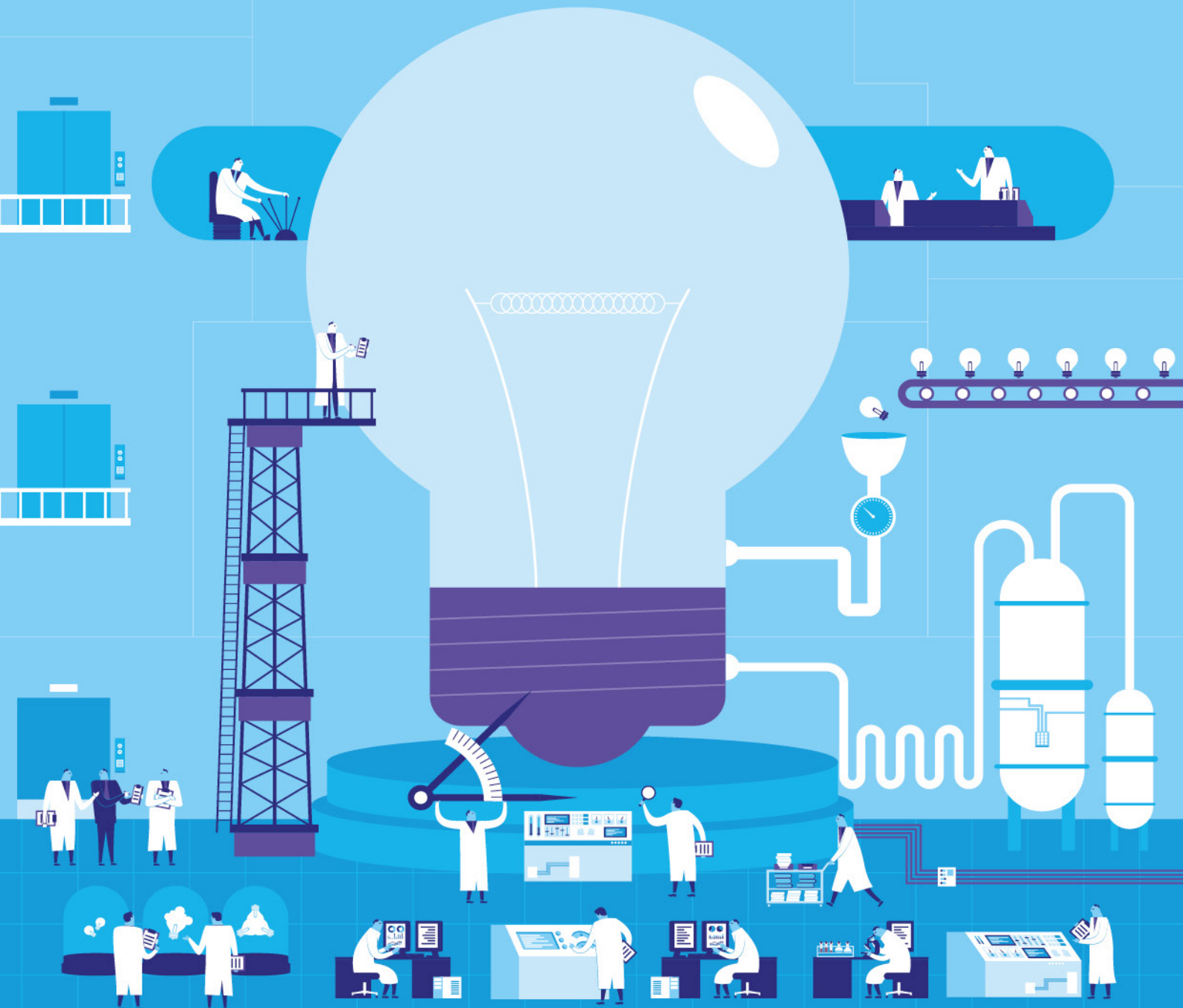


EEN VOORUITBLIK OP DE ENERGIEVOORZIENING IN 2050

NET VOOR DE TOEKOMST



SAMENVATTING

COLOFON

Onderzoekers

Maarten Afman CE Delft
Frans Rooijers CE Delft

Begeleidingscommissie

Maurice Roovers (voorzitter) Netbeheer Nederland
Huibert Baud Alliander
Arjen Jongepier Enduris
Gert van der Lee TenneT
Liane ter Maat Netbeheer Nederland
Bastiaan Meijer Rendo

Piet Nienhuis GTS
Jan Peters Enexis
Bert Vogelaar GTS
Wilco Wittenberg Coteq Netbeheer
Ton Wurth Stedin

Vormgeving

AANDAGT reclame & marketing

November 2017

Op weg naar een CO₂-neutrale samenleving in 2050 zal de energievoorziening de komende decennia ingrijpend veranderen, maar niemand weet precies hoe. De vorm van de transitie heeft gevolgen voor de energie-infrastructuur. Andersom kunnen investeringskeuzes van netbeheerders de richting en de snelheid van de transitie beïnvloeden. De energietransitie gaat echter uiteraard niet alleen om infrastructuur en kostenefficiënte technische oplossingen, maar ook om draagvlak voor de veranderingen. Om de samenhang te laten zien tussen de richting die de samenleving kiest en de benodigde infrastructuur, plaatsen we in dit rapport de technische uitdagingen in een context van sociaal-maatschappelijke en politieke keuzes en afwegingen.

DE ENERGIEVOORZIENING IN 2050 IN VERSCHILLENDE MAATSCHAPPIJBEELDEN

In het onderzoek zijn vier maatschappijbeelden uitgewerkt en daarbij is doorgerekend wat politieke en maatschappelijke keuzes betekenen voor de energievoorziening in 2050. De maatschappijbeelden verschillen in hoe er regie wordt gevoerd over de transitie, op welk schaalniveau er wordt gestuurd, en in welke mate zelfvoorziening zal worden gerealiseerd.

1. Regie Regionaal

In dit scenario hebben provincies en gemeenten veel regie. Zo veel mogelijk energie voor de productie van elektriciteit en warmte komt uit lokale energiebronnen, zoals zon, wind, biomassa en geothermie.

2. Regie Nationaal

De rijksoverheid heeft in dit scenario de regie en stuurt op energie-autonomie voor Nederland via een mix van vooral centrale energiebronnen, met name wind op zee.

3. Internationaal








Nederland is in dit scenario een mondiaal georiënteerd land dat verschillende vormen van hernieuwbare energie importeert. Er is een internationale productie en handel in waterstof uit klimaatneutrale bronnen (hernieuwbaar en fossiel+CCS).

4. Generieke sturing

In dit scenario komt de energievoorziening via een organisch proces tot stand, gestuurd door een stevig CO₂-prijssignaal, maar zonder verdere regie van de overheid. De energievoorziening is een mix van lokale en internationale opties. Per scenario is gekeken naar hoe wordt voorzien in de energievraag voor kracht en licht, lage temperatuur warmte, industrie en transport.

De volgende tabel bevat een overzicht van de techniekenmerken per scenario.

Opwekkingsmix en inpassing (GWe)

| | Regie Regionaal | Regie Nationaal | Internationaal | Generieke sturing |
|--|---|--|--|---|
| Kracht en Licht  | 25% besparing basisvraag door zuiniger apparaten. Daarnaast een sterke elektrificatie industrie | | 25% besparing door zuiniger apparaten | 25% besparing door zuiniger apparaten |
| Lage temperatuur warmte*  | Veel warmtenetten en all-electric. (Beperkingen op groen gas, geen H ₂ distributie). Besparing 23% | Veel hybride warmtepompen op H ₂ (en groen gas) (Beperkingen op groen gas). Besparing 16% | Veel hybride warmtepompen op groen gas en waterstof (milde beperkingen op groen gas) Besparing 12% | Mix van individuele opties (geen groot collectief, geen andere beperkingen) Besparing 17% |
| Hoge temperatuur & feedstock industrie**  | Circulaire industrie en ambitieuze procesinnovatie: 60% besparing; 55% elektrificatie; CO ₂ -emissie -97%. | | Biomassa-gebaseerde industrie en CCS: 55% besparing; 35% biomassa; 14% elektrificatie; CO ₂ -emissie -95% | Geleidelijke ontwikkeling, business as usual en CCS: 20% besparing; 12% elektrificatie; CO ₂ -emissie -85% |
| Personenvervoer  | 100% elektrisch | 75% elektrisch, 25% H ₂ brandstofcel | 50% elektrisch; 25% groen gas; 25% H ₂ | 50% elektrisch; 25% groen gas; 25% H ₂ |
| Goederenvervoer  | 50% groen gas; 50% H ₂ | | 25% biobrandstof; 25% groen gas; 50% H ₂ | |
| Hernieuwbare opwek in NL  | 84 GW zon 16 GW wind op land 26 GW wind op zee | 34 GW zon 14 GW wind land 53 GW wind zee | 16 GW zon 5 GW wind land 6 GW wind zee | 18 GW zon 5 GW wind land 5 GW wind zee |
| Conversie en opslag in NL  | 75 GW elektrolyse 60 GW accu-opslag 9 bcm gasbuffer | 60 GW elektrolyse 50 GW accu-opslag 11 bcm gasbuffer | 2 GW elektrolyse 5 GW accu-opslag 10 bcm gasbuffer | 0 GW elektrolyse 2 GW accu-opslag 10 bcm gasbuffer |

* Uitkomsten kosteneffectieve opties met het CEG01A model doorgerekend.** Toekomstbeelden voor de industrie van het Wuppertal Instituut.

ANALYSE

Het onderzoek laat zien hoe zeer de technische uitwerking van de energietransitie en de gevolgen voor onder meer de energie-infrastructuur afhangen van (politieke) keuzes, ook al zal geen van de vier maatschappijbeelden de uiteindelijke waarheid beschrijven.

In alle maatschappijbeelden verandert het energiesysteem drastisch.

Een aantal punten vallen op:

- Elektriciteit wordt belangrijker in de energievoorziening, ook voor de industrie. In het regionale maatschappijbeeld moet lokaal en regionaal opgewekte elektriciteit uit zon en wind via het landelijke net naar de industrie worden getransporteerd en worden omgezet in waterstof. In het nationale maatschappijbeeld is vooral extra infrastructuur (zowel elektriciteit als gas) nodig om op zee opgewekte energie te transporteren. Het (fors) verzwaren van de elektriciteitsnetten betekent niet alleen veel werk voor de netbeheerder en behoefte aan voldoende technisch personeel, maar legt ook een groot beslag op de openbare ruimte voor meer transformatoren en extra hoogspanningslijnen.

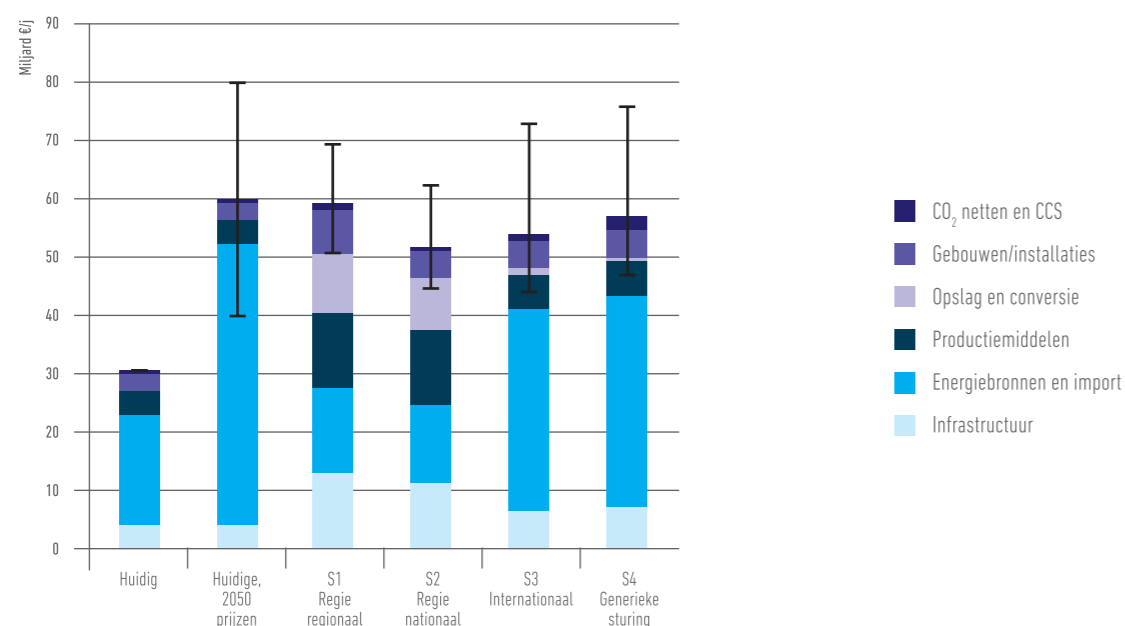
De benodigde capaciteiten elektriciteitsnet 2050 (GW)

| | Huidig | Regionaal | Nationaal | Internationaal | Generiek |
|----------------|--------|-----------|-----------|----------------|----------|
| Wind op Zee | 1 | 26 | 53 | 6 | 5 |
| Hoogspanning | 20 | 36 | 57 | 18 | 20 |
| Middenspanning | 10 | 53 | 22 | 10 | 20 |
| Laagspanning | 11 | 24 | 13 | 11 | 5 |

- Flexibiliteit van gebruikers draagt bij aan optimalisering van de kosten van het elektriciteitsstelsel.
- In maatschappijbeelden waarin zon en wind belangrijke energiebronnen zijn, zijn ook centrales op basis van CO₂-vrije brandstoffen nodig met eenzelfde vermogen als de huidige kolen- en gascentrales als oplossing voor grijze en windstille dagen.
- Waterstof is onmisbaar in de toekomstige energievoorziening; het is een goede oplossing om energie uit wind en zon niet alleen direct als elektriciteit te kunnen gebruiken, maar ook in te zetten bij vervoer, invulling van de warmtevraag en als feedstock voor de chemische industrie.
- In alle scenario's blijft landelijke en regionale gasinfrastructuur nodig voor CO₂-vrije gassen. De capaciteit van de huidige netten is voldoende. CO₂-vrij-gas zal in veel gevallen, direct en indirect, zorgen voor het voorzien in de warmtevraag tijdens de winterpiek.

De totale kosten van de energievoorziening zijn in de toekomst ongeveer twee keer zo hoog als nu, of we nou afhankelijk blijven van fossiele brandstoffen of naar een CO₂-neutrale energievoorziening gaan. De onderlinge verschillen in totale kosten zijn klein. Bij klimaatneutrale scenario's telt dat hernieuwbare bronnen vaak duurder zijn dan de huidige goedkope fossiele energie. Daarnaast zijn er meer investeringen nodig in installaties, isolatie en infrastructuur. Als we niets zouden veranderen aan het huidige energiesysteem, zou de kostprijs van fossiele energie zomaar kunnen verdubbelen als wereldwijd klimaatbeleid niet effectief is, waardoor de energievoorziening ook dan twee keer zo duur wordt. De kosten in het internationale beeld en het beeld met generieke sturing hangen overigens sterk af van de marktprijzen, omdat de totale kosten in deze maatschappijbeelden voor een groot deel uit variabele kosten voor de import van energiebronnen bestaan. Er gaan in deze beelden veel grotere geldstromen naar het buitenland dan in de zelfvoorzienende beelden.

Jaarlijkse kosten van de energievoorziening



Naast de kosten zijn er ook andere effecten die verschillen tussen de toekomstbeelden. Dit gaat om macro-economische structuur, toegevoegde waarde, innovatie, hoog- en laaggeschoolde werkgelegenheid, economische handelsbalans, evenals milieu-effecten, luchtkwaliteit, beperking van klimaatverandering en effecten op ruimte/landschap. Daarnaast zijn er verschillen in een aantal meer subjectieve eigenschappen van het energiesysteem, zoals energie-zelfvoorzienendheid, voorzieningszekerheid, autonomie en keuzevrijheid voor burgers.

CONCLUSIES

Welke investeringen in infrastructuur nodig zijn en wat de ruimtelijke impact is van de duurzame energievoorziening, hangt af van de koers van de energietransitie en dus van wie de regie heeft. Omdat netbeheerders nu al bezig zijn met het aanleggen van het net voor die toekomst, is op tijd een richting kiezen de meest doelmatige weg. Overheden, netbeheerders, marktpartijen en consumenten moeten daarover het gesprek aangaan. De overheid kan daarbij actief sturen met bijvoorbeeld regulering of beprijzing of met regie en inhoudelijke keuzes.

Op regionale schaal energieneutraal worden vergt (heel) veel lokale bronnen, met grote impact op ruimte en infrastructuur. Het is belangrijk die impact te onderkennen en kosten, zelfvoorzienendheid, ruimte, draagvlak, risico's en de mogelijkheid om energie te importeren allemaal mee te wegen in keuzes.

