



Net voor de Toekomst

Achtergrondrapport



CE Delft

Committed to the Environment

Net voor de Toekomst

Achtergrondrapport

Dit rapport is geschreven door:
Maarten Afman en Frans Rooijers

Met medewerking van:
Jacobine Aalberts-Bakker, Harry Croezen, Anouk van Grinsven, Marit van Lieshout, Thomas Huigen, Katja Kruit, Cor Leguijt, Marijke Meyer, Benno Schepers, Jasper Schilling, Thijs Scholten

Delft, CE Delft, 22 november 2017

Publicatienummer: 17.3L53.170

Energievoorziening / Elektriciteit / Infrastructuur / Scenario's / Regelgeving / Technologie / Duurzame energie / Vraag en aanbod

Opdrachtgever:
Netbeheer Nederland
Begeleidingsgroep Net voor de Toekomst

Alle openbare publicaties van CE Delft zijn verkrijgbaar via www.ce.nl

Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de projectleider Maarten Afman (CE Delft)

© copyright, CE Delft, Delft

CE Delft

Committed to the Environment

CE Delft draagt met onafhankelijk onderzoek en advies bij aan een duurzame samenleving. Wij zijn toonaangevend op het gebied van energie, transport en grondstoffen. Met onze kennis van techniek, beleid en economie helpen we overheden, NGO's en bedrijven structurele veranderingen te realiseren. Al ruim 35 jaar werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.



Voorwoord

Dit rapport vormt de achtergrond bij het rapport 'Net voor de Toekomst' van Netbeheer Nederland (november 2017).

Op basis van deze rapportage, die onder de verantwoordelijkheid valt van CE Delft, heeft een werkgroep van Netbeheer Nederland gewerkt aan het 'Net voor de Toekomst' rapport.

De werkgroep van Netbeheer Nederland werd voorgezeten door Maurice Roovers (Netbeheer Nederland) en bestond verder uit:

- Huibert Baud - Liander
- Gert van der Lee - TenneT
- Arjen Jongepier - Enduris
- Bastiaan Meijer - RENDO
- Liane ter Maat - Netbeheer Nederland
- Piet Nienhuis en Bert Vogelaar - GTS
- Jan Peters - Enexis
- Wilco Wittenberg - Coteq Netbeheer
- Ton Wurth - Stedin

Met de werkgroep zijn de consequenties verkend van een stringent klimaatbeleid waarbij nieuwe technieken en nieuwe energiebronnen een ingrijpende verandering zullen veroorzaken in de energievoorziening. De netbeheerders willen actief bijdragen aan die verandering waarbij de vraag zich voordoet wat er precies moet veranderen in energie-infrastructuur om de transitie mogelijk te maken.

Quintel Intelligence (John Kerkhoven en Rob Terwel) heeft een peer review uitgevoerd op een conceptversie van het Net voor de Toekomst rapport. De bevindingen van hen zijn verwerkt in deze eindversie.

Frans Rooijers
Directeur CE Delft

Inhoud

	Voorwoord	2
	Samenvatting	6
1	Inleiding	11
	1.1 Waarom dit document?	11
	1.2 Klimaatbeleid vergt forse veranderingen in de energievoorziening	12
	1.3 Recente ontwikkelingen	12
2	Maatschappijbeelden en energietoekomstbeelden 2050	14
	2.1 Energietransitie: veranderingen in energievraag	14
	2.2 Maatschappijbeelden	15
	2.3 Overzicht maatschappijbeelden	15
	2.4 Uitgangspunten berekeningen	17
3	Toekomstbeeld 'Regie Regionaal'	19
	3.1 Maatschappij en besluitvorming	19
	3.2 Veranderingen in energiefuncties	19
	3.3 Energiebronnen en energiedragers; opwek en conversie	20
	3.4 Energie-infrastructuur, lokale effecten	22
	3.5 Effecten op ruimte	24
	3.6 Kosten en baten	25
	3.7 Conclusies voor de opgave	26
4	Toekomstbeeld 'Regie Nationaal'	27
	4.1 Maatschappij en besluitvorming	27
	4.2 Veranderingen in energiefuncties	27
	4.3 Energiebronnen en energiedragers; opwek en conversie	29
	4.4 Energie-infrastructuur, lokale effecten	31
	4.5 Effecten op ruimte	32
	4.6 Kosten en baten	33
	4.7 Conclusies voor de opgave	34
5	Toekomstbeeld 'Internationaal'	35
	5.1 Maatschappij en besluitvorming	35
	5.2 Veranderingen in energiefuncties	35
	5.3 Energiebronnen en energiedragers; opwek en conversie	37
	5.4 Energie-infrastructuur, lokale effecten	39
	5.5 Effecten op ruimte	40
	5.6 Kosten en baten	41
	5.7 Conclusie voor de opgave	42
6	Toekomstbeeld 'Generieke sturing'	43
	6.1 Maatschappij en besluitvorming	43
	6.2 Veranderingen in energiefuncties	44
	6.3 Energiebronnen en energiedragers; opwek en conversie	45
	6.4 Energie-infrastructuur, lokale effecten	47



6.5	Effecten op ruimte	48
6.6	Kosten en baten	49
6.7	Conclusies voor de opgave	50
7	Conclusies	52
7.1	De netbeheerders houden veel wegen open	52
7.2	Elektriciteit én CO ₂ -vrij gas zijn de energiedragers voor de toekomst	53
7.3	Transitie vergt snel, actief overheidsbeleid	57
7.4	Draagvlak	58
7.5	Volgende stappen	60
8	Referenties	61

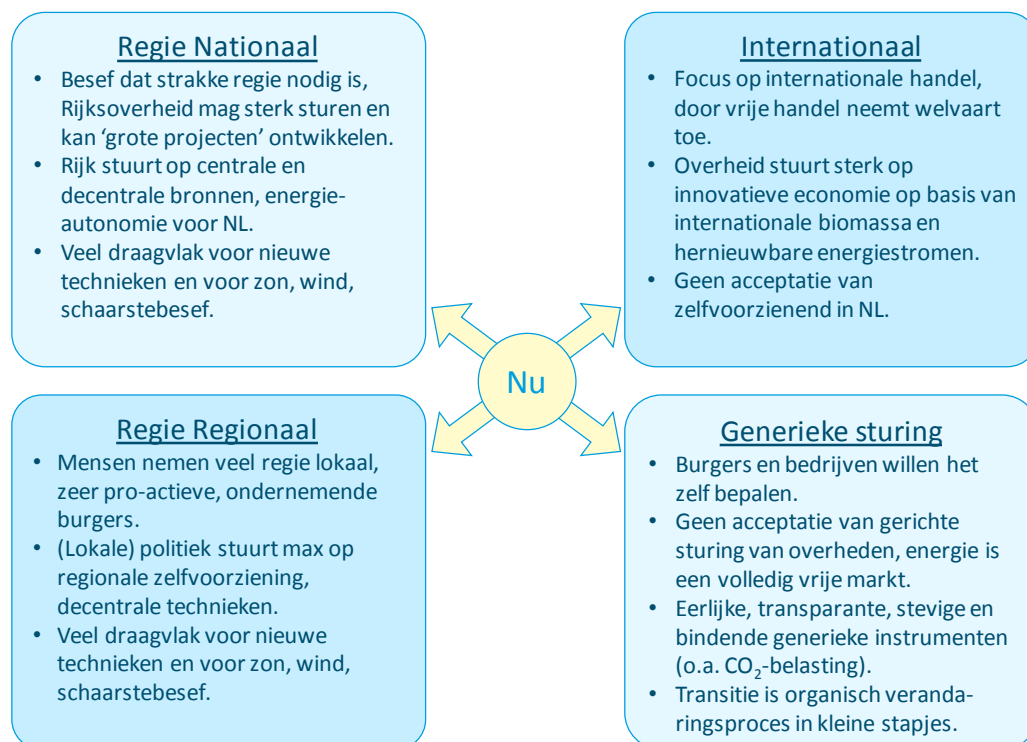




Samenvatting

Om in 2050 een CO₂-neutrale samenleving te bereiken, zal de energievoorziening de komende decennia ingrijpend moeten veranderen. Maar hoe precies deze energietransitie vorm moet krijgen, is nu nog onduidelijk. Met verschillende scenario's proberen de netbeheerders van de energienetten in Nederland daarom grip te krijgen op de mogelijke ontwikkelingen. Want de transitie zal de energie-infrastructuur voor 2050 bepalen en daarmee ook wijzigingen in de infrastructuur die vandaag de dag worden gedaan. De investeringskeuzes van de netbeheerders kunnen de transitie versnellen. De energietransitie gaat echter niet alleen om de meest kostenefficiënte, technische oplossingen. De overgang naar een klimaatvriendelijke energievoorziening vraagt bij uitstek ook om een groot maatschappelijk draagvlak voor de veranderingen. Daarom plaatsen we, de werkgroep van alle netbeheerders, in dit rapport de technische uitdagingen in een context van sociaal-maatschappelijke en politieke keuzes en afwegingen. In dit onderzoek hebben we vier verschillende toekomstbeelden uitgewerkt en doorgerekend. De toekomstbeelden verschillen in het soort maatschappij en het soort sturing (met name hoe overheden het energiesysteem gericht vormen). We verkennen daarmee in deze studie hoe de energievoorziening van de toekomst eruit kan zien, gegeven sociaal-maatschappelijke en politieke afwegingen en keuzes die aan het maatschappijbeeld ten grondslag liggen.

Vier maatschappijbeelden voor klimaatneutrale scenario's



Regie Regionaal

In dit toekomstbeeld 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. Er is veel meer energie-infrastructuur en opslag in de vorm van waterstof nodig om de ongelijktijdigheid en afstand tussen vraag en aanbod op te lossen. Omzetting van elektriciteit naar waterstof vindt op veel locaties verspreid over het land plaats.

Regie Nationaal

De Rijksoverheid heeft in dit toekomstbeeld veel regie en stuurt op energie-autonomie voor Nederland via een mix van vooral centrale energiebronnen, zoals met name wind op zee. Er is veel opslag nodig in de vorm van waterstof omdat vraag en aanbod niet gelijktijdig plaatsvinden. Omzetting van elektriciteit naar waterstof gebeurt aan de kust of zelfs op zee.

Internationaal

Nederland is in dit toekomstbeeld een mondiaal georiënteerd land dat verschillende vormen van hernieuwbare energie importeert, zoals biomassa, waterstof uit elektriciteit van de zon. Er is een internationale handel in waterstof uit klimaatneutrale bronnen (hernieuwbaar en fossiel met CCS).

Generieke sturing

In dit toekomstbeeld 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. Collectieve opties en maatregelen zoals woningsisolatie blijven uit of worden pas laat in het transitieproces uitgevoerd. Het Nederlandse bedrijfsleven zal in dit toekomstbeeld veel minder bijdragen aan oplossingen dan in de andere beelden.

De tabel bevat een overzicht van de kenmerken van het energiesysteem per maatschappijbeeld.

Tabel 1 - Techniekenkenmerken van de toekomstbeelden

	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%
Personen vervoer 	100% elektrisch	75% elektrisch 25% H ₂ -brandstofcel	50% elektrisch 25% groen gas 25% H ₂	50% elektrisch 25% groen gas 25% H ₂
Goederen vervoer 	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 CEGIOA-model doorgerekend.

** Toekomstbeelden voor de industrie van het Wuppertal Instituut.

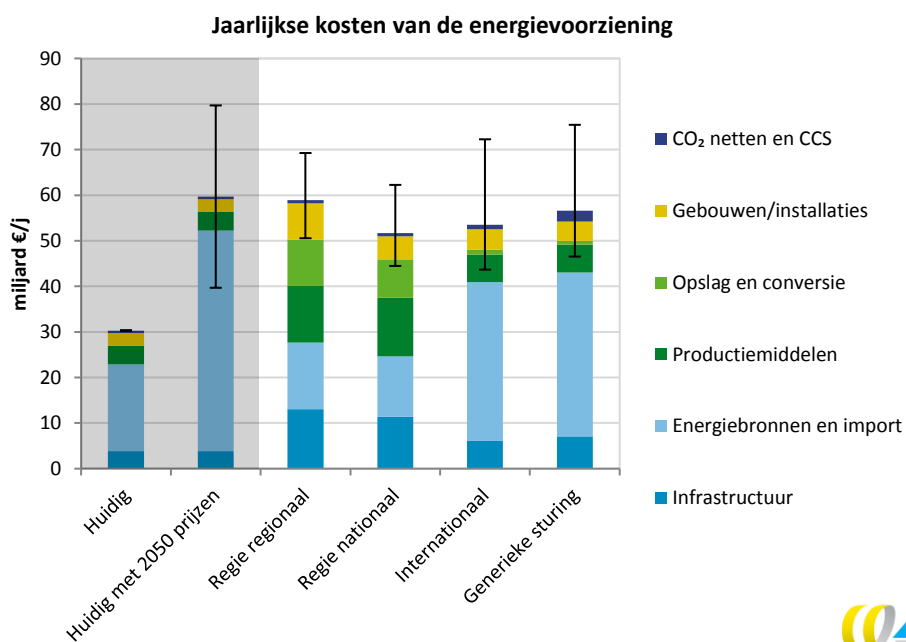
Analyse

Waarschijnlijk beschrijft geen van de vier toekomstbeelden de uiteindelijke werkelijkheid van 2050. De kans is namelijk groot is dat er tegen die tijd andere technieken voor productie en consumptie van energie zijn dan het huidige spectrum. Toch laat dit onderzoek zien hoe zeer de technische uitwerking van de energietransitie afhangt van de keuzes die we nu maken.

Vast staat dat in alle beelden het energiesysteem drastisch verandert. In tegenstelling tot wat sommigen verwachten, wordt energie niet gratis. Weliswaar nemen de variabele kosten van elektriciteit sterk af omdat steeds meer zon en wind wordt gebruikt, maar om dit te bereiken moet wel flink geïnvesteerd worden in installaties. Daarnaast kunnen zon en wind niet direct in de hele energievraag voorzien. Per kWh zal elektriciteit ongeveer even duur blijven.

De variabele kosten van energiedragers zoals hernieuwbaar gas zullen wel veel hoger zijn dan de huidige kostprijs van aardgas.

De totale kosten van de energievoorziening zullen omhooggaan (grofweg verdubbelen) ten opzichte van vandaag de dag. Dat geldt voor de klimaatneutrale scenario's (omdat hernieuwbare energiebronnen duurder zijn dan de huidige lage prijs van fossiele energie, en daarnaast door de kapitaalkosten voor productiemiddelen, opslag, conversie, en infrastructuur), maar het geldt ook voor een 'business as usual'-toekomstbeeld waarbij het huidige energiesysteem doorgerekend is met de 2050-energieprijzen die horen bij het CPB WLO-scenario dat er weinig aan klimaatbeleid wordt gedaan.



De onzekerheden zijn erg groot, waarbij de toekomstbeelden met veel import gevoelig zijn voor de prijs van (CO₂-vrije) brandstoffen op de wereldmarkt, en de toekomstbeelden met regionale of nationale zelfvoorzienendheid gevoelig zijn voor kapitaalkosten. De financiële risico's zijn in de import-scenario's wel duidelijk groter omdat energiekosten historisch veel volatieler zijn.

Naast de 'kosten' zijn er ook andere effecten die verschillen tussen de toekomstbeelden. Dit gaat om macro-economische structuur, in toegevoegde waarde, innovatie, hoog- en laaggeschoolde werkgelegenheid, economische handelsbalans. Maar ook milieueffecten, luchtkwaliteit, beperking van klimaatverandering, effecten op ruimte/landschap. Daarnaast zijn er verschillen in meer en ook in een



aantal meer subjectieve eigenschappen van het energiesysteem, zoals energie-zelfvoorzienendheid en voorzieningszekerheid, autonomie, en keuzevrijheid voor burgers.

Wat zijn de effecten op de energie-infrastructuur?

De energie-infrastructuur zal fors veranderen. Er lijkt één uitzondering, namelijk in het geval dat dat Nederland de benodigde energie hoofdzakelijk gaat importeren. De elektriciteitsnetten zullen in het Regionale beeld moeten zorgen dat de lokaal en regionaal opgewekte elektriciteit (zon en wind) via het landelijke net bij de industrie terecht komt en wordt geconverteerd naar waterstof voor diverse toepassingen, zowel bij industrie en transport als in de gebouwde omgeving. In het Nationale beeld verandert er minder en komt veel energie, zowel elektriciteit als gas, van de Noordzee. Het minst ingrijpend is het toekomstbeeld Internationaal en Generiek die beiden veel energie importeren.

Tabel 2 - benodigde capaciteiten elektriciteitsnet 2050

Capaciteit [GW]	Huidig	Regie regionaal	Regie Nationaal	Internationaal	Generieke sturing
Wind op Zee	1	26	53	6	5
Hoogspanning	20	36	57	18	19
Middenspanning	10	53	22	10	10
Laagspanning	11	24	13	11	11

Het verzwaren van de elektriciteitsnetten - voor sommige onderdelen soms met een factor 5 - vergt zowel meer werk voor de netbeheerders als meer ruimte voor de elektriciteitsnetten. Deze ruimte is nodig voor transformatoren en extra hoogspanningslijnen en dat moet allemaal worden gevonden in steeds dichter bebouwde gebieden. Naast de effecten op ruimte zijn er de landschappelijke impacts.

De gasinfrastructuur zal op regionaal en landelijk niveau, in alle toekomstbeelden nodig blijven. Dat net dient niet meer voor de distributie van aardgas maar voor diverse CO₂-vrije gassen, waarvan waterstof de belangrijkste is. Deze gassen worden gebruikt in de industrie, in het vervoer, en in een aantal beelden ook in significante hoeveelheden in de gebouwde omgeving. De capaciteit van de huidige gasnetten is voldoende, maar er zullen wel aanpassingen nodig zijn.

Vooral in het toekomstbeeld Regionaal wordt in de helft van de woongebieden een of andere vorm van warmtelevering gerealiseerd. Zowel grootschalige restwarmtebronnen als geothermie zullen deze warmte gaan leveren. Kleinschalige warmtesystemen op basis van lokale bronnen spelen in alle scenario's een rol. CO₂-vrij gas zal in veel gevallen, direct en indirect, voorzien in de warmtevraag tijdens de 'winterpiek'.

Uit de verschillende toekomstbeelden komen een aantal zaken naar voren:

- we kunnen op allerlei manieren een klimaatneutrale energievoorziening realiseren, waarbij de soort bronnen en mate van import sterk verschilt;
- de rol van elektriciteit als energiedrager zal toenemen doordat het zowel duurzaam uit zon en wind geproduceerd zal worden, daarnaast zal het gebruikt worden voor energiefuncties die nu met benzine of aardgas worden voorzien;
- waterstof is onmisbaar in de toekomstige energievoorziening; het is een goede oplossing om energie van wind en zon niet alleen direct als elektriciteit te kunnen gebruiken, maar ook om energie op te slaan;
- flexibiliteit in de energievraag draagt bij aan lagere kosten van het elektriciteitssysteem;
- in toekomstbeelden waarin zon en wind belangrijke energiebronnen zijn, zijn ook centrales op basis van CO₂-vrije brandstoffen met eenzelfde vermogen als de huidige kolen- en gascentrales nodig om op grijze en windstille dagen in voldoende elektriciteit te voorzien;
- In de transportsector nemen biogas, waterstof en elektriciteit de rol van benzine en diesel over.

Tot slot

Maatschappelijke en politieke keuzes zijn bepalend voor hoe de energievoorziening van de toekomst eruit komt te zien. Omdat netbeheerders nu al bezig zijn met het voorbereiden en aanleggen van het net voor die toekomst, is op tijd een richting kiezen de meest doelmatige weg. De overheid kan daarbij actief sturen met regulering of beprijzing, maar ook met regie. Regie kan een waterstof-infrastructuur mogelijk maken, warmtetransportnetten in specifieke gebieden faciliteren, overal een minimumniveau van warmte-isolatie bewerkstelligen enzovoorts. Overheden, netbeheerders, marktpartijen en consumenten moeten daarom het gesprek aangaan over welke kant we op willen met onze toekomstige energievoorziening en welke investeringen daarvoor nodig zijn.

