterijen in huis en power-to-heat elektrische boilers. Ook het

eindgebruik van energie voor warmte en warmwater is verdeeld op basis van aantal huishoudens per buurt.

Voor de warmtevoorziening is gekozen om op basis van een aantal kenmerken de meest waarschijnlijke verdeling van warmtetechnologieën onder buurten te bepalen. Hierbij zijn eerst de warmtenetten verdeeld onder de buurten die momenteel ook een warmtenet hebben, aangezien de kans dat die buurten over 30 jaar nog steeds een warmtenet hebben hoog is. Vervolgens is aangenomen dat hoe hoger de stedelijkheid⁴⁴⁾ (aantal adressen per hectare), hoe groter de kans op een warmtenet is. Buurten met een gelijke stedelijkheid maar die in een grotere gemeente liggen hebben voorrang op een warmtenet ten opzichte van buurten in kleinere gemeentes, aangezien grotere gemeentes vaker al een warmtenet hebben.

Voor de verdeling van de gasnetten (zowel methaan als waterstof) voor hybride warmtepompen is gekeken naar het percentage woningen per buurt dat een bouwjaar van voor 2000 heeft⁴⁴⁾. Aangenomen is dat in buurten met veel oude woningen de kans op een gasnet groter is, aangezien all-electric warmtepompen hier niet altijd voldoende zijn.

43) CBS Statline: Regionale prognose bevolkingsopbouw; 2011-2040

44) CBS Statline: Kerncijfers wijken en buurten 2018

In het Europese scenario zijn er zowel buurten met hybride warmtepompen op methaan als op waterstof. In dit scenario is daarom de landelijkheid ook meegenomen bij het verdelen van deze twee type gasnetten. Landelijkheid is gedefinieerd als het percentage van de totale oppervlakte dat bestaat uit agrarisch terrein of bos en open natuurlijk terrein⁴⁵⁾. Aangezien gasinfrastructuur buurtoverschrijdend is, is ervoor gekozen om de landelijkheid per RES-regio te gebruiken in plaats van de landelijkheid per buurt. Buurten in een RES-regio met de hoge landelijkheid maken gebruik van een groegasnet. Immers is in deze regio's relatief veel biomassa beschikbaar om dit gas te produceren. Buurten met een lage landelijkheid maken gebruik van waterstof.

Van buurten die geen warmtenet of gasnet hebben wordt aangenomen dat zij zullen worden verwarmd met all-electric warmtepompen.

Aangezien er op landelijk niveau aanzienlijke verschillen zijn in het percentage huishoudens dat in gestapelde bouw woont, is ervoor gekozen om de zonnepanelen niet over de huishoudens te verdelen, maar over het beschikbare dakoppervlak. Er is aangenomen dat het dakoppervlak van een meergezinswoning vijf maal kleiner is dan het dakoppervlak van een eengezinswoning, aangezien het gemiddelde gebouw met meergezinswoningen 5 verdiepingen kent⁴⁶⁾. Er is aangenomen dat andere verschillen tussen eengezinswoningen en meergezinswoningen (zoals omvang, schuin/plat dak) elkaar compenseren.

6.2.2 Gebouwen

Voor de gebouwen is aangenomen dat de huidige gasvraag van utiliteitsgebouwen in de betreffende buurt een indicatie geeft van de toekomstige energievraag in die buurt.

Voor de verdeling van warmtetechnologieën is gekeken naar de technologie voor huishoudens in de betreffende buurt. Dus als er in een buurt al een warmtenet of gasnet ligt, is de kans groot dat de andere gebouwen hier ook op zullen aansluiten.

Echter, als alle gebouwen in de betreffende buurten worden voorzien van een warmtenet of gasnet, worden de percentages zoals vastgesteld in de scenario's nog niet gered. Het wordt aangenomen dat in buurten met veel bedrijven (bedrijventerreinen) de kans groter is dat hier ook een warmtenet ligt ten opzichte van buurten met relatief weinig bedrijven. Daarom

zijn de warmtenetten toebedeeld aan buurten met de hoogste bedrijfsdichtheid⁴⁴⁾ (aantal bedrijfsvestigingen per hectare).

Voor het verdelen van het gasnet is, naast de bedrijfsdichtheid, gekeken naar welke buurten in een gemeente liggen waar ten minste 10 andere buurten een gasnet hebben. Aangenomen is dat het doortrekken in deze buurten de kans op een gasnet (zowel methaan als waterstof) relatief hoog is.

6.3 Mobiliteit

6.3.1 Personenvervoer

In alle scenario's wordt ervan uitgegaan dat auto's tegen 2050 een standaard accucapaciteit van 100 kWh hebben bereikt vanwege verbeteringen in de energiedichtheid van batterijen. Vandaar dat bereikangst is verdwenen. De toename van de accu's gaat gepaard met een toename van het laadvermogen. Langzame laadfaciliteiten hebben een vermogen van 11 kW om binnen de limieten van een 3x25A-aansluiting toch binnen 10 uur een volledige laadstatus te bereiken. In de scenario's wordt verondersteld dat door retailers aangeboden parkeerplaatsen (b.v. Ikea, Albert Heijn etc.) zullen beschikken over 50 kW laadfaciliteiten. Hierdoor kunnen auto's volledig opgeladen worden binnen de tijd die nodig is voor een bezoek aan een winkel. Snel laadvermogen wordt verondersteld een standaard van 250 kW te hebben in 2050. Alle scenario's gaan ervan uit dat slim laden met congestie-vermijdingsfunctionaliteit de standaard is voor langzaam laden, wat leidt tot een lagere piekcapaciteit.

In alle scenario's wordt ervan uitgegaan dat automobilisten de kosten minimaliseren en hun tijd zo nuttig mogelijk willen besteden. In het regionale scenario leidt dit tot een voorkeur voor opladen terwijl de auto toch wordt geparkeerd, hetzij 's nachts of op zonnige dagen rond het middaguur. Er wordt verondersteld dat detailhandelaren energiebelastingen betalen op de elektriciteit die zij aanbieden op hun laadpunten en daarom laden niet tegen prijzen aanbieden die lager zijn dan de kosten van thuis opladen. Van huishoudens wordt verondersteld dat ze betaalbare elektriciteit opwekken uit zonnepanelen.

In het nationale scenario wordt ervan uitgegaan dat detailhandelaren geen energiebelastingen betalen op de elektriciteit die zij op hun laadpunten aanbieden. Als gevolg hiervan kunnen ze hun klanten goedkope elektriciteit aanbieden als marketingstrategie. Dit wijzigt het laadgedrag van chauffeurs die de kosten minimaliseren door te laden tijdens een bezoek aan winkels. Daarom is het aandeel medium-snel laden hoger dan in het regionale scenario.

45) CBS Statline: Bodemgebruik; uitgebreide gebruiksvorm, per gemeente

46) RVO: Gebouwen; Referentiewoningen EPC. [Link](#)

In het Europese en Internationale scenario met zelfrijdende voertuigen wordt ook verondersteld dat auto's niet mogen parkeren in stedelijke gebieden (zones 1-2, zie Tabel 34), met uitzondering van snellaadstations. Dit zorgt ervoor dat duur land vrijkomt voor andere ontwikkelingen in stedelijke gebieden.

In het Europese scenario wordt ervan uitgegaan dat de autonome elektrische voertuigen-markt gereguleerd is om het openbaar vervoer concurrerend te houden en te voorkomen dat het openbaarvervoersysteem wordt afgestoten. Daarom rijden auto's niet zoveel als in het internationale scenario en hebben auto's een hogere neiging om buiten de piekuren stil te staan. Dit leidt tot een laadgedrag waarbij auto's in minder stedelijke gebieden (zones 3-5, zie Tabel 34) opladen om te profiteren van de elektriciteit die huishoudens gedurende de dag of buiten de piekuren opwekken, b.v. 's nachts.

Het internationale scenario veronderstelt dat er geen voorschriften zijn die het aantal zelfrijdende voertuigen beperken. Als gevolg maken ze andere vormen van gemotoriseerd vervoer overbodig, wat leidt tot desinvesteringen in het openbaar vervoer. Dit verhoogt de omvang van files rond piekuren. De overheid laat mensen belasting betalen naar de hoeveelheid tijd die ze in autonome auto's doorbrengen om te voorkomen dat de straten overvol raken. Auto's staan minder uren stil in het internationale scenario. Dit leidt tot een relatief hoger aandeel van snelladen. Auto's laden ook in minder stedelijke gebieden (3-5, zie Tabel 34) gedurende uren met weinig vraag naar mobiliteitsdiensten.

De verdeling van het laden tussen langzaam-, medium-snel- en snelladen van auto's in de scenario's wordt beschreven in Tabel 35. In het regionale scenario wordt er relatief meer opgeladen bij medium-snelladers die door retailers worden aangeboden en minder bij langzaamladere in vergelijking met het nationale scenario. Dit komt doordat mensen geen eigen parkeerplaatsen in stedelijke gebieden hebben⁴⁷⁾. In het nationale scenario wordt er relatief meer opgeladen met langzaamladere in niet-stedelijke gebieden in vergelijking met stedelijke gebieden. Dit komt doordat mensen hun eigen parkeerplaatsen met opladers hebben. In de Europese en internationale scenario's wordt het aandeel van langzaam laden in stedelijke gebieden toegewezen aan niet-stedelijke gebieden.

Het aandeel van snelladen is hoger in meer stedelijke gebieden aangezien de dichtheid van snelladers hoger is. Het is ook hoger in het regionale scenario vanwege het feit dat alle voertuigen elektrisch zijn. Daarom rijden zelfs degenen die regelmatig lange afstanden afleggen in elektrische voertuigen. In de nationale en Europese scenario's kunnen die chauffeurs kiezen voor andere brandstoffen. In het internationale scenario rijden auto's meer en is er een grotere vraag naar mobiliteit, waardoor de auto's de tijd die ze stil staan door het laden minimaliseren en dus kiezen voor snelladen.

Tabel 35 geeft het aantal laadstations per type per auto weer. In de nationale en regionale scenario's zijn er meer laadstations per auto vanwege de grotere parkeerbehoefte. Deze parkeerbehoefte groeit vanwege het grotere aantal auto's en omdat auto's niet autonoom zijn. In de Europese en internationale scenario's wordt medium-snel opladen niet aangeboden, omdat het niet door retailers als marketingstrategie kan worden gebruikt. Dit komt omdat klanten geen auto's bezitten die kunnen worden opgeladen.

Van busbedrijven wordt verondersteld dat ze het gebruik van activa optimaliseren en zo de stilstandtijd door opladen minimaliseren. De best beschikbare technologie voor bussen maakt een bereik van 400 km al mogelijk^{48),49)}. Daarom hoeven bussen die in het gemeentelijk openbaar vervoer worden gebruikt overdag niet worden opgeladen en worden ze dus 's nachts opgeladen. In het regionale scenario moeten langeafstands-bussen (internationaal) mogelijk opladen tijdens service-uren. Dit zal waarschijnlijk plaatsvinden op momenten dat het voertuig toch geparkeerd staat, b.v. tijdens stops bij busstations of wettelijk verplichte pauzes in de scenario's waarin voertuigen niet autonoom zijn. Bij dit type opladen wordt snelladen verondersteld. In andere scenario's dan het regionale scenario worden langeafstandsbussen verondersteld andere brandstoffen te gebruiken. De verdeling tussen particuliere en openbare voorzieningen wordt gegeven in Tabel 37. Bussen worden verondersteld 's nachts op 50 kW te laden. Aangenomen wordt dat het snellaadvermogen voor bussen 400 kW is.

47) Hoekstra, A. and Refa, N. (2017). Characteristics of Dutch EV drivers

48) OV bussen rijden gemiddeld genomen dagelijks 235km o.b.v. 320 operationele dagen per jaar. (CBS, 2019).

49) Van de Weijer, B. (2019). Eerst de stadsbus, nu de streekbus. Hoe een Brabants bedrijf de conservatieve bussenwereld elektrificeert

Tabel 34 Beschrijving van verstedelijkingszones. Bron: CBS

| Graad van verstedelijking | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--------------------------------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Urban/ non-urban | Urban | Urban | Non-urban | Non-urban | Non-urban |
| # adressen per km ² | >2500 | 1500-2500 | 1000-1500 | 500-1000 | <500 |

Tabel 35 Toewijzing van het opladen tussen verschillende soorten laders.

| Scenario's | Urban | | | Non-urban | | |
|-----------------------------------|----------|--------|--------|-----------|--------|--------|
| | Langzaam | Medium | Snel | Langzaam | Medium | Snel |
| | 11 kW | 50 kW | 250 kW | 11 kW | 50 kW | 250 kW |
| Regionale sturing | 0.75 | 0.175 | 0.075 | 0.9 | 0.075 | 0.025 |
| Nationale sturing | 0.25 | 0.7 | 0.05 | 0.5 | 0.475 | 0.025 |
| Europese CO ₂ -sturing | 0 | 0 | 0.025 | 0.975 | 0 | 0.025 |
| Internationale sturing | 0 | 0 | 0.5 | 0.5 | 0 | 0.5 |

Tabel 36 Aantal laadstations per auto voor elke urbanisatiezone.

| # laadstations | Nationale sturing | Regionale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Zones 1-2 | | | | |
| Langzaam | 0.25 | 0.25 | 0.02 | 0.02 |
| Medium | 0.01 | 0.01 | 0 | 0 |
| Snel | 0.004 | 0.004 | 0.002 | 0.002 |
| Zone 3 | | | | |
| Langzaam | 0.8 | 0.8 | 0.25 | 0.25 |
| Medium | 0.01 | 0.01 | 0 | 0 |
| Snel | 0.004 | 0.004 | 0.002 | 0.002 |
| Zone 4 | | | | |
| Langzaam | 1 | 1 | 0.25 | 0.25 |
| Medium | 0.01 | 0.01 | 0 | 0 |
| Snel | 0.004 | 0.004 | 0.002 | 0.002 |
| Zone 5 | | | | |
| Langzaam | 1 | 1 | 0.4 | 0.4 |
| Medium | 0.01 | 0.01 | 0 | 0 |
| Snel | 0.004 | 0.004 | 0.002 | 0.002 |

6.3.2 Vrachtvervoer

Vrachtwagenbedrijven worden verondersteld het activagebruik te optimaliseren, net als busbedrijven. Vrachtwagens voor korte afstanden, zoals vuilniswagens of vrachtwagens die van distributiecentra naar winkellocaties rijden, laden bij particuliere faciliteiten. Dergelijke vrachtwagens hebben meestal een vaste route en planning. Omdat de afstanden die ze rijden relatief kort zijn en er geen natuurlijke stilstandtijd langs de route is, wordt ervan uitgegaan dat het opladen van 100% bij de privéfaciliteit extra downtime vanwege het opladen minimaliseert. Zie Tabel 38 voor de toewijzing.

6.4 Landbouw

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

6.5 Energie

6.5.1 Wind-op-land

Het opgestelde vermogen voor wind-op-land is verdeeld naar de locaties die ruimte bieden voor windmolens vanaf 3,6 MW en geen harde beperkingen kennen. Hierdoor zijn ook kleinere gebieden geschikt voor windmolens. Deze windmolens zijn verdeeld over heel Nederland.

6.5.2 Zonneparken

Zonneparken zijn verdeeld via de verdeelsleutels van oppervlakte landbouwareaal en oppervlaktewater geschikt voor zon in Nederland, waarbij rekening is gehouden met harde restricties. De verdeling tussen deze categorie is gedaan aan de hand van de verdeling uit het Nationaal Solar Trend Rapport 2018, waarbij het merendeel van de zonneparken op land komt.

6.6 Regionalisering industrie

Eerst wordt ingegaan op de methodiek die gehanteerd is om het gebruik van energiedragers door de industrie in de nationale scenario's te verbijzonderen naar vijf industrieclustersscenario's (exclusief E-refinery, omdat deze moeilijk te alloceren is aan de clusters). Daarna beschrijven we per industriecluster de ontwikkelingen in ieder scenario. Deze stukken bevatten veel tabellen met getallen die de leesbaarheid bemoeilijken, maar die de lezer wel in staat stellen om te volgen hoe we uiteindelijk op een "energiebalans" per cluster en per scenario zijn gekomen.