Het op afzienbare termijn maken van systeemkeuzes voor de lange termijn is belangrijk voor een snelle en efficiënte energietransitie. Te lang wachten leidt uiteindelijk tot knelpunten in de uitvoering, bijvoorbeeld omdat er niet genoeg tijd meer is en niet genoeg personeel voor de tijdige aanpassing van alle conversie-installaties en de netten. Onder systeemkeuzes verstaan we bijvoorbeeld de mate van gewenste zelfvoorziening, de keuzevrijheid voor burgers of voor gemeenten in de infrastructuur voor verwarming, hoeveel extra productie van elektriciteit uit zon/wind gewenst is.

Zo lang onduidelijk is welke kant we op gaan, moeten netbeheerders met elke mogelijke richting rekening houden. Netbeheerders moeten dan voorbereid zijn op een regionaal scenario waarin veel infrastructuur nodig is tegen hoge kosten, terwijl over 30 jaar wellicht blijkt dat de energievoorziening juist internationaal georiënteerd is, met een veel kleinere behoefte aan infrastructuur. Vanuit die optiek kunnen netbeheerders de kosten beperken door niet met alle mogelijkheden rekening te hoeven houden.

Overigens kan louter streven naar de laagste kosten voor de netten het draagvlak beperken. Draagvlak is essentieel voor de energietransitie, omdat alle energiegebruikers (ingrijpende) maatregelen moeten treffen om de energietransitie te kunnen laten slagen. Meer ruimte in de netten (en daardoor hogere kosten) geeft de energiegebruikers meer mogelijkheden om eigen oplossingen te kiezen. Een voorbeeld hiervan is het (langer) in stand houden van gasnetten voor hernieuwbare gassen naast een warmtenet. Dit levert een maatschappelijk dilemma op tussen enerzijds het streven naar de laagste kosten en anderzijds het creëren van draagvlak.





“DE ENERGIEVOORZIENING
ZAL DE KOMENDE DECENNIA
INGRIJPEND VERANDEREN”

1 INLEIDING RAPPORT

Nederland is op weg naar een CO₂-neutrale samenleving in 2050. In 2050 moeten de broeikasgasemissies in de energievoorziening nihil zijn. Dit betekent dat voor alle functionele energievragen (kracht & licht, lage temperatuur warmte, industrie en transport) de broeikasgasemissies naar nul moeten. Om dat te bereiken moet de energievoorziening de komende decennia ingrijpend veranderen. Fossiele brandstoffen zoals aardgas, kolen en aardolie maken plaats voor duurzame energiebronnen óf de CO₂ die vrijkomt bij verbranding van fossiele energiebronnen moet worden afgevangen en opgeslagen. Bovendien moet het energiegebruik omlaag.

Hoe de toekomstige energievoorziening er precies uit gaat zien, is nog onduidelijk. De vorm van de transitie heeft gevolgen voor de energie-infrastructuur en andersom kunnen investeringskeuzes van netbeheerders de richting en de snelheid van de transitie beïnvloeden. De energietransitie gaat echter niet alleen om kostenefficiënte technische oplossingen, maar ook om draagvlak voor de veranderingen. Overheden, netbeheerders, marktpartijen en consumenten moeten tijdig het gesprek aangaan over welke kant onze toekomstige energievoorziening op gaat en welke investeringen daarvoor nodig zijn. Het maken van systeemkeuzes voor de lange termijn is belangrijk voor een snelle en efficiënte energietransitie én voor de tijdige aanpassing van de netten.

Dit rapport is bedoeld om handvatten te bieden voor de dialoog. Het geeft aan de hand van vier maatschappijbeelden inzicht in de aard en omvang van de energietransitie en de consequenties voor de energienetten en de maatschappelijke kosten in 2050.

30 jaar vooruit kijken brengt onvermijdelijk onzekerheden met zich mee. Ondanks die onzekerheden maakt dit rapport duidelijk dat het maken, uitstellen of achterwege laten van keuzes gevolgen heeft voor de energievoorziening.



2 OPZET ONDERZOEK

De energietransitie is geen technisch vraagstuk van de energiesector, maar een grote verandering voor de samenleving. Het gaat niet alleen om kostenefficiënte technische oplossingen, maar ook om draagvlak voor de veranderingen. Daarom plaatsen we in dit rapport de technische uitdagingen in een context van sociaal-maatschappelijke en politieke keuzes en afwegingen, de zogenaamde maatschappijbeelden.

In het onderzoek is uitgewerkt hoe de energievoorziening van de toekomst eruit kan zien, vanuit het vertrekpunt van vier sterk verschillende maatschappijbeelden. De beelden verschillen in wie regie voert over de transitie, in het schaalniveau van energie-oplossingen en in de mate waarin Nederland ervoor kiest zelfvoorzienend te zijn.

1. Regie Regionaal

In dit maatschappijbeeld hebben decentrale overheden (provincies, gemeenten) veel regie en zij sturen sterk op decentrale energie opwekking en -gebruik.

2. Regie Nationaal

De Rijksoverheid heeft in dit maatschappijbeeld veel regie en stuurt op energie-autonomie voor Nederland via een mix van vooral centrale energiebronnen, zoals wind op zee.

3. Internationaal

Nederland is in dit maatschappijbeeld een mondiaal georiënteerd land dat verschillende vormen van hernieuwbare energie importeert.

4. Generieke sturing

In dit maatschappijbeeld komt de energievoorziening via een organisch proces tot stand, gestuurd door een stevig CO₂-prijssignaal, maar zonder verdere gerichte sturing van de overheid.

Per maatschappijbeeld schetsten we achtereenvolgens:

- hoe de maatschappij en besluitvorming zijn georganiseerd;
- hoe dit zich vertaalt naar de inrichting van de verschillende energiefuncties:
 - Kracht & licht: aandrijfenergie; (elektrische) apparaten en ICT;
 - Lage temperatuur warmte: het verwarmen en koelen van gebouwen, warm tapwater;
 - Energie voor de industrie: hoge temperatuur warmte voor de processen en energiegrondstoffen (die worden omgezet in een andere vorm);
 - Transport: vervoer van personen en goederen binnen Nederland;
- de consequenties voor de energiedragers die worden gebruikt, in hoeveelheden in 2050;
- de energie-infrastructuren die daarvoor nodig zijn en wat netbeheerders moeten doen;
- de kosten van de energievoorziening in totaal en de kosten van de infrastructuur;
- de keuzes die gemaakt moeten worden en de *no regret*-opties.

Daarbij gelden twee randvoorwaarden:

- CO₂-neutraal: Nederland voldoet in elk maatschappijbeeld aan de Parijs-doelstelling in 2050;
- Betrouwbare energievoorziening: de kwaliteit van de energievoorziening blijft voor de energievragers minstens gelijk ten opzichte van nu. Daarom geldt voor alle maatschappijbeelden dat voor energiebronnen die niet of minder leveringsbetrouwbaar zijn, back-upcapaciteit van belang is.

Het is belangrijk om te beseffen dat geen van de maatschappijbeelden de uiteindelijke waarheid zal beschrijven. Maar het gaat om het laten zien van de verschillen in de (technische) uitwerking van de energietransitie als gevolg van verschillende sociale, maatschappelijke, politieke en bestuurlijke keuzes, en om de conclusies die we daaruit kunnen trekken.

2.1 REKENMODELLEN

Een uitgebreide toelichting op alle uitgevoerde berekeningen en beschrijvingen in de maatschappijbeelden staat in een separaat rapport met bijlagen van CE Delft. De uitwerking is gebeurd op basis van huidig bekende technieken en kosten, inclusief te verwachten dalingen door innovaties. Op veel onderdelen zijn verdere optimalisaties mogelijk, maar die vergen dermate veel aannames en details dat gekozen is voor transparantie en enige onzekerheid in de uiteindelijke kosten. Wel is in de maatschappijbeelden met veel opwek van hernieuwbare energie uit wind en zon rekening gehouden met grootschalige flexibele inzet van electrolyse en opslag. Dergelijke technieken zullen (naast interconnectie) noodzakelijk zijn om een (sterk) toegenomen productie van zon en wind nuttig te kunnen gebruiken. Dit is gedaan met het model CE-GRID, dat uurlijkse waarden voor buffering, opslag, zon, wind, vraagsturing en flexopties doorrekent. In deze studie wordt uitgegaan van het nationale kostenbegrip, waarbij een integrale berekening van de totale nationale kosten van het energiesysteem is uitgevoerd. Belastingen, tarieven en heffingen zijn hier geen onderdeel van. In bijlage A van het achtergrondrapport is uitgewerkt hoe de maatschappijbeelden zijn doorgerekend en hoe flexibele vraag en aanbod zijn meegenomen. Ook staan in deze bijlage de details van de afbakening en berekening van de kosten.

2.2 KANTTEKENING: BATEN VAN DE MAATSCHAPPIJBEELDEN

Belangrijk om te benoemen is dat elk maatschappijbeeld naast kosten uiteraard ook baten heeft. Deze zijn niet meegenomen in dit onderzoek. De maatschappijbeelden verschillen van elkaar in macro-economische structuur, toegevoegde waarde, innovatie en hoog- en laaggeschoolde werkgelegenheid. Maatschappijbeelden met meer import van energie kennen een heel andere handelsbalans dan zelfvoorzienende maatschappijbeelden. Daarnaast kennen de maatschappijbeelden ook verschillen in meer subjectieve eigenschappen van het energiesysteem, zoals energie-zelfvoorzienendheid, autonomie en keuzevrijheid voor burgers. Deze verschillen hebben niet alleen te maken met waar de energie vandaan komt, maar ook met wat voor transitie de industrie doormaakt en wat voor transitie in de gebouwde omgeving wordt ingezet. Dit zijn wezenlijke zaken om in het achterhoofd te houden bij het onderling beschouwen van de kosten van de maatschappijbeelden. Er worden heel andere 'soorten Nederland' beschreven.



Verdeling warmteaan sluitingen per warmte-optie



3.1 MAATSCHAPPIJBEELDEN EN ENERGIESCENARIO'S 2050

REGIE REGIONAAL

3.1.1 MAATSCHAPPIJ EN BESLUITVORMING

Provincies en gemeenten hebben veel regie en sturen sterk op decentrale energieopwekking en -gebruik. De energietransitie heeft veel landschappelijke en ruimtelijke impact, dus sturing is nodig om dit goed in te passen. De rijksoverheid laat dit aan decentrale overheden over, vanuit een strikt beginsel van subsidiariteit. Het Rijk stuurt alleen op nationaal niveau als dit meerwaarde biedt. Het tempo van de transitie ligt hoog. De regionale overheden nemen veel initiatieven om het regionale potentieel maximaal te benutten. Regio's zijn niet noodzakelijk autonoom in hun energievoorziening.

Burgers nemen veel initiatief en helpen elkaar. Decentrale overheden faciliteren hen door te bemiddelen en oplossingen aan te dragen als er conflicterende belangen zijn. Burgers, bedrijven en decentrale overheden vervullen een actieve rol in het vormgeven van energieoplossingen, bijvoorbeeld collectieve en individuele zon-PV oplossingen, kleinschalige collectieve warmtenetten, wind op land. Omdat burgers betrokken zijn bij de energievoorziening, is er sneller draagvlak voor nieuwe technieken en decentrale oplossingen. De maatschappij beseft dat hernieuwbare energie in Nederland schaars is. Daardoor is er ook draagvlak voor het opzetten van een sterk circulaire industrie, waarin recycling belangrijk is. De industrie in Nederland is veranderd richting het 'Closed Carbon Cycle (CYC)' dat het Wuppertal Instituut heeft ontwikkeld voor het Rotterdamse haven-industriële cluster. De huidige olieraffinage en petrochemische industrie hebben plaats gemaakt voor een omvangrijke recyclingindustrie en een chemische industrie gebaseerd op hernieuwbaar geproduceerde waterstof en de productie van kunststof uit methanol. Er is geen grootscheepse import van hernieuwbare of fossiele energie van buiten Nederland, maar binnen Nederland kan energie wel getransporteerd worden. CCS is in dit maatschappijbeeld geen oplossingsroute.

3.1.2 VERANDERINGEN IN ENERGIEFUNCTIES

- Bij **kracht en licht** daalt de vraag licht. Efficiëntere apparaten verbruiken weliswaar 25% minder stroom, maar daar staat tegenover dat bedrijven en de industrie meer elektriciteit vragen, omdat de nieuwe processen veel meer elektrisch worden aangedreven. (Zie toelichting in bijlagen K en L van het achtergrondrapport.)
- Voor de **lage temperatuur warmtevoorziening** worden op regionale schaal zo veel mogelijk de bronnen gebruikt die er zijn. *All electric*-oplossingen komen het vaakst voor. Daarvoor zijn veel aanpassingen aan gebouwen nodig en verzwaring van de elektriciteitsinfrastructuur. Het aandeel collectieve opties is ongeveer even groot, maar wordt beperkt door de beschikbaarheid van geothermie en duurzame restwarmte. Nederland importeert geen biomassa, alleen Nederlands groengas is beschikbaar voor distributie naar de stedelijke regio. Waterstof die met elektrolyse met duurzame elektriciteit wordt gemaakt, gaat naar de industrie. De hybride warmtepomp op groen gas is in ongeveer 20% van de gevallen de oplossing. (Zie toelichting in bijlagen M tot en met S van het achtergrondrapport.)

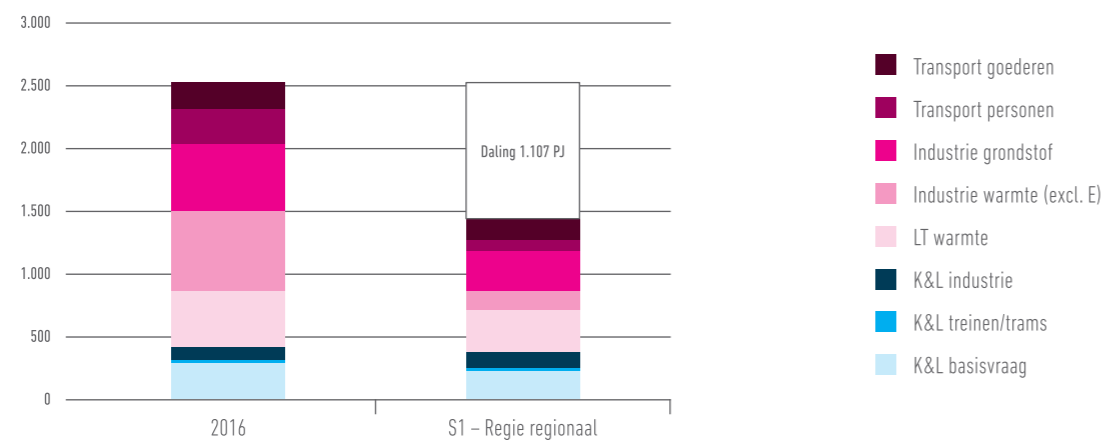
De afbeelding hiernaast geeft de verdeling van warmteaan sluitingen.

- De **industrie** vraagt veel elektriciteit en waterstof. Dit waterstof wordt in Nederland geproduceerd uit wind en zon, waardoor grootschalige elektrolyse en conversiecapaciteit nodig is. (Zie toelichting in bijlagen T tot en met W van het achtergrondrapport.)
- Het **transport** van goederen gaat voor 50% op groengas (verbrandingsmotor) en voor 50% op waterstof (brandstofcel-elektrische aandrijving). Personenvervoer gaat volledig elektrisch (batterij-elektrische aandrijving). (Zie toelichting in bijlagen X tot en met AA van het achtergrondrapport.)

3.1.3 OPWEKKINGSMIX EN ENERGIEDRAGERS

De onderstaande figuren tonen achtereenvolgens de ontwikkeling van de finale vraag in de energiefuncties, de verdeling van primaire energiebronnen, en de opwekkingsmix voor elektriciteit. In totaal is de energievraag in 2050 ongeveer 40% lager dan in 2016.