Als we op afzienbare termijn systeem keuzes maken voor de lange termijn, zal dat een snelle en efficiënte energietransitie bespoedigen. Te lang wachten leidt namelijk uiteindelijk tot knelpunten in de uitvoering, bijvoorbeeld omdat er niet genoeg tijd meer is en niet genoeg personeel is voor de tijdige aanpassing van alle conversie-installaties en de netten.

Onder systeemkeuzes verstaan we bijvoorbeeld de mate van gewenste zelfvoorziening en het schaalniveau daarbij, de keuzevrijheid voor burgers of voor gemeenten in de infrastructuur voor verwarming. Hierbij speelt de vraag hoeveel extra productie van elektriciteit uit zon/wind gewenst is ten opzichte van wat we direct voor 'licht en kracht' kunnen gebruiken en we dus moeten opslaan of omzetten naar bijvoorbeeld gas.

Zo lang onduidelijk is welke kant we op gaan, zullen netbeheerders met elke mogelijke richting rekening moeten houden. Netbeheerders moeten dan bijvoorbeeld voorbereid zijn op een regionaal scenario waarin veel infrastructuur nodig is voor zon en windenergie en opslag tegen hoge kosten, terwijl over dertig jaar wellicht blijkt dat de energievoorziening juist internationaal is georiënteerd, met een veel kleinere behoefte aan infrastructuur doordat veel energie wordt geïmporteerd. In die optiek kunnen de netbeheerders kosten beperken wanneer ze niet met alle mogelijkheden rekening hoeven te houden.

Aan de andere kant komt in deze studie nadrukkelijk naar voren dat het **draagvlak** voor de energietransitie essentieel is. Alle energiegebruikers moeten namelijk (ingrijpende) maatregelen treffen om de energietransitie te kunnen laten slagen. Daarbij zullen ze hogere kosten moeten dragen.

Het draagvlak zal groeien wanneer de gebruiker niet het gevoel heeft dat hij een specifieke kant op wordt geduwd, maar enige keuzevrijheid heeft. Bijvoorbeeld door het gasnet in bepaalde wijken langer operationeel te houden, als dat technisch kan, of zelfs naast een warmtenet te laten bestaan. Hier ontwaren we een maatschappelijk dilemma: enerzijds het streven naar de laagste kosten (voor onder meer de netten) door strakke keuzes te maken maar anderzijds weerstand bij burgers en bedrijven die het gevoel krijgen dat een specifieke oplossing wordt opgedrongen. Meer capaciteit in de netten (en daardoor hogere kosten) en/of vaker het gasnet handhaven, geeft de energiegebruikers meer mogelijkheden om eigen oplossingen te kiezen. Voorwaarde voor deze route is wel dat we ervoor zorgen dat natuurlijke vervangingsmomenten worden aangegrepen voor veranderingen. Zowel bij de renovatie van een woning, direct renoveren tot het juiste energetische niveau, als het vervangen van een ketel. Maar ook op het moment dat er infrastructuur structureel moet worden vervangen moet goed nagedacht worden over waar we op dat moment in investeren

De netbeheerders zien ten slotte als noodzakelijke **volgende stap** een discussie met maatschappelijke partijen over de diverse onderwerpen die hun werk raakt. Dit zijn onderwerpen als de klimaatneutrale warmtevraag in de gebouwde omgeving die zich regionaal anders zal manifesteren, afwegingen tussen het gebruik van regionale energiebronnen versus import van duurzame energie, de verduurzaming van de industrie, de invulling van elektrisch laden voor vervoer. Deze discussie heeft het doel om de infrastructuur de noodzakelijke energietransitie zo goed mogelijk te laten faciliteren.

De netbeheerders hebben met het oog hierop een discussie-agenda opgesteld - '10-puntenplan voor een succesvolle energietransitie'.

1 Inleiding

1.1 Waarom dit document?

De energievoorziening zal de komende decennia ingrijpend veranderen richting een voorziening die vrijwel geen broeikasgassen meer uitstoot. Een belangrijke vraag voor netbeheerders is hoe die transitie precies vorm zal krijgen en wat dat voor gevolgen heeft voor hun energie-infrastructuur. Andersom kunnen de investeringskeuzes die netbeheerders moeten maken de richting en de snelheid van de energietransitie ingrijpend beïnvloeden.

Aangezien dit een zaak van nationaal belang is, willen de netbeheerders daarom graag de dialoog met de maatschappij daarover aangaan. Dit document is geschreven om die dialoog te faciliteren.

Het doel van dit document is drieledig:

1. Inzicht geven in aard en omvang van de energietransitie en consequenties voor de energienetten

Het doel is om andere stakeholders binnen het energieveld inzichtelijk te maken wat nodig is en waar energiesysteemkeuzes nog niet gemaakt zijn. Het gaat om stakeholders die een rol hebben bij de keuzes: Rijksoverheid, politiek, gemeenten, provincies, energieleveranciers, woningcorporaties, vertegenwoordigers en energiegebruikers.

Net voor de Toekomst geeft inhoudelijke onderbouwing en conclusies. Het maakt duidelijk welke infrastructuur nuttig en nodig zijn voor de energietransitie, wat de impacts zijn van systeemkeuzes op de infrastructuur (maatschappelijke kosten en andere (lokale) effecten), onder de onvermijdelijke onzekerheden die er zijn als 30 jaar in de toekomst wordt gekeken.

2. Inhoudelijke actualisatie, nieuwe inhoudelijke inzichten

De vorige Net voor de Toekomst publicatie (Netbeheer Nederland, 2011) wordt nog gebruikt, maar heeft inhoudelijke actualisatie. Het doel is een actualisatie op de issues die in 2011 naar voren kwamen, maar ook een actualisatie van de toekomstbeelden, waarin de recente ontwikkelingen worden meegenomen. Tevens een update van het achtergrondrapport met de technische bijlagen (dit rapport). De inhoudelijke actualisatie van de studie is nodig omdat sommige ontwikkelingen sneller zijn gegaan, andere technieken lijken minder actueel, en er zijn een aantal nieuwe thema's en ontwikkelingen die opgenomen moeten worden: lokaal afwegingskader voor energie-opties in verband met de omgevingsvoorziening, de flexibiliteitsvoorziening, de impact van veranderingen in de industrie.

3. Naar buiten treden, het voeren en voeren van de dialoog met de maatschappij, en het uitnodigen tot het maken van systeemkeuzes

Het maken van systeemkeuzes voor de lange termijn is niet alleen van belang voor de energietransitie en de snelheid en kosteneffectiviteit daarvan, maar ook van groot belang voor de tijdige aanpassing van de netten en dus voor de opgave van netbeheerders.

Dit document is geen pleitnota voor meer investeringen in de infrastructuur, maar is gericht op het voorkomen dat de netbeheerders worden ingehaald door de ontwikkelingen.

Het doel is verder zeker niet een uitspraak te doen over de wenselijkheid van een bepaald energiesysteem, of op een bepaalde oplossing te sturen. De studie beoogt wel duidelijk te maken dat bepaalde keuzes gemaakt dienen te worden, dat het maken van keuzes gevolgen heeft, maar dat niet-keuze ook gevolgen kent. Op deze studie beoogt de studie handvatten voor de dialoog te bieden.

1.2 Klimaatbeleid vergt forse veranderingen in de energievoorziening¹

De transitie naar een klimaatneutrale energievoorziening is het uitgangspunt voor deze 'Net voor de Toekomst'-studie.

Een CO₂-reductie van 100% in de energievoorziening in 2050 om aan het Klimaatakkoord van Parijs te voldoen, zal een belangrijke impact hebben op de toekomstige energievoorziening en daarmee ook op de energie-infrastructuur. Deze enorme CO₂-reductie vergt een transformatie van de totale energievoorziening die momenteel nog gedomineerd wordt door fossiele brandstoffen zoals aardgas, kolen en aardolie. Daarmee wordt, naast 'betaalbaar' en 'betrouwbaar', een serieuze derde dimensie aan het energiebeleid toegevoegd, namelijk 'schoon'.

De CO₂ die vrijkomt bij de verbranding van fossiel brandstoffen zal óf moeten worden afgevangen en worden opgeslagen óf moeten worden vervangen door schone, hernieuwbare energiebronnen. Daarnaast is ook een forse daling van de energievraag bij de gebruikers nodig.

Op het niveau van 'kleinverbruikers' zullen alleen CO₂-neutrale² energiedragers kunnen worden gebruikt omdat het naar de huidige verwachting niet mogelijk zal zijn om op miljoenen plaatsen CO₂ af te vangen en op te slaan. Dat is voorbehouden aan plaatsen waar geconcentreerd grote hoeveelheden CO₂ vrijkomen.

1.3 Recente ontwikkelingen

In 2010-11 heeft Netbeheer Nederland de eerste versie van '*Net voor de Toekomst*' opgesteld. Hierin werd al geschetst dat de netbeheerders een actieve rol willen spelen in de energietransitie. Dat is ook gebeurd. De netbeheerders hebben het initiatief genomen om de Overlegtafel Energietransitie (OTE) te starten en hebben daarnaast ook andere initiatieven genomen. Tevens zijn er proefprojecten gestart. Een paar willekeurige voorbeelden zijn 'Jouw energie Moment', Smart Storage in Etten-Leur, 'Powermatching City', 'Samen Slim met Energie', 'Grid Flex Heeten', etc. Daarnaast is in Twente aan een biogasnetwerk gewerkt, hebben Netbeheerders een laadinfrastructuur voor elektrisch rijden uitgerold via E-laad (nu overgegaan in ElaadNL en EVnetNL), en hebben geparticipeerd in de Stroomversnelling.

Een belangrijke ontwikkeling die na 2010 aan kracht gewonnen heeft, is dat het besef van de urgente noodzaak om de broeikasgasemissies sterk terug te dringen nationaal en internationaal breder wordt onderkend. Dit heeft in 2015 geleid tot het Klimaatakkoord van Parijs. Belangrijk daarbij is dat niet alleen overheden de noodzaak van een forse energietransitie zien, maar dat ook het bedrijfsleven ziet dat dit onvermijdelijk is, internationaal maar zeker ook in Nederland. De opstelling van zowel VNO-NCW, VEMW als De Groene Zaak is daarbij helder: ook de Nederlandse industrie zal in 2050 klimaatneutraal moeten zijn.

Na 2010 is de bijdrage van wind en zon in het elektriciteitssysteem fors toegenomen, in eerste instantie vooral in de ons omringende landen. Dit heeft een nieuwe dynamiek gegeven, steeds meer elektriciteit wordt geproduceerd op momenten dat het waait en/of de zon schijnt en niet meer op basis van de vraag naar elektriciteit. Doordat wind en zon geen marginale kosten kennen, fluctueert de prijs van elektriciteit op de elektriciteitsbeurs op een hele andere manier dan voor 2010 gebruikelijk was, en de gemiddelde prijs van elektriciteit is gedaald. Deze trend zal doorzetten omdat meer elektriciteit uit zon en wind, ook in omringende landen, gestimuleerd zal worden.

¹ Onder energievoorziening wordt hier het gehele energiesysteem van vraag tot en met winning van energiebronnen verstaan; warmte, elektriciteit, gas, motorbrandstoffen, kolen, windenergie, kernenergie, zon, etc.

² CO₂-neutrale energiedragers zijn energiedragers waarbij bij gebruik geen netto CO₂-emissies vrijkomen. Elektriciteit is daarvan een voorbeeld, maar ook groen gas. Groen gas is gemaakt van biomassa.



Met de aardbeving in Huizinge in Groningen (16 augustus 2012) is het beeld over de rol van aardgas in ons energiesysteem fors veranderd. De winning van Nederlands aardgas is al sterk teruggebracht. Tevens is er een beweging ontstaan om zo snel mogelijk klimaatneutraal te gaan verwarmen, waarbij er geen aardgas meer wordt ingezet voor de verwarming van gebouwen.

Naast de noodzaak om CO₂-vrije energie te gaan gebruiken zullen nieuwe technieken voor conversie, maar ook voor productie ontwikkeld en gebruikt moeten gaan worden. Een andere belangrijke ontwikkeling die effect zal hebben op het energiesysteem is het toenemend gebruik van innovatieve ICT-oplossingen en marktkoppelingen om vraag en productie goed op elkaar af te stemmen, die ook van belang is voor de inpassing van grotere vermogens aan wind en zon in het energiesysteem.

De gewenste veranderingen in het energiesysteem om te streven naar verregaande CO₂-reductie zijn vastgelegd in de *Energieagenda* die het Rijk in 2016 heeft vastgesteld. Daarmee is het fundament voor de energietransitie veel steviger geworden en is duidelijk dat in 2050 broeikasgasemissies in de energievoorziening nihil moeten zijn. Dit betekent dat voor alle functionele energievragen (lage temperatuur warmtevraag, hoge temperatuur warmtevraag en energiebronnen/grondstoffen voor de industrie, kracht & licht, transport) de broeikasgasemissies naar nul moeten. Het Rijk heeft hiervoor *transitiepaden* geformuleerd die in 2017 worden uitgewerkt, parallel aan deze studie. 'Net voor de Toekomst - 2017' sluit ook aan bij de transitiepaden maar werkt deze uit voor een viertal verschillende maatschappij- en energietoekomstbeelden³.

³ De Rijksoverheid heeft vijf transitiepaden, het vijfde is 'voedsel en natuur'. Hoewel ook zeer belangrijk, is dit niet een van de energiefuncties die wordt uitgewerkt in Net voor de Toekomst. Wel zullen we effecten van het energiesysteem op ruimte laten zien, waarvan een bevredigende landschappelijke inpassing een belangrijk vraagstuk zal worden. Net voor de Toekomst werkt met vier hoofdfunctionaliteiten: kracht en licht (elektriciteitsvragen apparaten en ICT), transport, lage temperatuur warmtevoorziening, energie voor de industrie. Deze laatste splitsen we in hoge temperatuur warmtevoorziening en energiegrondstoffen voor de industrie.

2 Maatschappijbeelden en energietoekomstbeelden 2050

2.1 Energietransitie: veranderingen in energievraag

Belangrijke drijvende kracht achter de energietransitie is de noodzaak om snel tot omvangrijke CO₂-emissiereducties te komen. Het klimaatakkoord van Parijs is daarbij het uitgangspunt. De landen die het hebben ondertekend hebben een bindende afspraak met elkaar gemaakt om de opwarming van de aarde te beperken tot minder dan twee graden. De consequentie hiervan is dat er mondiaal werk gemaakt zal gaan worden van broeikasgasemissiereductie. Voor het Nederlandse energie-systeem betekent dit dat dit in 2050 klimaatneutraal zal moeten zijn⁴.

Het Rijk heeft in de *Energieagenda* (Ministerie van EZ, 2016) kaders geschetst hoe verder gegaan wordt met de energietransitie. Hierbij is de benadering via de functies van de energievoorziening - die reeds in *Net voor de Toekomst 2010* is geïntroduceerd - overgenomen. Het denken in de functies werkt goed om de veranderingen te beschouwen, vertrekkend vanuit de gebruiker en haar energievraag, via de infrastructuur naar de opwekking van energiedragers, en eventuele substituties daartussen (bijv. van gas naar elektriciteit). Daarom gebruiken we ook in deze studie weer de lijn van de functionele vraag naar:

- lage temperatuur warmtevoorziening, te weten het verwarmen en koelen van gebouwen, de vraag naar warm tapwater;
- energie voor de industrie, met daarbinnen de onderverdeling naar de vraag naar hoge temperatuur warmte en naar energiegroeistoffen⁵ (*feedstock*);
- transport, vervoer van personen en goederen binnen Nederland;
- kracht & licht: aandrijfenergie; (elektrische) apparaten en ICT.

Groei van de economie en toename van de welvaart betekent meestal dat het energiegebruik stijgt. Opgemerkt moet worden dat, na een lange periode van onafgebroken groei, het energiegebruik de laatste jaren lijkt af te vlakken. Dit komt door een veelheid aan factoren, waarbij verbetering van energie-efficiëntie van installaties, gebouwen en apparaten belangrijk is.

Andere belangrijke ontwikkelingen die moeten worden meegenomen zijn:

- Substitutie van energiedragers binnen energiefuncties. Bijvoorbeeld het vervangen van aardgas en motorbrandstoffen door elektriciteit en 'warmte'.
- Mogelijkheden en vormen voor lokale en centrale opslag van energie, de slimme sturing van de energievraag (in de plaats of in de tijd verschuiven)
- Ontwikkeling en gebruik van hernieuwbare bronnen op decentraal niveau (zon-PV, zon-thermisch, bodemwarmte, biomassa, wind op land) en op centraal niveau (wind op zee, biomassa).
- De omvang van de beschikbaarheid van biomassa, voor onder andere groen gas, binnen regionale schaal en wereldwijd.
- Afvang en opslag van CO₂ (CCU en CCS).

⁴ De zogenaamde 'emissieruimte' die er nog is voor Nederland zal nodig zijn *buiten het binnenlandse energiesysteem*: bijv. voor methaan en lachgasemissies van de landbouw en de broeikasgasemissies van de (internationale) lucht- en zeevaart.

⁵ Energiegroeistoffen zijn energiedragers als grondstof, zoals aardgas, waterstof, biomassa. Deze hebben een directe relatie met de energievoorziening. Veranderingen in beschikbare energiedragers maken ook nieuwe processen mogelijk.

2.2 Maatschappijbeelden

De energietransitie is geen technisch vraagstuk van de energiesector. Immers de energiefuncties beginnen bij (eind)gebruikers. Om de transitie succesvol te laten zijn, moet niet alleen het technische vraagstuk op een zo kostenefficiënt mogelijke manier opgelost worden, maar moet ook draagvlak en acceptatie van de technische oplossingen gecreëerd worden. Om snelheid te maken is daarnaast actieve participatie van bedrijven en burgers nodig.

Om de sociaal-maatschappelijke keuzes en afwegingen in de context van de -technische uitdagingen te schetsen, werken we in dit rapport vier toekomstbeelden uit voor hoe de energietransitie vormgegeven kan worden, vanuit het vertrekpunt van sterk verschillende maatschappijbeelden.

Het doel is te laten zien hoe de technische invulling van de toekomstige energievoorziening, en daarmee de maatschappelijke kosten van de energietransitie, kan gaan verschillen afhankelijk van de verschillende sociaal-maatschappelijke en politieke keuzes. Ieder maatschappijbeeld beschrijft een manier van hoe we in Nederland sturing geven aan de inrichting van het energiesysteem en hoe dit via de mogelijke technische keuzes doorwerkt naar de infrastructuur.

Het is belangrijk om te beseffen dat naar alle waarschijnlijkheid geen van de maatschappijbeelden de uiteindelijke waarheid zal beschrijven, maar het gaat om het laten zien van de verschillen en de gevolgen van de keuzes, en de conclusies die daarover getrokken kunnen worden.