6.6.1 Methodiek

We hebben op nationaal niveau de CBS-cijfers genomen m.b.t. de energetische vraag per industriesector, alsmede de non-energetische vraag van feedstock, die ook leidt tot CO₂-emissies voor het jaar 2015. Dit is het startjaar waarmee het Energietransitiemodel momenteel werkt.

Vervolgens hebben we een beeld gevormd van hoe de vraag naar feedstock, de productieprocessen, de vraag naar energie voor de productieprocessen, de vraag naar producten van de industriesector en de circulariteit van de industrie zich zouden kunnen gaan ontwikkelen in de verschillende nationale scenario's (zie voorgaande hoofdstukken).

We hebben alleen een energiebalans voor het jaar 2018 van het cluster Rotterdam-Moerdijk gekregen. Voor de overige clusters ontbrak dit overzicht voor de huidige situatie.

Voor de andere clusters hebben we de energiebalansen afgeleid van de meest recente emissieregistratiecijfers. Ook hebben we specifiek van de clusters rapporten gekregen, zoals roadmaps en systeemstudies, die informatie over de energiedragers bevatten. Tenslotte hebben we informatie verzameld door middel van interviews met vertegenwoordigers van de clusters.

Toen we eenmaal de "energiebalansen" per cluster hadden berekend, hebben we alle clusters weer bij elkaar opgeteld om te bepalen of de totalen van de vijf clusters overeenkomen met de industriesectoren zoals bepaald in de scenario's op nationaal niveau. Deze getallen (optelsom clusters en optelsom industriesectoren op nationaal niveau) sloten goed op elkaar aan.

Voor industrieën zoals papier en voeding, die vaak buiten de industrieclusters aanwezig zijn hebben we op basis van de emissieregistratie een allocatie gedaan van de energiedragers naar de gemeenten waar deze industrieën nu zijn gehuisvest.

Voor de categorie 'overige industrie', waar o.a. textiel-, hout- en bouwmaterialenindustrie onder vallen, bleken de emissieregistratiecijfers beperkt, vermoedelijk omdat veel bedrijven in deze sectoren geen registratieverplichting hebben. Daarom is gekozen om voor deze categorie cijfers van het CBS te gebruiken. Op COROP-niveau is de omzet van verschillende typen industrie beschikbaar⁵⁰⁾, wat vervolgens onderverdeeld is naar gemeente op basis van het aantal industrievestigingen per gemeente⁵¹⁾.

50) CBS (2018). Bedrijfsleven; omzet, bedrijfstak (SBI 2008), regio

51) CBS (2019). Vestigingen van bedrijven; bedrijfstak, gemeente

Tabel 37 Toewijzing van het opladen van bussen tussen particuliere en openbare voorzieningen.

| Scenario | Particuliere voorziening | Openbare voorziening |
|-----------------------------------|--------------------------|----------------------|
| Regionale sturing | 1 | 0 |
| Nationale sturing | 1 | 0 |
| Europese CO ₂ -sturing | 1 | 0 |
| Internationale sturing | 1 | 0 |

Tabel 38 Toewijzing van het laden van vrachtwagens tussen particuliere en openbare voorzieningen

| Scenario | Particuliere voorziening | Openbare voorziening |
|-----------------------------------|--------------------------|----------------------|
| Regionale sturing | 1 | 0 |
| Nationale sturing | 1 | 0 |
| Europese CO ₂ -sturing | 1 | 0 |
| Internationale sturing | 1 | 0 |

In het vervolg zullen we beknopt ingaan op ieder van de vijf clusters.

6.6.2 Rotterdam-Moerdijk

Inleiding

Het cluster Rotterdam-Moerdijk bestaat uit verschillende industrieën, waaronder raffinage, chemie, elektriciteitsproductie en afvalverwerking. Dit cluster omvat circa 60 bedrijven, waarvan 36 chemische bedrijven, 5 olieraffinaderijen en 4 afvalverwerkingsbedrijven. Gezamenlijk bedroeg de CO₂-uitstoot van deze bedrijven 18,6 Mton in 2016.⁵²⁾ Daarnaast bedroeg de CO₂-uitstoot van elektriciteitscentrales in het cluster 15,9 Mt in 2016. Na sluiting van de oude kolencentrale op de Maasvlakte in 2017 zijn er nu nog 5 elektriciteitscentrales, waarvan twee kolengestookt en drie gasgestookt, met een totale CO₂-uitstoot van 11,1 Mton in 2018.

Op de korte termijn, tot 2025, wordt binnen het cluster Rotterdam-Moerdijk met name ingezet op procesefficiëntie en CC(U)S bij bedrijven⁵²⁾, mede als basis voor de verdere verduurzaming. De efficiëntiewinst zal mede worden gerealiseerd door het uitwisselen van stoom. Hoewel er enkele stoomleidingen tussen bedrijven aanwezig zijn, is het maximale potentieel nog niet bereikt. In de projectverkenning onder de naam Porthos is de aanleg van een CO₂-infrastructuur onderzocht. Hierbij wordt CO₂ in het cluster Rotterdam-Moerdijk afgevangen en

getransporteerd naar lege gasvelden op de Noordzee en naar de glastuinbouw.⁵³⁾ Nationaal wordt gestreefd naar een beëindiging van kolengestookte elektriciteitsopwekking voor eind 2030. Hierdoor loopt de vraag naar kolen terug. Daarnaast is gepland om meer warmte vanuit de haven te leveren aan kassen en steden.

Op de middellange termijn, richting 2030, zal de focus verschuiven naar het opschalen van CC(U)S en de productie van hernieuwbare energiedragers. Hierdoor zal er een langzame verschuiving van fossiel naar elektriciteit en waterstof plaatsvinden. Door elektrificatie en het uitfaseren van de kolencentrales neemt de vraag naar hernieuwbare elektriciteit toe. Vanwege de strategische locatie kan elektriciteit afkomstig van wind-op-zee worden ingezet in het cluster Rotterdam-Moerdijk. Ook waterstof zal een steeds prominentere rol krijgen. In 2030 zal het aandeel groene waterstof uit Nederlandse duurzame stroom nog beperkt zijn, waardoor met name ingezet wordt op blauwe waterstof of geïmporteerde waterstof. Afhankelijk van de opschaling van groene waterstof en de ontwikkeling van de vraag naar waterstof zouden één of twee nieuwe blauwe waterstoffabrieken gebouwd kunnen worden, die tevens zijn aangesloten op de dan gerealiseerde CO₂-infrastructuur⁵³⁾.

Op de lange termijn, richting 2050, komt ook de feedstock in beeld. Hierin worden drie mogelijke routes uitgesplitst. Een circulaire route, waarbij plastics worden ingezameld en middels pyrolyse worden omgezet tot naftafracties (in Nederland of over

52) Industriecluster Rotterdam-Moerdijk (2018). In drie stappen naar een duurzaam industriecluster Rotterdam-Moerdijk in 2050

53) CCUS (2018), Rotterdam. Project Porthos: transport en opslag van CO₂

de grens). Hierdoor ontstaat een circulaire koolstofkringloop, die de vraag naar fossiele energiedragers doet krimpen. Een tweede mogelijkheid is een biogene route, waarbij biomassa kan worden ingezet voor zowel energetische als non-energetische doeleinden. Echter, de huidige omvang van het cluster Rotterdam-Moerdijk en de beperkte beschikbaarheid van biomassa staat mogelijk opschaling in de weg. Een laatste mogelijkheid is de productie van synthetische halfproducten en eindproducten middels het Fischer-Tropschproces. Wanneer deze route wordt bewandeld, stijgt de vraag naar waterstof en koolmonoxide (of kooldioxide) explosief. Alternatief is de import van tussenproducten die verder met behulp van waterstof in hydrocrackers worden opgewerkt.

Berekening van de energievraag in het Rotterdam-Moerdijk Cluster in 2050

De ontwikkeling van het cluster Rotterdam-Moerdijk in elk van de 2050-scenario's is volgens de onderstaande methode tot stand gekomen. Allereerst is het cluster onderverdeeld in drie primaire industriële sectoren, namelijk elektriciteitsproductie, raffinage en chemie. Vervolgens is de energiebalans uit 2018 gebruikt om de vraag naar energiedragers in 2050 te schalen voor elk van de scenario's. Hierbij zijn de volgende aannames gedaan.

Elektriciteitsopwekking Rotterdam-Moerdijk

In 2050 zal alle elektriciteitsopwekking hernieuwbaar zijn. Vanwege ruimtelijke beperkingen wordt ervan uitgegaan dat dit niet binnen het cluster Rotterdam-Moerdijk plaatsvindt, m.u.v. bijvoorbeeld waterstofgestookte back-upcentrales. De onderstaande tabel geeft dit weer.

Raffinage Rotterdam-Moerdijk

De raffinagesector gebruikt op dit moment aardolie. In 2050 zal dit niet meer het geval zijn in het regionale en nationale scenario. In deze twee scenario's zal de energetische vraag worden ingevuld door waterstof en de non-energetische vraag door pyrolyseolie (circulaire route), omdat de vraag naar aardolie gebaseerde eindproducten (bijv. benzine, diesel, kerosine, scheepsbrandstoffen etc.) in deze scenario's is verdwenen. De raffinagesector richt zich hierdoor vrijwel alleen op het produceren van halfproducten voor de chemische industrie. De omvang van de raffinage-industrie is vanwege deze reden afhankelijk van de omvang van de chemische industrie in elk van de 2050-scenario's. In het regionale scenario is de raffinagesector nog 14% van de huidige omvang en in het nationale scenario 36,4%.

In het Europese scenario wordt de energetische vraag door waterstof ingevuld, terwijl de non-energetische vraag met fossiele energiedragers wordt gedekt. Dit geldt ook voor non-energetische vraag in het internationale scenario. Echter, het internationale scenario gebruikt biomassa om in de energetische vraag te voorzien. De reden om wel voor fossiele energiedragers in het Europese en internationale scenario te kiezen is de omvang van de export. De omvang van de raffinagesector komt dan uit op 40% en 50% voor het Europese en Internationale scenario respectievelijk.

Vanwege de krimp in de raffinage-industrie wordt er minder geïnvesteerd in nieuwe technologieën, waardoor energetische besparingen door procesefficiëntie minder waarschijnlijk zijn en dus niet meegenomen in de energiebalans.

In het cluster Rotterdam-Moerdijk is de huidige energetische vraag voor de raffinage 124 PJ en de non-energetische vraag (energie in olieproducten) is 2125 PJ. Deze vraag is geschaald naar de landelijke raffinagepercentages. Ook is zowel de energetische vraag als de non-energetische vraag verdeeld over de energiedragers naar de landelijke verdelingen. Er wordt niet gedifferentieerd tussen de verschillende raffinaderijen. Voor Rotterdam-Moerdijk betekent dit dat de energievraag er als volgt uitziet.

Chemie Rotterdam-Moerdijk

Wat betreft de chemische industrie geldt het volgende. In het regionale scenario neemt de omvang van de chemische industrie af omdat de export wordt gereduceerd. De meeste producten worden afgezet op Nederlands grondgebied. Voor het nationale scenario wordt geen groei of krimp verwacht. In het Europese en internationale scenario wordt nog steeds geëxporteerd, waardoor de chemische industrie zal blijven groeien met circa 1% per jaar.

De chemische industrie wordt voorzien in non-energetische energiedragers door de raffinage-industrie. Dit betekent dat in het regionale en nationale scenario de vraag wordt ingevuld door circulaire nafta (pyrolyseolie), terwijl in het Europese en internationale scenario dit fossiele nafta zal zijn.

De focus zal in het regionale, nationale en Europese scenario liggen op de inzet van waterstof en elektrificeren. Alleen in het internationale scenario wordt geen gebruik gemaakt van waterstof. In dit scenario zal nog meer geëlektrificeerd worden en zullen de processen die niet te elektrificeren zijn worden gevoed met biomassa. Ten opzichte van de nationale scenario's kan er in Rotterdam in het regionale, nationale en Europese scenario

Tabel 39 Elektriciteitsopwekking Cluster Rotterdam-Moerdijk

| | Huidig | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|--------------------------------|--------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Elektriciteitsopwekking | 100% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Hernieuwbaar | 2% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| Kolen | 40% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Biomassa | 1% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Aardgas (incl. WKK) | 57% | 0% | 0% | 0% | 0% |

Tabel 40 Verhouding energiedragers raffinage sector voor het cluster Rotterdam-Moerdijk per scenario

| | Huidig | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|---|--------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Raffinage (energievraag) | 100% | 14% | 36,4% | 40% | 50% |
| Energetische vraag raffinage | | | | | |
| Aardolie | 60% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Aardgas | 36% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Elektriciteit | 3% | 5% | 5% | 5% | 5% |
| Waterstof | 0% | 95% | 95% | 80% | 80% |
| Biomassa | 0% | 0% | 0% | 20% | 20% |
| Feedstock (energie in olieproducten) | | | | | |
| Aardolie | 99% | 0% | 0% | 99% | 99% |
| Aardgas | 1% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Waterstof | 0% | 0% | 0% | 1% | 1% |
| Pyrolyseolie | 0% | 100% | 100% | 0% | 0% |

Tabel 41 Energievraag raffinage sector voor het cluster Rotterdam-Moerdijk per scenario

| | Huidig | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|-------------------------------------|--------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Energievraag (PJ) | 2249 | 312 | 819 | 900 | 1125 |
| Energetische vraag raffinage | 124 | 17 | 45 | 50 | 62 |
| Aardolie | 75 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Aardgas | 45 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Elektriciteit | 4 | 1 | 2 | 2 | 3 |
| Waterstof | 0 | 16 | 43 | 40 | 50 |
| Biomassa | 0 | 0 | 0 | 10 | 12 |
| Feedstock | 2125 | 294 | 774 | 850 | 1063 |
| Aardolie | 2105 | 0 | 0 | 842 | 1052 |
| Aardgas | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Waterstof | 0 | 0 | 0 | 9 | 11 |
| Biomassa | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Pyrolyseolie | 0 | 294 | 774 | 0 | 0 |

relatief meer gebruik worden gemaakt van waterstof en warmtewetten dan in andere clusters, vanwege de ligging en de aanwezige industrie. Daarnaast zijn ook de procesefficiëntiewinsten meegenomen in de chemische sector, omdat het waarschijnlijk wordt geacht dat de inzet van nieuwe technologieën de energetische vraag zal reduceren.

Het huidige verbruik van de chemie in Rotterdam-Moerdijk is 119 PJ energetische en 216 PJ feedstock. Er wordt vanuit gegaan dat de groei van de chemische industrie in Rotterdam-Moerdijk op een vergelijkbare wijze krimpt of groeit als aangenomen in de nationale scenario's. Daarnaast is het met de percentages in Tabel 42 mogelijk de energievraag te alloceren over de energiedragers, zie Tabel 43.

De volgende tabel geeft voor het gehele cluster Rotterdam-Moerdijk de volgende verdeling over de energiedragers in de huidige situatie, op basis van de energiebalans van dit cluster, alsmede de energievraag in de 2050-scenario's voor dit cluster.

Overslag Rotterdam-Moerdijk

Naast het gebruik van energiedragers voor energetische en non-energetische doeleinden wordt een aanzienlijk deel van de energiedragers vervoerd naar het achterland. Dit heeft mogelijk invloed op de landelijke infrastructuur richting 2050. Momenteel wordt een groot deel van de energiedragers namelijk vervoerd over het spoor of via de binnenvaart. Dit geldt vooral voor fossiele energiedragers. Echter, richting 2050 zal de vraag naar fossiele energiedragers afnemen. In het regionale en nationale scenario verdwijnt de vraag naar fossiele energiedragers zelfs. Substituten zullen fossiele energiedragers vervangen. Een mogelijk voorbeeld hiervan is waterstof of ammoniak. Wanneer deze energiedragers niet in Nederland worden geproduceerd zullen deze mogelijk binnenkomen via de Rotterdamse haven en vervolgens worden getransporteerd naar het achterland. Dit zou, wanneer het grote volumes betreft, plaats kunnen vinden door middel van een pijpleiding. Dit is geen onderdeel van deze studie. Onze aanbeveling is om deze mogelijkheden te onderzoeken in fase 2 van de II3050-studie.