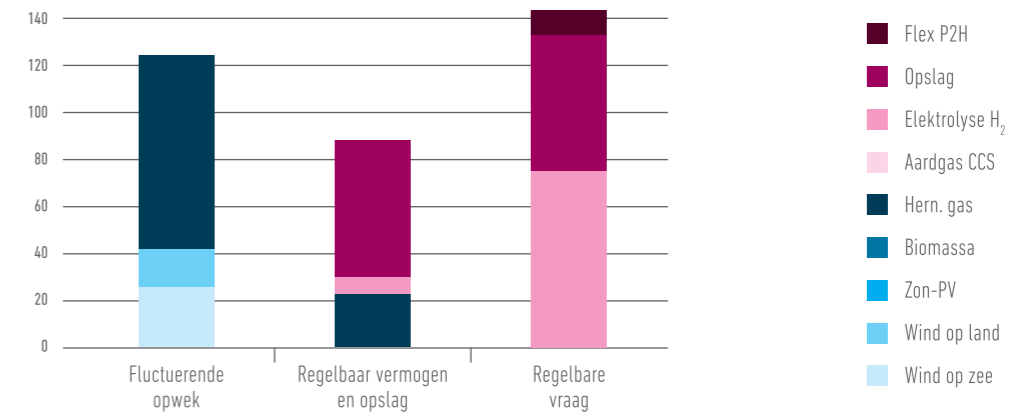
Finale energievraag (PJ)



Primaire energievraag (PJ)



Opwekkingsmix en inpassing (GWe)



Een grote hoeveelheid aan fluctuerende energiebronnen, zoals zon-PV, wind op zee en wind op land, vormen de basis van het zelfvoorzienende energiesysteem. Decentrale bronnen dragen 50% bij aan het totaal. Het opgesteld vermogen van fluctuerende bronnen bestaat uit bijna 90 GW zon-PV, 26 GW wind op zee en 16 GW wind op land. Voor wind op land gaat het om meer dan 3x het opgestelde vermogen dat momenteel gepland is. Voor zon-PV betekent dit een volledige benutting van alle geschikte dakoppervlakken, een groot aantal zonneweides en zon op water. Om de balans tussen vraag en aanbod te bewaken en ervoor te zorgen dat er ook energie is op momenten dat de zon niet schijnt en de wind niet waait, is ook een grote hoeveelheid aan regelbare vraag en opslag nodig. Voor de korte termijn gebeurt dit met accu's en power-to-heat, voor de lange termijn (opslag gedurende een aantal maanden) met waterstof. Waterstof op basis van elektrolyse is daarmee een belangrijke nieuwe energiedrager.

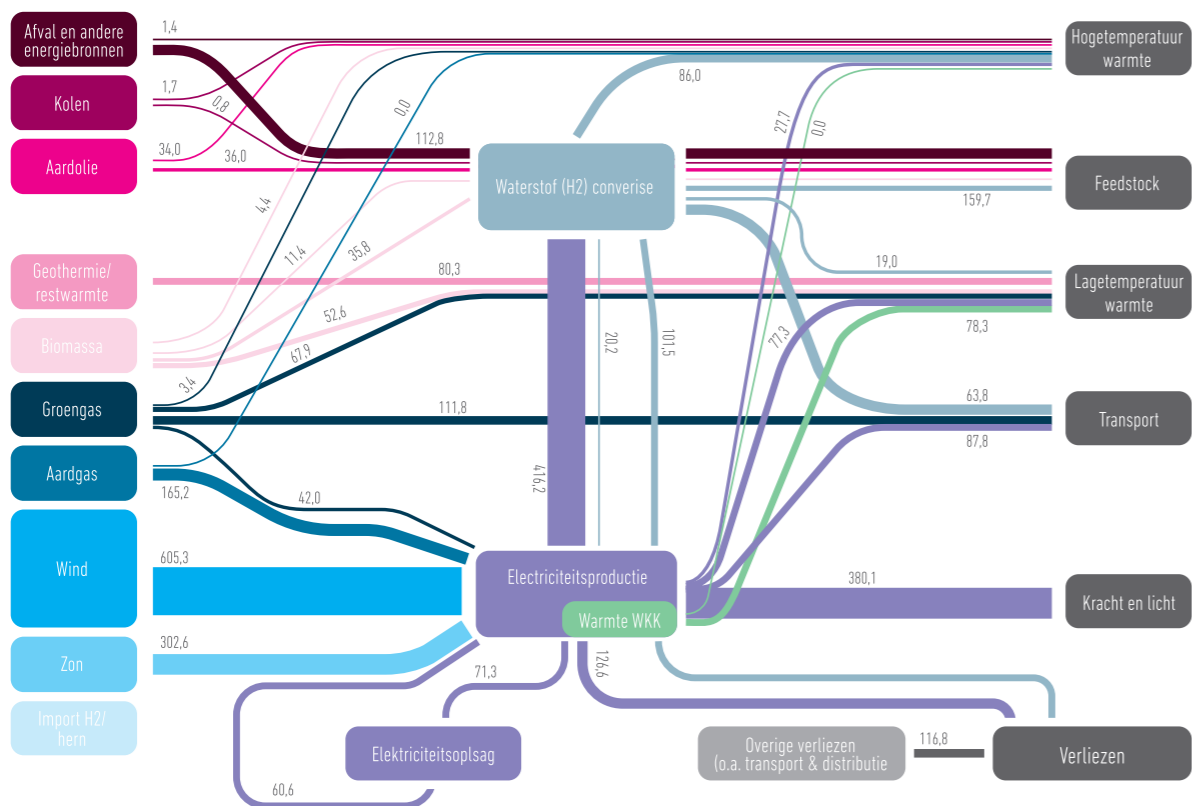
3.1.4 EFFECTEN OP DE ENERGIE-INFRASTRUCTUUR

Het beeld van Nederland is drastisch veranderd: veel grote windturbines, maximalisatie van zon-PV op daken, maar ook zonneweides en veel opslagsystemen. Alle installaties bij huishoudens en bedrijven zijn vervangen door klimaatneutrale, zuinige installaties. Bovendien heeft elk huishouden met zon-PV een batterij van circa 4 kW/8 kWh voor korte-termijn-opslag.

De gasinstallaties bij de bedrijven zijn geschikt voor waterstof. Lokaal en regionaal geproduceerde elektriciteit gaat via LS- en MS-netten naar opslagsystemen en nationale gebruikers. Een groot deel van de seizoensopslag in de vorm van waterstof is regionaal gesitueerd. De elektriciteit stroomt van lokaal naar nationaal.

De totale jaarlijkse vraag naar elektriciteit (voor warmte, transport en kracht en licht) bedraagt 570 PJ (op dit moment 425 PJ). De productie van elektriciteit bedraagt 1000 PJ en wordt voor een groot deel geconverteerd in waterstof (420 PJ). De vraag naar waterstof is

Sankey-diagram energiestromen (PJ/jaar)



Benodigde capaciteiten elektriciteitsnet 2050 (GW)

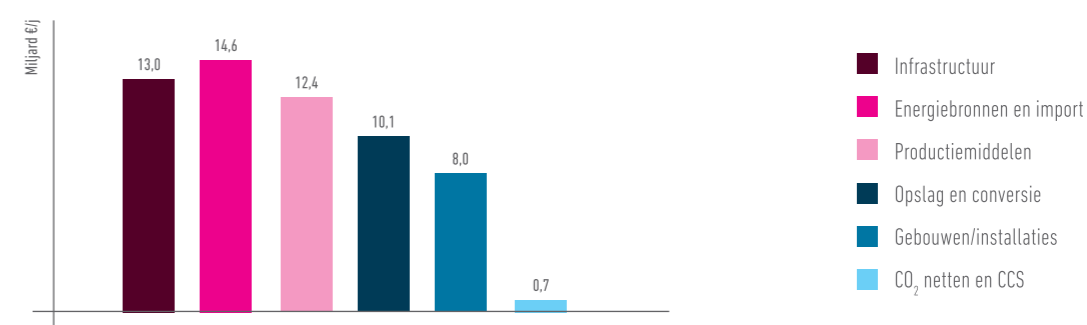
| | Huidig | | 2050 | |
|----------------|-----------|-------|-----------|-------|
| | Productie | Vraag | Productie | Vraag |
| Wind op Zee | 1 | | 26 | |
| Hoogspanning | 20 | 5 | 13 | 36 |
| Middenspanning | 6 | 10 | 37 | 53 |
| Laagspanning | 0 | 11 | 24 | 16 |

350 PJ, vooral in de industrie. Een fijnmazig net van laadpunten voor het personenvervoer functioneert deels als buffersysteem. Om bovenstaande mogelijk te maken is een verzwaring van de elektriciteitsnetten op alle niveaus nodig (LS factor 3, MS factor 5, HS factor 2 + 26 GW wind op zee). Voor de netverzwaring en de regionale opslag van waterstof is zeer veel ruimte nodig voor transformatoren, conversie- en opslagsystemen, extra kabels en hoogspanningslijnen. In woonwijken heeft een groot deel van het gasnet plaatsgemaakt voor warmtenetten met lokale warmtebronnen, zowel geothermie als restwarmte van bedrijven en de industrie. Het regionale en landelijke gasnet is geschikt gemaakt voor waterstof. De industrie gebruikt waterstof zowel voor feedstock als voor de energetische processen. De kosten van de energie-infrastructuur zijn ruim drie keer zo hoog als de huidige kosten van infrastructuur, en bedragen 22% van de totale systeemkosten. In bijlage A van het achtergronddocument is dit nader toegelicht.

3.1.5 KOSTEN

Het energiesysteem kost in totaal ongeveer € 60 miljard (+/- 20%) per jaar, exclusief belastingen en heffingen. De opbouw van deze kosten is in de onderstaande figuur weergegeven. Naast kosten zijn er ook baten, zie paragraaf 2.2. Wat opvalt is het relatief grote aandeel van infrastructuurkosten (met name elektriciteit en warmte), en de kosten van de productiemiddelen elektriciteit. Dit komt door de grote opgestelde vermogens hernieuwbare elektriciteit. Een groot deel van de kosten in dit maatschappijbeeld wordt veroorzaakt door kapitaallasten. De kosten van dit energiesysteem zijn daardoor gevoelig voor rente, maar niet voor de prijs van energiedragers op de markt, zoals nu de olieprijs en in de toekomst wellicht de prijs van waterstof.

Energiesysteemkosten



Kosten infra



3.1.6 HOOFDPUNTEN SAMENGEVAT

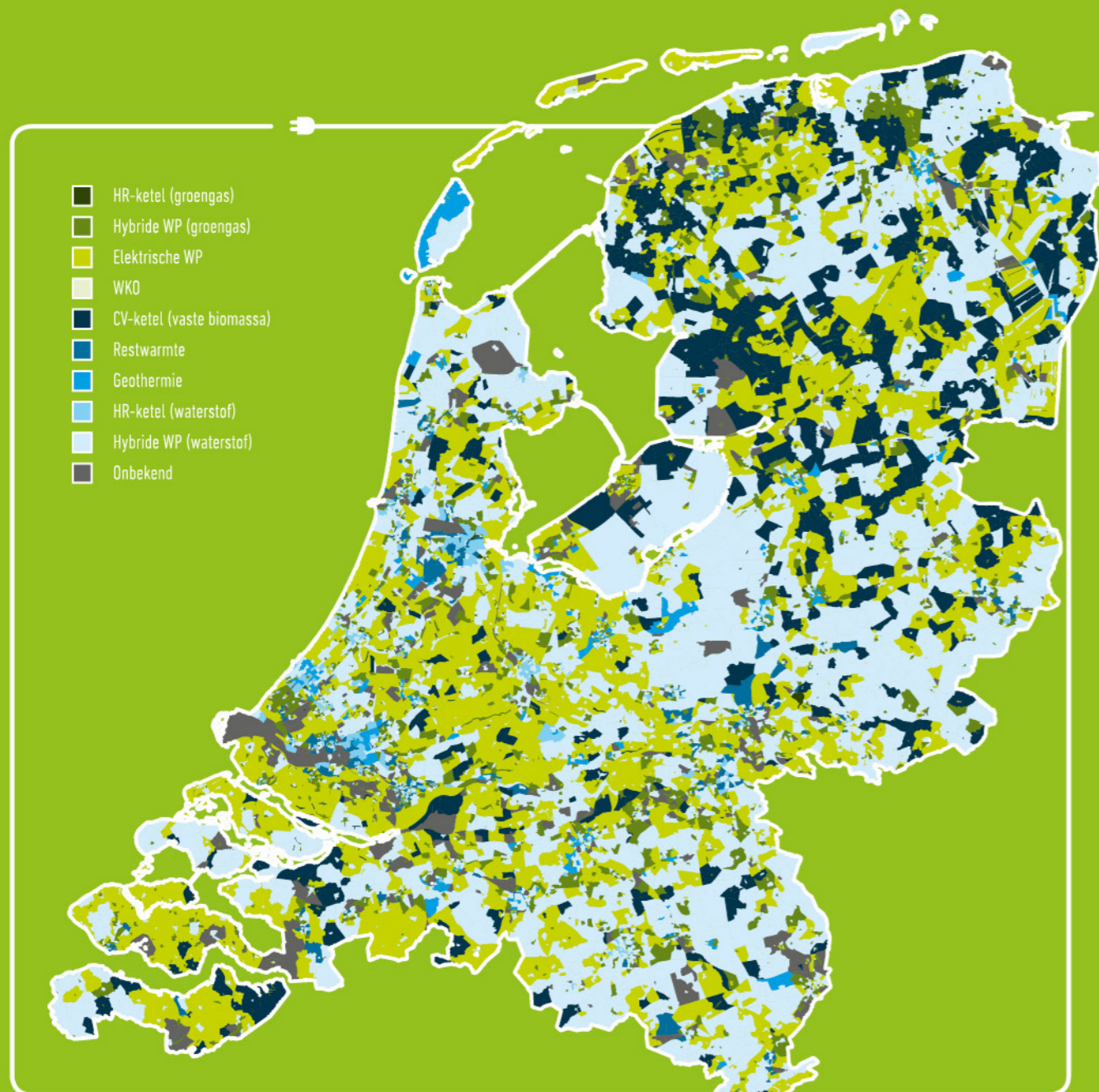
De energievoorziening in het regionale maatschappijbeeld samengevat in zes punten:

- Grote investeringsopgave in infrastructuur en productiemiddelen.
- Grote ruimtelijke impact door grote hoeveelheden zon-PV, wind op land en conversie- en opslagsystemen
- Elektrificatie van grote delen van de energievraag
- Zwaardere elektriciteitsnetten op alle niveaus ((LS factor 3, MS factor 5, HS factor 2 + 26 GW wind op zee)
- Gedeeltelijke aanpassing van het aardgasnet tot netten voor transport en distributie van waterstof
- Transitie van warmtevoorziening om collectieve opties te realiseren

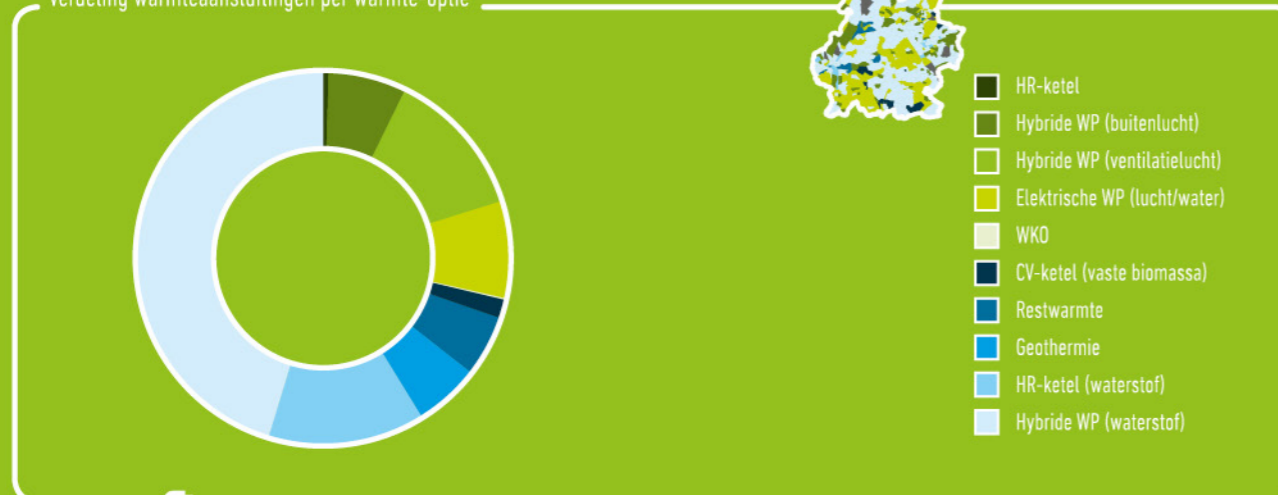
3.2

MAATSCHAPPIJBEELDEN
EN ENERGIESCENARIO'S 2050

REGIE NATIONAAL



Verdeling warmteaan sluitingen per warmte-optie



3.2.1 MAATSCHAPPIJ EN BESLUITVORMING

Burgers en bedrijven staan de rijksoverheid toe om de regio te nemen. Het Rijk stuurt op energie-autonomie voor Nederland via een mix van centrale en decentrale energiebronnen. Het Rijk organiseert grote projecten, onder andere op het gebied van wind op zee, inclusief bijvoorbeeld energie-eilanden in de Noordzee of andere grote projecten om de inpassing van wind op zee te verbeteren. De snelle uitrol van wind op zee biedt tevens perspectief op een grote bijdrage van de Noordzeeregio aan de decarbonisatie van het Europese energiesysteem (niet becijferd in deze studie). Grote projecten met hoge aanloopkosten en financiële risico's komen tot stand, ook als ze geruime tijd verlieslatend zijn. Ook decentrale overheden dragen sterk bij. Regio's maken actief keuzes, bijvoorbeeld in het tot stand brengen van grote warmtenetten en in het al dan niet realiseren van hernieuwbare opwek om hun gebied energieneutraal te maken. Met innovatieve energieoplossingen is een sterk circulaire industrie met veel recycling opgezet, omdat de energiedragers van nu niet meer mogelijk zijn. Bedrijven nemen meer risico's om deze industriële ketens vorm te geven. De overheid dekt bepaalde risico's af met subsidies, innovatiepremies, gerichte juridische sturing of andere instrumenten. Voor de industrie in Nederland zijn dezelfde aannames gehanteerd als in het maatschappijbeeld 'Regie regionaal', namelijk verandering richting het 'Closed Carbon Cycle (CC)'.