Per maatschappijbeeld schetsen we achtereenvolgens:

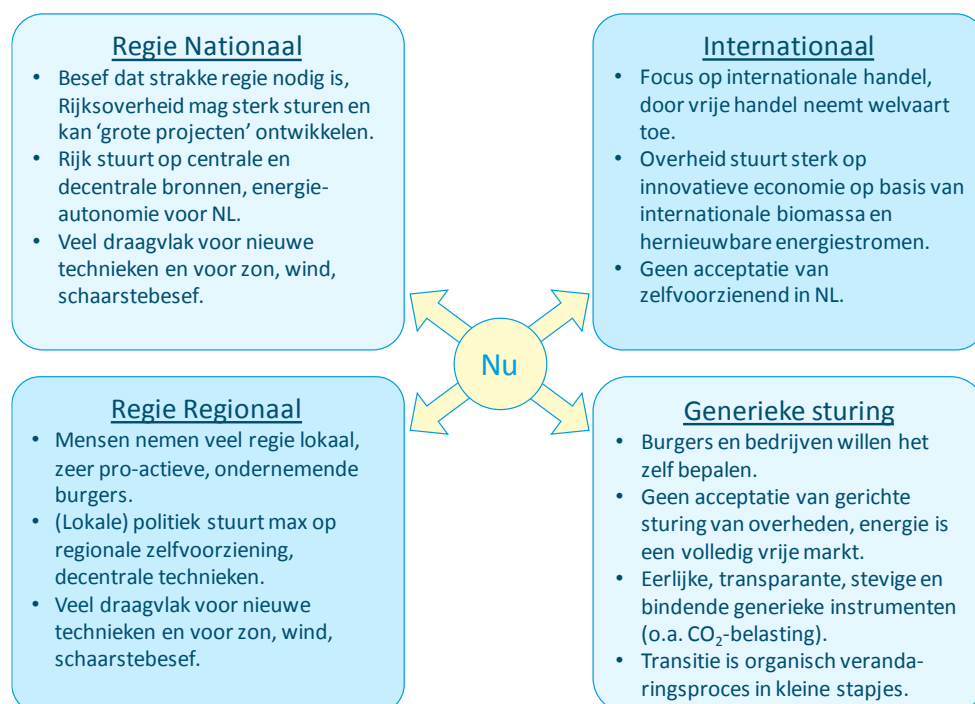
- Hoe is de maatschappij en besluitvorming georganiseerd, sociaal-maatschappelijk gezien?
- Hoe vertaalt zich dit naar de inrichting van de verschillende energiefuncties?
- Wat zijn de consequenties voor de energiedragers die worden gebruikt, in termen van hoeveelheden in 2050?
- Welke energie-infrastructuren hebben we dan nodig? Wat moeten netbeheerders gaan doen in dit toekomstbeeld?
- Wat zijn de effecten op ruimte?
- Wat zijn de kosten van de energievoorziening en wat betekent dit voor de burger?
- Welke keuzes moeten gemaakt worden? Wat zijn de *no-regret*-opties?

Er zijn twee randvoorwaarden bij de invulling. De eerste is klimaatneutraal. Alle verhalen die we schetsen gaan uit van hetzelfde uitgangspunt dat Nederland voldoet aan de Parijs doelstelling in 2050. De tweede is 'betrouwbaarheid'. Dit is en blijft een belangrijke randvoorwaarde voor de energievoorziening. Daarom geldt voor alle toekomstbeelden dat voor energiebronnen die niet of minder leveringsbetrouwbaar zijn, back-upcapaciteit van belang is. De beelden resulteren in een gelijke mate van kwaliteit van de energievoorziening in de zin van leveringsbetrouwbaar.

2.3 Overzicht maatschappijbeelden

De maatschappijbeelden verschillen in het schaalniveau van energieoplossingen regionaal en decentraal versus nationaal of centraal georiënteerd, en anderzijds in de mate waarin Nederland ervoor kiest zelfvoorzienend te zijn. Figuur 1 geeft de maatschappijbeelden met de belangrijkste eigenschappen. Tabel 3 bevat een overzicht van de techniekenmerken die volgen uit het soort energiesysteem dat hoort bij het maatschappijbeeld.

Figuur 1 - Maatschappijbeelden voor klimaatneutrale scenario's voor het energiesysteem



Tabel 3 - Techniekenmerken van de toekomstbeelden

Functie	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%
Personen vervoer 	100% elektrisch	75% elektrisch 25% H ₂ -brandstofcel	50% elektrisch 25% groen gas 25% H ₂	50% elektrisch; 25% groen gas; 25% H ₂
Goederen vervoer 	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 CEGOIA-model doorgerekend.

** Toekomstbeelden voor de industrie van het Wuppertal Instituut.

Korte beschrijving van de maatschappijbeelden:

1. **Regie Regionaal:** sterke regionale regie; maximale benutting van het decentrale potentieel aan productie. In dit toekomstbeeld ligt er veel regie voor het maken van keuzes bij regionale overheden (provincies, gemeenten). Deze sturen sterk op decentrale energieopwekking en -gebruik. Burgers nemen ook initiatieven en vervullen een actieve rol. Collectieve warmteprojecten worden gerealiseerd waar dit financieel kan. Er wordt in dit toekomstbeeld veel hernieuwbare energie decentraal en in de regio opgewekt, waarbij de overschotten ook decentraal worden omgezet in gasvormige dragers. De industrie ondergaat een transformatie naar vooral circulair.
2. **Regie Nationaal:** een sterke centrale overheid. De Rijksoverheid krijgt en neemt in dit toekomstbeeld veel regie en stuurt op energie-autonomie voor Nederland te realiseren via een mix van vooral centrale energiebronnen, waarbij wind op zee belangrijk is. De Rijksoverheid organiseert 'grote projecten', bijvoorbeeld op het gebied van wind op zee, energie-eilanden in de Noordzee om op centrale locaties bijvoorbeeld conversie naar gasvormige dragers te bewerkstelligen. Regio's maken keuzes bijvoorbeeld in het tot stand brengen van warmtenetten en in het al dan niet realiseren van hernieuwbare opwek. De industrie ondergaat ook hier een transformatie naar circulair.
3. **Internationaal:** import van hernieuwbare energie in verschillende vormen speelt een belangrijke rol. Nederland is in dit toekomstbeeld een mondiaal georiënteerd land, waarbij er veel handel is in energiedragers, die in 2050 grotendeels hernieuwbaar zijn. Het gaat hier niet alleen om biomassa en waterstof maar dit kan bijvoorbeeld ook gaan om ammoniak of hernieuwbare koolwaterstoffen. De overheid stimuleert internationale energiehandel. Dit heeft grote gevolgen voor de zowel de industrie als ook voor het transport en de gebouwde omgeving. De ruimere beschikbaarheid van CO₂-neutrale energiedragers vertaalt zich in andere energieoplossingen.
4. **Generieke sturing:** de energievoorziening van de toekomst komt tot stand via een organisch proces, gestuurd door een stevig CO₂ prijssignaal. Door het ontbreken van verdere sturing door de overheid levert dit een energievoorziening op die een mix is van nationale, en internationale energiebronnen. Grootschalige oplossingen die coördinatie en grote voorinvesteringen vergen, zullen niet tot stand komen. In dit beeld wordt dus niet ingezet op grootschalige collectieve warmtesystemen en worden ook geen grote projecten gerealiseerd.

2.4 Uitgangspunten berekeningen

In de volgende hoofdstukken worden de vier perspectieven gedetailleerder uitgewerkt. Bijlage A toont de berekeningswijze in meer detail, inclusief de uitgangspunten en technische overwegingen die zijn gehanteerd. Hier vast enige belangrijke punten.

De uitwerking van de toekomstbeelden is gebeurd op basis van **huidig bekende technieken en kosten**, inclusief te verwachten verbeteringen door **innovatie**. Het is denkbaar dat er verdere optimalisaties zullen zijn, maar die vergen dermate veel aannames en details, dat gekozen is voor transparantie, een beperking tot de belangrijkste groepen technieken in de maatschappijbeelden, en we accepteren enige onzekerheid in de uiteindelijke kosten.

In de scenario's met veel opwek van hernieuwbare energie uit wind en zon is in deze studie rekening gehouden met grootschalige flexibele inzet van **elektrolyse (power-to-gas)** en **opslag**. Dit omdat dergelijke technieken (naast interconnectie) noodzakelijk zullen zijn om een (sterk) toegenomen productie van zon en wind nuttig aan te kunnen wenden. Dit is gedaan met het model CEGRID 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. Paragraaf A.4.1 van Bijlage A bevat een preciezere afbakening van wat is meegenomen aan de kostenkant.

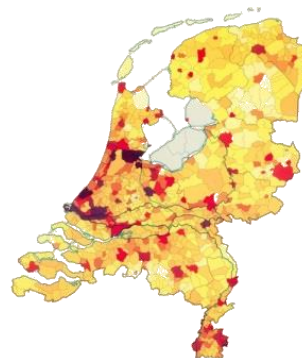
Een kanttekening moet gemaakt worden ten aanzien van de **baten van de scenario's**.

Elk scenario heeft naast kosten uiteraard ook baten, die niet onderzocht zijn. De scenario's verschillen van elkaar in macro-economische structuur, in toegevoegde waarde, innovatie, hoog- en laag-gechoolde werkgelegenheid. Scenario's met meer import van energie kennen een heel andere handelsbalans dan zelfvoorzienende scenario's. Dit hangt samen met ook risicoaspecten, zoals mate van blootstelling aan geopolitieke risico's. Scenario's kennen 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 scenario's, er worden heel andere 'soorten Nederland' beschreven. Van de scenario's worden de kosten gepresenteerd, maar een keuze voor de al dan niet wenselijkheid van een scenario kan niet alleen op basis van kosten gemaakt worden.

3 Toekomstbeeld 'Regie Regionaal'

3.1 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.

3.2 Veranderingen in energiefuncties

Bij **licht en kracht**⁶ daalt de vraag licht. Een daling door 25% efficiëntere apparaten wordt grotendeels gecompenseerd door de vraag naar elektriciteit van bedrijven en de industrie, de nieuwe processen worden veel meer elektrisch aangedreven. Naast voor kracht en licht wordt elektriciteit overigens ook gebruikt voor de conversie en levering van waterstof (elektrolyse van water).

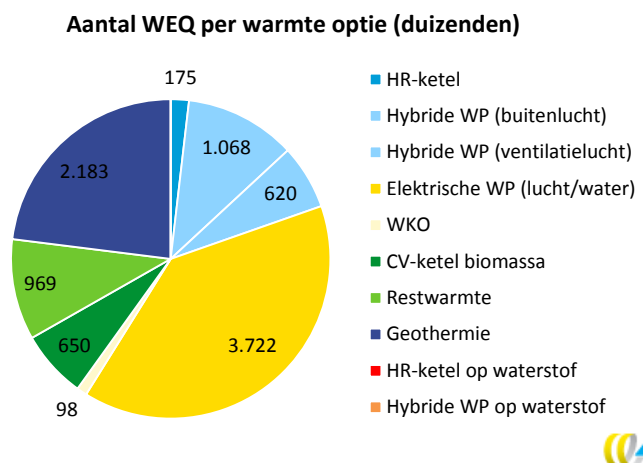
Voor de **lage temperatuur warmtevoorziening**⁷ worden op regionale schaal zo veel mogelijk de bronnen gebruikt die er zijn. *All-electric*-oplossingen komen het vaakst voor. Daarvoor zijn veel aanpassingen aan gebouwen nodig en verzwaring van de elektriciteitsinfrastructuur. Het aandeel collectieve opties is ongeveer even groot, maar wordt beperkt door de beschikbaarheid van geothermie en duurzame restwarmte. Nederland importeert geen biomassa, alleen Nederlands groen gas is beschikbaar voor distributie naar de stedelijke regio. Waterstof die met elektrolyse met

⁶ Bijlagen K en L gaan over de ontwikkelingen m.b.t. kracht en licht.

⁷ Bijlagen M tot en met S beschrijven de ontwikkelingen in de lage temperatuur warmtevoorziening.

duurzame elektriciteit wordt gemaakt, gaat naar de industrie. De hybride warmtepomp op groen gas is in ongeveer 20% van de gevallen de oplossing.

De volgende afbeelding geeft de verdeling van warmteaansluitingen.



Noot: Definitie WEQ - woningequivalent: woning of 150 m² utiliteitsbouw.

De **energievraag van de industrie**⁸ bestaat uit de vraag naar hoge temperatuur warmte, nodig voor de processen, een vraag naar energiegrondstoffen (die worden omgezet in een andere vorm) en een vraag naar elektriciteit voor licht en kracht (aandrijvingen) én voor het proces zelf. In de regionaal georganiseerde economie is er geen import van hernieuwbare of fossiele energie, en CCS is geen oplossingsroute. Eigenlijk alle processen in de industrie, en producten daarvan, zullen veranderen. De olieraffinage en de petrochemische industrie verdwijnen zoals we deze kennen. Daarvoor in de plaats komt een omvangrijke recyclingindustrie, een chemie gebaseerd op hernieuwbare waterstof en een methanolcluster. De industrievraag kent in dit beeld een zeer sterke elektrificatie en een zeer forse waterstofvraag. Deze waterstof moet in dit toekomstbeeld binnen Nederland op een duurzame manier geproduceerd worden uit wind en zon, waardoor grootschalige elektrolyse en conversie-capaciteit nodig is.

De **energievraag voor transport**⁹ verandert in dit beeld: personenvervoer geschiedt volledig met batterij-elektrische aandrijving; voor het zware transport wordt een mix van 50% groen gas (verbrandingsmotor) en 50% H₂ (brandstofcel-elektrische aandrijving) voorzien.

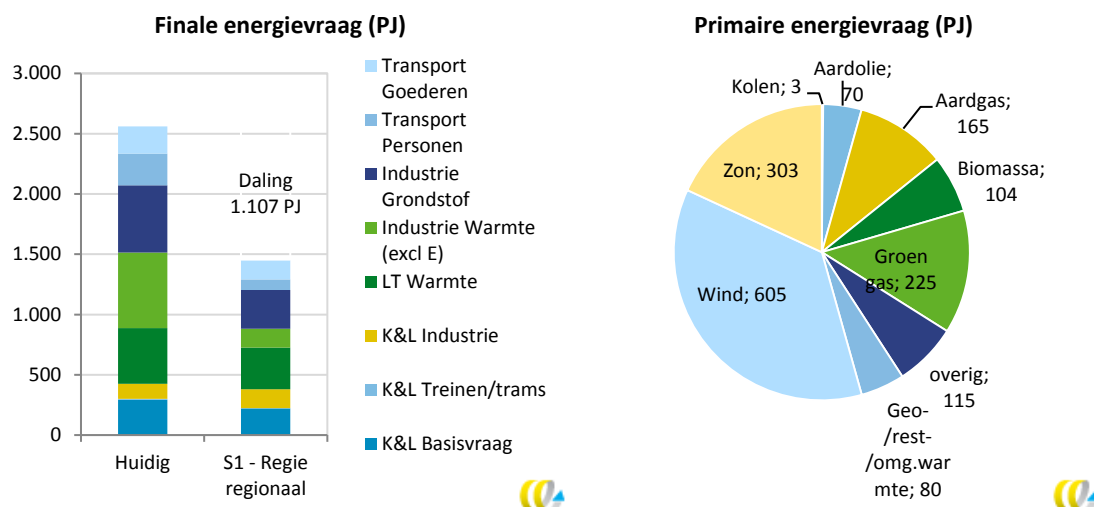
3.3 Energiebronnen en energiedragers; opwek en conversie

De volgende figuren tonen achtereenvolgens de ontwikkeling van de finale vraag in de energie-functies; de verdeling van primaire energiebronnen, en de opwekkingsmix voor elektriciteit die hierbij is verondersteld in dit toekomstbeeld. Bijlage A bevat meer details over hoe deze analyse is gedaan.

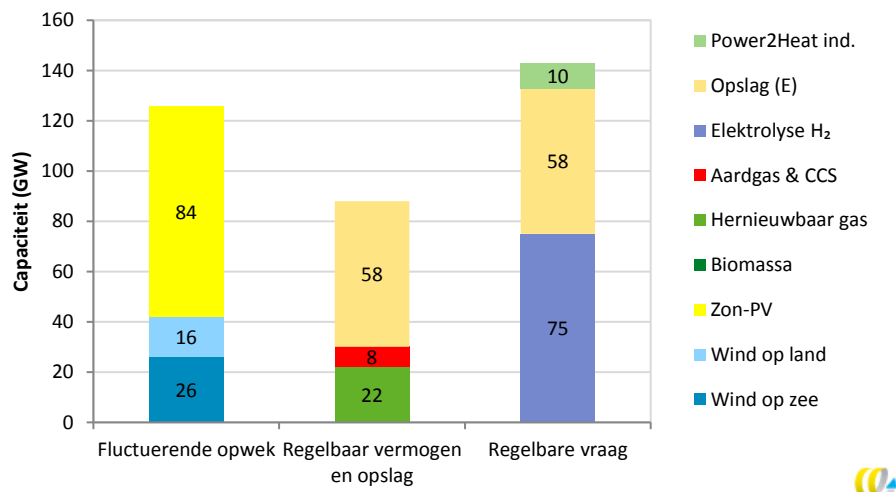
⁸ Bijlagen T tot en met W gaan in op de mogelijke ontwikkelingen over de HT-warmtevraag.

⁹ Bijlagen X tot en met AA gaan over mogelijke ontwikkelingen over de energievraag voor transport.

Figuur 2 - Finale energievraag per energiefunctie en verdeling van primaire energiebronnen (PJ/j)



Figuur 3 - Opgestelde capaciteiten aan variabele opwek, regelbaar vermogen, opslag en conversie (GWe)



In zijn totaliteit is de energievraag in 2050 met ongeveer 40% gedaald ten opzichte van 2016. Dat het importeren van hernieuwbare of fossiele energie geen onderdeel is van dit zelfvoorzienende scenario bepaalt sterk de opwekkingsmix. Een grote hoeveelheid aan fluctuerende energiebronnen zoals zon-PV, wind op zee en wind op land staan dus aan de basis van het energiesysteem. Hierbij is de bijdrage van decentrale bronnen aan het totaal 50%.

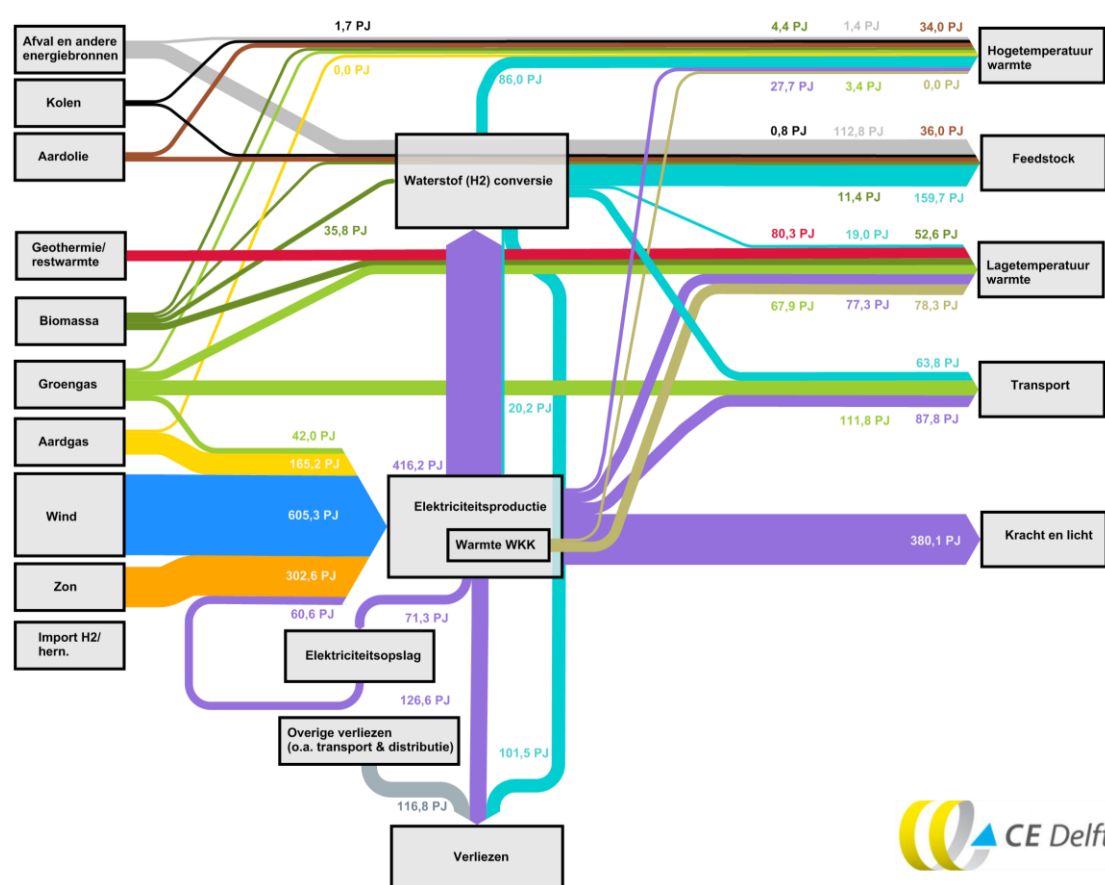
Het opgesteld vermogen van fluctuerende bronnen bestaat uit 26 GW wind op zee, bijna 90 GW zon-PV, (dit betekent een volledige benutting van alle geschikte dakoppervlakten en daarnaast een groot potentieel aan zonneweides en zon op water) en 16 GW wind op land, circa 3x het opgestelde vermogen dat momenteel gepland is.