6.6.3 Cluster Zeeland: SDR (Smart Delta Resources)

Inleiding

Dit cluster is gesitueerd in zowel Vlaanderen als Zeeland en daardoor grensoverschrijdend. Het cluster omvat 11 energie- en grondstofintensieve bedrijven die actief zijn in de raffinage-, chemische, staal-, kunstmest-, voedings-, en elektriciteitsproductiesector. De totale uitstoot bedroeg circa 20,4 Mton

CO₂-eq, waarvan 10,9 Mton CO₂-eq in Nederland in 2018⁵⁴). Gezien de aard van deze studie is alleen ingezoomd op de bedrijven gevestigd op Nederlands grondgebied, te weten: Cargill Benelux BV, Dow Benelux BV (Hoek), Elsta BV & Co. BV, Sloe Centrale BV, YARA Sluiskil BV, Zeeland Refinery N.V. en SABIC Innovative Plastics BV. De vraag naar energiedragers op Nederlands grondgebied wordt met name veroorzaakt door bedrijven in de raffinage-industrie, chemische industrie, kunstmestindustrie en elektriciteitsproductie.

Het onderzoek Clean Underground Sustainable Transport (CUST) uitgevoerd door Royal Haskoning DHV beschrijft drie mogelijke verduurzamingsscenario's⁵⁵). Binnen elk van deze scenario's worden mogelijke verduurzamingroutes beschreven, namelijk de inzet van CC(U)S, de overgang naar hernieuwbare energiedragers in combinatie met synthetische feedstock en de transitie naar circulariteit. Welke verduurzamingroute bewandeld wordt is onduidelijk. Te verwachten valt dat het toekomstbeeld uiteindelijk een mix van de verduurzamingroutes zal worden, waarin op korte termijn ingezet wordt op CC(U)S. Op de middellange termijn zullen processen vooral gebruik maken van hernieuwbare energiedragers en op de lange termijn zal ook de feedstock verduurzaamd worden door de synthetische of circulaire route.

De verwachting in cluster Zeeland is dat waterstof een grote rol kan spelen binnen dit cluster vanwege de strategische locatie. Groene waterstof geproduceerd door windturbines op zee kan namelijk relatief eenvoudig naar cluster Zeeland getransporteerd worden. Tevens kan hierbij een waterstofconnectie met het Vlaamse deel van het cluster worden gerealiseerd.

Berekening van de energievraag in het Cluster Zeeland in 2050

Het ontbreken van een actuele energiebalans heeft ertoe geleid dat een schatting van de huidige energievraag is gemaakt op basis van de emissieregistratiedatabase, de energiebalans van de Rotterdamse Haven en de ontwikkelingen die verondersteld worden voor de industriële sector op nationaal niveau. Hierin is de omvang van elke industriële sector afgeleid uit de emissieregistratiedatabase en de verhouding energetisch/non-energetisch (feedstock) gelijk gesteld aan de verhoudingen aanwezig binnen het cluster Rotterdam-Moerdijk. Ter verduidelijking dient het onderstaande voorbeeld:

54) TNO (2019). Inventarisatie van de behoefte van de industriecluster aan grootschalige infrastructuur voor transport van elektriciteit, waterstof, warmte en CO₂ nodig voor het realiseren van klimaatdoelstellingen

55) Royal Haskoning DHV (2019). Onderzoek Clean Underground Sustainable Transport (CUST)

Tabel 42 Verhouding energiedragers chemische sector voor het cluster Rotterdam-Moerdijk per scenario

| | Huidig | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|----------------------------------|--------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Chemie (Energievraag) | 100% | 78% | 107% | 145% | 145% |
| Energetische vraag Chemie | | 55% | 71% | 102% | 102% |
| Aardgas | 46% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Elektriciteit | 13% | 26% | 26% | 26% | 40% |
| Nafta (aardolie) | 38% | 0% | 0% | 0% | 25% |
| Waterstof | 0% | 60% | 60% | 60% | 35% |
| Biomassa | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Warmtenet | 3% | 14% | 14% | 14% | 0% |
| Feedstock | | | | | |
| Nafta | 73% | 0% | 0% | 100% | 100% |
| Aardgas | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Waterstof | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Biomassa | 27% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Pyrolyseolie | 0% | 100% | 100% | 0% | 0% |

Tabel 43 Energievraag chemische sector voor het cluster Rotterdam-Moerdijk per scenario

| | Huidig | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|----------------------------------|------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Energievraag (PJ) | 335 | 234 | 314 | 435 | 435 |
| Energetische vraag Chemie | 119 | 65 | 84 | 121 | 121 |
| Aardgas | 55 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Elektriciteit | 15 | 17 | 22 | 32 | 49 |
| Nafta (aardolie) | 45 | 0 | 0 | 0 | 30 |
| Waterstof | 0 | 39 | 50 | 73 | 42 |
| Biomassa | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Warmtenet | 4 | 9 | 12 | 17 | 0 |
| Feedstock | 216 | 169 | 230 | 313 | 313 |
| Nafta | 158 | 0 | 0 | 313 | 313 |
| Aardgas | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Waterstof | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Biomassa | 58 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Pyrolyseolie | 0 | 169 | 230 | 0 | 0 |

Tabel 44 Energievraag van het cluster Rotterdam-Moerdijk (excl. vraag naar brandstoffen voor internationale lucht- en scheepvaart)

| | Huidig | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|---------------------------------|--------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Totale vraag (PJ) | 2556 | 242 | 348 | 1006 | 1249 |
| Aardolie | 2188 | 0 | 0 | 842 | 1052 |
| Aardgas | 215 | 0 | 0 | 0 | 30 |
| Elektriciteit | 19 | 18 | 24 | 34 | 52 |
| Waterstof | 0 | 55 | 93 | 121 | 103 |
| Biomassa | 60 | 0 | 0 | 10 | 12 |
| Pyrolyseolie (circulair) | 0 | 169 | 230 | 0 | 0 |
| Kolen | 74 | 0 | 0 | 0 | 0 |

De uitstoot van Zeeland Refinery bedraagt circa 1,6 Mton CO₂-eq. Hierbij moet worden opgemerkt dat alleen CO₂ in acht is genomen, andere broeikasgassen zijn buiten beschouwing gelaten. Vervolgens is de aanname gedaan dat ruwe aardolie als energiedrager wordt ingezet en zowel energetisch als non-energetisch gebruikt wordt. Wanneer deze uitstoot omgerekend wordt naar petajoules met behulp van de aardolie-emissiefactor en energiedichtheid dan komt dit overeen met 23 PJ. Deze uitstoot wordt echter alleen veroorzaakt door procesemissies, omdat het overgrote deel van de energiedragers verwerkt is in raffinageproducten. Feedstock moet vanwege deze reden meegenomen worden om tot een totale energievraag over het cluster te komen. Hiervoor is de verhouding energetisch/non-energetisch uit cluster Rotterdam-Moerdijk gebruikt omdat op het moment van schrijven niets beters voorhanden was. Deze verhouding is als volgt: 6% energetisch en 94% non-energetisch. De totale energievraag van de raffinage-industrie binnen het cluster Zeeland is hierdoor gelijk aan 417 PJ. Voor de chemische industrie binnen het cluster Zeeland is een gelijke werkwijze toegepast.

Aangezien de kunstmestindustrie geen onderdeel uitmaakt van cluster Rotterdam, maar wel van cluster Zeeland, is ervoor gekozen om deze alleen te baseren op gegevens afkomstig van de emissieregistratiedatabase. Hierbij is de aanname gedaan dat aardgas momenteel dient als energiedrager voor alle energetische processen, maar ook als feedstock voor de productie van waterstof middels SMR. Hierdoor is alle uitstoot zowel energetisch als non-energetisch. Dit in tegenstelling tot de andere industriële sectoren.

Elektriciteitsopwekking Cluster Zeeland

In 2050 zal alle elektriciteitsopwekking hernieuwbaar zijn. Vanwege ruimtelijke beperkingen wordt ervan uitgegaan dat dit niet allemaal binnen het cluster Zeeland plaatsvindt. Zon-PV, wind-op-land en waterstofcentrales die dienen als back-up zullen wel gerealiseerd worden binnen het cluster. Tabel 45 geeft de huidige en toekomstige verdeling in elk van de scenario's weer. Omdat alle elektriciteitsopwekking duurzaam plaatsvindt, zijn er geen energiedragers nodig die voorzien in de baseload. Waterstof wordt alleen ingezet als back-up en is daarom niet meegenomen in Tabel 45.

Raffinage Cluster Zeeland

De raffinagesector gebruikt op dit moment aardolie. In 2050 zal dit niet meer het geval zijn in het regionale en nationale scenario. In deze twee scenario's zal de energetische vraag grotendeels worden ingevuld door waterstof aangevuld met elektriciteit en de non-energetische vraag door pyrolyseolie

(circulaire route), omdat de vraag naar op aardolie gebaseerde eindproducten (bijv. benzine, diesel, kerosine, scheepsbrandstoffen etc.) in deze scenario's is verdwenen. De raffinagesector richt zich hierdoor vrijwel alleen op het produceren van halffabricaten voor de chemische industrie. De omvang van de raffinage-industrie is vanwege deze reden afhankelijk van de omvang van de chemische industrie in elk van de 2050-scenario's. In het regionale scenario is de raffinagesector nog 14% van de huidige omvang en in het nationale scenario 36,4%.

In het Europese scenario wordt de energetische vraag door waterstof en biomassa ingevuld, terwijl de non-energetische vraag met fossiele energiedragers wordt gedekt. Dit geldt ook voor het internationale scenario. De reden om wel voor fossiele energiedragers in het Europese en internationale scenario te kiezen is de omvang van de export. Dit productievolume kan niet met pyrolyseolie worden ingevuld, waardoor volledig ingezet wordt op aardolie. De omvang van de raffinagesector komt dan uit op 40% en 50% van de huidige omvang voor respectievelijk het Europese en Internationale scenario.

Vanwege de krimp in de raffinage-industrie wordt er minder geïnvesteerd in nieuwe technologieën, waardoor energetische besparingen door procesefficiëntie minder waarschijnlijk zijn en dus niet meegenomen worden in de energiebalans.

In het cluster Zeeland is de huidige energetische vraag voor de raffinage 23 PJ en de non-energetische vraag is 394 PJ. Deze vraag is geschaald naar de landelijke raffinagepercentages. Ook is zowel de energetische vraag als de non-energetische vraag verdeeld over de energiedragers naar de landelijke verdelingen. Er wordt niet gedifferentieerd tussen de verschillende raffinaderijen. Tabel 47 geeft de vraag naar energiedragers voor de raffinage-industrie binnen het Cluster Zeeland weer.

Chemie Cluster Zeeland

In het regionale scenario neemt de omvang van de chemische industrie af omdat de export reduceert. De meeste producten worden afgezet op Nederlands grondgebied. Voor het nationale scenario wordt geen groei of krimp verwacht. In het Europese en internationale scenario wordt nog steeds geëxporteerd, waardoor de chemische industrie zal blijven groeien met circa 1% per jaar.

De chemische industrie wordt voorzien in non-energetische energiedragers door de raffinage-industrie. Dit betekent dat in het regionale en nationale scenario de vraag wordt ingevuld door circulaire nafta (pyrolyseolie), terwijl in het Europese en internationale scenario dit fossiele nafta zal zijn.

Tabel 45 Elektriciteitsopwekking Cluster Zeeland

| | Huidig | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|--------------------------------|--------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Elektriciteitsopwekking | 100% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Hernieuwbaar | 0% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| Kolen | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Biomassa | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Aardgas | 100% | 0% | 0% | 0% | 0% |

Tabel 46 Verhouding energiedragers raffinage sector voor het cluster Zeeland per scenario

| | Huidig | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|-------------------------------------|--------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Raffinage (energievraag) | 100% | 14% | 36,4% | 40% | 50% |
| Energetische vraag raffinage | | | | | |
| Aardolie | 60% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Aardgas | 36% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Elektriciteit | 3% | 5% | 5% | 5% | 5% |
| Waterstof | 0% | 95% | 95% | 80% | 80% |
| Biomassa | 0% | 0% | 0% | 20% | 20% |
| Feedstock (non-energetisch) | | | | | |
| Aardolie | 99% | 0% | 0% | 99% | 99% |
| Aardgas | 1% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Waterstof | 0% | 0% | 0% | 1% | 1% |
| Biomassa | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Pyrolyseolie | 0% | 100% | 100% | 0% | 0% |

Tabel 47 Energievraag raffinagesector voor het cluster Zeeland per scenario

| | Huidig | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|-------------------------------------|------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Energievraag (PJ) | 417 | 58 | 152 | 167 | 209 |
| Energetische vraag raffinage | 23 | 3 | 8 | 9 | 12 |
| Aardolie | 14 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Aardgas | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Elektriciteit | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Waterstof | 0 | 3 | 8 | 7 | 9 |
| Biomassa | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 |
| Feedstock (non-energetisch) | 395 | 55 | 144 | 158 | 197 |
| Aardolie | 391 | 0 | 0 | 156 | 195 |
| Aardgas | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Waterstof | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 |
| Biomassa | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Pyrolyseolie | 0 | 55 | 144 | 0 | 0 |

Tabel 48 Verhouding energiedragers chemische sector voor het cluster Zeeland per scenario

| | Huidig | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|----------------------------------|--------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Chemie (Energievraag) | 100% | 78% | 107% | 145% | 145% |
| Energetische vraag Chemie | | 55% | 71% | 102% | 102% |
| Aardgas | 46% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Elektriciteit | 13% | 26% | 26% | 26% | 40% |
| Nafta (aardolie) | 38% | 0% | 0% | 0% | 25% |
| Waterstof | 0% | 60% | 60% | 60% | 35% |
| Biomassa | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Warmtenet | 3% | 14% | 14% | 14% | 0% |
| Feedstock | | | | | |
| Nafta | 100% | 0% | 0% | 100% | 100% |
| Aardgas | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Waterstof | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Biomassa | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Pyrolyseolie | 0% | 100% | 100% | 0% | 0% |

Tabel 49 Energievraag chemische sector voor het cluster Zeeland per scenario

| | Huidig | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|----------------------------------|-----------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Energievraag (PJ) | 122 | 85 | 115 | 158 | 158 |
| Energetische vraag Chemie | 43 | 24 | 31 | 44 | 44 |
| Aardgas | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Elektriciteit | 6 | 6 | 8 | 11 | 18 |
| Nafta(aardolie) | 16 | 0 | 0 | 0 | 11 |
| Waterstof | 0 | 15 | 18 | 27 | 15 |
| Biomassa | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Warmtenet | 1 | 3 | 4 | 6 | 0 |
| Feedstock | 79 | 61 | 84 | 114 | 114 |
| Nafta | 58 | 0 | 0 | 114 | 114 |
| Aardgas | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Waterstof | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Biomassa | 21 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Pyrolyseolie | 0 | 61 | 84 | 0 | 0 |

Tabel 50 Verhouding energiedragers kunstmest sector voor het cluster Zeeland per scenario

| | Huidig | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|------------------------------------|--------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Kunstmest | 100% | 20% | 40% | 100% | 145% |
| Energetische vraag | | 14% | 28% | 70% | 102% |
| Aardgas | 100% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Waterstof ⁵⁶⁾ | 0% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| Feedstock (non-energetisch) | | | | | |
| Aardgas ⁵⁶⁾ | 100% | 0% | 0% | 100% | 0% |
| Waterstof ⁵⁶⁾ | 0% | 100% | 100% | 0% | 100% |

56) Waterstofproductie kan ook lokaal gebeuren. Dus in scenario's Regionale sturing en Nationale sturing is het mogelijk dat elektrolyzers onderdeel worden van het cluster. In het Europese-CO₂-sturing scenario kan de productie via lokale SMR/ATR met CCS plaatsvinden. In het Internationale scenario gaan we ervan uit dat de behoefte aan waterstof wordt geïmporteerd

Tabel 51 Energievraag kunstmest sector voor het cluster Zeeland per scenario

| | Huidig | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|------------------------------------|--------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Energievraag (PJ) | 66 | 12 | 24 | 60 | 88 |
| Energetische vraag | 22 | 3 | 6 | 16 | 23 |
| Aardgas | 22 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Waterstof⁵⁶⁾ | 0 | 3 | 6 | 16 | 23 |
| Feedstock (non-energetisch) | 44 | 9 | 18 | 44 | 65 |
| Aardgas⁵⁶⁾ | 44 | 0 | 0 | 44 | 0 |
| Waterstof⁵⁶⁾ | 0 | 9 | 18 | 0 | 65 |

Het bovenstaande heeft geleid tot een inschatting van de totale huidige energievraag van het cluster en de 2050-scenario's, welke zijn weergegeven in Tabel 52.