3.2.2 VERANDERINGEN IN ENERGIEFUNCTIES

- Bij **kracht en licht** daalt de vraag licht. Efficiëntere apparaten verbruiken weliswaar 25% minder stroom, maar daar staat tegenover dat bedrijven en de industrie meer elektriciteit vragen, omdat de nieuwe processen veel meer elektrisch worden aangedreven. (Zie toelichting in bijlagen K en L van het achtergrondrapport.)
- Voor de **lage temperatuur warmtevoorziening** worden de bronnen gebruikt die in Nederland beschikbaar zijn. Oplossingen met waterstof komen het vaakst voor. Grootschalig en centraal geproduceerd waterstof wordt naar de gebouwde omgeving getransporteerd en gebruikt voor zowel collectieve oplossingen als voor individuele oplossingen, zoals hybride warmtepompen. Waterstof is in dit maatschappijbeeld een belangrijke energiedrager voor de invulling van de lage temperatuur warmtevraag, voor bijna de helft van de aansluitingen in combinatie met een hybride warmtepomp. De hybride warmtepomp met groen gas is voor ongeveer 20% van de huishoudens de oplossing. *All-electric*-aansluitingen komen minder vaak voor vanwege de relatief hogere kosten. Ook het aandeel warmtenetten is beperkt door de hogere kosten; warmtenetten zijn in ongeveer 12 % van de gevallen de meest kosteneffectieve oplossing. (Zie toelichting in bijlagen M tot en met S van het achtergrondrapport.)

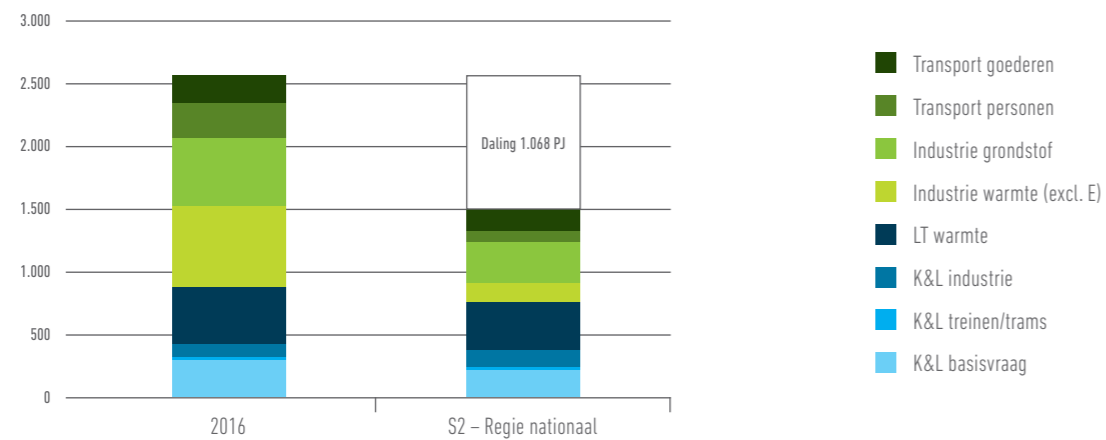
De afbeelding hiernaast geeft de verdeling van warmteaan sluitingen.

- De **industrie** vraagt veel elektriciteit en waterstof. Dit waterstof wordt in Nederland geproduceerd uit wind en zon, waardoor groot-schalige elektrolyse en conversiecapaciteit nodig is. (Zie toelichting in bijlagen T tot en met W van het achtergrondrapport.)
- Het **transport** van goederen gaat voor 50% op groengas (verbrandingsmotor) en voor 50% op waterstof (brandstofcel-elektrische aandrijving). Personenvervoer gaat voor 75% elektrisch (batterij-elektrische aandrijving) en voor 25% op waterstof (brandstofcel-elektrische aandrijving). (Zie toelichting in bijlagen X tot en met AA van het achtergrondrapport.)

3.2.3 ENERGIEBRONNEN EN ENERGIEDRAGERS

De onderstaande figuren tonen achtereenvolgens de ontwikkeling van de finale vraag in de energiefuncties, de verdeling van primaire energiebronnen, en de opwekkingsmix voor elektriciteit. In totaal is de energievraag in 2050 ongeveer 40% lager dan in 2016.

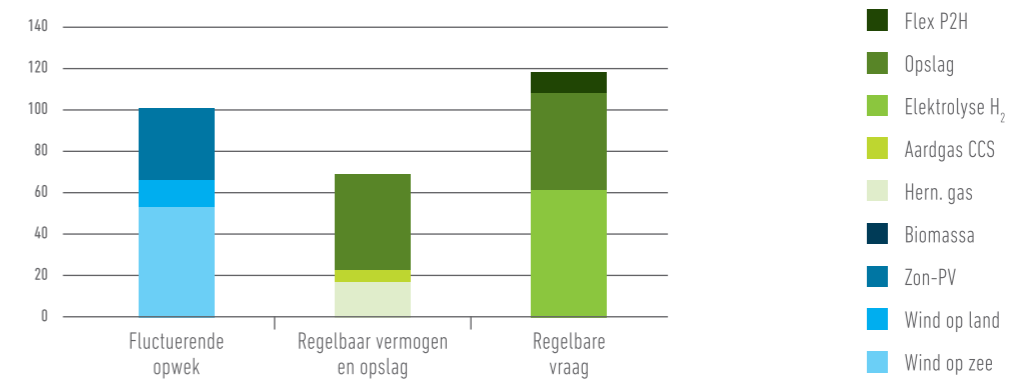
Finale energievraag (PJ)



Primaire energievraag (PJ)



Opwekkingsmix en inpassing (GWe)

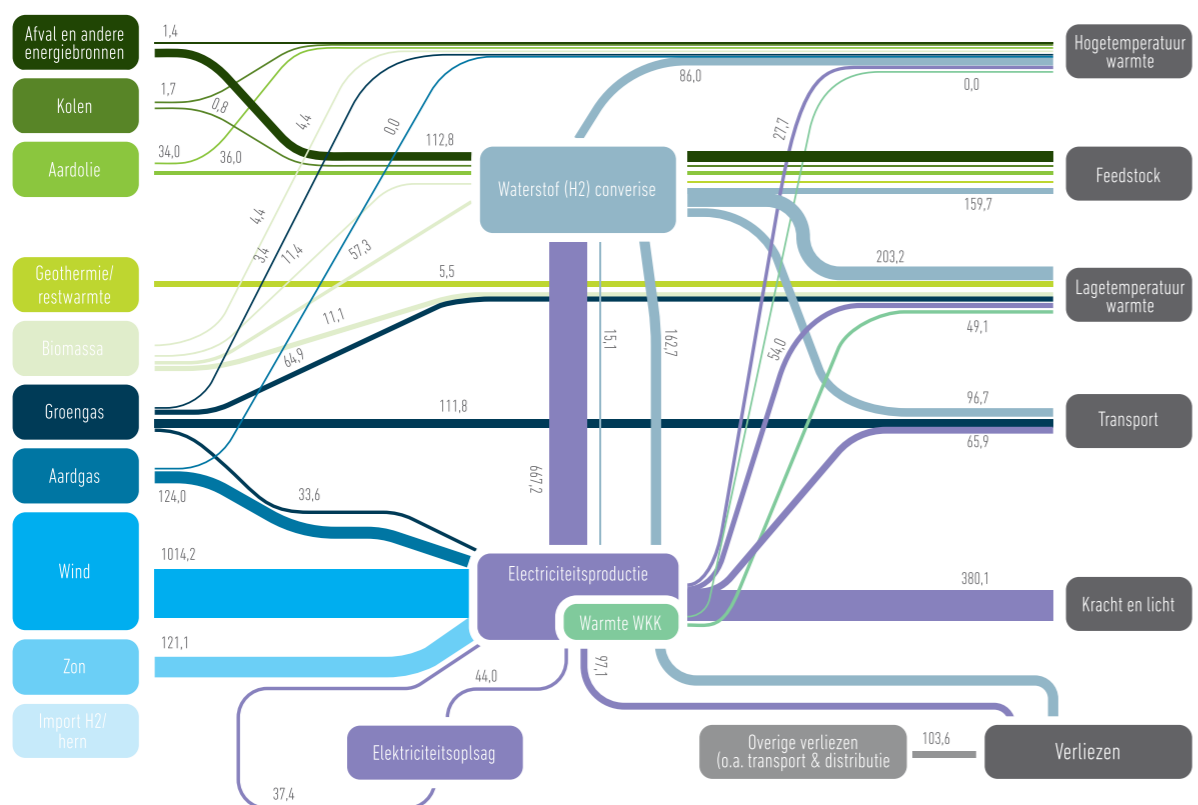


Nederland is in dit maatschappijbeeld energie-autonoom. Dat bepaalt sterk de opwekkingsmix. Een grote hoeveelheid aan fluctuerende energiebronnen, zoals zon-PV, wind op zee en wind op land, vormen de basis van het zelfvoorzienende energiesysteem. Centrale bronnen dragen 80% bij aan het totaal, decentrale bronnen 20%. Het opgesteld vermogen van fluctuerende bronnen bestaat uit 53 GW wind op zee, 34 GW zon-PV en 14 GW wind op land. Dat laatste is het dubbele van het huidige geplande opgestelde vermogen. Het vermogen aan wind op zee betekent dat er windparken verschijnen op een groot deel van de Noordzee. Voor zon-PV is benutting nodig van een groot deel van alle geschikte dakoppervlakken, inclusief utiliteitsbouw. Om de balans tussen vraag en aanbod te bewaken en ervoor te zorgen dat er ook energie is op momenten dat de zon niet schijnt en de wind niet waait, is ook een grote hoeveelheid aan regelbare vraag en opslag nodig. Dat gebeurt via waterstof. Waterstof op basis van elektrolyse is daarmee een belangrijke nieuwe energiedrager.

3.2.4 EFFECTEN OP DE ENERGIE-INFRASTRUCTUUR

Het beeld van Nederland is veranderd: veel grote windturbines en veel zon-PV op daken. De productie van elektriciteit en waterstof vindt vooral nationaal plaats, met wind op zee als dominante bron. Alle installaties bij huishoudens en bedrijven zijn vervangen door klimaatneutrale, zuinige installaties. Bovendien heeft elk huishouden met zon-PV een batterij van circa 4 kW/8 kWh voor korte-termijn-opslag van elektriciteit uit zon en wind. De grootste verandering is te zien op zee, waar bijna 60 GW aan windenergie staat opgesteld. In woonwijken zijn de elektriciteitsnetten geschikt gemaakt voor veel elektrische toepassingen, zoals elektrisch vervoer, elektrische warmtepompen en zon-PV. Een fijnmazig net van laadpunten voor het personenvervoer functioneert deels als buffersysteem. De totale jaarlijkse vraag naar elektriciteit (voor lage temperatuur warmte, vervoer, kracht en licht) bedraagt 530 PJ (op dit moment 425 PJ). De productie van elektriciteit bedraagt 1200 PJ. Hiervan wordt een groot deel (670 PJ) geconverteerd in waterstof. De vraag naar waterstof is 550 PJ. Conversie naar waterstof vindt voor offshore-wind grotendeels plaats op zogenaamde power-hubs, kleine eilanden op de Noordzee nabij clusters van windparken. De seizoensopslag in de vorm van waterstof kan in de vorm van zoutcavernes in het noorden en oosten van Nederland worden gesitueerd. Resterende waterstofelektrolyse vraagt vooral capaciteit op de (E)HS- en MS-netten. Om bovenstaande mogelijk te maken is een verzwaring van de elektriciteitsnetten op alle niveaus nodig (LS factor 3, MS factor 3, HS factor 2 + 53 GW wind op zee naar power-hubs). Voor de netverzwaring is veel ruimte nodig voor transformatoren, extra kabels en hoogspanningslijnen.

Sankey-diagram energiestromen (PJ/jaar)



Benodigde capaciteiten elektriciteitsnet 2050 (GW)

| | Huidig | | 2050 | |
|----------------|-----------|-------|-----------|-------|
| | Productie | Vraag | Productie | Vraag |
| Wind op Zee | 1 | | 53 | |
| Hoogspanning | 20 | 5 | 12 | 58 |
| Middenspanning | 6 | 10 | 19 | 22 |
| Laagspanning | 0 | 11 | 9 | 13 |

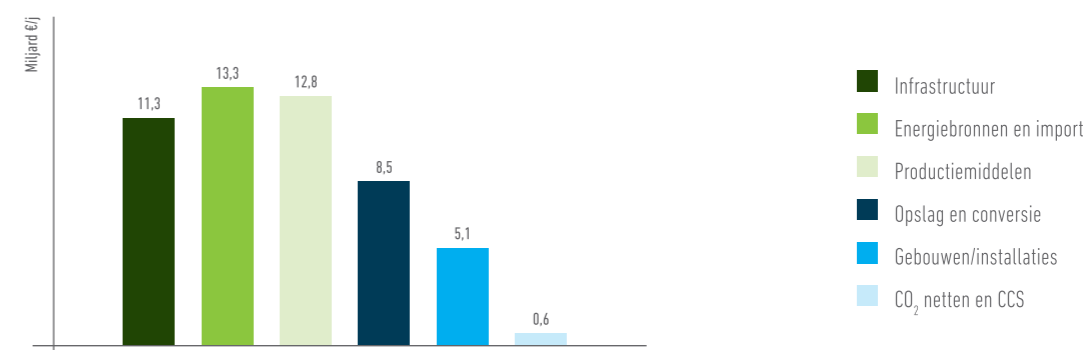
In woonwijken is het gasnet geschikt gemaakt voor de distributie van waterstof en voor een klein deel vervangen door warmtenetten op basis van geothermie en restwarmte of door *all electric*-oplossingen. Ook de gasinstallaties bij huishoudens en bedrijven zijn geschikt gemaakt voor waterstof. Het landelijke gasnet is ook geschikt gemaakt voor waterstof. De industrie gebruikt waterstof zowel voor feedstock als voor de energetische processen.

De kosten van de energie-infrastructuur zijn ruim drie keer zo hoog als de huidige kosten van infrastructuur, en bedragen 22% van de totale systeemkosten. In bijlage A van het achtergronddocument is dit nader toegelicht.

3.2.5 KOSTEN

Het energiesysteem kost in totaal ongeveer € 52 miljard (+/- 20%) per jaar, exclusief belastingen en heffingen. De opbouw van deze kosten is in de onderstaande figuur weergegeven. Naast kosten zijn er ook baten, zie paragraaf 2.2. Wat opvalt is het relatief grote aandeel van infrastructuurkosten (met name elektriciteit) en de kosten van de productiemiddelen elektriciteit. Dit komt door de grote opgestelde vermogens hernieuwbare elektriciteit.