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. De waterstof-elektrolyse zal op verschillende spanningsniveaus zal worden gerealiseerd.

Het Sankey-diagram in Figuur 4 laat zien hoe de energiestromen in de uitgevoerde modellering lopen. Het gebruik van fossiele energie in dit scenario is sterk beperkt tot met name aardgas-inzet voor centrale elektriciteitsproductie en productie van HT-warmte, beide met CCS. Kolen nauwelijks nog voor en aardolie is ook zeer beperkt.

Figuur 4 - Sankey-diagram van de energiestromen (in PJ/j) voor toekomstbeeld 'Regie regionaal'



De totale jaarlijkse vraag naar elektriciteit (voor warmtetransport en kracht en licht) bedraagt 570 PJ (op dit moment 425 PJ). De productie van elektriciteit bedraagt 1.000 PJ en wordt voor een groot deel geconverteerd in waterstof (420 PJ). De vraag naar waterstof is 350 PJ, vooral in de industrie.

3.4 Energie-infrastructuur, lokale effecten

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 termijnopslag. 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.

Een fijnmazig net van laadpunten voor het personenvervoer functioneert deels als buffersysteem.

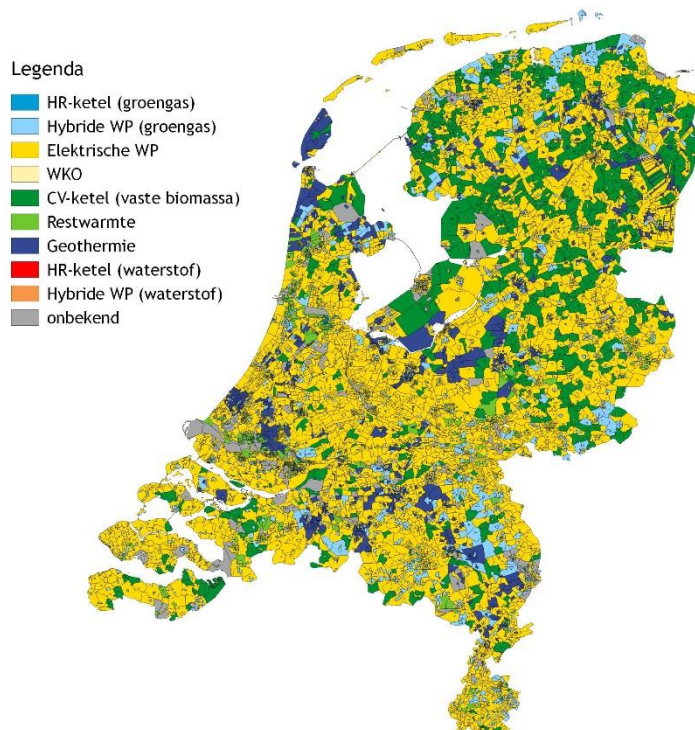
Om bovenstaande mogelijk te maken is een verzwaring van de elektriciteitsnetten op alle niveaus nodig (LS-factor 3, MS-factor 5, HS-factor 2 + 26 GW wind op zee) (zie ook Bijlage A).

Tabel 4 - Benodigde capaciteiten elektriciteitsnet 2050

Capaciteit [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

In woonwijken heeft een groot deel van het gasnet plaatsgemaakt voor warmtenetten met lokale warmtebronnen, zowel geothermie als restwarmte van bedrijven en de industrie. De onderstaande figuur toont de verdeling van de oplossingen voor de lage temperatuur warmtevoorziening per wijk.

Figuur 5 - Lage temperatuur warmtevoorziening in het maatschappijbeeld 'Regie Regionaal'



Het regionale en landelijke gasnet is in grote delen van het land geschikt gemaakt voor waterstof. De industrie gebruikt waterstof zowel voor feedstock als voor de energetische processen. Het gasnet zal niet hoeven worden uitgebreid, maar wel geschikt gemaakt moeten worden voor een ander gas dan het huidige aardgas. Het ruimtebeslag van netcomponenten, conversie- en opslagsystemen en hernieuwbare opwek zal voor knelpunten zorgen.

3.5 Effecten op ruimte

De inpassing in dit systeem vergt nogal wat van het ruimtebeslag. Dat gaat om de grote hoeveelheden zonneparken, zon op daken, windparken op land en op zee, maar ook transformatoren, conversie- en opslagsystemen, extra kabels en hoogspanningslijnen zullen veel ruimte vergen.

Tabel 5 geeft een aantal indicatoren voor de hoeveelheid ruimte die gemoeid is met de lokale en nationale duurzame energieopwekking, alsmede een indicatie van het ruimtebeslag van de infrastructuurcomponenten.

Tabel 5 - Ruimtebeslag

	Ruimtebeslag (km ²)	Staat gelijk aan:
Wind op zee	3.800	7% van het Nederlands deel van de Noordzee, of 1,6x de Waddenzee (Nederlands deel).
Wind op land	2.400	6% Nederlands landoppervlakte. Dit is ook gelijk aan 1,6x de oppervlakte van provincie Utrecht.
Zon-PV en zonneweides	(900)	
...waarvan op daken	400	100% van het totale dakoppervlakte van woningen en utiliteitsgebouwen.
...waarvan in veldopstellingen	500	5% van het grasland in Nederland, dit is ook gelijk aan 2,6x de grondoppervlakte van de gemeente Haarlemmermeer.
Elektriciteitsnet - HS ¹⁰	30	
Gasnet - Transportleidingen	30	
Hoofdstations en distributiestations ¹¹	9	
Elektrolyse-installaties	60	

Het zichtbare ruimtebeslag van de grote hoeveelheden zonneweides, windparken en hoogspanningsmasten is groter, in de tabel is namelijk de hoeveelheid grondoppervlakte van de windparken opgenomen, maar de uitstraling naar het landschap is groter. Windparken zijn in grote delen van Nederland te zien.

Er is natuurlijk ook nog een ondergronds ruimtebeslag, en ook in de Nederlandse ondergrond is het dringen. In dit regionale scenario zullen er ook veel winningsputten moeten worden gemaakt voor WKO en geothermie, en er wordt een warmte-infrastructuur aangelegd in de meeste regio's.

¹⁰ De infrastructuur op HS is geraamd 'Landschap en Energie' (Sijmons, Dirk; Hugtenburg, Jasper; Hoorn, Anton van, 2014).

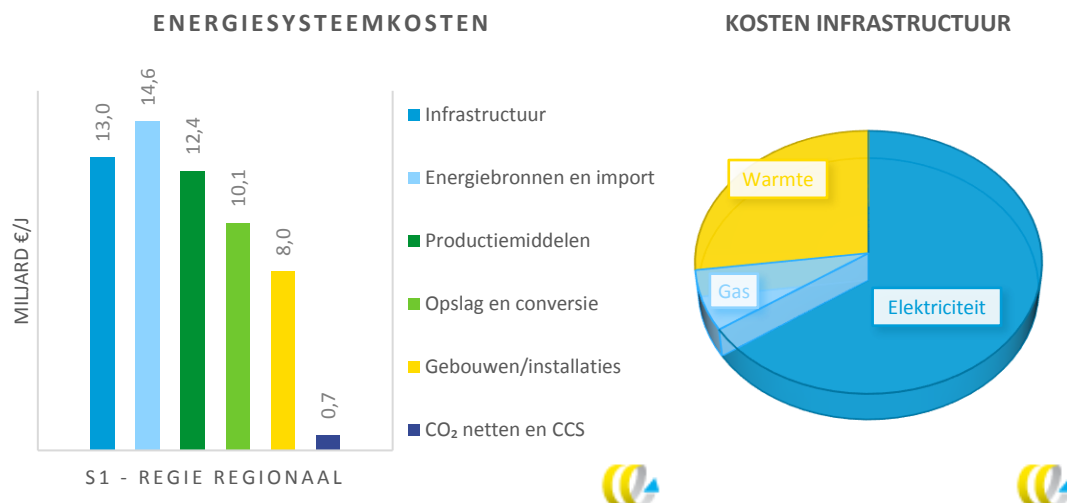
In scenario's met sterke elektrificatie nemen we aan dat het ruimtebeslag voor hoogspanningsleidingen verdubbelt.

En evenzo voor wat betreft het ruimtebeslag van stations.

¹¹ Zie vorige voetnoot. Informatie over ruimtebeslag stations verkregen van Liander, aangevuld met inschattingen.

3.6 Kosten en baten

De totale energiesysteemkosten¹² van dit scenario bedragen ongeveer 60 miljard euro per jaar voor het totaal van Nederland. De opbouw van deze kosten is in de onderstaande figuur weergegeven. Dit betreft jaarlijkse kosten, exclusief belastingen en heffingen. Deze kostenposten gaan direct of indirect bij de burger neerslaan.



Wat opvalt is de relatief grote bijdrage aan de totale kosten van infrastructuur (met name elektriciteit en warmte), en de kosten van de productiemiddelen elektriciteit. Dit komt door de grote opgestelde vermogens hernieuwbare elektriciteit. 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.

Dit toekomstbeeld is relatief kapitaalintensief en OPEX-extensief. De cumulatieve investeringsomvang ten behoeve van de energietransitie bedraagt indicatief circa 360 miljard euro, waarvan circa 40% gemoeid is met de elektriciteit-, warmte-, gas en CO₂-infrastructuren, uitgaand van de kostenkentallen uit Bijlage A¹³.

Naast de 'kosten' zijn er ook 'baten' van dit toekomstbeeld (zie ook Paragraaf 2.4). In dit scenario zorgt een innovatieve circulaire industrie voor een andere manier van waarde toevoegen. Voor de handelsbalans is relevant dat er geen energie wordt geïmporteerd; wat ook een gunstig effect heeft op werkgelegenheid en blootstelling aan geopolitieke risico's. Doordat een groot deel van de kosten in dit scenario wordt veroorzaakt door kapitaallasten, zijn de kosten van het systeem gevoelig voor rente, maar niet gevoelig voor de prijs van energiedragers op de markt, zoals nu de olieprijs en in de toekomst wellicht de prijs van waterstof.

¹² In deze studie wordt uitgegaan van nationale kosten. Bijlage A geeft de details van de afbakening en berekening.

¹³ Dit is een indicatie; om het nauwkeuriger te ramen moet een tijdspadanalyse worden uitgevoerd, waarbij de transitie wordt doorgemaakt terwijl de technieken een leercurve doormaken.

3.7 Conclusies voor de opgave

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 + 29 GW wind op zee);
- gedeeltelijke aanpassing van het aardgasnet tot netten voor transport en distributie van CO₂-vrije gassen zoals groen gas, biogas en vooral waterstof;
- transitie van warmtevoorziening, inclusief de regulering, om collectieve opties te realiseren.

Dit toekomstbeeld kent een zeer grote investeringsopgave in infrastructuur en productiemiddelen en forse landschappelijke impacts. Van burgers, bedrijven en overheden zal verwacht worden dat deze allemaal proactief omgaan met deze immense opgave om de vermogens binnen 30 jaar te realiseren. Daarom is het belangrijk op tijd te beginnen met investeren.

De landschappelijke inpassing van de grote hoeveelheden zon-PV en wind op land en elektrolyse/conversie zal niet eenvoudig zijn omdat er bij een deel van de bevolking (veel) weerstand zal zijn tegen veranderingen in het landschap. De hoeveelheid zon en windinstallaties die nodig is om de noodzakelijke vermogens in dit toekomstbeeld te realiseren zijn, ondanks toenemende efficiency, zeer groot. Hierbij is het zaak ook verschillende belangen af te wegen en daarvoor landelijke regels vast te leggen.

Naast incentives voor hernieuwbare energie moeten er ook incentives komen voor investeringen in de verschillende vormen van flexibele conversiesystemen (elektrolyse en opslag). Dit is belangrijk omdat anders de toegevoegde waarde van hoeveelheden windturbines en zonneparken, die de vraag (ver) overstijgen, er niet is.

Een transitie in het energiesysteem is nodig om de output van zonne- en windenergie maximaal in te passen. Dit kan door middel van zowel techniek, ICT als regulering om de vraag aan te passen aan de productie en door (slim gestuurde) elektrificatie van grote delen van de energievraag (warmtepompen, elektrisch vervoer, industriële processen).

De mismatch tussen aanbod van fluctuerende energiebronnen en de energievraag moet verder met een seizoensopslag (gasopslag) worden opgevangen.

Gericht industrieel beleid is nodig om clusters van de industrie om te bouwen naar circulair. Dat is een forse industriële transformatie waar de bedrijven nauw bij betrokken moeten worden.

De huidige omvang van het personeelsbestand van veel partijen, niet alleen netbeheerders, lijkt te krap om deze opgave in 30 jaar te realiseren, daarom zal extra capaciteit ontwikkeld moeten worden.

4 Toekomstbeeld 'Regie Nationaal'

4.1 Maatschappij en besluitvorming

Hoe zien de energiewereld en de infrastructuur eruit als maatschappij en politiek besluiten dat regionale regie niet de beste oplossing is, maar dat we nationale sturing en nationale bronnen nodig hebben?

Burgers en bedrijven staan de rijksoverheid in dit beeld toe om de regie te nemen, dus er is een krachtige Rijksoverheid. Het Rijk stuurt op energieautonomie voor Nederland via een mix van centrale en decentrale energiebronnen. CCS is in dit maatschappijbeeld geen grootschalige oplossingsroute.



Het tempo van de transitie ligt hoog. Het Rijk organiseert grote projecten, onder andere op het gebied van wind op zee, inclusief bijvoorbeeld energie-eilanden in de Noordzee of andere omvangrijke projecten om de inpassing van wind op zee te verbeteren. De snelle uitrol van wind op zee biedt in dit maatschappijbeeld 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.

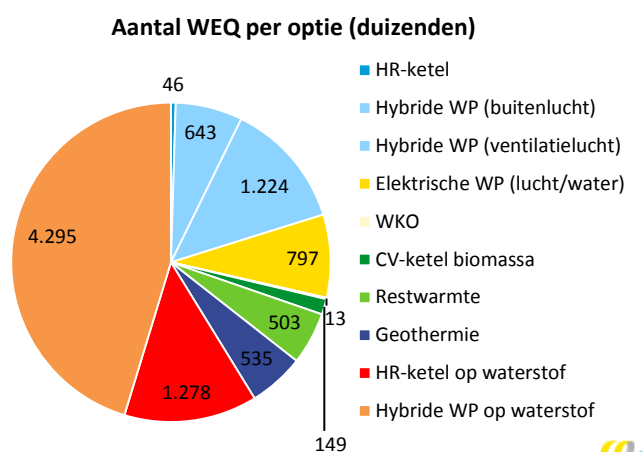
Burgers en bedrijven beseffen dat hernieuwbare energie in Nederland schaars is. Daardoor is de stap naar het opzetten van een sterk circulaire industrie, waarin recycling een grote rol heeft, logisch. De industrie in Nederland is daarmee - net als in het regionale toekomstbeeld (Hoofdstuk 3) - veranderd 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 hierin plaats gemaakt voor een omvangrijke recyclingindustrie en een chemische industrie gebaseerd op hernieuwbaar geproduceerde waterstof en de productie van kunststof uit methanol.

4.2 Veranderingen in energiefuncties

Bij **licht en kracht**¹⁴ daalt de vraag licht. Een daling door 25% efficiëntere apparaten wordt grotendeels gecompenseerd door de vraag naar elektriciteit van bedrijven en de industrie, de nieuwe processen worden veel meer elektrisch aangedreven. Naast voor kracht en licht wordt elektriciteit overigens ook gebruikt voor de conversie en levering van waterstof (elektrolyse van water).

¹⁴ Bijlagen K en L gaan over de ontwikkelingen m.b.t. kracht en licht.

Nederland is in dit toekomstbeeld energie-zelfvoorzienend, dus ook de energiebronnen voor de **lage temperatuur warmtevoorziening**¹⁵. Er worden alleen 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, in bijna de helft van de aansluitingen de warmteoplossing. 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. De onderstaande figuur toont de verdeling van de warmtevoorziening in dit scenario.



Noot: Definitie WEQ - woningequivalent: woning of 150 m² utiliteitsbouw

De **energievraag van de industrie**¹⁶ (hoge temperatuur warmte, energiegrondstoffen, elektriciteit voor licht en kracht en proces) is in dit toekomstbeeld, net als in het eerste toekomstbeeld, radicaal anders. Eigenlijk alle processen in de industrie, en producten daarvan, zullen veranderen. De olie-raffinage en de petrochemische industrie verdwijnen zoals we deze kennen. Daarvoor in de plaats komt een omvangrijke recyclingindustrie, een chemie gebaseerd op hernieuwbare waterstof en een methanolcluster. De industrievraag kent in dit beeld een zeer sterke elektrificatie en een zeer forse waterstofvraag. Deze waterstof moet in dit toekomstbeeld binnen Nederland op een duurzame manier geproduceerd worden uit wind en zon, waardoor grootschalige elektrolyse en conversiecapaciteit nodig is.

De **energievraag voor transport**¹⁷ verandert in dit beeld: personenvervoer geschiedt voor 75% met batterij-elektrische aandrijving en 25% met H₂-brandstofcel-elektrische aandrijving. Het zware transport geschiedt met een mix van 50% groen gas (verbrandingsmotor) en 50% H₂-brandstofcel-elektrische aandrijving.

¹⁵ Bijlagen M tot en met S beschrijven de ontwikkelingen in de lage temperatuur warmtevoorziening.

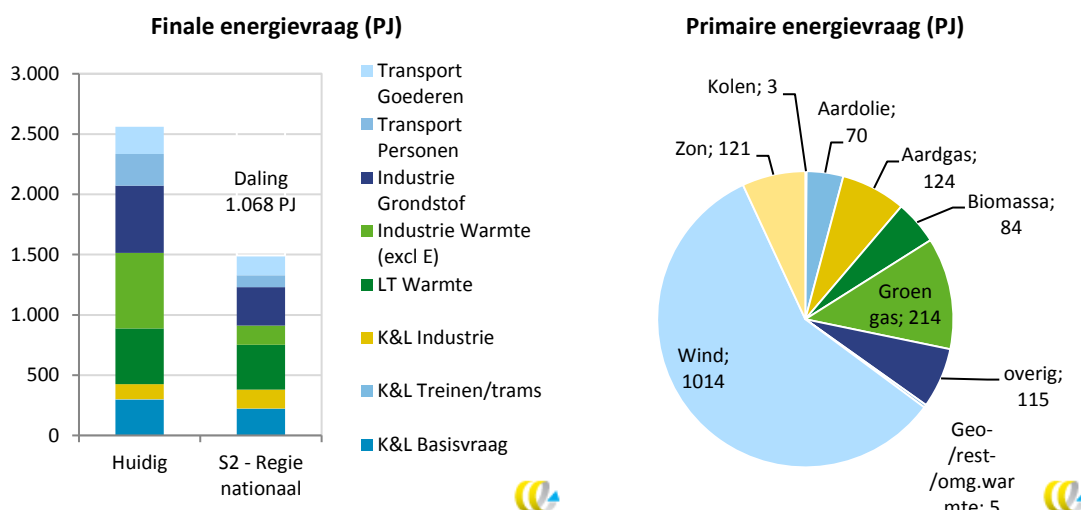
¹⁶ Bijlagen T tot en met W gaan in op de mogelijke ontwikkelingen over de HT-warmtevraag.