Tabel 52 Energievraag van het cluster Zeeland

| | Huidig | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|---------------------------------|--------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Totale energievraag (PJ) | 727 | 90 | 129 | 271 | 264 |
| Aardolie | 405 | 0 | 0 | 156 | 195 |
| Aardgas | 294 | 0 | 0 | 44 | 0 |
| Elektriciteit | 6 | 6 | 8 | 12 | 18 |
| Waterstof | 0 | 20 | 33 | 51 | 49 |
| Biomassa | 21 | 0 | 0 | 2 | 2 |
| Pyrolyseolie (circulair) | 1 | 64 | 88 | 6 | 0 |
| Kolen | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

De focus zal in het regionale, nationale en Europese scenario liggen op de inzet van waterstof en elektrificeren (energetische vraag). Dit geldt ook voor het internationale scenario. Echter, er ligt in dit scenario meer nadruk op elektrificatie en er zullen er ook processen aanwezig zijn waarbij de energetische vraag wordt ingevuld door fossiele nafta. Bij deze processen wordt wel CCS toegepast. Daarnaast zijn ook de procesefficiëntiewinsten meegenomen in de chemische sector, omdat het waarschijnlijk wordt geacht dat de inzet van nieuwe technologieën de energetische vraag zal reduceren.

Het huidige verbruik van de chemie in Zeeland is 43 PJ energetisch en 79 PJ feedstock (non-energetisch). Er wordt vanuit gegaan dat de groei van de chemische industrie in Cluster Zeeland op een vergelijkbare wijze krimpt of groeit als aangenomen in de nationale scenario's. Daarnaast is met de percentages in Tabel 48 de energievraag te alloceren over de energiedragers. Deze energievraag wordt weergegeven in Tabel 49.

Kunstmest Cluster Zeeland

Er is aangenomen dat de kunstmestindustrie in Cluster Zeeland groeit/krimpt naar de nationale kunstmestindustriecijfers. Dit betekent dat de kunstmestindustrie in Cluster Zeeland 20%, 40%, 100% en 145% van de huidige omvang zal aannemen voor elk van de scenario's respectievelijk. Aangezien er geen duidelijke ontwikkelingen van de kunstmestindustrie in cluster Zeeland naar voren kwamen tijdens de gesprekken is een inschatting van de toekomstige situatie in elk van de scenario's gemaakt op basis van ontwikkelingen zoals we die ook aannemen voor de kunstmestindustrie in Chemelot. Dit is weergegeven in Tabel 50.

De huidige vraag naar energiedragers wordt ingevuld door methaan, dit betreft voor energetische doeleinden 22 PJ en 44 PJ feedstock. Door deze cijfers te combineren met de percentages in Tabel 50 kan de omvang van de vraag bepaald worden per energiedrager in de kunstmestindustrie in Zeeland. De energetische vraag wordt verder teruggebracht als gevolg van een toename van de procesefficiëntie in de 2050-scenario's. Dit is weergegeven in Tabel 51.

6.6.4 Chemelot

Inleiding

Chemelot is gepositioneerd in Zuid-Limburg en kenmerkt zich als een sterk geïntegreerd cluster. Dit cluster kan grofweg opgedeeld worden in twee delen: het Noordelijk deel en het Zuidelijk deel. Het Noordelijk deel kenmerkt zich door zijn ammoniakketen en in het Zuidelijk deel is de naftaketen dominant⁵⁷⁾.

Berekeningen Chemelot

Hoewel er in het cluster zowel de kunstmestindustrie als de chemische industrie aanwezig is, is een scherpe opsplitsing tussen kunstmest en chemie moeilijk te maken. Dit komt omdat er ook kunstmest wordt geproduceerd uit bijproducten afkomstig van andere chemische processen. Ook worden bijproducten van de kunstmestindustrie gebruikt als feedstock voor de chemische processen. Toch is er een opsplitsing nodig om de kunstmest en de chemie in Chemelot weer terug in de nationale 2050-scenario's te kunnen plaatsen. Deze verdeling is gemaakt door de inkomende energiestromen te alloceren aan een bepaalde sector. Dit betekent dat methaan wordt gealloceerd aan de kunstmestindustrie. Het merendeel van het methaan wordt nu namelijk gebruikt voor de productie van waterstof in de ammoniakketen. De nafta- en elektriciteitsstromen worden gealloceerd aan de chemische industrie.

Kunstmest Chemelot

Er is aangenomen dat de kunstmestindustrie in Chemelot groeit/krimpt naar de nationale kunstmestindustrie cijfers. Dit betekent dat de omvang van de kunstmestindustrie in Chemelot 20%, 40%, 100% en 145% is van de huidige omvang voor de scenario's respectievelijk. De kunstmestindustrie in Chemelot gaf aan drie verschillende CO₂-neutrale strategieën tot 2050 te hebben⁵⁷⁾, namelijk de huidige *steam methane reformers* (SMRs) vervangen met een aansluiting op een waterstofnet, de SMRs in gebruik houden en CCS intensiever toepassen of het importeren van groene moleculen (bijv. ammoniak). Deze drie strategieën worden alle drie gesimuleerd in de scenario's, waarin het aansluiten op een waterstofnet voorkomt in het regionale en nationale scenario. De SMRs blijven in het Europese scenario de bron voor waterstof. In het internationale scenario worden groene moleculen (bijv. groene ammoniak) geïmporteerd om kunstmest mee te maken. Op deze manier wordt de inbreng van de kunstmestindustrie in Chemelot meegenomen. De energetische vraag wordt verder teruggebracht als gevolg van een toename van de procesefficiëntie in de 2050-scenario's. Dit is te zien in Tabel 53. Hierbij kon nog geen rekening worden gehouden met het feit dat, naast kunstmest, een belangrijk deel van de ammoniaproductie in Chemelot bestemd is voor andere chemieproducten zoals Caprolactam, Acrylonitril en Melamine; deze producten volgen niet de groei of krimp van de kunstmestindustrie cijfers maar zouden meer in lijn moeten zijn met de chemische industrie als geheel (hetgeen bijv. betekent dat deze hoger zijn in de scenario's regionale en nationale sturing, waardoor ook de waterstofvraag hoger uit zou vallen). Vanwege de beperkingen in het nationale model kon dat hier niet direct in detail worden verwerkt, maar dit is nog wel een aandachtspunt in fase 2 en voor een regionale uitwerking van de regio van Chemelot.

De huidige vraag naar energiedragers in de kunstmestindustrie binnen cluster Chemelot is 32 PJ. Hiervan wordt 11 PJ gebruikt voor energetische doeleinden en 21 PJ voor feedstock. Door de huidige cijfers te combineren met de percentages in Tabel 53 kan de omvang van de vraag worden bepaald per energiedrager per scenario. Dit is weergegeven in Tabel 54.

57) Interview met Chemelot op 31-10-2019

Tabel 53 Omvang en verdeling van de energiedragers over de kunstmestindustrie Chemelot

| | Huidig | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|-------------------------------------|------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Kunstmest | 100% | 20% | 40% | 100% | 145% |
| Energetische vraag Kunstmest | 14% | 28% | 70% | 102% | |
| Aardgas | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Waterstof⁵⁸⁾ | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| Feedstock | | | | | |
| Aardgas⁵⁸⁾ | 100% | 0% | 0% | 100% | 0% |
| Waterstof⁵⁸⁾ | 0% | 100% | 100% | 0% | 100% |

Tabel 54 Energiedrager Kunstmest Chemelot in PJ

| Energiedrager | Huidig | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|-------------------------------------|-----------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Energiebalans (PJ) | 32 | 6 | 11 | 28 | 42 |
| Energetische vraag Kunstmest | 11 | 2 | 3 | 7 | 11 |
| Aardgas | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Waterstof⁵⁸⁾ | 0 | 1 | 3 | 7 | 11 |
| Feedstock | 21 | 4 | 8 | 21 | 31 |
| Aardgas⁵⁸⁾ | 21 | 0 | 0 | 21 | 0 |
| Waterstof⁵⁸⁾ | 0 | 4 | 8 | 0 | 31 |

Chemie Chemelot

De chemische industrie in Chemelot groeit/krimpt naar de nationale chemische industrie. Daarnaast vindt er een efficiëntietoename plaats van 1% per jaar waardoor ‘Energievraag t.o.v. huidig’ lager ligt dan de ‘Omvang t.o.v. huidig’. In het interview met de chemische industrie in Chemelot kwam naar voren dat Chemelot twee grote veranderingen beoogt: het intensief elektrificeren van grote energievragende processen en het vervangen van nafta voor pyrolyseolie uit gerecyclede plastics. Maximaal elektrificeren van warmteprocessen in de chemische industrie is voor Chemelot in alle scenario’s meegenomen. Het vervangen van nafta door pyrolyseolie als gevolg van circulariteit is in het regionale en nationale scenario meegenomen. Dit is getoond in Tabel 55.

Tabel 55 Omvang en verdeling van de energiedragers over de chemie Chemelot

| | Huidig | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|-----------------------------------|--------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Omvang t.o.v. huidig | 100% | 78% | 107% | 145% | 145% |
| Energievraag t.o.v. huidig | 100% | 55% | 71% | 102% | 102% |
| Aardgas | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Elektriciteit | 100% | 100% | 100% | 100% | 40% |
| Nafta (aardolie) | 0% | 0% | 0% | 0% | 25% |
| Waterstof | 0% | 0% | 0% | 0% | 35% |
| Biomassa | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Warmtenet | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Feedstock | | | | | |
| Nafta | 100% | 0% | 0% | 100% | 100% |
| Pyrolyseolie | 0% | 100% | 100% | 0% | 0% |

⁵⁸⁾ Waterstofproductie kan ook lokaal gebeuren. Dus in scenario’s Regionale sturing en Nationale sturing is het mogelijk dat elektrolyzers onderdeel worden van het cluster. In het Europese-CO₂-sturing scenario kan de productie via lokale SMR/ATR met CCS plaatsvinden. In het Internationale scenario gaan we ervan uit dat de behoefte aan waterstof wordt geïmporteerd

De huidige vraag van de chemie is 48 PJ energetisch en 140 PJ als feedstock (non-energetisch). Door deze gegevens te combineren met de omvang en procentuele verdeling uit Tabel 55 kan de energievraag per energiedrager voor de chemische industrie in Chemelot bepaald worden. Dit is weergegeven in Tabel 56.

Dit alles telt op tot een totale energievraag van verschillende energiedragers in de 2050-scenario's, zie Tabel 57. Het valt op dat de aardolie in de huidige vraag in regionale en nationale scenario volledig wordt vervangen door pyrolyseolie als gevolg van volledige circulariteit. Hierachter zit wel de aanname dat de gerecyclede plastics voor de pyrolyseolie op een andere plek verwerkt worden (bijv. nationale of regionale inzamelcentra voor kunststoffen). De vraag naar methaan verdwijnt in het nationale, regionale en internationale scenario volledig en wordt in de scenario's vervangen door waterstof of afgeleiden (bijvoorbeeld geïmporteerde groene of blauwe ammoniak). Verder is te zien dat er elektrificatie plaatsvindt in alle scenario's.

6.6.5 Noordzeekanaalgebied (NZKG)

Inleiding

Het Noordzeekanaalgebied is het industriegebied boven Amsterdam rondom het Noordzeekanaal en de Zaan. Er is een grote diversiteit aan bedrijven, waardoor verschillende industriële sectoren hier vertegenwoordigd zijn. Veruit de grootste energiegebruiker in dit gebied is Tata Steel.

Berekening Noordzeekanaalgebied

De energievraag uit het Noordzeekanaalgebied bestaat voornamelijk uit de energievraag van Tata Steel (90 PJ). De overige industriële energievraag van 20 PJ is verdeeld over verschillende industriële sectoren waarbij er geen verdere uitschieters zijn. De overige vraag zal vanwege deze reden niet verder gespecificeerd worden. Voor Tata Steel zal een gedetailleerdere uitsplitsing gemaakt worden.

De gedetailleerdere uitsplitsing is uitgevoerd met behulp van het Energietransitiemodel. Hierbij is gekeken naar de huidige energievraag van de staalindustrie en wat de toekomstige vraag zal zijn wanneer andere productietechnieken worden toegepast die efficiënter zijn dan de huidige hoogovens.

Staalindustrie Noordzeekanaalgebied

Tata Steel groeit naar de algemene aannames in de scenario's. Aan de hand van het interview met Tata Steel⁵⁹⁾ is een verdeling gemaakt van de technieken die worden ingezet voor de productie van staal in elk van de scenario's, zie Tabel 58. In de huidige situatie wordt er vooral gebruik gemaakt van hoogovens. Hierdoor bestaat de energievraag van Tata Steel nu hoofdzakelijk uit kolen, welke zowel als energiebron (energetisch) en als feedstock (non-energetisch) wordt gebruikt. Daarnaast wordt er ook elektriciteit en gas verbruikt.

Doordat in de scenario's andere productietechnieken worden toegepast dan in de huidige situatie zal de vraag naar kolen afnemen. Voorbeelden van dit soort productietechnieken zijn HIsarna en EAF. HIsarna is een nieuwe, vooruitstrevende technologie om staal te produceren waarbij twee essentiële processen van staalproductie worden gecombineerd. De technologie maakt een aantal voorbereidingsstappen overbodig en stelt minder strikte eisen aan de kwaliteit van de grondstoffen. Dit resulteert in een enorme efficiëntieverhoging. Het verlaagt het energieverbruik en dringt de CO₂-uitstoot terug. Electric Arc Furnaces (EAF) worden ingezet voor de productie van gerecyclede staal. De energetische vraag van het recyclingproces is veel lager dan de energetische vraag van een primair staalproductieproces.

Door het inzetten van alternatieve productietechnieken loopt de energetische vraag sterk terug, zie Tabel 59. Dit is vooral zichtbaar in het regionale scenario. Voor de kolen die nog gestookt worden zal er CCS toegepast worden in de toekomst. In het internationale scenario wordt er alternatief geen gebruik meer gemaakt van kolen maar van Hot Bırquetted Iron (HBI). Dit is een stabiele vorm van ijzer dat ergens anders op de wereld (door de aanwezigheid van goedkopere energie) gereduceerd is en vervolgens in Nederland verwerkt wordt. Bij import van HBI vervalt het gebruik van steenkool in IJmuiden. In de doorrekening van de scenario's is wel nog gekozen voor staalproductie in Nederland.