Energiesysteemkosten



Kosten infra



3.2.6 HOOFDPUNTEN SAMENGEVAT

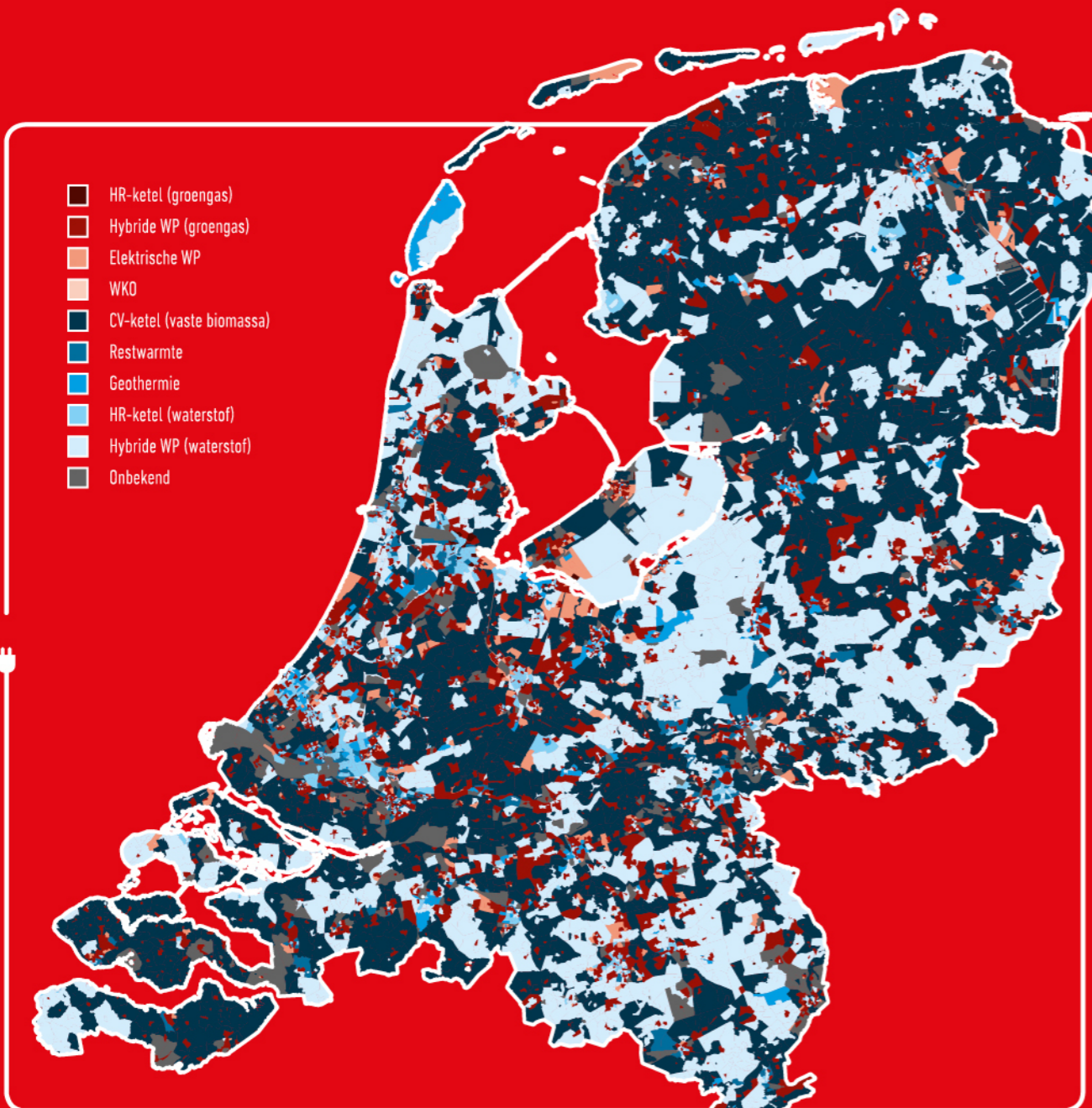
De energievoorziening in het nationale maatschappijbeeld samengevat in vijf punten:

- Grote investeringsopgave in wind op zee en de bijbehorende infrastructuur en opslagsystemen.
- Elektrificatie van grote delen van de energievraag
- Zwaardere elektriciteitsnetten op alle niveaus (LS factor 3, MS factor 3, HS factor 2 + 53 GW wind op zee)
- Gedeeltelijke aanpassing van het aardgasnet tot netten voor transport en distributie van waterstof
- Veel conversie- en opslagsystemen: waterstofelektrolyse, gasbuffers.

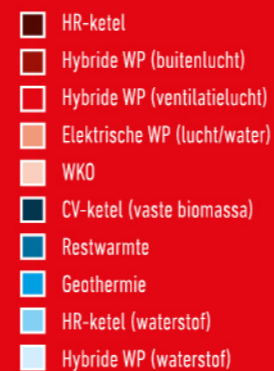
3.3

MAATSCHAPPIJBEELDEN
EN ENERGIESCENARIO'S 2050

INTERNATIONAAL



Verdeling warmteaan sluitingen per warmte-optie



3.3.1 MAATSCHAPPIJ EN BESLUITVORMING

Nederland is net als nu een welvarend, sterk internationaal mondiaal georiënteerd land, ook op het gebied van de eigen energievoorziening. Nederland wil geen CO₂ uitstoten en moet aan haar internationale verplichtingen voldoen. Burgers accepteren de lasten echter niet die het met zich meebrengt om dit binnen het bescheiden grondgebied van Nederland voor elkaar te krijgen. Nederland heeft daardoor een hoge euro-waardering voor buitenlandse hernieuwbare energie, waardoor er significante energie-importen plaatsvinden. De Nederlandse economie is innovatief en de handelsbalans gezond. Bedrijven hanteren geheel nieuwe productieprocessen, passend bij te importeren hernieuwbare energiestromen. De industrie is veranderd richting het 'Biomass and CCS (BIO)'-maatschappijbeeld dat het Wuppertal instituut heeft ontwikkeld voor het Rotterdamse haven-industriële cluster (Wuppertal Instituut, 2016). Door de omvangrijke import van biomassa ligt er geen hoge nadruk op het sluiten van koolstofkringlopen; groene grondstoffen kunnen de basis zijn voor de chemische industrie. De petrochemie en raffinagecomplexen zijn door de overschakeling op biomassa sterk veranderd. De te importeren energiedragers zijn grotendeels hernieuwbaar; niet alleen biomassa maar bijvoorbeeld ook waterstof en afgeleide producten zoals ammoniak en hernieuwbare koolwaterstoffen. Dit heeft grote gevolgen voor de warmtevoorziening; de ruim voldoende beschikbaarheid van CO₂-neutrale dragers die naar gebouwen kunnen worden gedistribueerd, maakt het minder makkelijk om collectieve warmtesystemen met restwarmte aan te leggen. Deze kennen immers grotere integrale kosten dan de te importeren energiedragers.

3.3.2 VERANDERINGEN IN ENERGIEFUNCTIES

- Bij **kracht en licht** daalt de vraag ongeveer 25% door efficiëntere apparaten en zuiniger processen. Daarnaast is er nog elektriciteitsvraag voor elektrolyse, elektrificatie in de warmtevoorziening en voor elektrisch transport. (Zie toelichting in bijlagen K en L van het achtergrondrapport.)
 - Voor de **lage temperatuur warmtevoorziening** kan Nederland energiebronnen importeren, bijvoorbeeld in de vorm van vaste biomassa, voor pellet-ketels of collectieve systemen, of in de vorm van gasvormige dragers (groen gas en waterstof). De ruimere beschikbaarheid van biomassa en groen gas, tegen relatief lagere kosten, in vergelijking tot wanneer alleen Nederlandse bronnen gebruikt zouden worden, werkt sterk door op het soort oplossingen voor de lage temperatuur warmtevoorziening. De hybride warmtepomp op buitenlucht en de hybride warmtepomp op ventilatielucht, beide in combinatie met groen gas, zijn hierdoor kosteneffectieve oplossingen die een flink aandeel kennen. Ook HR-ketels op waterstof en hybride warmtepompen op waterstof komen veel voor, want in dit maatschappijbeeld worden ook delen van de gasdistributienetten geschikt gemaakt voor waterstof. Warmtenetten zijn in slechts 6% van de aansluitingen de meest kostenefficiënte oplossing. Er zijn nauwelijks *all electric*-aansluitingen door de relatief hoge kosten. (Zie toelichting in bijlagen M tot en met S van het achtergrondrapport.)
- In dit maatschappijbeeld is een beperking van 150 PJ/j groen gas voor de lage temperatuur warmtevoorziening aangenomen, omdat zonder deze beperking de totale hoeveelheid biomassa-energie in dit maatschappijbeeld een onevenredig deel van de wereldwijde beschikbaarheid van biomassa zou vragen. (Bijlage F van het achtergrondrapport gaat in op de wereldwijde beschikbaarheid van biomassa).

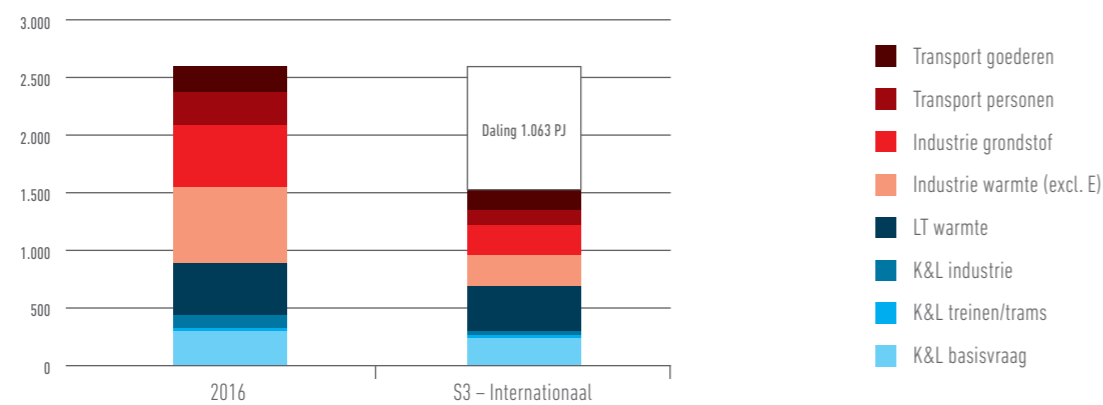
De afbeelding hiernaast geeft de verdeling van warmteaan sluitingen.

- Het aandeel biograndstoffen in de **industrie** bedraagt ongeveer 50%. Naast biomassa speelt ook elektrificatie van de industriële warmtevraag een rol en worden waterstof en biosyngas als energiebron gebruikt. Ook fossiele energie wordt nog beperkt gebruikt, waarbij CO₂-emissies met CCS worden afgevangen indien een de emissie op een bepaalde locatie voldoende groot daarvoor is. De totale industriële CO₂-emissies dalen met 95% ten opzichte van 2016. (Zie toelichting in bijlagen T tot en met W van het achtergrondrapport.)
- Het **transport** van goederen gaat voor de 50% op waterstof (brandstofcel-elektrische aandrijving), voor 25% op groengas (verbrandingsmotor) en voor 25% op biobrandstoffen (verbrandingsmotor). Personenvervoer gaat voor 50% elektrisch (batterij-elektrische aandrijving), voor 25% op groengas en voor 25% op waterstof. (Zie toelichting in bijlagen X tot en met AA van het achtergrondrapport.)

3.3.3 ENERGIEBRONNEN EN ENERGIEDRAGERS

De onderstaande figuren tonen achtereenvolgens de ontwikkeling van de finale vraag in de energiefuncties, de verdeling van primaire energiebronnen, en de opwekkingsmix voor elektriciteit. In totaal is de energievraag in 2050 ongeveer 40% lager dan in 2016.

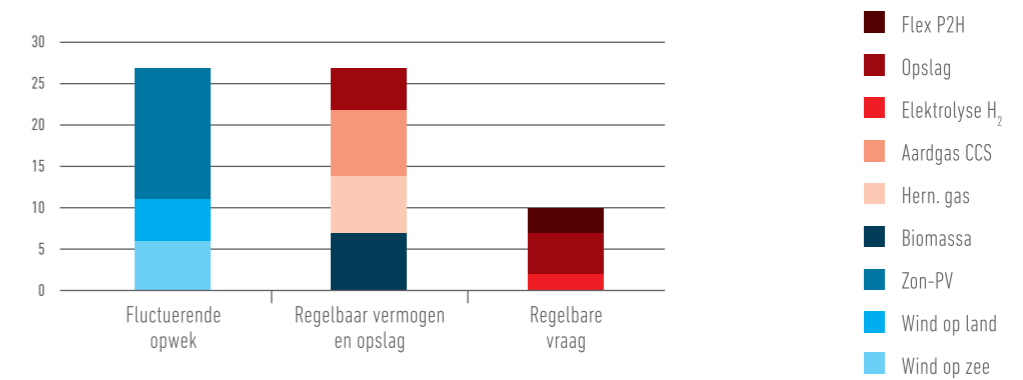
Finale energievraag (PJ)



Primaire energievraag (PJ)



Opwekkingsmix en inpassing (GWe)

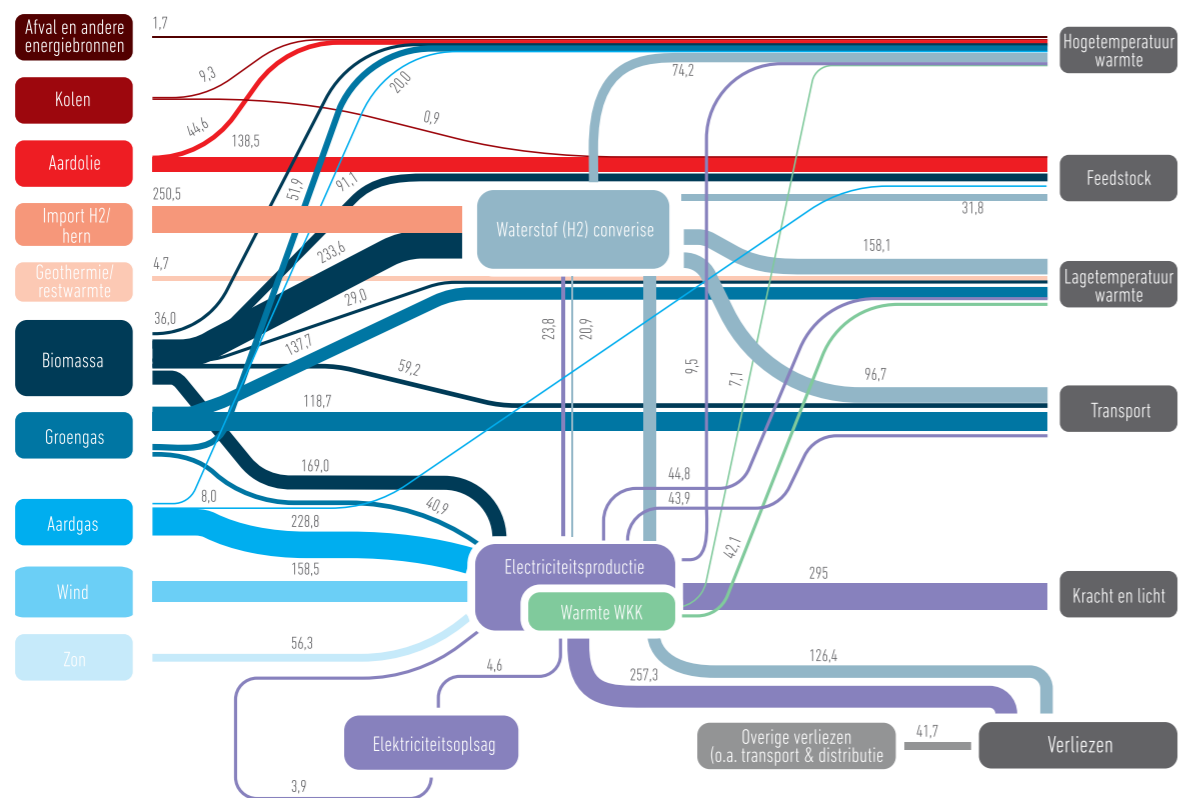


Fluctuerende energiebronnen, zoals zon en wind, leveren een bijdrage van ongeveer 10% aan de totale energiemix. De rest komt van energiebronnen die voor het overgrote gedeelte worden geïmporteerd, zowel hernieuwbaar (biomassa en groen/hernieuwbaar gas) als fossiel. In de opwekkingsmix voor elektriciteit is te zien dat balansregelbare centrales net als nu in de mix domineren, waardoor er nauwelijks behoefte aan elektriciteitsopslag is. De variaties in fluctuerende opwek worden met regelbare centrales opgevangen, die in 2050 op hernieuwbaar gas of op biomassa draaien. De hoeveelheid biomassa die wordt geïmporteerd (voor alle functies), is gerelateerd aan de mondiaal beschikbare hoeveelheden (zie bijlage H van het achtergronddocument). Waterstof (zowel geïmporteerd als afkomstig uit biomassavergassing) is een belangrijke energiedrager. Elektrolyse heeft een gering aandeel. Vanuit het oogpunt van voorzieningszekerheid is er in dit maatschappijbeeld wel opslag van geïmporteerde waterstof verondersteld.