¹⁷ Bijlagen X tot en met AA gaan over mogelijke ontwikkelingen over de energievraag voor transport.

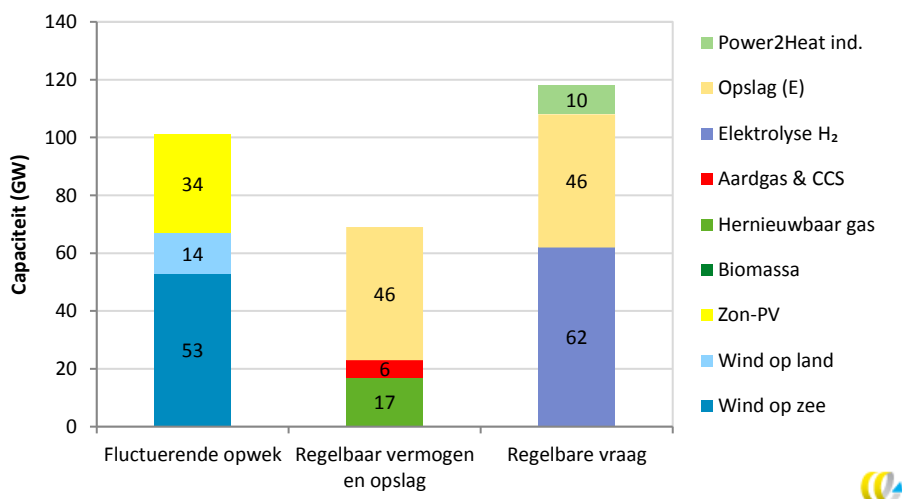
4.3 Energiebronnen en energiedragers; opwek en conversie

De volgende figuren tonen achtereenvolgens de ontwikkeling van de finale vraag in de energie-functies; de verdeling van primaire energiebronnen, en de opwekkingsmix voor elektriciteit die hierbij is verondersteld in dit toekomstbeeld. Zie Bijlage A voor de beschrijving hoe deze analyse is gedaan.

Figuur 6 - Finale energievraag per energiefunctie en verdeling van primaire energiebronnen (PJ/j)



Figuur 7 - Opgestelde capaciteiten aan variabele opwek, regelbaar vermogen, opslag en conversie (GWe)



In zijn totaliteit is de energievraag in 2050 met ongeveer 40% gedaald ten opzichte van 2016.

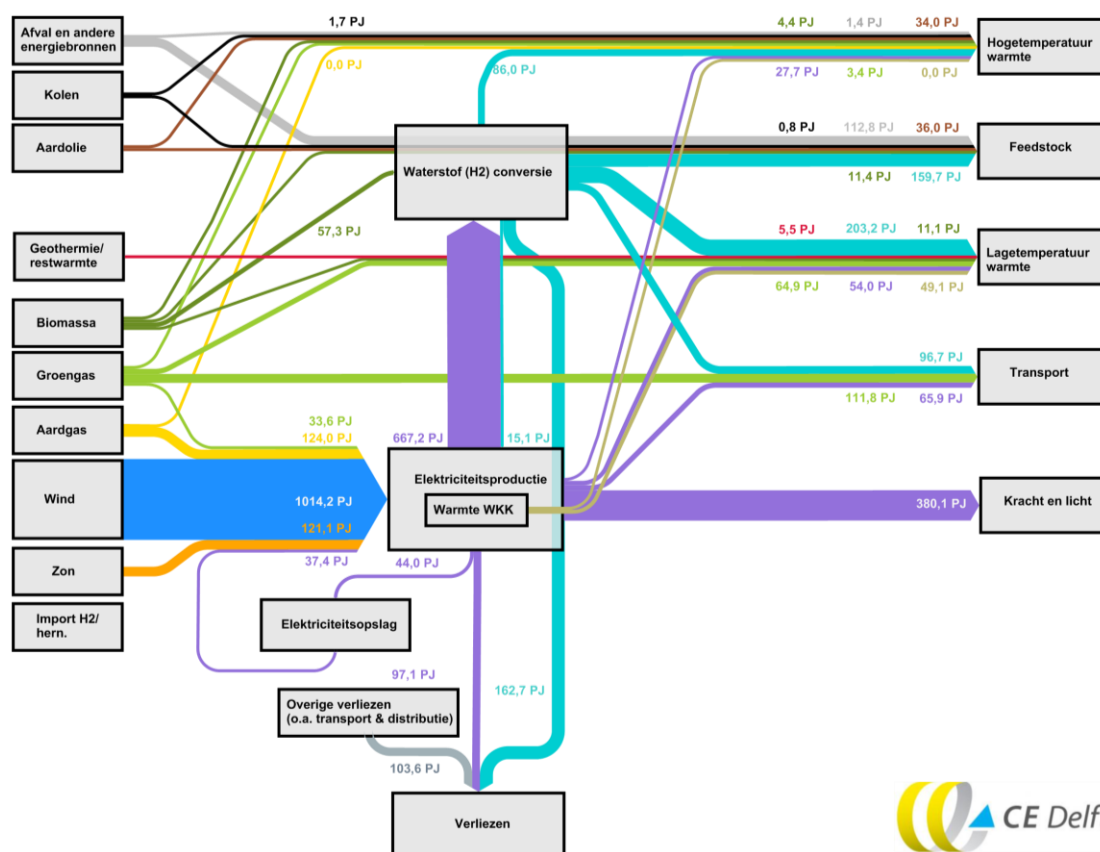
Nederland is in dit scenario energie-autonoom. Dat bepaalt sterk de opwekkingsmix. Een grote hoeveelheid aan fluctuerende energiebronnen zoals zon-PV, wind op zee en wind op land vormen de basis van het zelfvoorzienende energiesysteem. Centrale bronnen dragen 80% bij, decentrale bronnen 20%.

Het opgesteld vermogen van fluctuerende bronnen bestaat uit 53 GW wind op zee, waarbij dus windparken verschijnen op een groot deel van de Noordzee. Daarnaast is er ook 34 GW zon-PV opgenomen (dit betekent dat een groot deel van al het geschikte dakoppervlak, inclusief dat van de utiliteitsbouw, vol gelegd is met zonnepanelen) en 14 GW wind op land, wat het dubbele is ten opzichte van het huidige geplande opgestelde vermogen.

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. Waterstof op basis van elektrolyse is vooral op de (E)HS-en MS-netten gerealiseerd.

Het Sankey-diagram in Figuur 8 laat zien hoe de energiestromen in de uitgevoerde modellering lopen. Het gebruik van fossiele energie is in dit scenario sterk beperkt tot m.n. aardgas-inzet voor centrale elektriciteitsproductie en productie van HT-warmte, beide met CCS. Kolen komt nauwelijks nog voor en aardolie is ook zeer beperkt. In vergelijking met het regionale scenario (Toekomstbeeld 1) is het aandeel wind en de hoeveelheid elektrolyse substantieel groter.

Figuur 8 - Sankey-diagram van de energiestromen (in PJ/j) voor toekomstbeeld 'Regie nationaal'



De totale jaarlijkse vraag naar elektriciteit (voor lage temperatuur warmte, vervoer, kracht en licht) bedraagt 530 PJ (op dit moment 425 PJ). Deze is, ondanks besparing op de basisvraag, gestegen door de elektrificatie in dit scenario. De productie van elektriciteit bedraagt 1.200 PJ, hiervan wordt een groot deel (670 PJ) geconverteerd in waterstof. De vraag naar waterstof is 560 PJ, voornamelijk voor de industrie.

4.4 Energie-infrastructuur, lokale effecten

Het beeld van Nederland verandert sterk in dit toekomstbeeld: veel grote windturbines op land, veel zon-PV op daken en in veldopstellingen. Maar de grootste verandering is te zien op zee waar bijna 60 GW aan windenergie staat opgesteld.

De grootste bijdrage aan de inpassing van de grote vermogens hernieuwbaar komt door de conversie naar waterstof. 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.

In de woonwijken worden de elektriciteitsnetten geschikt voor veel elektrische toepassingen zoals elektrisch vervoer, elektrische warmtepompen en zon-PV. Een fijnmazig net van laadpunten voor het personenvervoer functioneert deels als buffersysteem. Bovendien heeft elk huishouden met zon-PV een batterij van circa 4 kW/8 kWh voor korte termijnopslag van elektriciteit uit zon en wind.

Om deze energiestromen mogelijk te maken worden de elektriciteitsnetten fors uitgebreid (LS-factor 3, MS-factor 5, HS-factor 2 + 53 GW wind op zee naar power-hubs) - zie Tabel 6.

Tabel 6 - benodigde capaciteiten elektriciteitsnet 2050

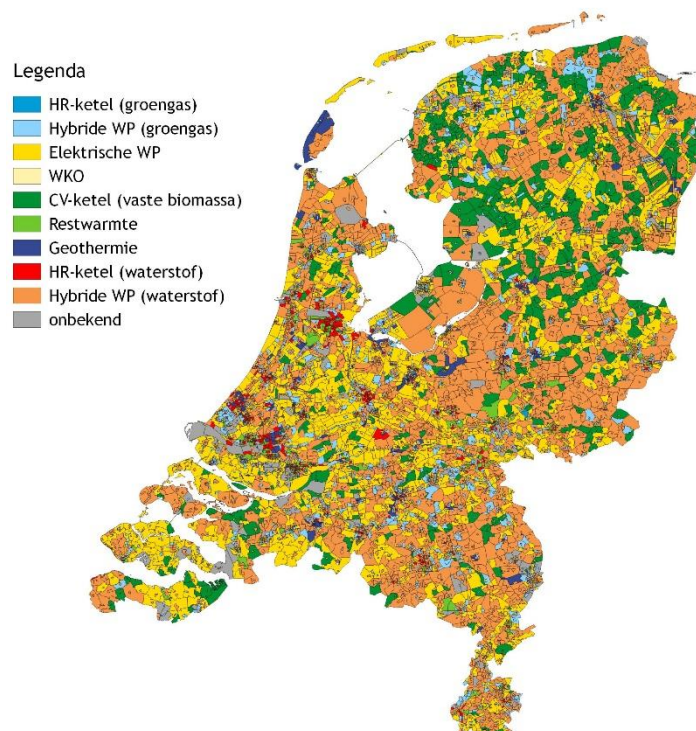
Capaciteit [GW]	Huidig		2050	
	Productie	Vraag	Productie	Vraag
Wind op Zee	1		53	
Hoogspanning	20	5	12	57
Middenspanning	6	10	19	22
Laagspanning	0	11	9	13

De gasnetten in de wijken worden grotendeels omgebouwd voor distributie van waterstof, in ieder geval in de wijken waar geen collectief systeem wordt aangelegd. Alle installaties bij huishoudens en bedrijven zullen vervangen worden door klimaatneutrale, zuinige installaties. Gasinstallaties bij huishoudens en bedrijven zijn geschikt voor waterstof.

Ook het regionale en landelijke gasnet zal geschikt worden gemaakt voor waterstof. Het waterstof zal gebruikt worden door de industrie, zowel voor feedstock als voor de energetische processen. Het gasnet zal niet significant hoeven te worden uitgebreid in transportcapaciteit, maar wel geschikt gemaakt moeten worden voor waterstof, en daarnaast zullen er in verschillende delen van Nederland verschillende soorten gassen worden geleverd.

Figuur 9 toont de verdeling van de oplossingen voor de lage temperatuur warmtevoorziening per wijk.

Figuur 9 - Lage temperatuur warmtevoorziening in het maatschappijbeeld 'Regie Nationaal'



4.5 Effecten op ruimte

De inpassing in dit systeem vergt nogal wat van het ruimtebeslag. Dat gaat om de grote hoeveelheden zonneparken, zon op daken, windparken op land en op zee, maar ook transformatoren, conversie- en opslagsystemen, extra kabels en hoogspanningslijnen zullen veel ruimte vergen.

De onderstaande tabel geeft een aantal indicatoren voor de hoeveelheid ruimte die gemoeid is met de lokale en nationale duurzame energieopwekking, alsmede een indicatie van het ruimtebeslag van de infrastructuurcomponenten.

	Ruimtebeslag (km ²)	Staat gelijk aan:
Wind op zee	7.600	13% van het Nederlands deel van de Noordzee, of 3,2x de Waddenzee (Nederlands deel).
Wind op land	2.000	5% Nederlands landoppervlakte. Dit staat ook gelijk aan 1,4x de oppervlakte van provincie Utrecht.
Zon-PV en zonneweides	(350)	
...waarvan op daken	180	44% van het totale dakoppervlakte van woningen en utiliteitsgebouwen.
...waarvan in veldopstellingen	180	2% van het grasland in Nederland, dit is ook gelijk aan de gehele grondoppervlakte van de gemeente Haarlemmermeer.
Elektriciteitsnet - HS ¹⁸	30	

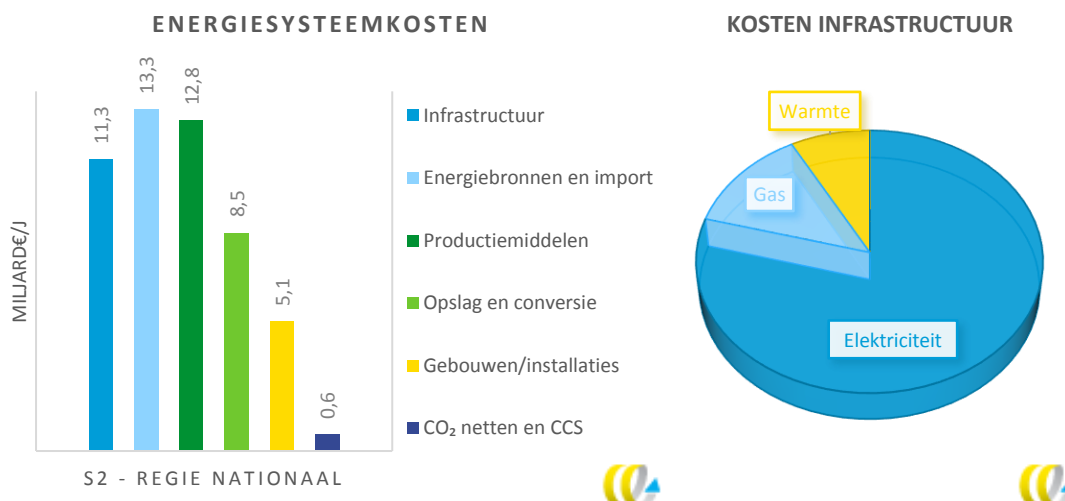
¹⁸ De infrastructuur op HS is geraamd in 'Landschap en Energie' (Sijmons, Dirk; Hugtenburg, Jasper; Hoorn, Anton van; 2014). In scenario's met sterke elektrificatie nemen we aan dat het ruimtebeslag voor hoogspanningsleidingen verdubbelt. En evenzo voor wat betreft het ruimtebeslag van stations.

	Ruimtebeslag (km ²)	Staat gelijk aan:
Gasnet - Transportleidingen	30	
Hoofdstations en distributiestationen ¹⁹	9	
Elektrolyse-installaties	50	

Het zichtbare ruimtebeslag van de grote hoeveelheden zonneweides, windparken en hoogspanningsmasten is groter, in de tabel is namelijk de hoeveelheid grondoppervlakte van de windparken opgenomen, maar de uitstraling naar het landschap is groter. Windparken zijn in grote delen van Nederland te zien. Er is natuurlijk ook nog een ondergronds ruimtebeslag, inclusief veiligheidscontouren voor de gasinfrastructuur.

4.6 Kosten en baten

De totale energiesysteemkosten²⁰ van dit scenario bedragen 52 miljard euro per jaar voor het totaal van Nederland. Deze zijn in volgende figuur weergegeven. Dit betreft jaarlijkse kosten, exclusief belastingen en heffingen. Deze kostenposten gaan direct of indirect bij de burger neerslaan.



Wat opvalt is een flinke bijdrage aan de totale kosten van infrastructuur (met name elektriciteit), en de kosten van de productiemiddelen elektriciteit. Dit komt door de grote opgestelde vermogens hernieuwbare elektriciteit. De kosten van de energie-infrastructuur zijn ongeveer driemaal zo hoog als de huidige kosten van infrastructuur, en bedragen 22% van de totale kosten van het energiesysteem.

Dit toekomstbeeld is kapitaalintensief en OPEX-extensief. De cumulatieve investeringsopgave voor de energietransitie bedraagt indicatief circa 300 miljard euro, waarvan circa 40% gemoeid is met de elektriciteit-, warmte-, gas en CO₂-infrastructuren, uitgaand van de kostenkennallen uit Bijlage A²¹.

¹⁹ Zie vorige voetnoot. Informatie over ruimtebeslag stations verkregen van Liander, aangevuld met inschattingen.

²⁰ In deze studie wordt uitgegaan van nationale kosten. Bijlage A geeft de details van de afbakening en berekening.

²¹ Dit is een indicatie; om het nauwkeuriger te ramen moet een tijdspadanalyse worden uitgevoerd, waarbij de transitie wordt doorgemaakt terwijl de technieken een leercurve doormaken.

Naast de 'kosten' zijn er ook 'baten' van dit toekomstbeeld (zie ook Paragraaf 2.4). In dit scenario zorgt een innovatieve circulaire industrie voor een andere manier van waarde toevoegen. Voor de handelsbalans is relevant dat er geen energie wordt geïmporteerd; wat ook een gunstig effect heeft op werkgelegenheid en blootstelling aan geopolitieke risico's. Daarnaast zal Nederland in dit scenario een sterke offshore energiesector ontwikkelen.

Doordat een groot deel van de kosten in dit scenario wordt veroorzaakt door kapitaallasten, zijn de kosten van het systeem gevoelig voor rente, maar niet gevoelig voor de prijs van energiedragers op de markt, zoals nu de olieprijs en in de toekomst wellicht de prijs van waterstof.

4.7 Conclusies voor de opgave

De energievoorziening in het nationale maatschappijbeeld samengevat in vijf punten:

- Grote investeringsopgave in wind op zee en de bijbehorende infrastructuur en opslagsystemen.
- Grote delen van de energievraag zullen worden geëlektrificeerd als onderdeel van de transitie naar het grotendeels gebruik van wind- en zonne-energie.
- De elektriciteitsnetten worden op alle niveaus verzwakt (LS-factor 3, MS-factor 3, HS-factor 2 + 53 GW wind op zee met de infrastructuren op zee). Realisering van dit toekomstbeeld vergt op het voor netbeheerders een forse inspanning.
- Gedeeltelijke aanpassing van het gasnet tot netten voor transport en distributie van waterstof.
- Daarnaast zijn er veel conversie- en opslagsystemen, conversie naar waterstof is belangrijk om de inpassing van hernieuwbare energie te verbeteren. Gasbuffers zorgen voor het opvangen van periodes als er langere tijd weinig hernieuwbare opwek is en bieden een vorm van strategische reserve.

Dit toekomstbeeld kent een zeer grote investeringsopgave in infrastructuur en productiemiddelen en forse landschappelijke impacts.