Tijdens het interview kwam tevens naar voren dat er mogelijkheden zijn om voor 2030 ongeveer 100 kton blauwe waterstof per jaar te gaan produceren uit de koolstofmonoxide. Deze koolstofmonoxide wordt momenteel geleverd aan de Velserscentrales ten behoeve van elektriciteitsproductie. Wanneer ervoor gekozen wordt om deze koolstofmonoxide niet meer te leveren aan de Velserscentrale kan hiermee waterstof worden geproduceerd middels een water-gas-shiftreactie. Deze waterstof

59) Interview met Tata Steel op 28-10-2019

Tabel 56 Energiedragers Chemie Chemelot in PJ

| Energiedrager | Huidig | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|---|------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Totaal | 188 | 135 | 182 | 251 | 251 |
| Energetische vraag chemie chemelot | 48 | 26 | 33 | 48 | 48 |
| Aardgas | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Elektriciteit | 8 | 26 | 33 | 48 | 19 |
| Nafta(aardolie) | 40 | 0 | 0 | 0 | 12 |
| Waterstof | 0 | 0 | 0 | 0 | 17 |
| Biomassa | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Warmtenet | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Feedstock | 140 | 109 | 149 | 203 | 203 |
| Nafta | 140 | 0 | 0 | 203 | 203 |
| Aardgas | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Waterstof | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Biomassa | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Pyrolyseolie | 0 | 109 | 149 | 0 | 0 |

Tabel 57 Totale vraag energiedrager Chemelot

| | Huidig | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|---------------------------------|--------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Totale energievraag (PJ) | 219 | 141 | 194 | 301 | 292 |
| Aardolie | 179 | 0 | 0 | 203 | 215 |
| Aardgas | 32 | 0 | 0 | 21 | 0 |
| Elektriciteit | 8 | 26 | 33 | 48 | 19 |
| Waterstof | 0 | 6 | 12 | 29 | 58 |
| Biomassa | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Pyrolyseolie (circulair) | 0 | 109 | 149 | 0 | 0 |
| Kolen | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabel 58 Omvang en verdeling productieproces staalindustrie

| | Huidig | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|-----------------------------|--------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Omvang t.o.v. huidig | 100% | 78% | 107% | 145% | 145% |
| Hoogoven (+ CCS) | 98% | 0% | 50% | 80% | 40% |
| Hlsarna (+ CCS) | 0% | 50% | 25% | 0% | 40% |
| Electric Arc Furnance (EAF) | 2% | 50% | 25% | 20% | 20% |

Tabel 59 Energiedragers staalindustrie NZKG

| | Huidig | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|----------------------------|-----------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Aardgas | 8 | 3 | 6 | 11 | 6 |
| Elektriciteit | 7 | 7 | 7 | 11 | 10 |
| Kolen/HBI (+CCS) | 74 | 27 | 52 | 78 | 80 |
| Totale energievraag | 89 | 37 | 65 | 100 | 106 |

zou vervolgens geleverd kunnen worden aan een centraal waterstofnet en de basis vormen van waterstofgebruik binnen de industrie. Dit zijn zeer interessante innovatiepaden om de transitie in de industriesectoren op gang te brengen. Echter, deze transitiepaden kunnen niet gemodelleerd worden in het ETM en worden daarom in deze studie meegenomen.

Overslag NZKG

Naast het gebruik van energiedragers voor energetische en non-energetische doeleinden wordt een aanzienlijk deel van de energiedragers vervoerd naar het achterland. De overslag wordt niet meegenomen in deze studie omdat de ontwikkelingen richting 2050 uiterst onzeker zijn en dit mogelijk geen invloed heeft op de landelijke infrastructuur. Momenteel wordt een groot deel van de energiedragers namelijk vervoerd over het spoor of via de binnenvaart. Dit geldt vooral voor fossiele energiedragers. Echter, richting 2050 zal de vraag naar fossiele energiedragers afnemen. In het regionale en internationale scenario verdwijnt de vraag naar fossiele energiedragers zelfs. Substituten zullen fossiele energiedragers vervangen. Een mogelijk voorbeeld hiervan is waterstof of ammoniak. Wanneer deze energiedragers niet in Nederland worden geproduceerd zullen deze mogelijk binnenkomen via de Amsterdamse haven en vervolgens worden getransporteerd naar het achterland. Dit zou, wanneer het grote volumes betreft, plaats kunnen vinden door middel van een waterstofleiding. Aangezien deze ontwikkelingen zeer onzeker zijn, mede als de vraag naar een specifieke energiedrager en het daarbij horende volume onzeker is, wordt overslag niet meegenomen in deze studie.

6.6.6 Delfzijl en Eemshaven (Groningen Seaport)

Inleiding

Groningen Seaport is de overkoepelende organisatie van de haven van Delfzijl, Eemshaven en de aangelegen industriegebieden. In dit gebied bevinden zich onder andere chemische (DOW chemical) en aluminiumbedrijven (Aldel). In de aluminiumindustrie zal weinig veranderen, omdat deze al is geëlektrificeerd. De berekening hieronder richt zich dan ook op de chemische industrie in Groningen Seaport.

Berekeningen Groningen Seaport

Er is geen energiebalans van het cluster beschikbaar. Wel is er uit het interview informatie naar voren gekomen, welke is gebruikt om de ontwikkeling van de energievraag van dit cluster voor elk scenario in kaart te brengen. Uit het interview bleek dat er nu ongeveer 17 PJ energetisch wordt verbruikt. Dit is exclusief de vraag naar energiedragers voor de productie van elektriciteit. Het grootste deel hiervan wordt verbruikt door

de chemische en aluminiumindustrie⁶⁰. Van deze 17 PJ wordt circa 14 PJ verbruikt door de chemische industrie. De resterende energievraag, 3 PJ afkomstig van de aluminiumindustrie, wordt niet verder meegenomen in deze studie. Naast de energievraag voor energetische doeleinden is er ook vraag naar feedstock (non-energetisch) door chemische industrie. Aangezien deze data niet voorhanden was is gebruik gemaakt van de verhouding energetisch/non-energetisch in chemische industrie in cluster Rotterdam-Moerdijk.

Over de energievraag voor de productie van elektriciteit is geen informatie naar voren gekomen uit het interview. Op basis van data afkomstig van emissieregistratiedatabase is een schatting gemaakt van de huidige energievraag voor productie van elektriciteit.

Elektriciteitsopwekking Groningen Seaport

In 2050 zal alle elektriciteitsopwekking hernieuwbaar zijn. Vanwege ruimtelijke beperkingen wordt ervan uitgegaan dat dit niet allemaal binnen het cluster Groningen Seaport plaatsvindt. Zon-PV, wind-op-land en waterstofcentrales die dienen als back-up zullen wel gerealiseerd worden binnen het cluster. Tabel 60 geeft de huidige en toekomstige verdeling in elk van de scenario's weer. Omdat alle elektriciteitsopwekking duurzaam plaatsvindt, zijn er geen energiedragers nodig die voorzien in de baseload. De energievraag verdwijnt hierdoor. Waterstof wordt alleen ingezet als back-up en is daarom niet meegenomen in Tabel 60.

Chemie Groningen Seaport

Er wordt aangenomen dat de industrie in dit cluster zal groeien of krimpen naar de groei/krimp in de nationale scenario's. Daarnaast vindt er een efficiëntietoename plaats van 1% per jaar, waardoor 'Energievraag t.o.v. huidig' lager ligt dan de 'Omvang t.o.v. huidig'. Dit cluster heeft in de interviews aangegeven vooral te willen inzetten op waterstof⁶⁰. Dit is doorgevoerd in de ondervuring van de chemie. Hier zal dus een sterke waterstofvraag ontstaan. Deze energetische waterstofvraag is vertaald in het regionale, nationale en Europese scenario. In het internationale scenario is energetisch gekozen voor een mix van elektriciteit en waterstof, waarbij voor feedstock in dit scenario ook een groot deel door waterstof wordt ingevuld. Deze omvang en verdeling is weergegeven in Tabel 61.

De huidige energievraag van de chemie in Groningen Seaport is ongeveer 39 PJ. Door de huidige vraag te vermenigvuldigen met

60) Interview met Groningen Seaport op 05-11-2019

Tabel 60 Elektriciteitsopwekking Groningen Seaport

| | Huidig | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|--------------------------------|--------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Elektriciteitsopwekking | 100% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Hernieuwbaar | 0% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| Kolen | 66% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Biomassa | 12% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Aardgas | 23% | 0% | 0% | 0% | 0% |

Tabel 61 Omvang en verdeling van de energiedragers over de chemie Groningen Seaport

| | Huidig | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|----------------------------------|-------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Omvang t.o.v. huidig | 100% | 78% | 107% | 145% | 145% |
| Energetische vraag Chemie | 100% | 55% | 71% | 102% | 102% |
| Aardgas | 57% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Elektriciteit | 0% | 0% | 0% | 0% | 40% |
| Aardolie | 43% | 0% | 0% | 0% | |
| Waterstof | 0% | 100% | 100% | 100% | 60% |
| Biomassa | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Warmtenet | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Feedstock | | | | | |
| Aardolie | 100% | 0% | 0% | 100% | 10% |
| Aardgas | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Waterstof | 0% | 0% | 0% | 0% | 90% |
| Biomassa | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Pyrolyseolie | 0% | 100% | 100% | 0% | 0% |

Tabel 62 Energiedragers Chemie Groningen Seaport in PJ

| | Huidig | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|---------------------------|-----------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Energiebalans (PJ) | 39 | 28 | 37 | 51 | 51 |
| Energetische vraag | 14 | 8 | 10 | 14 | 14 |
| Aardgas | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Elektriciteit | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 |
| Nafta (aardolie) | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Waterstof | 0 | 8 | 10 | 14 | 9 |
| Biomassa | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Warmtenet | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Feedstock | 25 | 20 | 27 | 37 | 37 |
| Nafta (aardolie) | 18 | 0 | 0 | 37 | 4 |
| Aardgas | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Waterstof | 0 | 0 | 0 | 0 | 33 |
| Biomassa | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Pyrolyseolie | 0 | 20 | 27 | 0 | 0 |

Tabel 63 Energievraag van Groningen Seaport

| | Huidig | Regionale sturing | Nationale sturing | Europese CO ₂ -sturing | Internationale sturing |
|----------------------------------|--------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Totale energiebalans (PJ) | 39 | 28 | 37 | 51 | 51 |
| Nafta (aardolie) | 24 | 0 | 0 | 37 | 4 |
| Aardgas | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Elektriciteit | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 |
| Waterstof | 0 | 8 | 10 | 14 | 42 |
| Biomassa | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Pyrolyseolie (circulair) | 0 | 20 | 27 | 0 | 0 |
| Kolen | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

de verwachte omvang van de chemische industrie in elk van de scenario's kan de vraag per energiedrager bepaald worden. Dit is weergegeven in Tabel 62.

Tabel 63 geeft een overzicht van de energievraag van Groningen Seaport. Er wordt in dit cluster sterk ingezet op waterstof en circulariteit. In het regionale en nationale scenario speelt circulariteit een grote rol waardoor de vraag naar aardolie volledig verdwijnt. Verder neemt inzet van waterstof sterk toe in het internationale scenario. Alleen in het Europese scenario wordt nog gebruik van gemaakt van aardolie als feedstock (non-energetisch) voor de chemische industrie.





Gebruik van scenario's

Hoofdstuk 7

In het rapport zijn vier klimaatneutrale energiescenario's voor 2050 gepresenteerd. Allereerst, lichten we het gebruik de scenario's toe (zie ook paragraaf 1.3) en bespreken we de scenario's en de invloed van onzekerheden op deze scenario's.



7.1 Gebruik scenario's

De toekomstbeelden van een Nederlandse klimaatneutrale samenleving in 2050 schetsen, hoe Nederland wat betreft energievraag en -aanbod er uit kan gaan zien. En daarmee kunnen de scenario's ook bruikbaar zijn als "speelveld" voor andere organisaties, die plannen maken voorbij het Klimaatakkoord 2030. Daarvoor willen we nog enkele zaken onder de aandacht brengen:

- De scenario's geven vier verschillende uiterste toekomstbeelden, maar zijn niet bedoeld om daartussen te kiezen en kunnen ook gecombineerd worden.
- De scenario's zijn daarnaast wel anders in te vullen wat betreft de precieze technische invulling en schaalgrootte op diverse terreinen zoals back-up vermogen, opslagmogelijkheden, duurzame warmtebronnen en wellicht ook andere. Andere technieken (ook wanneer deze niet expliciet genoemd worden in dit rapport) zijn ook goed denkbaar zolang deze maar dezelfde functionaliteit betreffen en dus dezelfde soort omzetting, opwek of verbruik per sector geven. Er is dus nog alle ruimte voor verdere inhoudelijke invulling met andere alternatieven.
- De scenario's zijn gesimuleerd met het Energie Transitie Model (ETM), waarbij rekening moet worden gehouden met de beperkingen aan dit model (zie ook paragraaf 7.3).
- Verdere optimalisatie van de scenario's is nog nodig, zoals ook in fase 2 van II3050, volgend op deze fase, zal plaatsvinden. Dit niet alleen wat betreft de technieken (zie hiervoor), maar ook wat betreft de wijze waarop de leveringszekerheid wordt verzorgd.

7.2 Voorspelbaarheid energietransitie

Deze scenariostudie is niet bedoeld om conclusies te trekken over wat de beste klimaatneutrale toekomst is voor onze samenleving. Wel schetst deze scenariostudie duidelijk dat:

- Er meerdere mogelijkheden zijn om een CO₂-vrije energievoorziening en samenleving te creëren.
- Dit veelal kan met bestaande techniek die in de komende jaren naar verwachting nog in kosten gaat dalen door de grootschalige toepassing van die techniek en innovatie.
- Er zowel een groot volume opwek van hernieuwbare energie in Nederland kan plaatsvinden als dat er mogelijkheden zijn voor andere decarbonisatie-opties en voor de import van groene stroom en moleculen.
- Energievraag en -aanbod in alle sectoren een forse verandering zal ondergaan.

Deze studie gaat uit van vele veranderingen in ons energiesysteem om te komen tot klimaatneutrale scenario's voor 2050. Hierbij hebben we zo goed als mogelijk rekening gehouden met de huidige stand der techniek en voorspellingen van de technologische ontwikkeling. Het is echter goed mogelijk dat de exacte ontplooiing van de energietransitie anders zal gaan, deze scenario's bieden daar tot ruimte voor. Enerzijds, doordat

de scenario's combineerbaar zijn, anderzijds doordat er ruimte is in plaats van de technieken die in de studie voorkomen te kiezen voor andere technieken met dezelfde functionaliteit.

Toch zijn er ook toekomstden denkbaar die niet gevat worden in deze studie. In enkele gevallen liet de modellering en de tijd ons niet toe om opties mee te nemen, denk bijvoorbeeld aan combinatie van geïntegreerde zonneparken met batterijopslag. Een deel van deze zaken zal echter in fase 2 van I13050 aanbod komen.

Nieuwe technieken of onvoorziene voortgang in innovaties die nu nog niet beschikbaar zijn, of waarbij de precieze werking nog vastgesteld moet worden, zijn buiten de scope van deze studie. De introductie van dit soort baanbrekende technieken kan er vooral toe leiden dat doelen eerder of gemakkelijker haalbaar zijn.

Anderzijds kan het natuurlijk ook voorkomen dat er tegenvalers ontstaan. In dat geval zouden maatregelen uit verschillende van deze scenario's ook goed combineerbaar kunnen zijn, denk bijvoorbeeld aan het ruimer toepassen van technieken die leiden tot negatieve emissies.

7.3 Lijst van aandachtspunten

Bij gebruik van het ETM, kunt u Berenschot vragen voor een lijst met aandachtspunten behorende bij de modellering in het ETM.

Bijlagen

Hoofdstuk 8



8.1 Review Planbureau voor de Leefomgeving

PBL heeft een conceptversie van dit rapport kunnen inzien en analyseren. Overkoepelend stellen de reviewers het volgende: "Allereerst complimenten voor de studie, het is een uitgebreide en grondige studie die de hele energievoorziening in beeld brengt met een gedetailleerde kwantitatieve uitwerking en een mooie uitwerking op regionaal niveau. Met de gekozen scenario's worden de mogelijke toekomstige ontwikkelingen in de

energietransitie voldoende meegenomen om de uitdagingen in beeld te brengen waar de energie-infrastructuur mee te maken zou kunnen krijgen richting 2050."