3.3.4 EFFECTEN OP DE ENERGIE-INFRASTRUCTUUR

Het beeld van Nederland is nauwelijks veranderd: geen verdere toename van windturbines op land, wel veel zon-PV op daken, maar geen zonnevelden en geen opslagsystemen. Alle installaties bij huishoudens en bedrijven zijn vervangen door klimaatneutrale, zuinige installaties. De gasinstallaties bij de huishoudens en bedrijven zijn geschikt voor waterstof of groengas. Lokaal en regionaal wordt in zeer beperkte mate elektriciteit geproduceerd die via het huidige net kan worden getransporteerd. Met flexibiliteitsmaatregelen in de vraag kunnen de beperkte hoeveelheden zon en wind goed worden geaccomodeerd. De totale jaarlijkse vraag naar elektriciteit bedraagt 390 PJ (op dit moment 425 PJ). Dit is niet heel verschillend; de efficiencyverbetering is in de zelfde orde van grootte als de nieuwe vraag (elektrisch vervoer, industrie). De productie is vooral afkomstig van aardgas met CCS. De vraag naar waterstof is 380 PJ. Dit waterstof wordt grotendeels geïmporteerd. De laainfrastructuur voor elektrische auto's is in dit maatschappijbeeld beperkter van omvang dan in de eerste twee maatschappijbeelden. Het regionale en landelijke gasnet zijn geschikt gemaakt voor waterstof. De gebouwde omgeving en de transportsector maken gebruik van waterstof. In een deel van de woonwijken wordt het aardgasnet gebruikt voor groengas. Daarvoor zijn geen aanpassingen nodig. In een beperkt deel van de woonwijken heeft het gasnet plaatsgemaakt voor een warmtenet met lokale warmtebronnen, zowel geothermie als restwarmte van bedrijven en de industrie. Het ruimtebeslag voor de energie-infrastructuur is nauwelijks veranderd ten opzichte van nu. Wel heeft de import van biomassa gevolgen voor de havens en vraagt daar veel ruimte. De kosten van de energie-infrastructuur zijn iets minder dan twee keer zo hoog als de huidige kosten van infrastructuur en bedragen 11% van de totale systeemkosten. In bijlage A van het achtergronddocument is dit nader toegelicht.

Sankey-diagram energiestromen (PJ/jaar)



Benodigde capaciteiten elektriciteitsnet 2050 (GW)

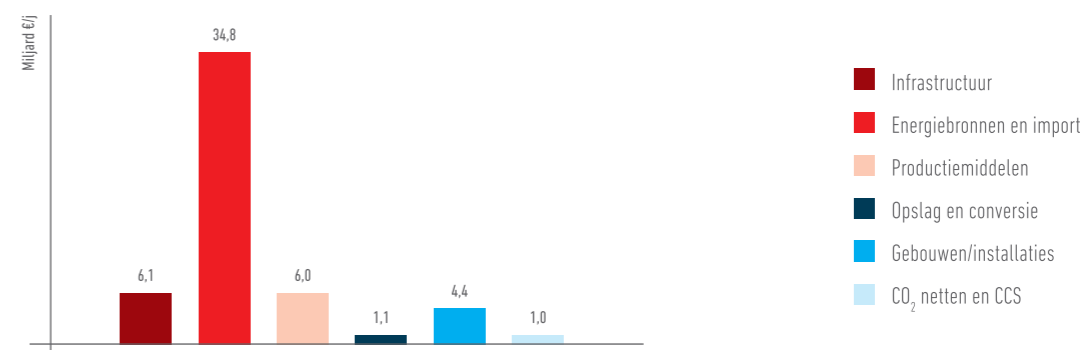
| | Huidig | | 2050 | |
|----------------|-----------|-------|-----------|-------|
| | Productie | Vraag | Productie | Vraag |
| Wind op Zee | 1 | | 6 | |
| Hoogspanning | 20 | 5 | 18 | 5 |
| Middenspanning | 6 | 10 | 6 | 10 |
| Laagspanning | 0 | 11 | 6 | 11 |

Het regionale en landelijke gasnet zijn geschikt gemaakt voor waterstof. De gebouwde omgeving en de transportsector maken gebruik van waterstof. In een deel van de woonwijken wordt het aardgasnet gebruikt voor groengas. Daarvoor zijn geen aanpassingen nodig. In een beperkt deel van de woonwijken heeft het gasnet plaatsgemaakt voor een warmtenet met lokale warmtebronnen, zowel geothermie als restwarmte van bedrijven en de industrie. Het ruimtebeslag voor de energie-infrastructuur is nauwelijks veranderd ten opzichte van nu. Wel heeft de import van biomassa gevolgen hebben voor de havens en daar veel ruimte vragen. De kosten van de energie-infrastructuur zijn iets minder dan twee keer zo hoog als de huidige kosten van infrastructuur en bedragen 12% van de totale systeemkosten. In bijlage A van het achtergronddocument is dit nader toegelicht.

3.3.5 KOSTEN

Het energiesysteem kost in totaal ongeveer € 54 miljard (+/- 30%) per jaar, exclusief belastingen en heffingen. De opbouw van deze kosten is in de onderstaande figuur weergegeven. Naast kosten zijn er ook baten, zie paragraaf 2.2. Wat opvalt is het relatief grote aandeel van de kosten van energie. Dit komt door de omvangrijke import. Volatiliteit in energieprijzen werkt direct door op de jaarlijkse kosten. Kosten van infrastructuur en productiemiddelen (centrales, windparken) en opslag en conversie-eenheden (batterij-opslag, waterstofelektrolyse) zijn in dit maatschappijbeeld veel beperkter.

Energiesysteemkosten



Kosten infra



3.3.6 HOOFDPUNTEN SAMENGEVAT

De energievoorziening in het internationale maatschappijbeeld samengevat in vijf punten:

- Internationale markt voor duurzame energiegrondstoffen.
- Gedeeltelijke aanpassing van het aardgasnet tot netten voor transport en distributie van waterstof en bio-syngas, naast groen gas.
- Elektrificatie in vervoer, industrie en lage temperatuur warmte (hybride warmtepompen).
- Zwaardere elektriciteitsnetten op alle niveaus om elektrificatie te kunnen faciliteren.
- Groot aandeel variabele kosten in het totale energiesysteem.

3.4

MAATSCHAPPIJBEELDEN
EN ENERGIESCENARIO'S 2050

GENERIEKE STURING

3.4.1 MAATSCHAPPIJ EN BESLUITVORMING

De Nederlandse overheden sturen stevig op CO₂-reductie, maar alleen via generieke instrumenten, zoals een algemene emissieheffing of een CO₂-taks, en niet via inhoudelijke keuzes voor specifieke oplossingen. Burgers en bedrijven accepteren niet dat de overheid bepaalde energie-oplossingen stimuleert (of remt), dus alle technieken hebben een kans. Veel partijen nemen zelf beslissingen over individuele business cases. Burgers en bedrijven eisen wel een soort van rechtsbescherming voor de investeringen die zij doen in klimaatneutrale technieken. Daarom liggen milieueffingen vast en is het beleid voorspelbaar. De tarieven voor emissieheffingen zijn in de loop naar 2050 toe snel gestegen.

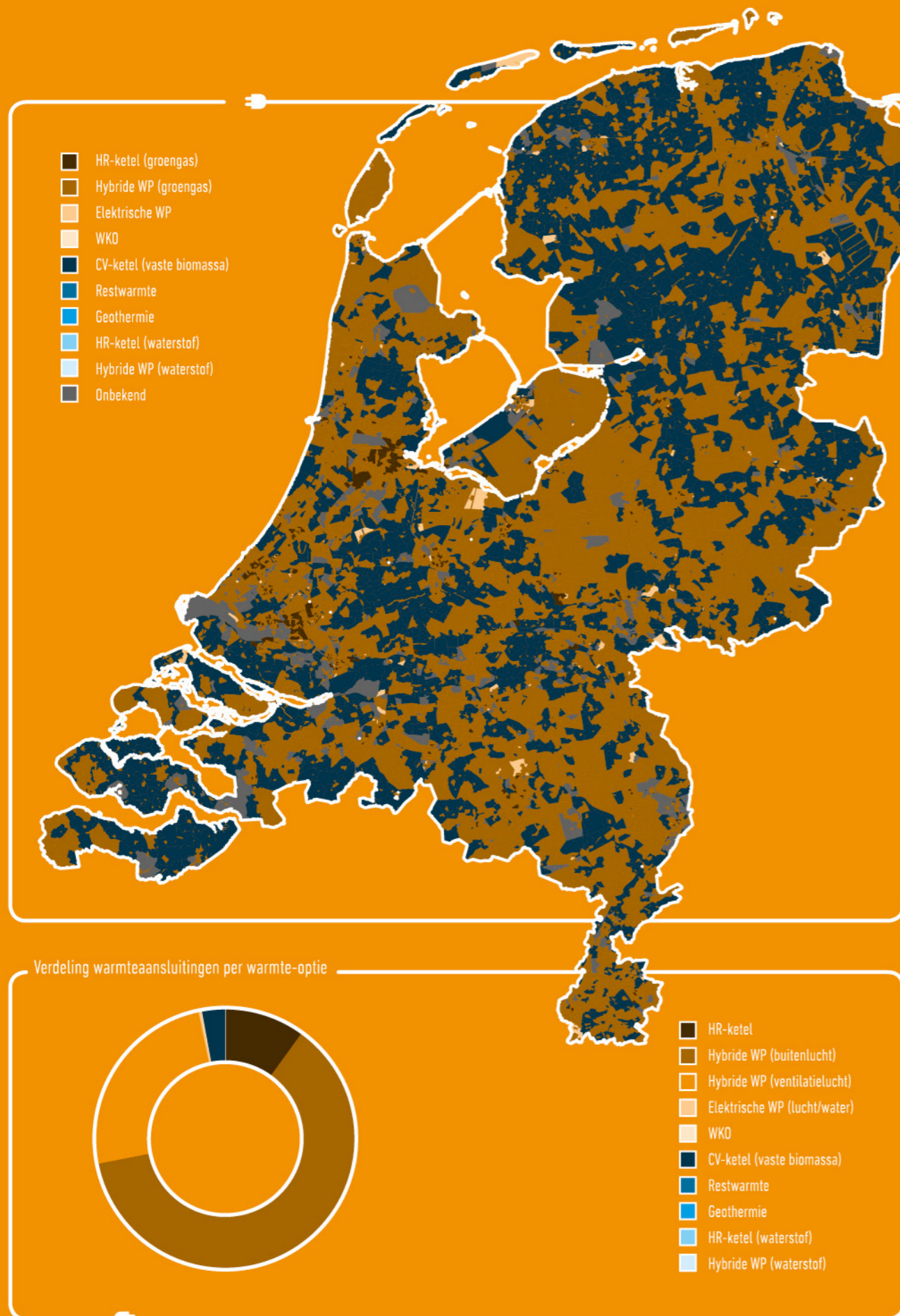
Het tempo van de veranderingen ligt relatief laag. Burgers en bedrijven hebben de transitie vormgegeven via (her)investeringen, waarbij de klimaatkosten zijn meegenomen in investeringsbeslissingen. Energie-oplossingen die een onrendabele top hebben, ook na CO₂-beprijzing, vallen af. Het energiesysteem is voor een groot deel CO₂-neutraal en in kleinere stapjes zonder grote, schoksgewijze veranderingen tot stand gekomen. Het bestaat uit een mix van decentrale, nationale, en internationaal energiebronnen, en lijkt in bepaalde opzichten op een doorgeëvolueerd energiesysteem van 2017. Burgers en bedrijven hebben geen grote problemen met CCS. CCS heeft daarom een grote rol in de industrie. De industrie is in kleine stapjes veranderd richting het 'Technology Progress'-maatschappijbeeld dat het Wuppertal instituut heeft uitgewerkt voor het Rotterdamse haven-industriële cluster (Wuppertal Instituut, 2016). Nieuwe bedrijfsvestigingen in de industrie komen niet of slechts mondjesmaat van de grond omdat Nederland geen strategische vestigingslocatie is. De overblijvende industrie past – gestuurd door stevige emissieheffingen – de best beschikbare technologie toe, waardoor de energie-efficiëntie in de meeste industrietakken met 20%-30% is verbeterd en er zo nog wel internationaal geconcurrereerd kan worden. De petrochemische industrie blijft voor een belangrijk deel bestaan, net als de raffinagecomplexen die zijn geïntegreerd met een petrochemisch cluster. Raffinaderijen die niet geïntegreerd zijn moeten wel sluiten, omdat er buiten de petrochemie slechts weinig vraag naar fossiele brandstoffen is.

De totale industriële CO₂-emissies dalen met 85% ten opzichte van 2016 mede dankzij het fors toepassen van CCS. Er wordt 17 Mt CO₂ per jaar afgevangen, maar er blijven 8 Mt emissies over. De emissies die overblijven zijn wel duur, omdat de kosten van de uitstoot minstens 160 €/ton bedragen (maatschappijbeeld WLO Hoog), oplopend tot 1000 €/ton (WLO maatschappijbeeld 2 graden decentraal).

3.4.2 VERANDERINGEN IN ENERGIEFUNCTIES

- Bij **kracht en licht** daalt de vraag ongeveer 25% door efficiëntere apparaten en zuiniger processen. Daarnaast is er nog elektriciteitsvraag in de warmtevoorziening en voor elektrisch transport. (Zie toelichting in bijlagen K en L van het achtergrondrapport.)
- Voor de **lage temperatuur warmtevoorziening** kan Nederland energiebronnen importeren, bijvoorbeeld in de vorm van vaste biomassa voor pellet-ketels, of in de vorm van gasvormige dragers (groen gas, waterstof). De beschikbaarheid van biomassa en groen gas, tegen relatief beperkte kosten, zorgt ervoor dat de lage temperatuur warmtevoorziening in dit maatschappijbeeld bestaat uit vooral individuele oplossingen. De hybride warmtepomp op buitenlucht en de hybride warmtepomp op ventilatielucht, beide in combinatie met groen gas, blijken het meest kosteneffectief en vormen de warmteoplossing voor ruim 80% van de aansluitingen. Daarna volgt de HR-ketel op groen

De afbeelding hiernaast geeft de verdeling van warmteaansluitingen.



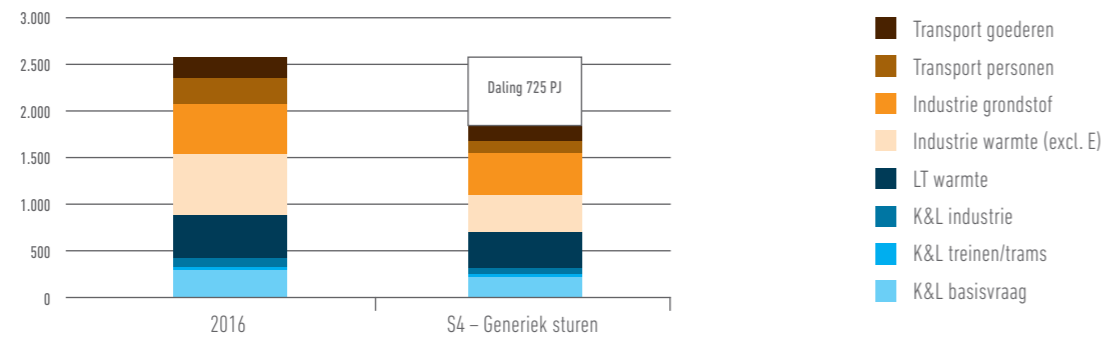
gas. Er zijn geen grote collectieve oplossingen omdat overheden hier niet op sturen, ook niet wanneer dat wel kostenefficiënt zou zijn. Waterstof en *all electric*-aansluitingen komen door de verhoudingsgewijs hogere kosten niet voor. (Zie toelichting in bijlagen M tot en met S van het achtergrondrapport.)

- De **industrie** maakt voor een belangrijk deel gebruik van 'conventionele' fossiele bronnen. Dit zijn dezelfde bronnen als anno nu ook in de industrie gebruikt worden, maar dan met CCS. (Zie toelichting in bijlagen T tot en met W van het achtergrondrapport.)
- Het **transport** van goederen gaat voor 50% op waterstof (brandstofcel-elektrische aandrijving), voor 25% op groengas (verbrandingsmotor) en voor 25% op biobrandstoffen (verbrandingsmotor). Personenvervoer gaat voor 50% elektrisch (batterij-elektrische aandrijving), voor 25% op groengas en voor 25% op waterstof. (Zie toelichting in bijlagen X tot en met AA van het achtergrondrapport.)