De landschappelijke impacts van windenergie op land zijn groot, maar ook een flink deel van de Noordzee wordt gereserveerd voor windparken, ook verder op zee (Doggersbank). De opgave om deze vermogens binnen 30 jaar te realiseren is zeer groot; het belangrijk op tijd te beginnen met investeren. Om in 2050 meer dan 50 GW aan windparken op zee operationeel te hebben, zal het tempo waarin deze worden ontwikkeld omhoog moeten, van de huidige 0,7 GW/j omhoog naar 2 GW/j.

Om het bouwtempo van hernieuwbaar én de inpassing te krijgen moeten er duidelijke incentives komen voor investeren in de verschillende vormen van hernieuwbare energie maar ook voor de verdere investeringen die nodig zijn om deze energie nuttig te kunnen aanwenden, waaronder dus conversie.

Het energiesysteem moet flexibeler worden, door middel van techniek, ICT en regulering om de fluctuerende output van vooral windenergie in te passen. Flexibele elektrificatie levert een bijdrage. Aanpassing van regulering van markten is nodig om de gewenste flexibiliteit en andere gewenste systeemadaptaties mogelijk te maken.

Realisatie van dit toekomstbeeld vergt voor de industriële transformatie verder zeer gericht industrieel beleid en samenwerken tussen bedrijven om productieclusters om te bouwen naar circulaire processen.

De huidige omvang van het personeelsbestand van veel partijen, niet alleen netbeheerders, lijkt te krap om deze opgave in 30 jaar te realiseren, dus de menselijke uitvoeringscapaciteit zal op het uittoltempo afgestemd moeten worden. Er is dus een behoefte aan technisch goed geschoold personeel.

5 Toekomstbeeld 'Internationaal'

5.1 Maatschappij en besluitvorming

De vorige twee toekomstbeelden hebben een sterke focus op de beleidskeuze dat Nederland zelfvoorzienend moet willen zijn op het gebied van de energievoorziening. Als we dat loslaten, en we baseren onze energievoorziening op een internationaal marktgeoriënteerd perspectief, met veel import en export, hoe ziet ons energiesysteem er dan uit?



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)'-scenario dat het Wuppertal Instituut heeft ontwikkeld voor het Rotterdamse haven-industriële cluster (Wuppertal Institute, 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 raffinage-complexen 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. Omdat CO₂-neutrale dragers (groen gas, waterstof) naar de gebouwen kunnen worden gedistribueerd en tegen gunstige kosten beschikbaar zijn, zal het minder makkelijk zijn om collectieve warmtesystemen met restwarmte of geothermie te ontwikkelen. Deze kennen immers in veel gevallen grotere integrale kosten.

5.2 Veranderingen in energiefuncties

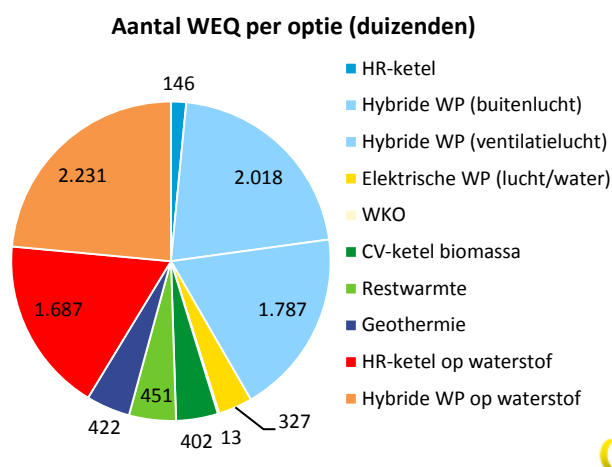
Bij **licht en kracht**²² daalt de vraag circa 25%, door efficiëntere apparaten en zuiniger processen. Daarnaast is er nog elektriciteitsvraag voor elektrolyse, elektrificatie in de warmtevoorziening en voor elektrisch transport.

In dit toekomstbeeld kan Nederland energiebronnen voor de **lage temperatuur warmtevoorziening**²³ importeren. Het kan dan gaan om vaste biomassa, voor pelletketels of collectieve systemen, maar het kan ook in de vorm van gasvormige dragers (groen gas, waterstof). Dit heeft twee gevolgen; als eerste is de beschikbaarheid van biomassa en groen gas groter, en ten tweede nemen de prijzen en kosten van de energiebronnen af wanneer vrije handel is toegestaan.

²² Bijlagen K en L gaan over de ontwikkelingen m.b.t. kracht en licht.

²³ Bijlagen M tot en met S beschrijven de ontwikkelingen in de lage temperatuur warmtevoorziening.

De afbeelding geeft de meest kostenefficiënte verdeling van warmteaansluitingen in dit scenario:



Noot: Definitie WEQ - woningequivalent: woning of 150 m² utiliteitsbouw.

Omdat in dit scenario grootschalige import van groen gas mogelijk is (er is een limiet gesteld t.a.v. 150 PJ/j), blijkt de hybride warmtepomp op buitenlucht en de hybride warmtepomp op ventilatielucht kosteneffectieve opties. Daarnaast is er de HR-ketel op waterstof en de hybride warmtepomp op waterstof. Tegen deze achtergrond hebben warmtenetten in slechts 6% van de aansluitingen de laagste kosten. Waterstofinfrastructuur is gemodelleerd als kostbaarder dan groen gasinfrastructuur, daardoor is waterstof niet emergent. Er zijn nauwelijks all-electric-aansluitingen door de relatief hogere kosten.

De **energievraag van de industrie**²⁴ (hoge temperatuur warmte, energiegrondstoffen, elektriciteit voor licht en kracht en proces) is in dit toekomstbeeld gebaseerd op een betrekkelijk ruime beschikbaarheid van internationale hernieuwbare energiebronnen en energiegrondstoffen. Daarnaast is CCS een oplossingsroute in dit scenario. De industrie is in dit scenario sterk getransformeerd naar geheel nieuwe biograndstoffen. Petrochemie en raffinagecomplexen veranderen sterk. Binnen de chemie zullen nafta krakers meer ethanol naar etheen gaan omzetten, of vergelijkbare processen hanteren. Het aandeel biograndstoffen in de chemie zal naar circa 50% gaan, en biocokes kan bijvoorbeeld voor cokes voor de hoogovens vervangen. Voor de industriële warmtevraag is er inzet van waterstof en bio-syngas en daarnaast ook elektrificatie. Er is nog enige inzet van fossiele energie, CO₂-emissies worden met CCS afgevangen indien een puntbron voldoende groot is. De totale industriële CO₂-emissies dalen met 95% ten opzichte van 2016.

Binnen **transport**²⁵ heeft personenvervoer een mix van 25% groen gas, 25% H₂-brandstofcel-elektrisch en 50% batterij-elektrisch. In het zware goederenvervoer hebben biobrandstoffen en groen gas beide een aandeel van 25% (verbrandingsmotor) en 50% wordt voorzien met waterstof (brandstofcel-elektrische aandrijving).

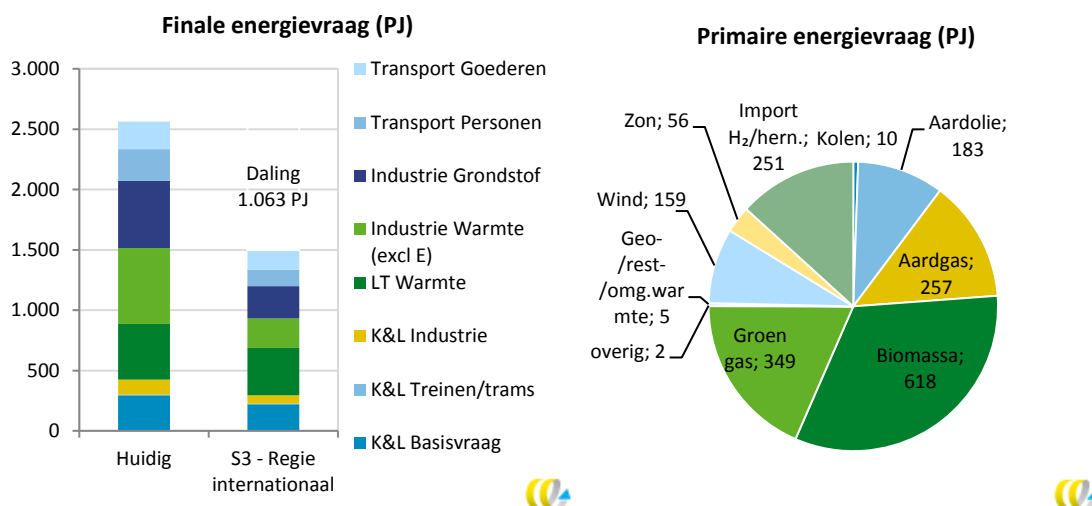
²⁴ Bijlagen T tot en met W gaan in op de mogelijke ontwikkelingen over de HT-warmtevraag.

²⁵ Bijlagen X tot en met AA gaan over mogelijke ontwikkelingen over de energievraag voor transport.

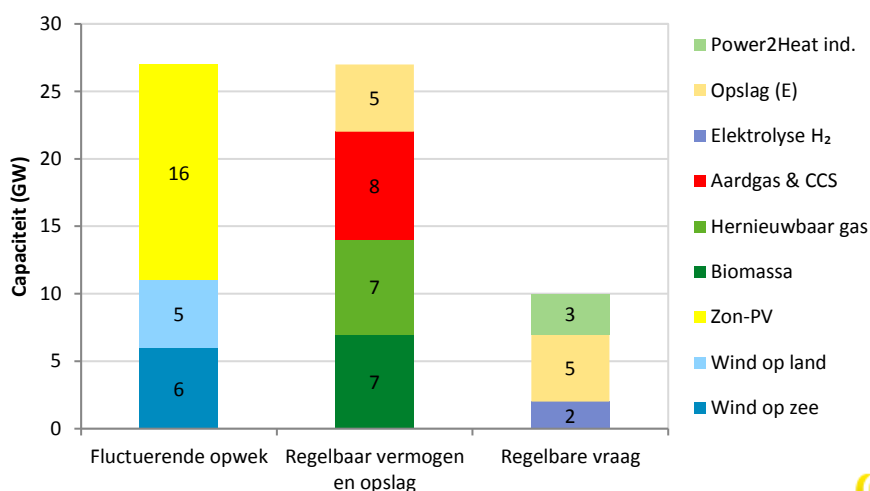
5.3 Energiebronnen en energiedragers; opwek en conversie

De volgende figuren tonen achtereenvolgens de ontwikkeling van de finale vraag in de energie-functies; de verdeling van primaire energiebronnen, en de opwekkingsmix voor elektriciteit die hierbij is verondersteld in dit toekomstbeeld. Zie Bijlage A voor de beschrijving hoe deze analyse is gedaan.

Figuur 10 - Finale energievraag per energiefunctie en verdeling van primaire energiebronnen (PJ/j)



Figuur 11 - Opgestelde capaciteiten aan variabele opwek, regelbaar vermogen, opslag en conversie (GWe)

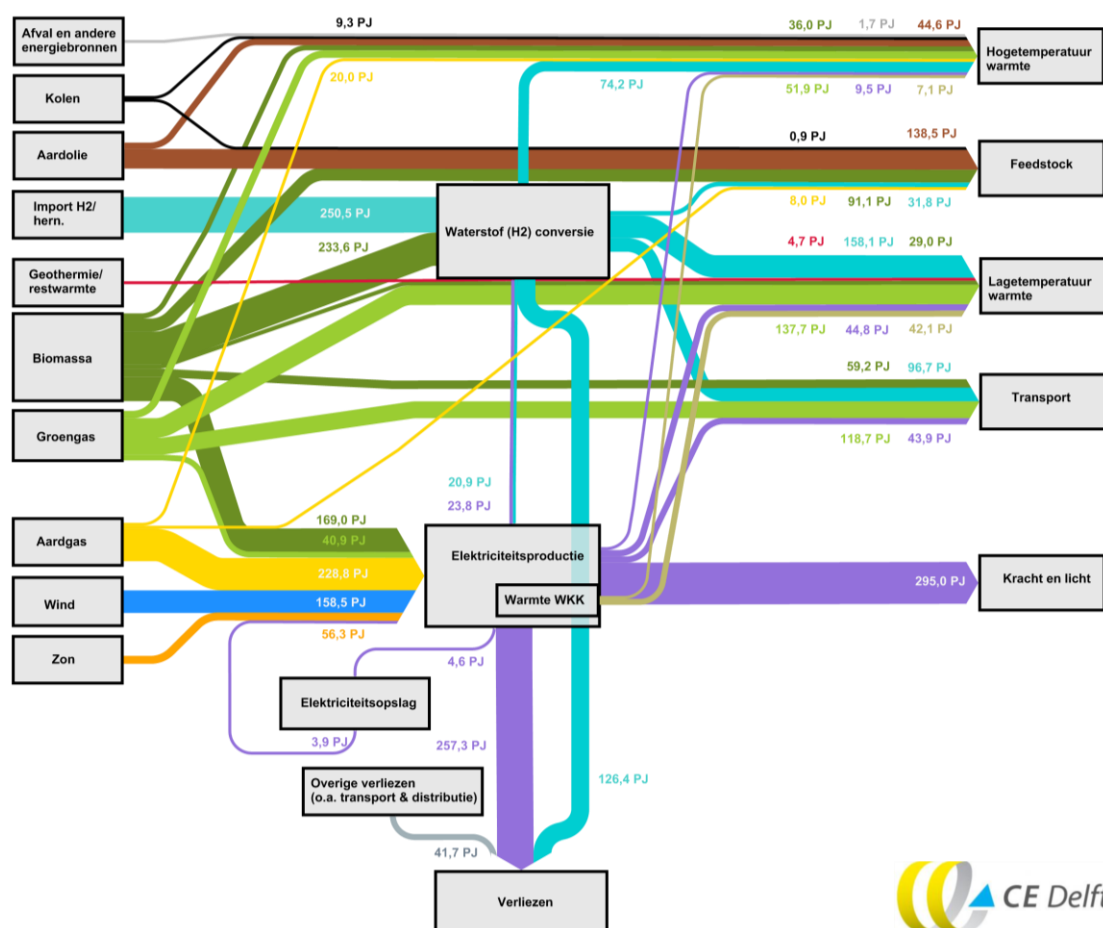


In zijn totaliteit is de energievraag in 2050 met ongeveer 40% gedaald ten opzichte van 2016. Dat het importeren van hernieuwbare energie mogelijk is in dit internationale scenario is de opwekkingsmix heel anders dan in de regionale en het nationale toekomstbeeld. Fluctuerende energiebronnen zoals zon en wind leveren nu een bijdrage van circa 10% aan de totale energiemix, de rest komt van energiebronnen die voor het overgrote gedeelte zullen worden geïmporteerd, zowel hernieuwbaar (biomassa en groen/hernieuwbaar gas) als fossiel. De opwekkingsmix voor elektriciteit laat nu ook zien dat de balans tussen vraag en aanbod meer gebeurt zoals dat vandaag de dag ook

gebeurt, met regelbare centrales, die in dit toekomstbeeld op hernieuwbaar gas of op biomassa draaien.

Het Sankey-diagram in Figuur 12 laat zien hoe de energiestromen in de uitgevoerde modellering lopen.

Figuur 12 - Sankey-diagram van de energiestromen (in PJ/j) voor toekomstbeeld 'Internationaal'



De energiestromen zien er behoorlijk anders uit dan in de zelfvoorzienende toekomstbeelden (regionaal en nationaal). Ten eerste valt op dat er een veel groter aandeel hernieuwbare energie uit groen gas en biomassa wordt gebruikt, en daarnaast is een behoorlijke stroom geïmporteerde waterstof en andere geïmporteerde hernieuwbare en CO₂-vrije energiedragers. Het gebruik van fossiele energie (met CCS) is in dit scenario forser, dit heeft te maken met het industrie scenario waarin een grotere rol is voor aardolie en afgeleide petrochemische grondstoffen. Het gebruik aan kolen is zeer beperkt. Wind en zon spelen een veel kleinere rol in dit beeld. De hoeveelheid biomassa die wordt geïmporteerd (voor alle functies) is gerelateerd aan de mondiaal beschikbare hoeveelheden, zie Bijlage F.

De totale jaarlijkse vraag naar elektriciteit (voor lage temperatuur warmte, vervoer, kracht en licht) bedraagt 390 PJ (op dit moment 425 PJ). Dit is dus behoorlijk goed vergelijkbaar met de huidige elektriciteitsvraag. De reductie in de basisvraag door besparing heeft dezelfde grootteorde als de substitutie die ontstaat door elektrisch vervoer en het aandeel (hybride) warmtepompen.

De productie van elektriciteit bedraagt 420 PJ uit een mix van bronnen, waaronder aardgas met CCS. De vraag naar waterstof voor de lage en hoge temperatuur warmtevoorziening en voor het transport bedraagt is 380 PJ. Een deel van de waterstof-energiedragers worden geïmporteerd, een ander deel van de waterstofbehoefte wordt uit vergassing van biomassa verkregen. Elektrolyse-waterstof heeft een gering aandeel.

5.4 Energie-infrastructuur, lokale effecten

Het beeld van Nederland verandert nauwelijks in dit toekomstbeeld: geen verdere toename van windturbines op land, wel veel zon-PV op daken, maar geen zonneweides en geen opslagsystemen. Alle installaties bij huishoudens en bedrijven zullen vervangen worden door klimaatneutrale, zuinige installaties. De gasinstallaties bij de huishoudens en bedrijven zijn geschikt voor waterstof of groen gas.

Lokaal en regionaal wordt in zeer beperkte mate elektriciteit geproduceerd die via het huidige net kan worden gebruikt, met flexibiliteitsmaatregelen kunnen de beperkte hoeveelheden zon en wind goed worden geacommodeerd.

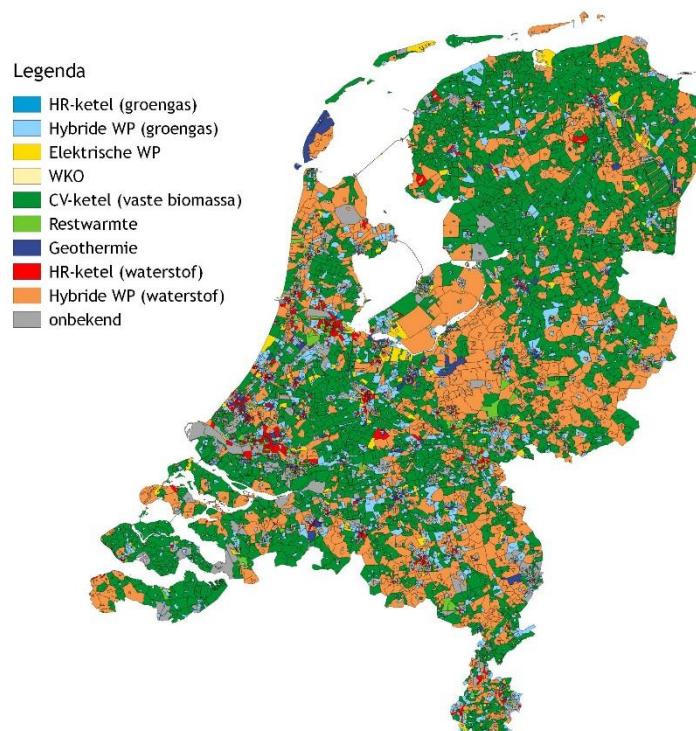
Door de beperkte elektrificering van het personenvervoer (vergeleken met de voorgaande hoofdstukken) zal het net van laadpunten beperkt van omvang zijn.

Tabel 7 - Benodigde capaciteiten elektriciteitsnet 2050

Capaciteit [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

Regionale en landelijke gasnetten zijn geschikt gemaakt voor waterstof. De gebouwde omgeving en de transportsector maken hier gebruik van, maar niet uitsluitend, in een deel van de woonwijken wordt het aardgasnet gebruikt voor groen gas. Daarvoor zijn geen aanpassingen nodig. In ander deel van de woonwijken heeft het gasnet plaatsgemaakt voor een warmtenet met lokale warmtebronnen, zowel geothermie als restwarmte van bedrijven en de industrie. Figuur 13 toont hoe de lage temperatuur warmtevoorziening er in de verschillende Nederlandse wijken uit ziet: een mix aan opties. In het landelijke gebied veel biomassa, in de steden en dorpen groen gas, waterstof en/of collectieve opties.