Daarnaast hebben de reviewers ons commentaar op hoofdpunten gegeven en meer gedetailleerde opmerkingen per reviewer. Wij hebben dit commentaar zo veel mogelijk verwerkt in dit rapport. Het hoofdcommentaar, en onze verwerking daarvan, was als volgt:

| Commentaar PBL | Verwerking door Berenschot/Kalavasta |
|--|--|
| <p>Hoe beantwoorden deze scenario's aan de centrale vraag: wat betekent de energietransitie voor de infrastructuur? Dekken deze scenario's de hoeken van het speelveld? Waarom zijn de keuzes die in de scenario's worden gemaakt relevant voor de toekomstige ontwikkeling van de infrastructuur? Dit zou uitgebreider toegelicht en verduidelijkt kunnen worden.</p> | <p>Toelichting op de scenario's toegevoegd in hoofdstuk 1. Scenario's zijn algemeen voor Nederland. Hoekpunten voor Nederlandse situatie op basis van sturing en overige uitgangspunten. Infrastructuur wordt hiermee bepaald, maar is niet het uitgangspunt van de scenario exercitie.</p> |
| <p>Wat is de internationale context bij het regionale en nationale scenario? In regionaal en nationaal speelt de buitenwereld een bescheiden rol, Nederland is bijna autarkisch in zijn energievoorziening. Wat wordt hier aangenomen over klimaatbeleid in het buitenland? Als er internationaal ook klimaatbeleid wordt gevoerd zou je mogen verwachten dat er meer uitwisseling mogelijk is over de grens. Er is bijvoorbeeld nu in deze scenario's geen of slechts beperkt import van elektriciteit, de interconnectie wordt nauwelijks benut. Dit terwijl interconnectie een bron van flexibiliteit kan zijn en daarmee impact heeft op bijvoorbeeld het benodigde piekvermogen. Is er buiten Nederland slechts sprake van geen of slechts bescheiden klimaatbeleid, dan is het de vraag of het realistisch is dat Nederland wel ambitieus beleid voert. Dat zou grote gevolgen hebben voor de industrie en de economie in Nederland.</p> | <p>In de tekst hebben wij sterker het uitgangspunt van zelfvoorziening in de scenario's regionale sturing en nationale sturing benadrukt. Dit uitgangspunt heeft inderdaad grote effecten op de industrie. Vooral de energie-intensieve industrie krimpt in beide scenario's. Wij hebben geen uitwerking gegeven van de economische effecten hiervan. Dit staat ook in de tekst beschreven. We gaan in alle scenario's uit van interconnectie en uitwisseling van elektriciteit met het buitenland; dit punt hebben wij verder benadrukt in de tekst. Voor fase 1 was het modeltechnisch niet logisch omdat de hoeveelheid elektriciteitsimporten enorm toenam. Fase 2 van I13050 zal hier verder naar kijken.</p> |
| <p>De structuur van het rapport is niet altijd even helder. De hoofdstukindeling en -volgorde roept vragen op. H4 geeft uitkomsten van de doorrekening. H5 geeft een gedetailleerdere beschrijving van de scenario's (geïntroduceerd in H3), maar het is niet direct duidelijk of/welk deel hiervan input en output is. H6 en H7 geeft dan weer een toelichting op de methodiek (H2).</p> | <p>Bij elk hoofdstuk hebben wij een korte introductie toegevoegd en de relatie beschreven met de overige hoofdstukken. Daarnaast is de leeswijzer uitgebreid.</p> |
| <p>De prijzen zijn niet altijd consistent met de gekozen scenario's. Bij een aantal secundaire energiedragers zou het logisch zijn geweest om per scenario andere prijsaannames te gebruiken, omdat die beter aansluiten bij het verhaal van een scenario. Daar staat tegenover dat de scenario's minder vergelijkbaar zouden zijn als er met verschillende prijzen zou zijn gewerkt voor verschillende scenario's.</p> | <p>Wij hebben geen prijsoptimalisatie uitgevoerd voor de scenario's, maar zijn uitgegaan van prijzen gebaseerd op algemene bronnen. De kosten zullen ook later bij I13050 worden onderzocht en zijn geen onderdeel van deze rapportage.</p> |
| <p>Maatschappelijke kosten van de scenario's In de studie is er terecht voor gekozen om voor de kosten de maatschappelijke kosten te berekenen, daardoor zijn de scenario's goed vergelijkbaar. Deze maatschappelijke kosten worden echter niet gegeven, met als argument dat dat pas in fase 2 de netwerkkosten goed in beeld worden gebracht. Desalniettemin zou het inzichtelijk zijn om te laten zien wat de kosten zijn van de verschillende scenario's.</p> | <p>De uitleg over WACC en discontovoet hebben we hierop aangepast. De volgende fases van I13050 zullen verder ingaan op de kosten van de scenario's. Omdat, niet in volledigheid en in alle detail zijn onderzocht in deze eerste fase, is er voor gekozen deze niet op te nemen in de rapportage</p> |
| <p>Technologiekeuzes Wat onevenwichtige mix van technologische aannames. (Heel) conservatieve aannames voor sommige opties (bijv. warmtebereik elektrische stoomketel, COP WP (ingeschat obv grafieken)) naast tegelijk veronderstelde inzet van nu nog zeer onrijpe technieken (bijv. DAC en CO PEM) en/of erg optimistische aannames (bijv. superkritische vergassing).</p> | <p>De technologiekeuzes zijn gebaseerd op algemeen beschikbare bronnen en studies en ook zo veel mogelijk gedocumenteerd bij deze studie. We hebben onzekerheden verder toegelicht in de tekst en ook in hoofdstuk 7.2 een stuk geweid aan de voorspelbaarheid van de energietransitie met het oog op deze aannames.</p> |

8.2 Energievraag in de gebouwde omgeving

De totale finale energievraag van de gebouwde omgeving daalt gestaag tot 2050. Dit komt met name door hogere isolatiewaarden en efficiëntere warmtebronnen. De finale energievraag daalt echter niet over de gehele breedte. Met name bij de huishoudens vindt veel elektrificatie plaats in vrijwel alle scenario's. Dit wordt veroorzaakt door de inzet van onder andere (hybride) warmtepompen. Hierdoor neemt de netto-elektriciteitsvraag voor ruimteverwarming toe.

Naast de elektriciteitsvraag voor ruimteverwarming, wordt het andere deel van de totale elektriciteitsvraag veroorzaakt door het gebruik van apparaten. De ontwikkeling van energiezuinigere apparaten is een historische trend die zich naar verwachting door zal zetten richting 2050⁶¹). Echter, er blijkt uit een studie van RVO dat de "overige elektriciteitsvraag" die niet toegerekend wordt aan ruimteverwarming toeneemt⁶²). Het gaat daarbij om de elektriciteitsvraag van apparaten als computers, tv's, wasmachines, wasdrogers, etc. Dit is te verklaren door een toename van het aantal elektrische apparaten. Wel is er aangenomen dat elektrische apparaten 10% zuiniger worden. Het is hierbij de vraag of deze trend in de toekomst verder doorzet, of dat de efficiëntieverbeteringen de groei in het gebruik van elektrische apparaten inhaalt. Voor nu rekenen we met een lichte stijging van de vraag naar elektriciteit voor apparaten in de gebouwde omgeving.

8.3 Warmtevraagprofielen

ETM hanteert voor alle individuele technieken hetzelfde warmteprofiel. Hierdoor hebben (hybride) warmtepompen een zelfde warmtevraagprofiel met een in de avond en in de ochtend een hoge piekvraag gelijk aan het huidige gebruiksprofiel van een cv-ketel. Dit is waarschijnlijk niet realistisch aangezien (hybride) warmtepompen vaak gebruikt worden voor een gelijkmatigere warmteprofiel over de dag met daardoor veel minder grote vraagpieken. Daarnaast kunnen hybride warmtepompen hun piekvraag desgewenst verminderen door actieve sturing, waarbij deze bij tekortsituaties overgaan van elektriciteit naar (klimaatneutraal) gas. Een hoge piekvraag heeft een groot effect op de rest van het energiesysteem, aangezien er een groot vermogen aan back-upcentrales aanwezig moet zijn om deze piekvraag op te vangen. Dit betekent dat de scenario's een hoger back-upvermogen hebben staan dan er waarschijnlijk in de toekomst nodig is. Daarnaast heeft het invloed op de benodigde netcapaciteit.

Tot slot worden deze warmtevraagprofielen bij elkaar opgesteld, waardoor de gelijktijdigheid van de piekvraag van de huizen samen valt en zeer hoge pieken geeft. In realiteit zullen mensen op net andere tijden verwarmen, waardoor de piek over een langere periode wordt uitgesmeerd.

8.4 Thuisbatterijen

De thuisbatterijen staan in het ETM op een manier geprogrammeerd dat zij als opslag dienen voor het hele systeem. Deze batterijen zijn dus onafhankelijk van de elektriciteitsproductie achter de meter geprogrammeerd. Concreet betekent dit dat de batterij niet direct oplaadt en ook niet direct levert aan het huis, en dat alle energie die door de batterij gaat ook door het laagspanningsnet gaat. Dit heeft een sterke verzwaring van het laagspanningsnet tot gevolg. In werkelijkheid zal een groot deel van de batterij direct uit eigen opwek kunnen worden geladen en uit eigen verbruik kunnen worden ontladen. Hierbij wordt geen gebruik gemaakt van het laagspanningsnet. Dit heeft een lagere laagspanningsnetcapaciteit tot gevolg. We hebben er derhalve in de scenario's voor gekozen om het aantal thuisbatterijen vooralsnog laag te houden. Gebruikers van de scenario's kunnen deze zelf toevoegen, indien gewenst.

8.5 Kosten scenario's in 2050

Bij de economische doorrekening van de vier scenario's is gebruik gemaakt van drie kostenniveaus. Hierbij is uitgegaan van voorspellingen van prijzen en kosten in 2050.

Het standaard kostenniveau draagt de naam "midden", deze kosten zijn opgenomen in het ETM. Daarnaast zijn er een kostenniveau "laag" en "hoog" ontwikkeld om de prijsgevoeligheid te onderzoeken. Het kostenniveau "midden" maakt gebruik van beschikbare voorspelling van prijzen en kosten in 2050. Kostenniveaus "laag" en "hoog" maken eveneens gebruik van beschikbare voorspellingen over de bandbreedte van kosten in 2050. Echter, dergelijke voorspellingen zijn niet altijd voorhanden. In die gevallen is d.m.v. een schatting van het "laag" en "hoog" kostenniveau gemaakt. In een relatief zekere situaties is het "midden" kostenniveau gehanteerd, waarbij een bandbreedte van -20% en +20% is genomen (bijvoorbeeld investeringskosten voor een gascentrale) voor respectievelijk kostenniveau "laag" en kostenniveau "hoog". In onzekere situaties is dezelfde methode toegepast maar is een bandbreedte van -50% en +100% gehanteerd. Dit is bijvoorbeeld genomen voor energiedragers zoals aardgas en aardolie, waarbij dit soort prijschommeling momenteel al binnen termijnen van een jaar kunnen worden waargenomen.

61) Papachristos, G. (2014). Residential electricity consumption in the Netherlands: A model-based policy analysis.

62) RVO (2017). Monitor energiebesparing gebouwde omgeving

| Energiedrager | Eenheid | Laag | Midden | Hoog |
|-----------------------------|-----------|-------------------|-------------------|--------------------|
| Aardgas | €/MWh | 12 ^a | 24 ⁶³⁾ | 48 ^b |
| Olie | \$/barrel | 32 ^a | 64 ⁶³⁾ | 128 ^b |
| Kolen | \$/tonne | 33 ^a | 66 ⁶³⁾ | 132 ^b |
| Groengas | €/MWh | 26 ^a | 52 ⁶⁴⁾ | 104 ^b |
| Biogas | €/MWh | 22,5 ^a | 45 ⁶⁴⁾ | 90 ^b |
| Hout | €/tonne | 76,5 ^a | 153 | 306 ^b |
| Biodiesel | €/liter | 0,6 ^d | 1,2 ^c | 2,4 ⁶³⁾ |
| Bio-ethanol | €/liter | 0,6 ^e | 1,2 ^e | 2,4 ^e |
| Geïmporteerde elektriciteit | €/MWh | 25 ^a | 50 ⁶³⁾ | 100 ^b |
| Geïmporteerde waterstof | €/MWh | 45 ^a | 90 ⁶³⁾ | 180 ^b |

^a 50% lagere kosten dan kostenniveau midden

^b 100% hogere kosten dan kostenniveau midden

^c 50% lagere kosten dan kostenniveau hoog

^d 75% lagere kosten dan kostenniveau hoog

^e Dezelfde prijzen gehanteerd als voor biodiesel

| Energieproductie | Eenheid | Laag | Midden | Hoog | Fixed O&M (%/jaar) | Levensduur (jaar) |
|---------------------------------------|---------|--------------------|----------------------|----------------------|---------------------|-------------------|
| (Groen) gas STEG | €/kWe | 600 ^f | 750 ⁶³⁾ | 900 ^g | 1,5% ⁶⁴⁾ | 30 ⁸²⁾ |
| (Groen) gas STEG + CCS | €/kWe | 780 ^f | 970 ⁶⁵⁾ | 1160 ^g | 2% ⁶⁵⁾ | 30 ⁸²⁾ |
| Biomassa WKK | €/kWe | 2400 ^f | 3000 ⁶⁶⁾ | 3600 ^g | 2% ⁶⁶⁾ | 30 ⁸²⁾ |
| Waterkracht rivier | €/kWe | 2.750 ^f | 3.500 ⁶⁷⁾ | 4.150 ^g | 2% ⁶⁷⁾ | 40 ⁸²⁾ |
| wind-op-zee | €/kWe | 740 ⁶⁸⁾ | 1.000 ⁶⁸⁾ | 1.480 ⁶⁸⁾ | 3,2% ⁶⁸⁾ | 25 ⁸²⁾ |
| Wind-op-land | €/kWe | 560 ⁶⁸⁾ | 710 ⁶⁸⁾ | 860 ⁶⁸⁾ | 2,5% ⁶⁸⁾ | 25 ⁸²⁾ |
| Zon-PV (grootschalig en kleinschalig) | €/kWe | 220 ^f | 280 ⁶⁹⁾ | 330 ^g | 2% ⁸²⁾ | 35 ⁸²⁾ |
| Geothermie | €/kWh | 900 ^a | 1.500 ⁷⁰⁾ | 2.100 ^g | 8% ⁷⁰⁾ | 30 ⁷¹⁾ |

^f 20% lagere kosten dan kostenniveau midden

^g 20% hogere kosten dan kostenniveau midden

| Opslag, conversie en flexibiliteit | Eenheid | Laag | Midden | Hoog |
|--|---------|--------------------|----------------------|--------------------|
| Waterstofopslag (zoutcaverne) | €/MWh | 3 ⁷²⁾ | 4,5 ⁷²⁾ | 6 ⁷²⁾ |
| Thuisbatterijen | €/kWh | 200 ⁸²⁾ | 300 ⁸²⁾ | 400 ⁸²⁾ |
| Wijkbatterijen | €/kWh | 200 ⁸²⁾ | 300 ⁸²⁾ | 400 ⁸²⁾ |
| Ondergrondse pomp accumulatie centrale | €/kWe | 640 ^a | 1.290 ⁷³⁾ | 2.570 ^b |
| Elektrische boiler (Power-to-heat) | €/kWe | 48 ^f | 60 ⁷⁴⁾ | 72 ^g |
| Elektrolyse | €/kWe | 225 ^a | 450 ⁷⁵⁾ | 900 ^b |

63) World Energy Outlook (2018)

64) Ecofys (2018). Gas for Climate

65) Energytransitionmodel, total costs are dependent on the costs for a gasplant without CCS

66) Tsiropoulos I., et al., Cost development of low carbon energy technologies, JRC Technical Reports, EC, 2018 (Table 35)

67) IEA, World Energy Investment (2016).

68) IRENA (2019), Future of Wind

69) IRENA (2019), Future of Solar

70) PBL (2019). conceptadvies SDE++ 2020. Aanname: kosten blijven stabiel

71) EBN (2018). Masterplan aardwarmte in Nederland

72) SBC Energy institute Hydrogen-based energy conversion (2014).

73) Huynen, J. (2018). Blue batterij for green energy

74) CE Delft, Potential for Power-to-Heat (2015).