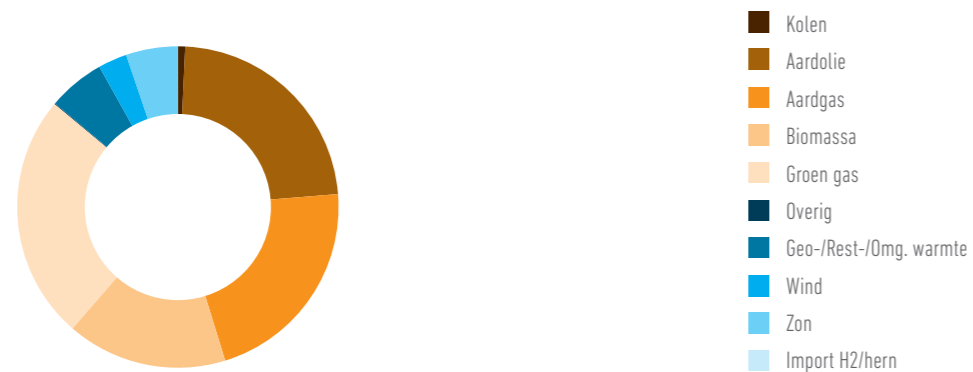
3.4.3 ENERGIEBRONNEN EN ENERGIEDRAGERS

De onderstaande figuren tonen achtereenvolgens de ontwikkeling van de finale vraag in de energiefuncties, de verdeling van primaire energiebronnen, en de opwekkingsmix voor elektriciteit. In totaal is de energievraag in 2050 ongeveer 25% lager dan in 2016.

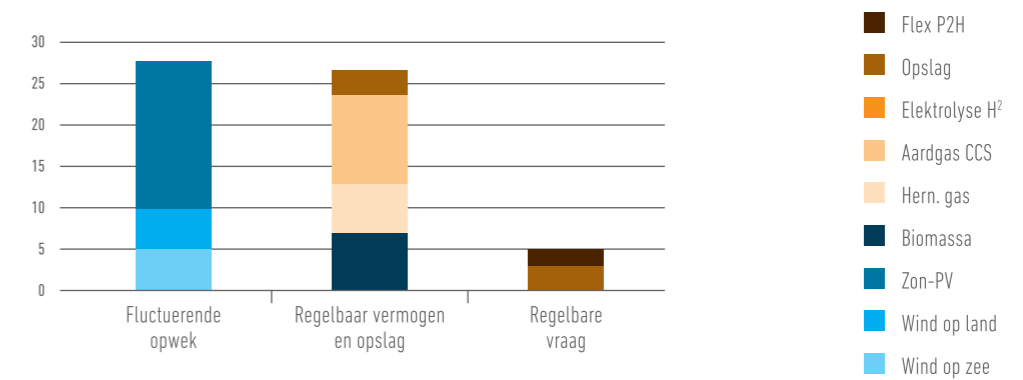
Finale energievraag (PJ)



Primaire energievraag (PJ)



Opwekkingsmix en inpassing (GWe)



De hoeveelheid biomassa die wordt geïmporteerd (voor alle functies) is gerelateerd aan de mondiaal beschikbare hoeveelheden (zie bijlage H van het achtergronddocument). Fluctuerende energiebronnen, zoals zon en wind, leveren een bijdrage van ongeveer 8% aan de totale energiemix. De rest komt van energiebronnen die voor het overgrote gedeelte worden geïmporteerd, zowel hernieuwbaar (biomassa en groen/hernieuwbaar gas) als fossiel. Aardgas in combinatie met CCS is belangrijk. In de opwekkingsmix voor elektriciteit nemen regelbare centrales een dominante plaats in. De balanshandhaving tussen vraag en aanbod is daardoor vergelijkbaar met de balancering anno nu, met regelbare centrales. Waterstof (geïmporteerd en afkomstig uit vergassing van biomassa) is een energiedrager die belangrijk is voor transport. Elektrolyse heeft een gering aandeel.

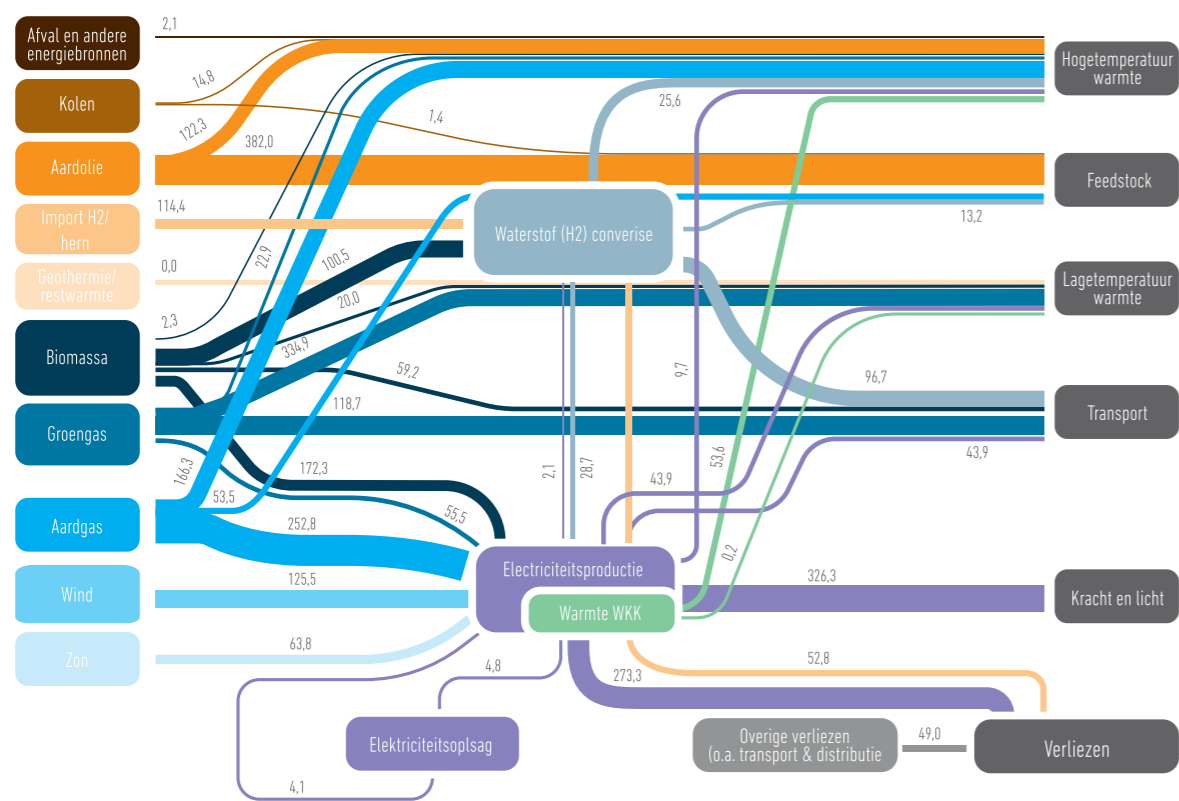
3.4.4 EFFECTEN OP DE ENERGIE-INFRASTRUCTUUR

Het beeld van Nederland is nauwelijks veranderd: geen verdere toename van wind op land, wel veel zon-PV op daken, maar geen zonneweides en geen opslagsystemen. Alle installaties bij huishoudens en bedrijven zijn vervangen door klimaatneutrale, zuinige installaties. De gasinstallaties bij huishoudens zijn geschikt voor groengas en bedrijven gebruiken aardgas met CCS. De totale jaarlijkse vraag naar elektriciteit bedraagt 420 PJ, wat hetzelfde is als de huidige vraag.

De productie van elektriciteit geschiedt met een mix van bronnen, waarbij aardgas met CCS de grootste bijdrage levert. Vanwege de gedeeltelijke elektrificatie van het personenvervoer is een net van laadpunten ontstaan. Lokaal en regionaal wordt beperkt elektriciteit geproduceerd, maar door de onzekerheid wat burgers en bedrijven op basis van de CO₂-prikkel daadwerkelijk gaan doen, moeten netbeheerders in aanloop naar 2050 rekening houden met veel eigen opwekking op lokaal niveau. Daarvoor is verzwaring van de elektriciteitsnetten op alle niveaus nodig (LS en MS factor 2).

Het regionale en landelijke gasnet zijn geschikt gemaakt voor zowel groengas als waterstof, omdat het zeer goed mogelijk is dat er veel waterstof wordt geïmporteerd. In woonwijken wordt groengas gedistribueerd via het bestaande gasnet. Warmtenetten met lokale warmtebronnen, zoals geothermie en restwarmte, komen slechts sporadisch voor en alleen als ze duidelijk goedkoper zijn dan verwarmen met groengas. Collectieve projecten komen alleen van de grond als er duidelijk voordeel is voor de deelnemers. Het ruimtebeslag voor de energie-infrastructuur is nauwe-

Sankey-diagram energiestromen (PJ/jaar)



Benodigde capaciteiten elektriciteitsnet 2050 (GW)

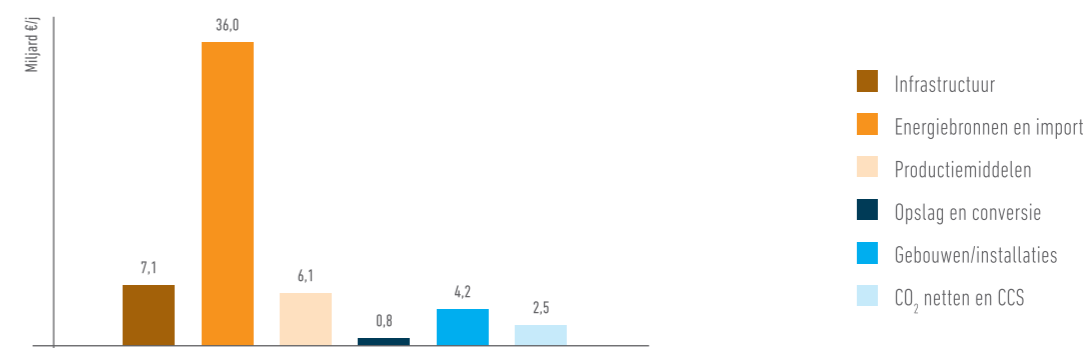
| | Huidig | | 2050 | |
|----------------|-----------|-------|-----------|-------|
| | Productie | Vraag | Productie | Vraag |
| Wind op Zee | 1 | | 5 | |
| Hoogspanning | 20 | 5 | 20 | 10 |
| Middenspanning | 6 | 10 | 20 | 20 |
| Laagspanning | 0 | 11 | 17 | 15 |

lijks veranderd ten opzichte van nu. Wel heeft de import van biomassa gevolgen voor de havens en vraagt daar veel ruimte. Ook de netverzwaring vraagt om extra ruimte voor transformatoren en extra kabels en hoogspanningslijnen. Vanwege het organische proces in dit maatschappijbeeld, moeten netbeheerders in aanloop naar 2050 in de infrastructuur rekening houden met verschillende mogelijke uitkomsten, zonder de extremen met heel veel wind op zee en land en heel veel zon-PV. Pas over een jaar of 15 wordt duidelijk in welke richting de transitie gaat. Een deel van de netten heeft dan mogelijk meer capaciteit dan nodig is, maar welk deel is niet vooraf te voorspellen. De kosten van de energie-infrastructuur zijn twee keer zo hoog als de huidige kosten van infrastructuur, en bedragen 13% van de totale systeemkosten. In bijlage A van het achtergronddocument is dit nader toegelicht.

3.4.5 KOSTEN

Het energiesysteem kost in totaal ongeveer € 57 miljard (+/-30%) per jaar, exclusief belastingen en heffingen. De opbouw van deze kosten is in de onderstaande figuur weergegeven. Naast kosten zijn er ook baten, zie paragraaf 2.2. Wat opvalt is het relatief grote aandeel van de kosten van energie. Dit komt door de omvangrijke import. Volatiliteit in energieprijzen werkt direct door op de jaarlijkse kosten. Kosten van infrastructuur en productiemiddelen (centrales, windparken) en opslag en conversie-eenheden (batterij-opslag, waterstofelektrolyse) zijn in dit maatschappijbeeld veel beperkter. Ook CO₂-netten en het afvangen van CO₂ hebben een duidelijk aandeel in de kosten.

Energiesysteemkosten



Kosten infra



3.4.6 HOOFDPUNTEN SAMENGEVAT

De energievoorziening in het maatschappijbeeld met generieke sturing samengevat in vijf punten:

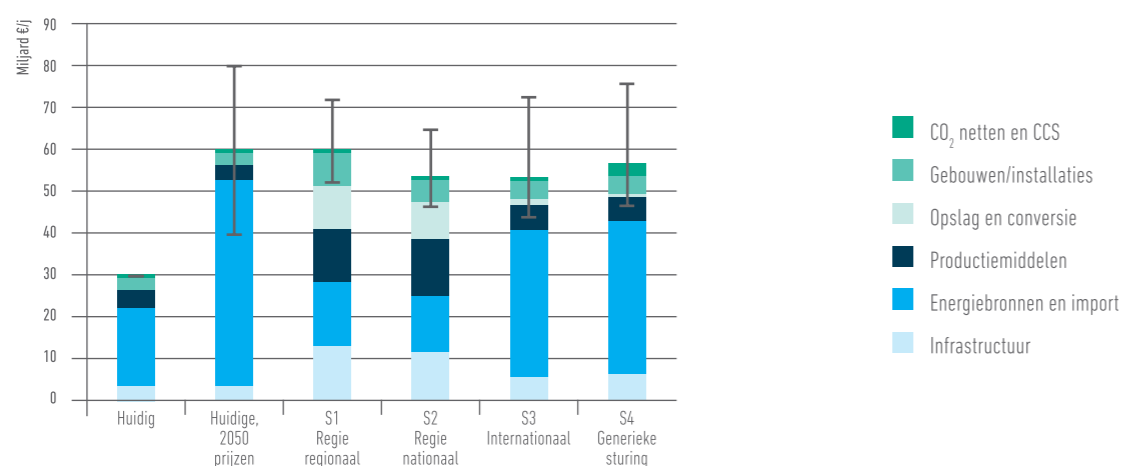
- Duidelijke en sterke generieke instrumenten die sturen op CO₂-reductie
- De transitie richting 2050 verloopt relatief langzaam, en er is minder zekerheid dat de CO₂-ambities op tijd worden bereikt.
- Beperkte aanpassing van het aardgasnet tot netten voor transport en distributie van waterstof en biosyngas, grote rol voor groen gas.
- CCS is onderdeel van de oplossing.
- Groot aandeel variabele kosten in het totale energiesysteem,

ANALYSE

4.1 KOSTEN

Een opvallende uitkomst is dat de totale jaarlijkse kosten van de energievoorziening in de verschillende maatschappijbeelden niet sterk onderling verschillen.

Jaarlijkse kosten van de energievoorziening



De energievoorziening wordt in de toekomst wel duurder dan vandaag de dag (een stijging met € 20 tot 30 miljard per jaar ten opzichte van 2017). In de klimaatneutrale maatschappijbeelden worden investeringen gedaan om de hernieuwbare bronnen te exploiteren, wat bijna altijd duurder is dan het huidige prijsniveau van fossiele bronnen. Tevens zijn er meer investeringen nodig in installaties, isolatie en infrastructuur. Maar de stijging komt deels ook doordat fossiele energiebronnen vandaag de dag relatief goedkoop zijn, en de klimaatschade van fossiele energie telt nu niet mee in de energiesysteemkosten. Echter, ook als we niets zouden veranderen aan het huidige energiesysteem, dan is het goed voorstelbaar dat de kosten van de energievoorziening met een vergelijkbare hoeveelheid stijgen, want de kostprijs van fossiele energiebronnen zal sterk oplopen in een maatschappijbeeld waarin wereldwijd klimaatbeleid niet effectief is (prijzen van de WLO-laag, meer dan het dubbele ten opzichte van de huidige prijzen). Dus als dat als referentie genomen wordt, dan kan niet gesteld worden dat een klimaatneutrale energievoorziening duurder is dan een op fossiele energie gebaseerde. De onzekerheden in de kostenberekeningen zijn groot. De maatschappijbeelden met veel import zijn gevoelig voor de prijs van CO₂-vrije brandstoffen op de wereldmarkt, en de maatschappijbeelden met regionale of nationale zelfvoorzienendheid zijn gevoelig voor kapitaalkosten. Financiële risico's zijn in de import-maatschappijbeelden wel groter omdat energie-kosten historisch veel volatieler zijn. Tevens zal de hoeveelheid geld die naar het buitenland gaat in de importmaatschappijbeelden toenemen ten opzichte van vandaag. Voor alle toekomstbeelden geldt dat er naast de kosten ook (maatschappelijke) baten zijn die verschillen tussen de maatschappijbeelden, zoals de werkgelegenheid en de industrie (zie paragraaf 2.2). Deze zijn niet meegenomen in de scope van dit onderzoek.