Figuur 13 - Lage temperatuur warmtevoorziening in het maatschappijbeeld 'Internationaal'



5.5 Effecten op ruimte

De inpassing in dit systeem vergt slechts een beperkter ruimtebeslag vergeleken met het ruimtebeslag van het energiesysteem zoals we dat vandaag de dag kennen.

De onderstaande tabel geeft een aantal indicatoren voor de hoeveelheid ruimte die gemoeid is met de lokale en nationale duurzame energieopwek, alsmede een indicatie van het ruimtebeslag van de infrastructuurcomponenten. Het gaat hier dan om het bovengrondse ruimtebeslag, waarbij de zichtbare uitstraling groter is. En daarnaast is er ook nog een ondergronds ruimtebeslag, in dit scenario ook voor bijvoorbeeld waterstofopslag.

	Ruimtebeslag (in km ²)	Staat gelijk aan:
Wind op zee	900	2% van het Nederlands deel van de Noordzee, of 40% van de Waddenzee (het Nederlandse deel).
Wind op land	760	2% Nederlands landoppervlakte. Dit staat ook gelijk aan de helft van de oppervlakte van provincie Utrecht.
Zon-PV en zonneweides	(165)	
...waarvan op daken	80	20% van het totale dakoppervlakte van woningen en utiliteitsgebouwen.
...waarvan in veldopstellingen	80	1% van het grasland in Nederland, dit is ook gelijk aan de helft van de grondoppervlakte van de gemeente Haarlemmermeer.

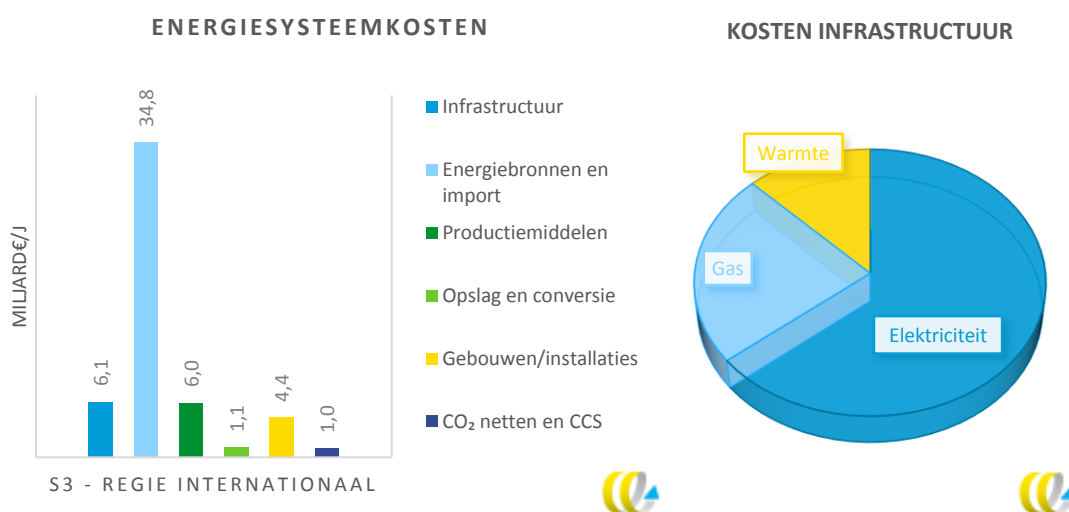
	Ruimtebeslag (in km ²)	Staat gelijk aan:
Elektriciteitsnet - HS ²⁶	15	
Gasnet - Transportleidingen	30	
Hoofdstations en distributiestations ²⁷	4	

Het ruimtebeslag voor de energie-infrastructuur is nauwelijks veranderd ten opzichte van nu. Wel heeft de import van biomassa gevolgen voor de havens en zal daar veel ruimte vragen.

5.6 Kosten en baten

De totale energiesysteemkosten²⁸ van dit scenario bedragen ongeveer 53 miljard euro per jaar voor het totaal van Nederland. Deze zijn in volgende figuur weergegeven, onderverdeeld naar de verschillende componenten van het energiesysteem. Dit betreft jaarlijkse kosten, exclusief belastingen en heffingen. Een deel van deze kostenposten gaan direct of indirect bij de burger neerslaan.

Wat opvalt is de relatief grote bijdrage aan de totale kosten van energiebronnen, deze zijn meer dan dubbel zo hoog als in de voorgaande twee toekomstbeelden. Dit komt door de omvangrijke import van energiebronnen. Daartegenover staat dat in dit scenario de kosten van infrastructuur en productiemiddelen (centrales, windparken) en opslag en conversie-eenheden (batterij-opslag, waterstofelektrolyse) veel beperkter zal zijn.



In dit scenario zijn de kosten van het energiesysteem voor een belangrijk deel bepaald door de kosten van de geïmporteerde CO₂-vrije energiedragers. Dit toekomstbeeld is dus OPEX-intensief. Prijsveranderingen hierin zullen dan ook direct doorwerken op de jaarlijkse kosten.

²⁶ De infrastructuur op HS is geraamd in Sijmons et al. 'Landschap en Energie'. In dit scenario verwachten we niet dat dit zich sterk anders zal gaan voordoen dan vandaag de dag.

²⁷ Informatie over ruimtebeslag stations verkregen van Liander, aangevuld met inschattingen. Zie verder vorige voetnoot.

²⁸ In deze studie wordt uitgegaan van nationale kosten. Bijlage A geeft de details van de afbakening en berekening.

De kosten van de energie-infrastructuur zijn, ten opzichte van het huidige kostprijsniveau, onder andere gestegen door het grotere aandeel warmtenetten en het geschikt maken van de gasnetten voor waterstof. Ze bedragen 11% van de totale systeemkosten.

De cumulatieve investeringsopgave t.b.v. de energietransitie bedraagt indicatief circa 80 miljard euro, waarvan circa 50% gemoeid is met de elektriciteit-, warmte-, gas en CO₂-infrastructuren, uitgaande van de kostenkanten uit Bijlage A²⁹.

Naast de 'kosten' zijn er ook 'baten' van dit toekomstbeeld (zie ook Paragraaf 2.4). Het internationale scenario verschilt in macro-economische structuur van de andere scenario's. Er is een innovatieve op biograndstoffen gebaseerde industrie, die nieuwe, klimaatneutrale producten maakt. Dit zorgt voor een andere manier van waarde toevoegen. Voor de handelsbalans is relevant dat er wel energie wordt geïmporteerd. Er is dus een blootstelling aan internationale markten met dus ook de geopolitieke risico's. Doordat een groot deel van de kosten in dit scenario wordt veroorzaakt door operationele kosten van de import van energiedragers, zijn de kosten van het systeem gevoelig voor schommelingen in de prijs hiervan. Daarentegen is er een lagere blootstelling aan risico's op de kapitaalmarkt.

5.7 Conclusie voor de opgave

De energievoorziening in het internationale maatschappijbeeld samengevat in vijf punten:

- de internationale markt voor duurzame energiegrondstoffen ontwikkelen en gebruiken;
- 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 en import-afhankelijkheid in het totale energiesysteem.

Nederland opereert in dit toekomstbeeld als handelsland op een wereldmarkt. Er is een rol voor de Rijksoverheid om een internationale markt in duurzame energiebronnen te ontwikkelen, via stabiele handelsrelaties en internationale samenwerkingsverbanden.

De grote import van onder andere biomassa in dit scenario is een 'achilleshiel' van dit toekomstbeeld: de duurzaamheid van de wereldwijde supply chains van biomassa en andere hernieuwbare energiegrondstoffen moet daarbij worden gegarandeerd. Het uitgangspunt zou moeten zijn dat de energietransitie in Nederland geen externe schade elders oplevert. Hier ligt een rol voor regie, door Nederlandse partijen, en ook in internationaal verband.

De transitie in onder andere de industrie zal niet vanzelf gaan, en vergt een langdurige oriëntatie. Ook hier ligt een regierol. De transformatie van huidige industriële netwerken naar biomassa-gebaseerde routes vergt een combinatie van samenwerken tussen bedrijven, het gericht aantrekken van nieuwe bedrijvigheid, ondersteund door innovatiebeleid.

De capaciteitsuitdaging voor de infrastructuur is minder groot dan in de voorgaande hoofdstukken behandelde toekomstbeelden. De ombouw van het aardgasnet naar netten voor transport en distributie van klimaatneutrale gassen zoals waterstof en bio-syngas is echter wel een flinke opgave. Daarnaast wordt in dit scenario ook warmtenetten aangelegd waar dat kosteneffectief is, wat investeringen behelst. Elektriciteitsinfrastructuur zullen op LS, MS, HS in gebieden moeten worden verzaamd in verband met de elektrificatie. Verandering van regulering is ook in dit scenariobeeld nodig om de gewenste systeemaanpassingen mogelijk te maken.

²⁹ Dit is een indicatie; om het nauwkeuriger te ramen moet een tijdspadanalyse worden uitgevoerd, waarbij de transitie wordt doorgemaakt terwijl de technieken een leercurve doormaken.

6 Toekomstbeeld ‘Generieke sturing’

6.1 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 energieoplossingen stimuleert (of remt), dus alle technieken hebben een kans.



Het ‘Generieke sturing’ scenario beschrijft hiermee een toekomstbeeld waarbij de transitie in de energievoorziening tot stand komt via een meer organisch proces zonder gerichte regie van overheid. Partijen nemen zelf beslissingen over individuele *businesscases*, waar CO₂-beprijzing in meegenomen wordt. Voor de investeringen die partijen doen in klimaatneutrale technieken is rechtsbescherming cruciaal, daarom is het beleid ten aanzien van de heffingen voorspelbaar en de tarieven liggen ruim van tevoren vast.

Hoewel de tarieven voor emissieheffingen in de loop naar 2050 toe stijgen en een steeds steviger prikkel gaan geven, ligt het tempo van de veranderingen in dit maatschappijbeeld lager dan in de andere maatschappijbeelden. Dit komt omdat burgers en bedrijven de transitie vormgegeven via een groot aantal grotere en kleinere (her)investeringen. Hoewel de klimaatkosten meegenomen worden in investeringsbeslissingen, wordt niet altijd een CO₂-neutrale techniek verkozen. Energieoplossingen die op enig moment nog een onrendabele top lijken te hebben, ook na de CO₂-beprijzing, vallen af.

Het klimaatneutrale energiesysteem dat er uiteindelijk dan toch is, is 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 door-geëvolueerd energiesysteem van 2017.

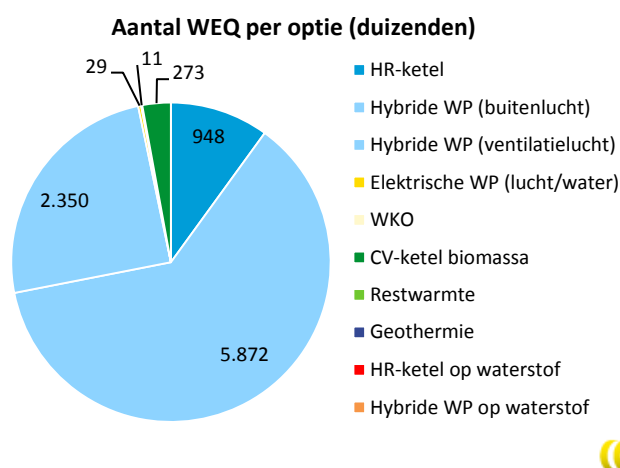
Burgers en bedrijven hebben geen grote problemen met CCS. CCS heeft daarom een grote rol in de industrie. De industrie is in kleine stapjes veranderd richting het ‘Technology Progress’-scenario dat het Wuppertal Instituut heeft uitgewerkt voor het Rotterdamse haven-industriële cluster (Wuppertal Institute, 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 over³⁰.

³⁰ De emissies die overblijven zijn wel duur, omdat de kosten van de uitstoot minstens 160 €/ton bedragen (scenario WLO Hoog, CPB; PBL, 2015). Dit kan het WLO-scenario ‘2 graden decentraal’ oplopen tot 1.000 €/ton.

6.2 Veranderingen in energiefuncties

Bij **licht en kracht**³¹ daalt de vraag circa 25%, door efficiëntere apparaten en zuiniger processen. Daarnaast is er nog elektriciteitsvraag in de warmtevoorziening en voor elektrisch transport.

In dit toekomstbeeld kan Nederland energiebronnen voor de **lage temperatuur warmtevoorziening**³² importeren. Het kan dan gaan om vaste biomassa, voor pelletketels, maar het kan ook in de vorm van gasvormige dragers (groen gas, waterstof). Het gebrek aan gerichte sturing zorgt dat collectieve oplossingen niet worden gerealiseerd, ook niet wanneer deze kostenefficiënt zouden zijn. Tevens wordt er vanwege het gebrek aan regie geen werk gemaakt van het omschakelen van wijken van aardgas naar waterstof. De beschikbaarheid van biomassa en groen gas, tegen relatief beperkte kosten, zorgt er daarentegen voor dat de lage temperatuur warmtevoorziening vooral bestaat uit individuele oplossingen. De hybride warmtepomp op buitenlucht en de hybride warmtepomp op ventilatielucht, beide in combinatie met groen gas, blijken het meest verkozen en vormen de warmteoplossing voor ruim 80% van de aansluitingen. Daarna volgt de HR-ketel op groen gas. *All-electric*-aansluitingen komen door de verhoudingsgewijs hogere kosten nauwelijks voor. De afbeelding geeft de verdeling van warmteaansluitingen:



Noot: Definitie WEQ - woningequivalent: woning of 150 m² utiliteitsbouw.

De **energievraag van de industrie**³³ is niet heel wezenlijk anders dan vandaag. Er is nog een flink deel gebruik van 'conventionele' fossiele bronnen, dezelfde bronnen die nu ook in de industrie gebruikt worden, maar dan met CCS. De industrie past - gestuurd door stevige emissieheffingen - gericht de best beschikbare technologie toe, waardoor de energie-efficiëntie in de meeste bedrijfstakken met 20-30% verbeterd door het autonoom toepassen van de best beschikbare technologie. Er zijn wel sluitingen van bedrijven. De petrochemie blijft grotendeels behouden, en tevens blijven de raffinage-complexen die verticaal zijn geïntegreerd met een petrochemisch cluster bestaan. Raffinaderijen die niet geïntegreerd zijn sluiten omdat de vraag naar fossiele brandstoffen zeer beperkt 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. Er blijven echter 8 mln ton emissies over. De emissies die overblijven zijn wel kostbaar voor de industrie om te compenseren, omdat de kosten van de

³¹ Bijlagen K en L gaan over de ontwikkelingen m.b.t. kracht en licht.

³² Bijlagen M tot en met S beschrijven de ontwikkelingen in de lage temperatuur warmtevoorziening.

³³ Bijlagen T tot en met W gaan in op de mogelijke ontwikkelingen over de HT-warmtevraag.

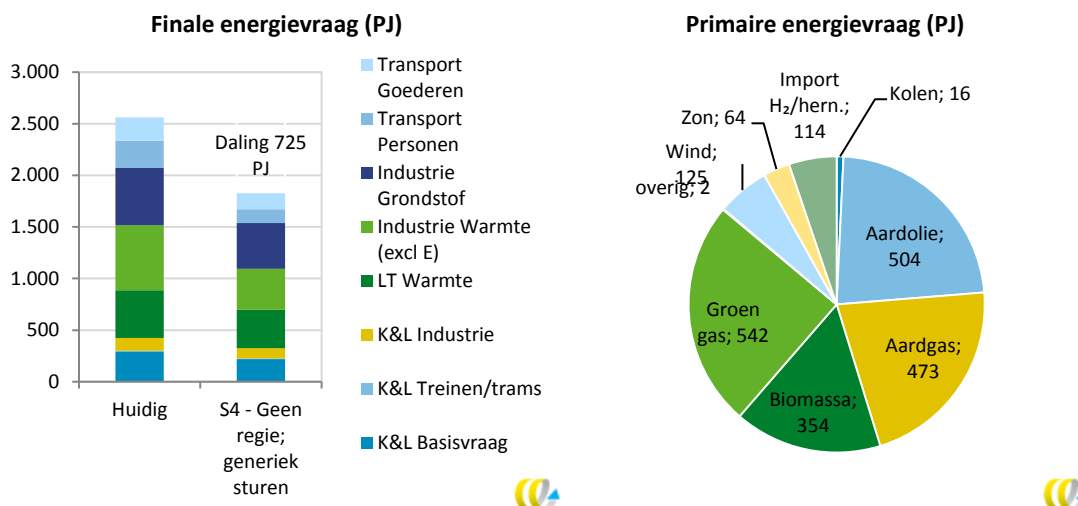
uitstoot minstens 160 €/ton bedraagt (Scenario WLO Hoog), maar dat kan oplopen tot 1.000 €/ton (WLO-scenario 2 graden decentraal).

Binnen **transport**³⁴ heeft personenvervoer een mix van 25% groen gas, 25% waterstof brandstofcel-elektrisch en 50% batterij-elektrisch. In het zware goederenvervoer hebben biobrandstoffen en groen gas beide een aandeel van 25% (verbrandingsmotor) en 50% is met waterstof (brandstofcel-elektrische aandrijving).

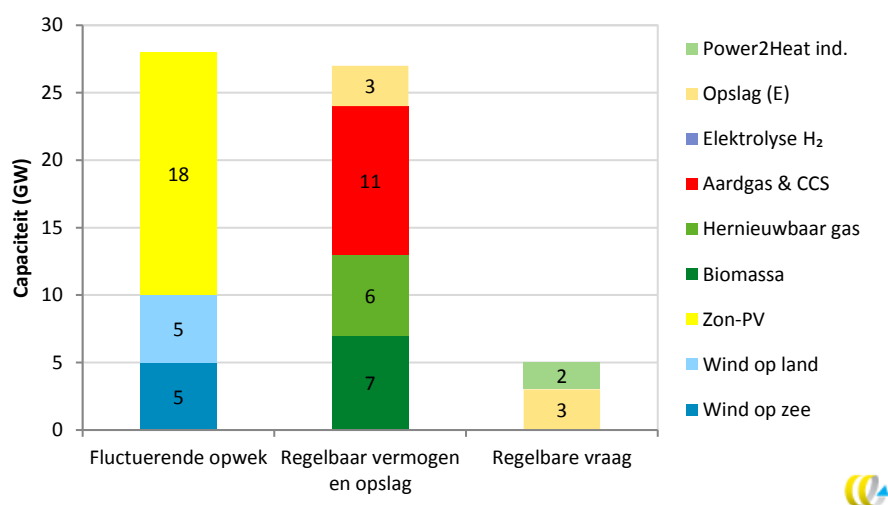
6.3 Energiebronnen en energiedragers; opwek en conversie

De volgende figuren tonen achtereenvolgens de ontwikkeling van de finale vraag in de energie-functies; de verdeling van primaire energiebronnen, en de opwekkingsmix voor elektriciteit die hierbij is verondersteld in dit toekomstbeeld. Zie Bijlage A voor de beschrijving hoe deze analyse is gedaan.

Figuur 14 - Finale energievraag per energiefunctie en verdeling van primaire energiebronnen (PJ/j)



Figuur 15 - Opgestelde capaciteiten aan variabele opwek, regelbaar vermogen, opslag en conversie (GWe)



³⁴ Bijlagen X tot en met AA gaan over mogelijke ontwikkelingen over de energievraag voor transport.