75) IEA (2019). The Future of hydrogen. Midden waarde gekozen

| Infrastructuur | | Eenheid | Laag | Midden | Hoog |
|----------------------|-------------------------|---------|------------------|--------------------|--------------------|
| Waterstof | Waterstofleiding | €/MWh | 1,3 ^f | 1,6 ⁷²⁾ | 1,9 ^g |
| | Waterstof vrachtvervoer | €/MWh | 45 ^f | 56 ⁷²⁾ | 68 ^g |
| Elektriciteit | LS-net | €/kW | 730 ^f | 916 ⁸²⁾ | 1.100 ^g |
| | LS-MS station | €/kW | 160 ^f | 200 ⁸²⁾ | 240 ^g |
| | MS-net | €/kW | 550 ^f | 690 ⁸²⁾ | 830 ^g |
| | MS-HS station | €/kW | 200 ^f | 250 ⁸²⁾ | 300 ^g |
| | HS-net | €/kW | 290 ^f | 364 ⁸²⁾ | 440 ^g |
| | HS-interconnectie | €/kW | 290 ^f | 364 ⁸²⁾ | 440 ^g |

| CCS | Eenheid | Laag | Midden | Hoog |
|------------------|---------|-----------------|-------------------|-----------------|
| Industrie | €/tonne | 40 ^f | 50 ⁷⁶⁾ | 60 ^g |

| Gebouwde omgeving | Eenheid | Laag | Midden | Hoog |
|--------------------------------------|---------------|--------------------|-----------------------|---------------------|
| Hybridewarmtepomp (Gas) | €/kWth | 550 ⁷⁷⁾ | 620 | 700 ⁷⁷⁾ |
| Hybridewarmtepomp (Waterstof) | €/kWth | 670 ⁷⁷⁾ | 760 ⁷⁷⁾ | 850 ⁷⁷⁾ |
| Warmtepomp (Lucht) | €/kWth | 550 ⁷⁷⁾ | 620 ⁷⁷⁾ | 700 ⁷⁷⁾ |
| Warmtepomp (Bodem) | €/kWth | 700 ⁷⁷⁾ | 800 ⁷⁷⁾ | 900 ⁷⁷⁾ |
| Warmtenet woningen | €/kWh | 3.380 ^a | 6.750 | 13.500 ^b |
| Warmtenet utiliteiten | €/aansluiting | 5.100 ^a | 10.200 ⁷⁸⁾ | 20.000 ^c |

76) EBN & Gasunie (2018). Transport en opslag van CO₂ in Nederland

77) ETM default aangepast op basis van CE Delft (2013). Vesta 2.0 - Uitbreidingen en dataverificaties

78) CE Delft CEGOIA

8.6 Kapitaalskosten (WACC/discontovoet)

In het ETM wordt standaard gerekend met verschillende WACC (Weighted Average Cost of Capital) per investeringscategorie. Deze is laag voor investeringen die huishoudens doen. Iets hoger voor investeringen in infrastructuur tot relatief hoog voor investeringen die door bedrijven worden gedaan. Het PBL hanteert echter voor zijn Nationale kostenberekeningen een maatschappelijke discontovoet van 3% over alle categorieën⁷⁹⁾. Omdat de kostengetallen vergelijkbaar te maken met PBL hebben we ervoor gekozen om de doorrekening ook met dezelfde discontovoet te doen als die PBL hanteert, waarbij de parameter WACC in het ETM op 3% is gezet.

In het ETM zijn ook de WACC-waardes inmiddels instelbaar waardoor eenvoudig de impact van een hogere of lagere discontovoet (of WACC per categorie) kan worden onderzocht in de scenario's.

8.7 Elektriciteitsimport

Voor de doorrekening is er gebruik gemaakt van een elektriciteitsimportprijs. Deze importprijs is een gewogen importprijs naar interconnectiecapaciteit op basis van het "Sustainable Trends" scenario van het Ten Year Network Development Plan 2018 en de voorspellingen voor de interconnectie daarin.

| Grens | Verbinding | Capaciteit (MW)* | TYNDP 2018 NTC ST 2040 |
|----------------------------|---|--------------------|------------------------|
| Nederland-Groot-Brittannië | BritNed | 1000 MW | 2500 MW |
| Nederland-Duitsland | Maasbracht, Meeden-Diele, Hengelo-Gronau, Doetinchem-Wesel Doetinchem – Wesel 380 kV | 2450 MW 1500 MW | 5000 MW |
| Nederland-België | Verbindingen naar België | 1500 MW | 4900 MW |
| Nederland-Noorwegen | NorNed | 700 MW | 1700 MW |
| Nederland-Denemarken | COBRACable | 700 MW | 700 MW |

* Exclusief 300 MW intradaycapaciteit op de verbindingen met Duitsland en België (die na de DA-markt extra ter beschikking wordt gesteld). Bronnen: Tennet.eu; Berenschot, Bevordering integratie Nederlandse elektriciteitsmarkt, 2015; Energeia, Interconnectie-capaciteit met Duitsland is nu anderhalf keer zo groot, 2018

8.8 Potentiëlen

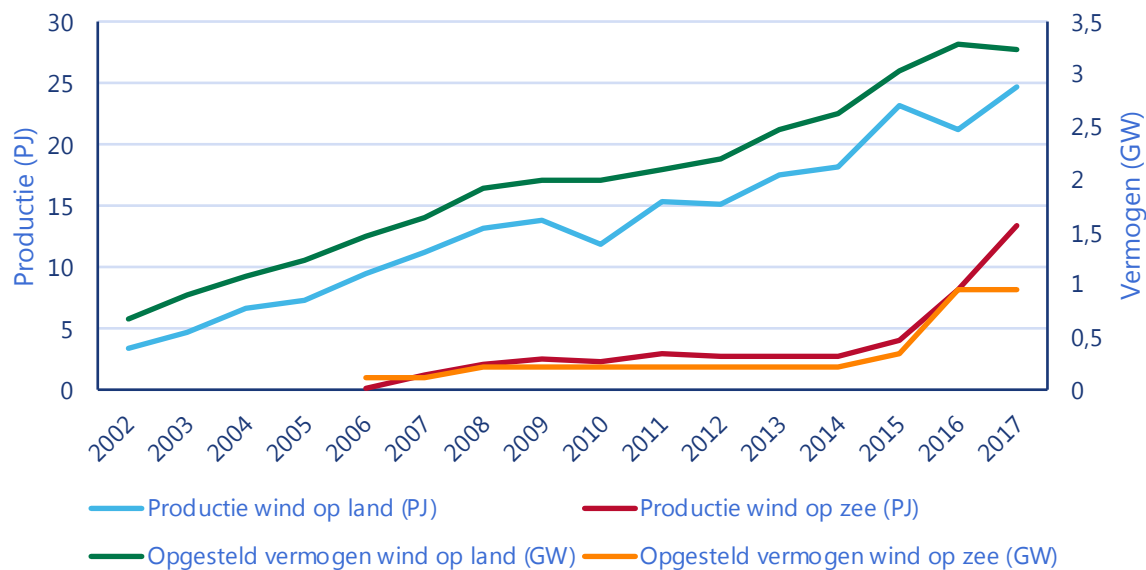
8.8.1 Windenergie

Windturbines hebben vanaf 2000 hun intrede gedaan in Nederland. In eerste instantie waren dit voornamelijk windturbines op land. Echter, door de beperkte ruimte, landschapsvervuiling, geluidoverlast en andere argumenten die tegen windturbines ingebracht worden, is de inzetmogelijkheid van wind-op-land beperkt. Windturbines op zee bieden een uitstekend alternatief, maar zowel de investeringskosten als de onderhoudskosten zijn aanzienlijk hoger. Daartegenover staat dat windturbines op zee meer vollasturen hebben, omdat het meer en harder waait op zee. Ook kunnen er grotere windturbines gerealiseerd worden die vanwege schaalvoordelen efficiënter omgaan met de wind. Enerzijds omdat het op grotere hoogte harder waait en anderzijds omdat deze windturbines alleen bij extreem hoge windsnelheden afschakelen. Vanaf 2006 zijn er vanwege de bovenstaande argumenten windturbines op zee gerealiseerd. Hoewel dit echte windparken betreft, is het totale opgestelde vermogen klein. Het gaat hier voornamelijk om kleinere windturbines waarbij schaalvoordelen niet worden benut, zie Figuur 59. Vanaf 2015 is echter een forse toename zichtbaar in zowel het opgestelde vermogen als de totale productie. Dit is te danken aan de realisatie van de nieuwe windparken met grotere windturbines.

Hoewel er met name een sterke toename zichtbaar is in het opgestelde windturbinevermogen op zee in Nederland, is het totale windturbinevermogen in Nederland nog beperkt. In 2018 stond er 4,4 GW aan opgesteld windturbinevermogen, waarvan het grootste gedeelte op land en een klein gedeelte turbines op zee. Het Klimaatakkoord stelt echter dat er tot 2030 veel ingezet moet worden op windenergie. De nadruk ligt hierbij vooral op wind-op-zee. Het totale opgestelde vermogen dat in het Klimaatakkoord genoemd wordt voor wind-op-zee is 11,5 GW.

De doelstelling om klimaatneutraal te zijn in 2050 vraagt echter grote ontwikkeling op het gebied van windenergie. Zeker wanneer men streeft naar zelfvoorzienende maatschappij moet de productie van windenergie sterk toenemen. Hoe de ontwikkeling van windenergie na 2030 vorm krijgt is onduidelijk. Er staat vast dat de huidige productiecapaciteit niet toereikend is. Mocht de ontwikkeling een zeer hoog tempo aannemen, dan is de maximale hoeveelheid windenergie wel gelimiteerd aan ruimtelijke grenzen. Voor wind-op-land zal dit eerder problematisch zijn dan voor wind-op-zee.

Opgesteld vermogen (GW) en productie (PJ) windenergie



Figuur 59 Historische ontwikkeling van windenergie.⁸⁰⁾

Tabel 64 Maximale potentie wind energie in Nederland 2050

| | Opgesteld vermogen 2018 (GW) | Verwachting opgesteld vermogen 2030 (GW) | Potentie opgesteld vermogen 2050 (GW) |
|---------------------|------------------------------|--|---------------------------------------|
| Wind-op-land | 3,4 ⁸⁰⁾ | 3,7 ⁸¹⁾ | 16 ⁸²⁾ |
| Wind-op-zee | 1 ⁸⁰⁾ | 11,5 ⁸³⁾ | 72 ⁸⁴⁾ |
| Totaal | 4,4 | 15,2 | 86 |

CE Delft stelt in Net voor de toekomst (2017) dat er in 2050 een potentiële capaciteit van 16 GW beschikbaar is op land.⁸²⁾ De Ruimtelijke verkenning Energie en Klimaat opgesteld in het kader van het Klimaat Akkoord ziet een potentieel voor wind-op-land van 50 GW als uitsluitend rekening wordt gehouden met harde restricties. Het potentieel van wind-op-zee is aanzienlijk groter, maar blijft wel lastig te bepalen. TKI wind-op-zee rekent met een potentie van 60 GW, waar Smart Port de potentie voor wind-op-zee op 70 GW inschat.⁸⁴⁾ Technologische en ruimtelijke ontwikkelingen zullen uitwijzen wat het maximale potentieel in 2050 is. Het maximale potentieel van zowel wind-op-land als wind-op-zee dat gehanteerd wordt in dit rapport is weergegeven in Tabel 64.

80) CBS statline: Hernieuwbare elektriciteit; productie en vermogen

81) Klimaatakkoord (2019), pag. 162

82) CE Delft (2017). Achtergrondrapport Bijlagen Net voor de Toekomst 2017.

83) Klimaatakkoord (2019), pag. 161

84) Ruimtelijke verkenning Energie en Klimaat opgesteld in het kader van het Klimaat Akkoord

8.8.2 Zon-PV

Het totale vermogen aan zon-PV groeit op dit moment ieder jaar met meer dan tien procent.⁸⁵⁾ Veel studies verwachten in 2050 dan ook een forse toename in het opgesteld vermogen van zon-PV. Het Solar Trendrapport 2018 rekent uit dat het maximaal potentieel in Nederland 5500 km² is, dit staat ongeveer gelijk aan 370 GWp. Hiervoor is dan wel 5% van het water in de Nederlandse exclusief economische zone bezet met (drijvende) zonnepanelen. Zonder deze bezetting komt het totaal potentieel aan zon-PV-vermogen uit op zo'n 180 GWp.

Voor de gebouwde omgeving komt het Solar Trendrapport uit op 65 GWp aan maximaal potentieel. Waarvan 50% op huizen en 50% op bedrijfsterreinen.

8.8.3 Biomassa

In Tabel 66 worden de voorspellingen voor het potentieel biomassa zoals berekend door PBL weergegeven. Deze voorspellingen gaan uit van 230 PJ biomassa die in Nederland geproduceerd kan worden en 18 PJ aquatische biomassa. Het PBL

stelt dat het technisch potentieel voor beiden een stuk groter is. Hierbij gaat men uit van een grote hoeveelheid aquatische biomassa. De technologische ontwikkelingen rondom aquatische biomassa zijn echter nog summier, waardoor het potentieel in 2050 lastig in te schatten is. Gezien het belang van biomassa is een voorzichtige schatting gedaan.

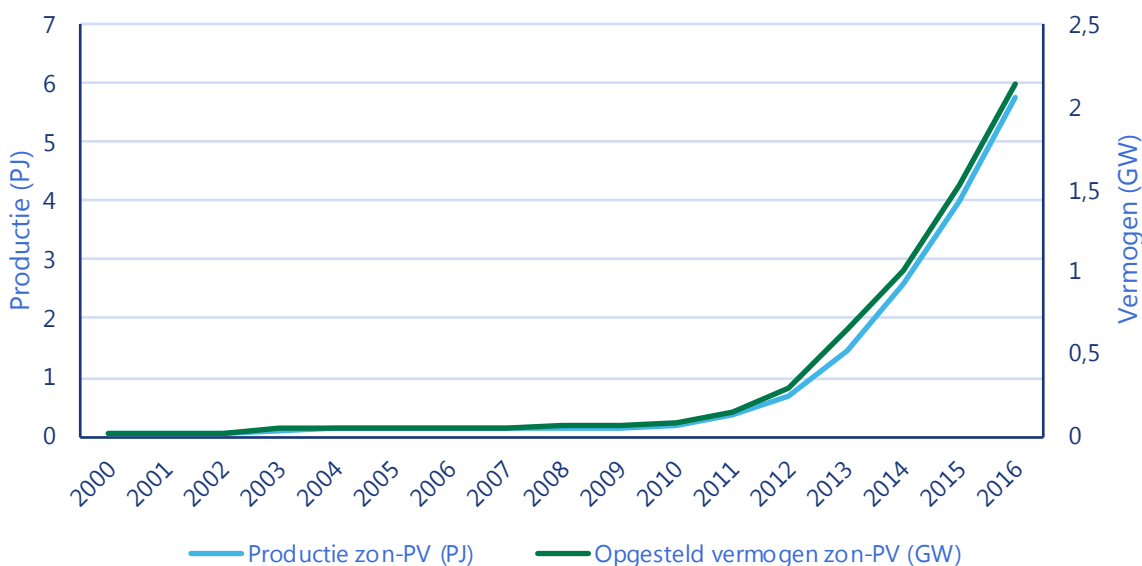
Fairshare-importbiomassa

In het rapport "systeemvraagstukken en afhankelijkheden in de energietransitie" is het economische fairshare van Nederland berekend. In dit rapport worden verschillende bronnen aangehaald. Deze zijn weergegeven in Tabel 67. Het rapport concludeert dat de economische fairshareratio op 660 PJ tot 1420 PJ ligt⁸⁶⁾. Deze studie behoudt deze range als maximale importpotentie voor Nederland.

8.8.4 Geothermie

In Tabel 68 wordt de potentie voor geothermie in Nederland weergegeven. Deze is berekend door EBN in het "Masterplan aardwarmte in Nederland". Op dit moment wordt er 3 PJ van het potentieel benut.