4.2 TRANSITIEPAD

De maatschappijbeelden zijn als eindbeeld uitgewerkt en niet als transitiepad. Zonder in te veel detail te treden kan wel geconstateerd worden dat het transitiepad sterk zal verschillen tussen de beelden onderling. In de regionale en nationale maatschappijbeelden wordt er een strakke regie gevoerd richting een hoge mate van regionale of nationale zelfvoorziening. In het internationale en nog sterker in het generieke beeld wordt dit veel losser gelaten. Het tempo van doelbereiking zal dan ook verschillen. Bij alleen generiek sturen is er een risico dat het tempo van de transitie in de aanvang laag is, dat het instrumentarium in de aanvang minder krachtig is. Een te trage transitie brengt een risico met zich mee dat de opgave in termen van inspanning en mankracht aan het eind (tussen 2040 en 2050) te groot wordt, en de doelen dus toch niet worden gehaald. Bij de zelfvoorzienende maatschappijbeelden zullen omvangrijke investeringen plaats moeten vinden. Ook de aanleg en ombouw van infrastructuur behelst een grote inspanning in termen van mankracht, waar tijdig aan begonnen moet worden.

4.3 ELEKTRICITEIT

De kostprijs van elektriciteit wordt niet nihil, zoals sommigen denken. Zelfs bij goedkope productie uit zon en wind (1-5 ct per kWh) is ook elektriciteit nodig op momenten dat de zon niet schijnt en de windturbines niet draaien. Die elektriciteit is relatief duur, want die wordt uit opslag geleverd of door regelbare centrales die in het regionale en nationale toekomstbeeld niet veel draaiuren maken. De productiekosten in het internationale en generieke maatschappijbeeld liggen hoger door de hogere brandstof- en CCS-prijzen. In het algemeen kan de kostprijs van elektriciteit (zonder belastingen) van de huidige 4-5 ct per kWh in alle toekomstbeelden toenemen tot wel 6-10 ct/kWh. De netkosten zijn daarbij nog niet inbegrepen. Deze kosten kunnen stijgen tot 3-5 ct/kWh in het generieke maatschappijbeeld (de totale E-infrastructuurkosten omgeslagen naar het totale volume). Daarbij zijn de kosten voor het openhouden van de verschillende opties inbegrepen.

Elektriciteit toekomstbeelden

| | Regionaal | Nationaal | Internationaal | Generiek |
|-----------------------------|------------|------------|----------------|------------|
| Vraag (TWh)* | 280 (165*) | 336 (151*) | 116 (109*) | 118 (118*) |
| Productiekosten** (€ct/kWh) | 5,6 | 4,5 | 9,8 | 10,7 |
| Opslagkosten*** (€ct/kWh) | 1,6 | 1,0 | 0,3 | 0,2 |
| E-infrakosten (€ct/kWh) | 3,3 | 2,8 | 3,3 | 4,8 |

* De getallen betreffen de totale vraag inclusief de vraag van elektrolyse. De getallen tussen haakjes betreft de vraag voor eindgebruik excl. elektrolyse. Eén TWh staat gelijk aan een miljard (10⁹) kWh, of 3,6 PJ.

** De productiekosten betreffen de kosten van productiemiddelen elektriciteit (centrales en zonne- en windparken) en de kosten voor de inzet van de brandstoffen.

*** De opslagkosten betreffen de kosten van de batterij-opslagsystemen; waterstofconversie en de kosten van gasbuffers zijn bij 'gas' geteld.

4.4 FLUCTUERENDE ENERGIEBRONNEN

Zon en wind worden belangrijke bronnen van elektriciteit. Als er steeds meer capaciteit voor zon en wind bij komt, kan op een gegeven moment een substantieel deel van de jaarproductie niet meer rechtstreeks gebruikt worden, omdat die niet gelijk met de vraag naar elektriciteit plaatsvindt. De inzet van zon en wind heeft beperkingen, zowel in volume (hoewel in de regionale en nationale beelden wind en zon een groot aandeel in het hele energiesysteem vervullen, vergt het nogal wat van het ruimtebeslag) als in balancering van vraag en aanbod op elk moment. Daarom zal hernieuwbaar gas een belangrijke rol gaan spelen, juist ook in maatschappijbeelden met veel fluctuerende hernieuwbare bronnen. Gas is een kosteneffectieve oplossing om energieoverschotten langdurig op te slaan. Flexibiliteit zal bijdragen aan de optimalisering van de kosten van het elektriciteitssysteem (bij tekort: vraag verschuiven, bij overschot: extra vraag creëren zoals warmtebuffering, power-to-heat). Het is echter niet echt een oplossing in periodes dat er zeer weinig productie van elektriciteit uit zon en wind is. Daarvoor zullen voldoende centrales (thermisch vermogen met hernieuwbare brandstof) beschikbaar moeten blijven. Het gaat in totaal om circa 20 GW aan centrales (net zoveel als de huidige kolen- en gascentrales), die in een gering aantal uren per jaar de investering moeten terugverdienen. De capaciteit aan productievermogen, flexibel vraagvermogen en opslagvermogen verschilt sterk per maatschappijbeeld.

De capaciteit aan productievermogen, flexibel vraagvermogen en opslagvermogen per maatschappijbeeld

| | Regionaal | Nationaal | Internationaal | Generiek |
|---------------|-----------|-----------|----------------|----------|
| Elektriciteit | | | | |
| Zon-PV | 84 | 34 | 16 | 18 |
| Wind op land | 16 | 14 | 5 | 5 |
| Wind op zee | 26 | 53 | 6 | 5 |
| Flex vraag | 140 | 120 | 10 | 5 |
| Opslag | 58 | 46 | 5 | 3 |

4.4.1 DE WINTERPIEK – HET OVERBRUGGEN VAN DE SEIZOENEN MET OPSLAG

Ook in extreme situaties moet er voldoende energie zijn, zoals tijdens langdurige koude periodes zonder zon en met weinig wind. Seizoensopslag en productie van elektriciteit voor deze extreme momenten zijn wezenlijke uitdagingen. In alle maatschappijbeelden is een vergroting van de seizoensopslag nodig in de vorm van gasvormige dragers in lege gasvelden (9-11 miljard m³). In de maatschappijbeelden met energie-import is dit volume ook nodig; enerzijds als strategische reserve en anderzijds omdat de import het hele jaar doorgaat terwijl de piekvraag in de winter zit (winterpiekvoorziening).

4.5 VAN AARDGAS NAAR HERNIEUWBAAR GAS

Ondanks een toename van de elektrificatie zijn ook nieuwe schone gassen nodig om de huidige fossiele brandstoffen in met name de industrie en het vervoer te vervangen. Het aardgas zal geleidelijk plaats maken voor verschillende CO₂-vrije gassen, zoals groengas, waterstof, biogas en syngas (CO en H₂). De belangrijke toekomstige rol van waterstof in de industrie is eigenlijk geen onzekerheid meer, met de concrete projecten die momenteel door industriële clusters in Rotterdam, Zeeland en Groningen worden vormgegeven. In woonwijken waar het aardgas wordt vervangen door een klimaatneutraal gas, zal de transitie schoksgewijs gaan. Wijken moeten van de ene op de andere dag overschakelen van aardgas naar bijvoorbeeld waterstofgas. Het landelijke net kan meer stapsgewijs overschakelen, doordat parallelle transport-pijpleidingen één voor één overschakelen van aardgas naar waterstof of syngas en er daarnaast ook nieuwe dedicated transportleidingen zullen worden aangelegd. De rol van gasnetten zal dus sterk veranderen. In het regionale maatschappijbeeld zal gasdistributie naar huizen verdwijnen; meteen bij de aanleg van een warmtenet of na een overgangperiode. In andere toekomstbeelden worden de gasnetten geschikt gemaakt voor distributie/transport van hernieuwbare gassen, zoals waterstof.

De hoeveelheid te transporteren en distribueren gas verschilt sterk per toekomstbeeld, van 750 PJ in het regionale maatschappijbeeld tot 1500 PJ in het generieke maatschappijbeeld. Naar verwachting kan dat grotendeels binnen het huidige gasnetwerk. Het gaat hier om het totaal aan gasvormige energiedragers, dus zowel aardgas, groengas en waterstof. In het nationale en internationale maatschappijbeeld gaat het vooral om waterstof, terwijl in het regionale en generieke maatschappijbeeld een rol is weggelegd voor groengas. De kosten van gas stijgen van € 5 per GJ (15 ct per m³) naar € 12 - € 25 per GJ.

Totaal gasvormige energiedragers (aardgas, groen gas, waterstof)

| | Regionaal | Nationaal | Internationaal | Generiek |
|---------------------------------------|-----------|-----------|----------------|-------------|
| Eindverbruik* (PJ) | 750 (500) | 900 (700) | 1100 (850) | 1500 (1200) |
| Productie** (€/GJ) | 25,0 | 21,8 | 17,7 | 12,5 |
| (€/m ³ , excl belastingen) | 0,75 | 0,6 | 0,5 | 0,4 |
| Opslag (€/GJ) | 0,7 | 0,7 | 0,5 | 0,4 |
| Infra (€/GJ) | 1,7 | 1,9 | 1,6 | 1,2 |

* Het eindgebruik in PJ betreft het totaal aan gasvormige dragers dat finaal wordt verbruikt, in een van de energiefuncties en als input voor elektriciteitsproductie. Het getal in haakjes betreft het totaal exclusief gebruik voor elektriciteitssector.

** Kosten voor CCS zijn hierbij niet inbegrepen (er is een deel inzet van aardgas met CCS in alle toekomstbeelden)

4.6 WARMTE

In het regionale maatschappijbeeld zijn forse investeringen in warmtenetten nodig. In het nationale en internationale maatschappijbeeld spelen warmtenetten een beperktere rol, maar wel groter dan op dit moment.

4.7 BIOMASSA

Biomassa kent in alle toekomstbeelden een belangrijke rol, voor bio-energie en als grondstof. Nederlandse biomassa levert een beperkte bijdrage van maximaal ongeveer 300 PJ in de vorm van groengas, biofuels en vaste biomassa. In het internationale en generieke maatschappijbeeld wordt biomassa geïmporteerd. Als de wereldwijde beschikbaarheid van duurzame biomassa naar rato van inwonertal verdeeld wordt, zou Nederland beperkt kunnen importeren (maximaal 300 PJ). Naar rato van de omvang van het BBP zou het om 900 PJ gaan. In bijlage F van het achtergronddocument is dit toegelicht. Een punt van discussie is wel hoe realistisch dit is. De potentiëlen doen in de regel geen correctie voor de effecten van klimaatverandering op het aanbod, en daarnaast kan de druk voor voedsel toenemen. Er zijn partijen die van mening zijn dat biomassa in het geheel niet voor energetische toepassingen aangewend zou moeten worden.

4.8 VERVOER

In de transportsector nemen hernieuwbare gassen (bio-gas, waterstof) en elektriciteit de rol van benzine en diesel over. Welke impact elektrificatie precies heeft, is nog onduidelijk. We weten niet of mensen hun elektrische auto's vooral thuis of bij bijvoorbeeld hun werkplek zullen laden, en wie de meters van de infrastructuur zal beheren. Ook is onzeker wat bijvoorbeeld autonoom rijden betekent voor het aantal auto's en de behoefte aan laadinfrastructuur. De verwachting is wel dat de vraag stuurbaar is en dat auto's geladen worden op momenten dat het systeem optimaal is, bijvoorbeeld als er veel productie van hernieuwbare energie is.

4.9 INFRASTRUCTUUR

In het regionale en het nationale maatschappijbeeld is een forse uitbreiding van de infrastructuur voor elektriciteit en warmte nodig. Er is behoefte aan veel eigen energieproductie, dus de netten moeten deze vraag aankunnen. In het internationale en generieke maatschappijbeeld groeit de duurzame elektriciteitsproductie slechts beperkt. Als de overheid alleen generiek stuurt zonder inhoudelijk te kiezen, moeten de netbeheerders met meerdere maatschappijbeelden rekening houden in de infrastructuur en moeten zij wellicht infrastructuur aanleggen die over dertig jaar toch minder of niet nodig blijkt. In het maatschappijbeeld "generieke sturing" zijn deze kosten opgenomen voor de infrastructuur.

Benodigde capaciteiten elektriciteitsnet 2050 (GW)

| | Huidig | Regionaal | Nationaal | Internationaal | Generiek |
|----------------|--------|-----------|-----------|----------------|----------|
| Wind op Zee | 1 | 26 | 53 | 6 | 5 |
| Hoogspanning | 20 | 36 | 57 | 18 | 20 |
| Middenspanning | 10 | 53 | 22 | 10 | 20 |
| Laagspanning | 11 | 24 | 13 | 11 | 15 |

5 CONCLUSIES

Welke investeringen in infrastructuur nodig zijn en wat de ruimtelijke impact is van de duurzame energievoorziening, hangt af van de koers van de energietransitie en dus van wie de regie heeft. Omdat netbeheerders nu al bezig zijn met het aanleggen van het net voor die toekomst, is op tijd een richting kiezen de meest doelmatige weg. Overheden, netbeheerders, marktpartijen en consumenten moeten daarover het gesprek aangaan. De overheid kan daarbij actief sturen met bijvoorbeeld regulering of beprijzing of met regie en inhoudelijke keuzes.

Op regionale schaal energieneutraal worden vergt (heel) veel lokale bronnen, met grote impact op ruimte en infrastructuur. Bovendien leidt maximaal inzetten op regionale zelfvoorziening boven een bepaald niveau tot hogere kosten. Het is belangrijk dat te onderkennen en kosten, zelfvoorzienendheid, ruimte, draagvlak, risico's en de mogelijkheid om energie te importeren allemaal mee te wegen in keuzes. Lokale en regionale overheden nemen vaak het initiatief tot een dergelijke afweging, netbeheerders kunnen hierbij helpen.

Het op afzienbare termijn maken van systeemkeuzes voor de lange termijn is belangrijk voor een snelle en efficiënte energietransitie. Te lang wachten leidt uiteindelijk tot knelpunten in de uitvoering, bijvoorbeeld omdat er niet genoeg tijd meer is en niet genoeg personeel voor de tijdige aanpassing van alle conversie-installaties en de netten. Onder systeemkeuzes verstaan we bijvoorbeeld de mate van gewenste zelfvoorziening, de keuzevrijheid voor burgers of voor gemeenten in de infrastructuur voor verwarming, hoeveel extra productie van elektriciteit uit zon/wind gewenst is.

Zo lang onduidelijk is welke kant we op gaan, moeten netbeheerders met elke mogelijke richting rekening houden. Netbeheerders moeten dan voorbereid zijn op een regionaal scenario waarin veel infrastructuur nodig is tegen hoge kosten, terwijl over 30 jaar wellicht blijkt dat de energievoorziening juist internationaal georiënteerd is, met een veel kleinere behoefte aan infrastructuur. Vanuit die optiek kunnen netbeheerders de kosten beperken door niet met alle mogelijkheden rekening te hoeven houden.

Overigens kan louter streven naar de laagste kosten voor de netten het draagvlak beperken. Draagvlak is essentieel voor de energietransitie, omdat alle energiegebruikers (ingrijpende) maatregelen moeten treffen om de energietransitie te kunnen laten slagen. Meer ruimte in de netten (en daardoor hogere kosten) geeft de energiegebruikers meer mogelijkheden om eigen oplossingen te kiezen. Een voorbeeld hiervan is het (langer) in stand houden van gasnetten voor hernieuwbare gassen naast een warmtenet. Dit levert een maatschappelijk dilemma op tussen enerzijds het streven naar de laagste kosten en anderzijds het creëren van draagvlak.

6 AANDACHTSPUNTEN

De netbeheerders hebben mede op basis van Net voor de Toekomst in een afzonderlijke publicatie een 'Netwerkagenda' geformuleerd met actiepunten die moeten worden gerealiseerd voor de korte en langere termijn. Daarnaast levert het onderzoek nog een aantal andere aandachtspunten op:

- De netbeheerders zullen de komende jaren de laadinfrastructuur voor elektrische auto's mogelijk blijven maken en de netten daarvoor verzwaren. Maar het is onzeker hoe de behoefte aan laadinfrastructuur voor elektrisch vervoer zich precies ontwikkelt en wat bijvoorbeeld autonoom rijden betekent voor het aantal auto's en de behoefte aan laadinfrastructuur. Dit moeten netbeheerders met stakeholders in de gaten houden en bespreken.
- Zowel voor de infrastructuur (trafo's, hoogspanningsleidingen) als voor opslag (elektrolyse en opslagfaciliteiten) en voor productie van elektriciteit en warmte (zon, wind, biomassa, bodemwarmte) is meer ruimte nodig. De nieuwe Omgevingswet geeft gemeenten de mogelijkheid om hier in de omgevingsvisie en de omgevingsplannen expliciet aandacht aan te besteden. De netbeheerders geven een voorzet hoe zowel vraag, infrastructuur als productie een plek kunnen krijgen in de Omgevingswet (een voorzet is opgenomen in bijlage B van het achtergrondrapport, opgesteld door CE Delft in samenwerking met Enexis).