Opgesteld vermogen (GW) en productie (PJ) zon-PV

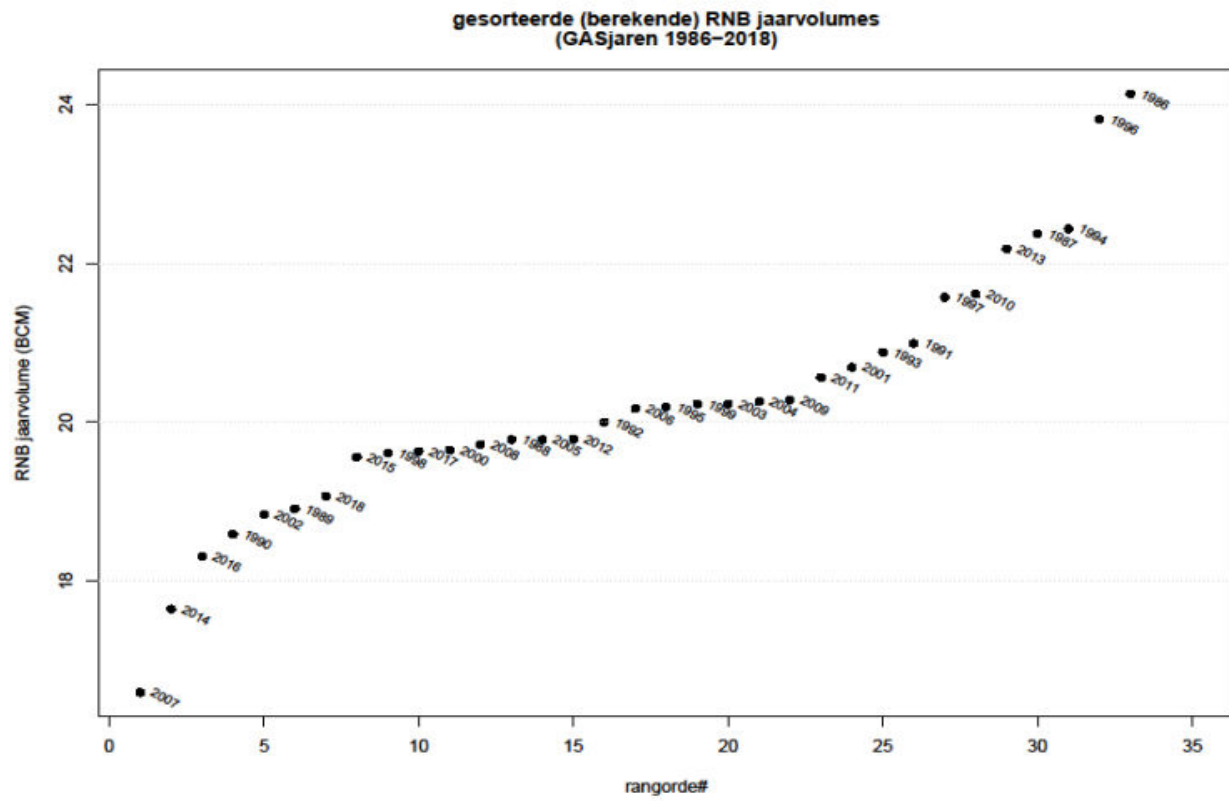


Figuur 60 Historische ontwikkeling van zon-PV.⁸⁰⁾

85) Dutch New Energy Research (2019). Nationaal Solar Trendrapport 2019

86) Berenschot (2018). Richting 2050: systeemkeuzes en afhankelijkheden in de energietransitie. pag. 70

8.8.5 Historische jaarlijkse gasvraag



Tabel 65 Maximale potentiële bezetting voor zon-PV in Nederland naar Solar Trendrapport 2018⁸⁷⁾

| Maximale potentiële bezetting landschap | Percentage | Aantal km2 | GW |
|---|------------|------------|----|
| Agrarisch terrein | 3,7% | 753 | 50 |
| Woonterrein | 16,0% | 496 | 33 |
| Bedrijfsterrein | 25,0% | 475 | 32 |
| Overig bebouwd terrein | 20,2% | 181 | 12 |
| Verkeersterrein | 29,6% | 370 | 25 |
| Binnenwater | 5,0% | 200 | 13 |
| Buitenwater | 4,0% | 168 | 11 |
| Overig | 0,3% | 18 | 1 |
| Exclusief Economische Zone | 5,0% | 2850 | |

Tabel 66 Maximale potentie Biomassa in Nederland 2050⁸⁸⁾

| | Huidig verbruik per jaar (PJ) | Potentieel beschikbaar 2050 (PJ) |
|---------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| Biomassa binnenland | 121 | 230 |
| Zeewier (Noordzee) | 0 | 18 |
| Totaal | 121 | 248 |

Tabel 67 Fairshare op basis van inwoners en BNP

| Studie | Jaar | Mondiale beschikbaarheid (EJ) | Deel NL o.b.v. inwoners (PJ) | Deel NL o.b.v. BNP (PJ) |
|------------------------|------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------|
| EEA, 2006 | 2030 | 12 (Europa) | 283 | 555 |
| Koppejan, et al., 2009 | 2020 | NL productie: 0,091 | 91 | 91 |
| Domburg, et al., 2008 | 2050 | 100-150 | 230-345 | 1130-1694 |
| IPCC, 2011 | 2050 | 100 | 230 | 1130 |
| IRENA, 2014 | 2030 | 37-66 | 85-152 | 418-746 |
| Biomass Futures, 2012 | 2030 | 9,3 (Europa) | 219 | 430 |

Tabel 68 Maximale potentie geothermie in Nederland 2050

| | Huidige productie per jaar (PJ) | Potentieel beschikbaar 2050 (PJ) |
|-------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| Geothermie | 3 | 210 ¹⁷⁾ |

87) Dutch New Energy Research (2018). Nationaal Solar Trendrapport 2018

88) PBL (2018). Negatieve emissies: technisch potentieel, realistisch potentieel en kosten voor Nederland

8.9 Overzicht geraadpleegde partijen

Voor het verdiepen van de industrieclusters zijn de volgende personen geraadpleegd:

| Industriecluster | Persoon |
|---|--|
| Rotterdam-Moerdijk | Maike Akkers (Port of Rotterdam) |
| | Wilco van der Lans (Port of Rotterdam) |
| | Ruud Melieste (Port of Rotterdam) |
| | Erik Klooster (VNPI) |
| Cluster Zeeland (Smart Deltares Resources) | Daniel Goedhuis (Smart Deltares Resources) |
| Cluster Noordzeekanaalgebied (NZKG) | Cock Pieterse (Tata Steel) |
| Chemelot | René Slaghek (Sitech Services BV) |
| Delfzijl en Eemshaven (Groningen Seaport) | Robert van Tuinen (Groningen Seaport) |

Daarnaast zijn de volgende personen geraadpleegd:

| Partij | Persoon |
|-------------------------|-----------------------|
| NWEA | Leon Straathof |
| | Sascha van Rooijen |
| | Karen Kooi-de Bruijne |
| Ennatuurlijk | Helma Kip |
| | Frank Soons |
| Holland Solar | Amelie Veenstra |
| TKI Urban Energy | Robin Quax |
| NVDE | Annemarie Costeris |

De klankbordgroep werd gevormd door de volgende partijen:

| Partijen | | |
|----------|------------------------------|------------------|
| EZK | Cluster Noordzeekanaalgebied | Vattenfall |
| BZK | Cluster Groningen/Drenthe | GasTerra |
| | Cluster Rotterdam-Rijnmond | EnergieNederland |
| | Cluster Zeeland | RWE |
| | Cluster Limburg | NVDE |
| | VEMW | Essent |
| | VNCI | Holland Solar |
| | VNPI | Energie samen |
| | ISPT | NWEA |
| | TKI/TNO | |

De iNet-kerngroep werd gevormd door de volgende partijen:

| Partijen | | |
|---------------------|---------|---------|
| Netbeheer Nederland | Enexis | Gasunie |
| Westlandinfra | Stedin | Tennet |
| Alliander | Enduris | |

Verwijzingen

Hoofdstuk 9

- Association, Dutch Data Center. 2019. „Nederland is Europees koploper datacenters.”
- Berenschot. 2018. „Richting 2050: systeemkeuzes en afhankelijkheden in de energietransitie.”
- Berenschot. 2019. „Routekaart voor CO₂-reductie in de metallurgische industrie.”
- Berenschot. 2019. „Routekaart voor CO₂-reductie in de technologische industrie.”
- Bouwmachines. 2019. „Uitstoot van bouw materieel beperken: waarom, en wat zijn de oplossingen?”
- Bouwmagazine. 2018. „Wereldprimeur: een volledig elektrische betonmixer!”
- CBS. 2017. „Prognose: 18,4 miljoen inwoners in 2060.”
- CCUS, Rotterdam. 2018. „Project Porthos: transport en opslag van CO₂.”
- Concawe. 2019. „Refinery 2050: Conceptual Assessment. Exploring opportunities and challenges for the EU refining industry to transition towards a low-CO₂ intensive economy.”
- De Zwart, F., B. Vanthoor, en S. Koreneef. 2019. „Tuinbouw zonder fossiele energie.”
- Delft, CE. 2014. „Energiegebruik Nederlandse commerciële datacenters 2014-2017.”
- Delft, CE. 2015. „Denktank Energiemarkt.”
- Delft CE, 2015. „Potential for Power-to-Heat.”
- Delft, CE. 2017. „Achtergrondrapport Bijlagen Net voor de Toekomst 2017.”
- Delft, CE. 2019. „CEGOIA.”
- DHV, Royal Haskoning. 2019. „Onderzoek Clean Underground Sustainable Transport (CUST).”
- Dutch New Energy Research. 2018. „Nationaal Solar Trendrapport 2018.”
- Dutch New Energy Research. 2019. „Nationaal Solar Trendrapport 2019.”
- EBN. 2018. „Masterplan aardwarmte in Nederland.”
- EBN & Gasunie, 2018. „Transport en opslag van CO₂ in Nederland.”
- Ecofys & Berenschot, 2018. „Roadmap for the Dutch Chemical Industry towards 2050 .”
- Ecofys, 2018. Gas for Climate
- Elzen, B., F. W. Geels, en P. S. Hofman. 2002. „Sociotechnical Scenarios. Development and evaluation of a new methodology to explore transitions towards a sustainable energy supply Universiteit Twente, Centre for Studies of Science, technology and Society: Ens.”
- Eviation. 2019. Eviation Alice.
- Hermanides, E. 2019. „Schiphol luchtvaart moet CO₂ neutraal zijn in 2050.” Trouw.
- Hoekstra, A., en N. Refa. sd. „Characteristics of Dutch EV drivers.”
- Huynen, J. 2018. „Blue battery for green energy.”
- ING. 2019. „Foodtech: technologie in de voedingsindustrie.”
- IEA. 2016. „World Energy Investment.”
- IEA. 2019. „The Future of hydrogen.”
- IRENA. 2019. „Future of Solar.”
- IRENA. 2019. „Future of Wind.”
- Kalavasta. 2018. „Carbon neutral aviation with current engine technology.”
- Klimaatakkoord 2018. „Ontwerp klimaatakkoord afspraken in sectoren C1 Gebouwde omgeving.”
- KNMI. 2020. „Daggegevens.”
- Nieuwsbladtransport. sd. „Elektrisch wegtransport: doorbraak staat voor de deur.”
- Papachristos, G. 2014. „Residential electricity consumption in the Netherlands: A model-based policy analysis.”
- PBL. 2017. „Nationale energieverkenning 2017.”
- PBL. 2018. „De toekomst van de Noordzee.”
- PBL. 2018. „Negatieve emissies: technisch potentieel, realistisch potentieel en kosten voor Nederland.”
- PBL. 2019. „Conceptadvies SDE++ 2020. Aanname: kosten blijven stabiel”
- PBL. 2019. „Effecten Ontwerp klimaatakkoord (2019).”
- Reijn, G. 2017. „Hoe een glasfabriek spectaculair minder CO₂ ging uitstoten.”
- REOS. 2018. „Ruimtelijke verkenning Energie en Klimaat.”
- Rotterdam-Moerdijk, Industriecollege. 2018. „In drie stappen naar een duurzaam industriecollege Rotterdam-Moerdijk in 2050 .”
- RVO. sd. „Gebouwen; Referentiewoningen EPC.”
- RVO. 2017. „Monitor Energie besparing gebouwde omgeving.”
- Statline, CBS. sd. „Bodemgebruik; uitgebreide gebruiksvorm, per gemeente.”
- Statline, CBS. sd. „Hernieuwbare elektriciteit productie en vermogen.”
- Statline, CBS. 2018. „Kerncijfers wijken en buurten 2018.”
- Statline, CBS. 2020. „Energiebalans; aanbod en verbruik per sector.”
- Statline, CBS. sd. „Regionale prognose bevolkingsopbouw; 2011-2040.”
- SBC. 2014. „Energy institute Hydrogen-based energy conversion.”
- Tsiropoulos. 2018. „Cost development of low carbon energy technologies”, JRC Technical Reports, EC
- TNO. 2019. „Inventarisatie van de behoefte van de industriecluster aan grootschalige infrastructuur voor transport van elektriciteit, waterstof, warmte en CO₂ nodig voor het realiseren van klimaatdoelstellingen.”
- Van der Velden, N. J. A., P. X. Smit, en J. Buurma. 2018. „Prognoses CO₂-emissie glastuinbouw.”
- Van Gessel, S. F., J. Breunese, J. Juez Larré, T. D. Huijskens, en G. Remmelts. 2018. „Ondergrondse Opslag in Nederland - Technische Verkenning.”
- Van der Weijer. 2019. „Eerst de stadsbus, nu de streekbus. Hoe een Brabantse bedrijf de conservatieve buswereld elektrificeert.”
- VNG. 2012. „Routekaart 2030 Nederlandse glasindustrie.”
- VNP. 2018. „Roadmap 95 procent CO₂-besparing.”
- Yakaboylu, O., J. Harinck, en K. G. Smit. 2015. „Supercritical Water Gasification of Biomass: A Literature and Technology Overview.”
- Yara Birkeland. 2019. Yara Birkeland presskit.



Kalavasta is een strategie adviesbureau dat zich richt op het bewerkstelligen van evenwichten, die verloren zijn gegaan, in onze samenleving. We werken momenteel zowel aan het beperken van de klimaatverandering via onze bijdragen aan de energietransitie als aan de transitie die aanstaande is in het landbouw-, voedsel- en natuur-'systeem'.

Onze opdrachtgevers waarderen ons om onze scherpe strategische analyses, die altijd onderbouwd worden met transparante kwantitatieve rekenmodellen. Deze rekenmodellen stellen we zo veel mogelijk open source en gratis ter beschikking voor een ieder die interesse heeft. Dit doen we zowel om onze rekensommen te kunnen laten verifiëren als om anderen in de gelegenheid te stellen hun eigen analyses te maken, door zelf de aannames ten behoeve van de rekensommen te kunnen aanpassen.

Berenschot

Berenschot is een onafhankelijk organisatieadviesbureau met 350 medewerkers wereldwijd. Al 80 jaar verrassen wij onze opdrachtgevers in de publieke sector en het bedrijfsleven met slimme en nieuwe inzichten. We verwerven ze en maken ze toepasbaar. Dit door innovatie te koppelen aan creativiteit. Steeds opnieuw. Klanten kiezen voor Berenschot omdat onze adviezen hen op een voorsprong zetten.

Ons bureau zit vol inspirerende en eigenwijze individuen die allen dezelfde passie delen: organiseren. Ingewikkelde vraagstukken omzetten in werkbare constructies. Door ons brede werkkterrein en onze brede expertise kunnen opdrachtgevers ons inschakelen voor uiteenlopende opdrachten. En zijn we in staat om met multidisciplinaire teams alle aspecten van een vraagstuk aan te pakken.

Berenschot Groep B.V.

Europalaan 40, 3526 KS Utrecht
Postbus 8039, 3503 RA Utrecht
030 2 916 916
www.berenschot.nl
[in /berenschot](https://www.linkedin.com/company/berenschot)