In dit toekomstbeeld is ondanks de veronderstelde stevige sturing met generieke instrumenten, de energievraag toch minder gereduceerd dan in de andere scenario's. Dit komt onder andere omdat de industriële processen een minder fundamentele transitie hebben ondergaan. De energievraag is met ongeveer een kwart gedaald ten opzichte van 2016.

Dat het importeren van hernieuwbare én fossiele energie mogelijk is in dit internationale scenario, is de opwekkingsmix heel anders dan in de toekomstbeelden 'regie regionaal' en 'regie nationaal'. Ten opzichte van het beeld 'internationaal' is de rol van CCS in dit toekomstbeeld groter, met een grotere rol voor aardgas + CCS. Fluctuerende energiebronnen zoals zon en wind leveren een bijdrage van circa 8% aan de totale energiemix, de rest komt van energiebronnen die voor het overgrote gedeelte zullen worden geïmporteerd, zowel hernieuwbaar (biomassa en groen/hernieuwbaar gas) als fossiel. De opwekkingsmix voor elektriciteit laat nu ook zien dat de balans tussen vraag en aanbod wordt gehandhaafd zoals dat vandaag de dag ook gebeurt: met regelbare centrales.

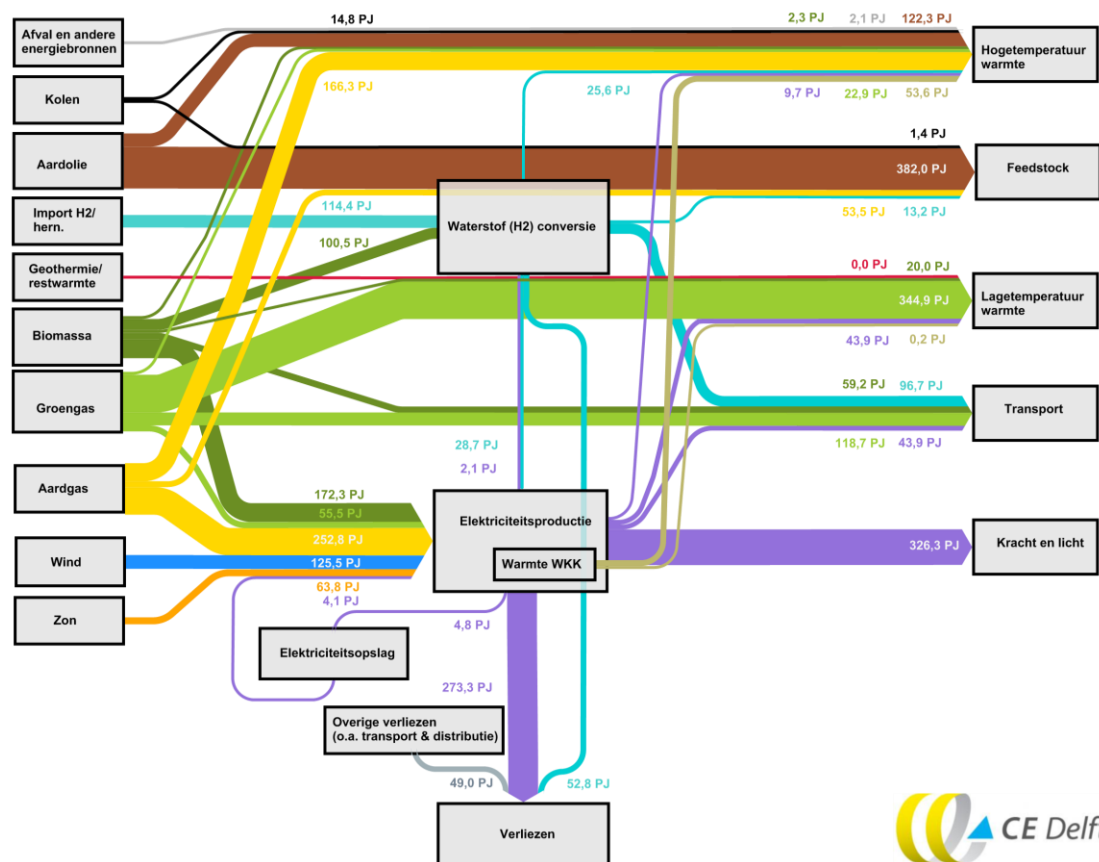
Het Sankey-diagram in Figuur 16 laat zien hoe de energiestromen lopen. De energiestromen zien er behoorlijk anders uit dan in de zelfvoorzienende toekomstbeelden (regionaal en nationaal) en in het internationale beeld. Ten opzichte van de regionale en nationale scenario's valt op dat er een veel groter aandeel hernieuwbare energie uit groen gas en biomassa wordt gebruikt. Het gebruik van fossiele energie (met CCS), aardolie en aardgas, is in dit scenario nog groot. Dit heeft te maken met het industrie scenario waarin in dit scenario de huidige petrochemische industrie min of meer blijft voortbestaan, onder toepassing van best beschikbare technologieën end of pipe oplossingen zoals CCS. Daarnaast is er voor aardgas een rol in elektriciteitsproductie. Wind en zon spelen in dit beeld geen grote rol.

De totale jaarlijkse vraag naar elektriciteit bedraagt 420 PJ, wat precies hetzelfde is als de huidige elektriciteitsvraag. De efficiencyverbetering is in dezelfde orde van grootte als de nieuwe vraag (elektrisch vervoer, industrie).

De productie van elektriciteit geschiedt met een mix van bronnen, waarbij aardgas met CCS de grootste is. De vraag naar waterstof is in dit scenario beperkt tot 160 PJ. Waterstof is in dit beeld vooral voor transport belangrijk is maar speelt daarbuiten geen grote rol. Het waterstof wordt vooral geïmporteerd en uit biomassa gemaakt.

De hoeveelheid biomassa die wordt geïmporteerd (voor alle functies) is gerelateerd aan de mondiaal beschikbare hoeveelheden, zie Bijlage F.

Figuur 16 - Sankey-diagram van de energiestromen (in PJ/j) voor toekomstbeeld 'Generieke sturing'



6.4 Energie-infrastructuur, lokale effecten

Het beeld van Nederland verandert nauwelijks in dit toekomstbeeld: geen verdere toename van windturbines op land, wel veel zon-PV op daken, maar geen zonneweides en geen opslagsystemen. Installaties bij huishoudens en bedrijven zullen stapsgewijs steeds meer vervangen worden door klimaatneutrale, zuinige installaties. De gasinstallaties bij de huishoudens zijn geschikt voor groen gas en de bedrijven zullen aardgas met CCS gebruiken.

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 de 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).

Door de gedeeltelijke elektrificering van het personenvervoer zal een net van laadpunten ontstaan.

Tabel 8 - Benodigde capaciteiten elektriciteitsnet 2050

Capaciteit [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

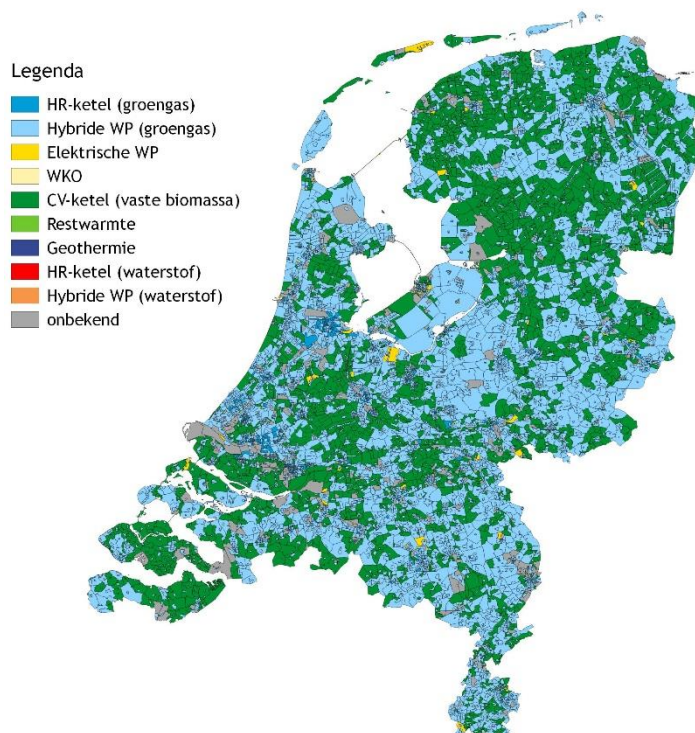
In de woonwijken zal het gasnetwerk blijven bestaan zoals het nu bestaat en groen gas gaan distribueren in plaats van aardgas. Warmtenetten met lokale warmtebronnen, geothermie en restwarmte van bedrijven en de industrie, komen nauwelijks voor.

Gasnetten zullen geschikt worden gemaakt voor de invoeding van groen gas, en op het landelijke niveau ook voor waterstof, omdat het zeer goed mogelijk is dat er veel waterstof wordt geïmporteerd. Het gasnet zal niet hoeven worden uitgebreid.

Hoewel de gasnetten in ieder geval op transportniveau geschikt gemaakt zijn voor waterstof, vindt er in dit scenario geen transitie naar de toepassing van waterstof in woonwijken plaats, want dit zou een niveau van regie behelzen.

Figuur 17 toont de verdeling van de oplossingen voor de lage temperatuur warmtevoorziening per wijk.

Figuur 17 - Lage temperatuur warmtevoorziening in het maatschappijbeeld 'Generieke sturing'



6.5 Effecten op ruimte

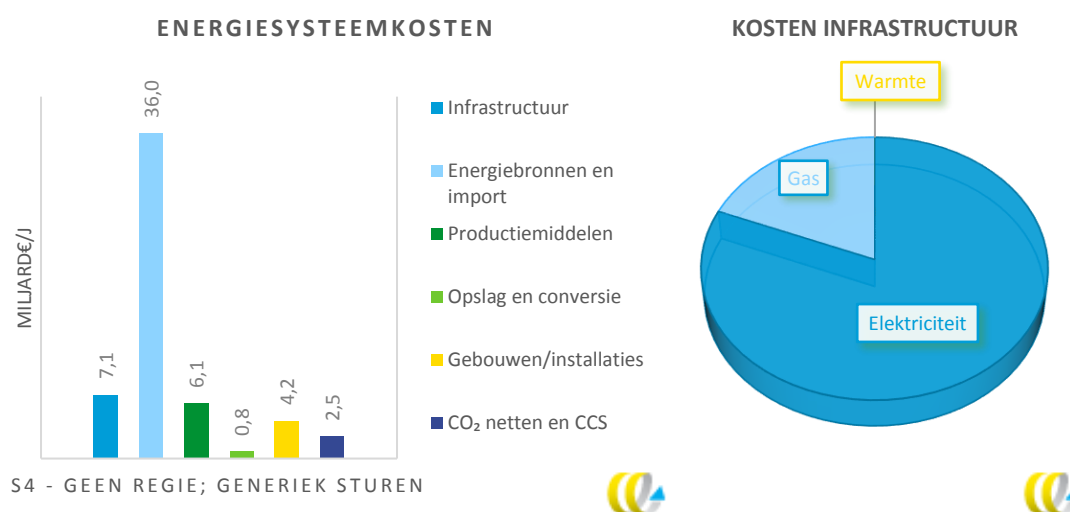
De inpassing in dit systeem vergt slechts een bescheiden extra ruimtebeslag vergeleken met het ruimtebeslag van het energiesysteem zoals we dat vandaag de dag kennen.

De onderstaande tabel geeft een aantal indicatoren voor de hoeveelheid ruimte die gemoeid is met de lokale en nationale duurzame energie opwek, alsmede een indicatie van het ruimtebeslag van de infrastructuurcomponenten. Het gaat hier dan om het bovengrondse ruimtebeslag, waarbij de zichtbare uitstraling groter is. En daarnaast is er ook nog een ondergronds ruimtebeslag. Tevens zal de import van biomassa toenemen en vooral in de havens z'n effect hebben en veel ruimte vergen.

	Ruimtebeslag (in km ²)	Staat gelijk aan:
Wind op zee	650	1% van het Nederlands deel van de Noordzee, of 30% van de Waddenzee (het Nederlandse deel).
Wind op land	700	2% Nederlands landoppervlakte. Dit staat ook gelijk aan de helft van de oppervlakte van provincie Utrecht.
Zon-PV en zonneweides	(190)	
...waarvan op daken	90	23% van het totale dakoppervlakte van woningen en utiliteitsgebouwen.
...waarvan in veldopstellingen	90	1% van het grasland in Nederland, dit is ook gelijk aan de helft van de grondoppervlakte van de gemeente Haarlemmermeer.
Elektriciteitsnet - HS ³⁵	15	
Gasnet - Transportleidingen	30	
Hoofdstations en distributiestations ³⁶	7	

6.6 Kosten en baten

De totale energiesysteemkosten³⁷ van dit scenario bedragen ongeveer 56 miljard euro per jaar voor het totaal van Nederland. Deze zijn in de onderstaande figuur weergegeven, onderverdeeld naar de verschillende componenten van het energiesysteem. Dit betreft jaarlijkse kosten, exclusief belastingen en heffingen. Een deel van deze kostenposten gaan direct of indirect bij de burger neerslaan.



Wat opvalt is de relatief grote bijdrage aan de totale kosten van energiebronnen, deze zijn meer dan dubbel zo hoog dan in de nationaal zelfvoorzienende toekomstbeelden. Dit komt door de omvangrijke import van energiebronnen. Daartegenover staat dat in dit scenario de kosten van infrastructuur en productiemiddelen (centrales, windparken) en opslag en conversie-eenheden (batterij-opslag,

³⁵ De infrastructuur op HS is geraamd in 'Landschap en Energie' (Sijmons, Dirk; Hugtenburg, Jasper; Hoorn, Anton van; 2014). We verwachten dat het ruimtebeslag van (E)HS in 'generiek sturen' niet sterk vergroot wordt.

³⁶ Informatie over ruimtebeslag stations verkregen van Liander, aangevuld met inschattingen. Op middenspanning en laagspanning wordt in dit scenario het net sterker verzwaid, wat een vergroot ruimtebeslag geeft in vergelijking met het internationale beeld.

³⁷ In deze studie wordt uitgegaan van nationale kosten. Bijlage A geeft de details van de afbakening en berekening.

waterstofelektrolyse) beperkter zal zijn. De kosten van de energie-infrastructuur zijn - in verband met de moeilijkheid voor de netbeheerder in de periode tot 2035 - circa tweemaal zo hoog als de huidige kosten van infrastructuur, en bedragen 13% van de totale systeemkosten.

Dit toekomstbeeld is OPEX-intensief, waarbij de kapitaalinvesteringen lager zijn. De cumulatieve investeringsomvang t.b.v. de energietransitie bedraagt indicatief circa 90 miljard euro, waarvan circa 60% gemoeid is met de elektriciteit-, warmte-, gas en CO₂-infrastructuren, uitgaande van de kostenkenticallen uit Bijlage A³⁸.

In dit scenario zijn de kosten van het energiesysteem dus grotendeels bepaald door de kosten van de geïmporteerde CO₂-vrije energiedragers. Prijsveranderingen hierin zullen dan ook direct doorwerken op de jaarlijkse kosten.

De kosten voor CO₂ netten en het afvangen van CO₂ zijn ook een duidelijke bijdrage in dit scenario.

Naast de 'kosten' zijn er ook 'baten' van dit toekomstbeeld (zie ook Paragraaf 2.4). Het 'Generieke sturing' scenario verschilt in macro-economische structuur van de andere scenario's. Een industrie die zich niet fundamenteel ontwikkelt richting klimaatneutraal en slechts beperkt innoveert, zal kwetsbaar zijn. Voor de handelsbalans is relevant dat er wel energie wordt geïmporteerd. Er is dus een blootstelling aan internationale markten met dus ook de geopolitieke risico's. Doordat een groot deel van de kosten in dit scenario wordt veroorzaakt door operationele kosten van de import van energiedragers, zijn de kosten van het systeem gevoelig voor schommelingen in de prijs hiervan. Daarentegen is er een lagere blootstelling aan risico's op de kapitaalmarkt. Op een aantal subjectieve gebieden scoort dit scenario wel goed. Er is bijvoorbeeld minder gerichte overheidsbemoediging met het energiesysteem, wat veel vrijheid laat aan burgers om te doen wat zij willen.

6.7 Conclusies voor de opgave

De energievoorziening in het maatschappijbeeld met generieke sturing samengevat in zes 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 bio-syngas, grote rol voor groen gas;
- CCS is onderdeel van de oplossing;
- groot aandeel variabele kosten in het totale energiesysteem;
- onduidelijkheid van ontwikkelingen zorgt ervoor dat netbeheerders meerdere infrastructuren tegelijk moeten faciliteren en netten zwaarder moeten dimensioneren.

Het generiek sturen vraagt om duidelijke en sterke instrumenten, die aan alle economische verkeer en alle beslissingen, op microniveau een krachtige prikkel geeft die er toe leidt dat hernieuwbare energie en CO₂-neutrale dragers worden gebruikt, ook bij eindgebruikers en doelgroepen die weinig affiniteit of kennis van het onderwerp hebben.

De snelheid van de transitie is in dit scenario een aandachtspunt. Teneinde de decarbonisatie-doelstelling in 2050 te halen moet een groot aantal individuele investeringsbeslissingen genomen worden, waarbij marktpartijen en burgers uit CO₂-neutrale technieken moeten kiezen. Dit geldt in alle scenario's maar in dit scenario wordt de investeringsbeslissing uitsluitend middels CO₂-prijsprikkels beïnvloed. Dit vereist een tijdig en krachtig prijssignaal dat niet ter discussie staat, om niet alleen de koplopers ('early adopters') maar ook het peloton en de achterblijvers ('laggards') in beweging te

³⁸ Dit is een indicatie; om het nauwkeuriger te ramen moet een tijdspadanalyse worden uitgevoerd, waarbij de transitie wordt doorgemaakt terwijl de technieken een leercurve doormaken.

krijgen. Als het prijssignaal niet tijdig gegeven wordt, dan moet de prijs te snel oplopen aan het einde van de periode tot 2050, leidend tot economische inefficiënties (kapitaalvernietiging) ofwel het niet behalen van de doelstelling.

CCS-infrastructuur is nodig in dit scenario. Er zal een CO₂-infrastructuur moeten worden ontwikkeld, ten behoeve van de bedrijven die hier gebruik van willen maken. De overheid kan hier wel in faciliteren of mee-investeren, om te borgen dat er een goede markt ontstaat voor CO₂-transport, en dat de alle partijen die dat willen van deze infrastructuur gebruik kunnen maken tegen eerlijke kosten.

Nederland opereert ook in dit toekomstbeeld als handelsland op een wereldmarkt. In dit kader is de grote import van biomassa een gevoelig punt: de duurzaamheid van de wereldwijde supply chains van biomassa en andere hernieuwbare energiegrondstoffen moet daarbij worden gegarandeerd. Het uitgangspunt zou moeten zijn dat de energietransitie in Nederland geen externe schade elders oplevert. Dit vraagt om aanvullende beleidsinstrumenten naast sturen op binnenlandse CO₂-emissies.

Voor de infrastructuur geldt dat realisering van dit toekomstbeeld voor netbeheerders een lastige opgave is, omdat er gedurende de transitie langdurig onduidelijkheid zal blijven in welke klimaat-neutrale energieoplossingen eindgebruikers zullen gaan investeren. Doordat zowel gas- als elektriciteitsnetten niet heel snel gerealiseerd kunnen worden, zullen de netbeheerders met een veelheid aan opties rekening moeten houden.

In feite komt dit erop neer dat netbeheerders in zekere zin met alle eerder behandelde toekomstbeelden - 'regie regionaal', 'regie nationaal', en 'internationaal', rekening zullen moeten houden (maar dan zonder de extremen in wind op zee, op land of zon-PV). Dat betekent dat netbeheerders toch fors zullen gaan verzwaren, op alle niveaus.

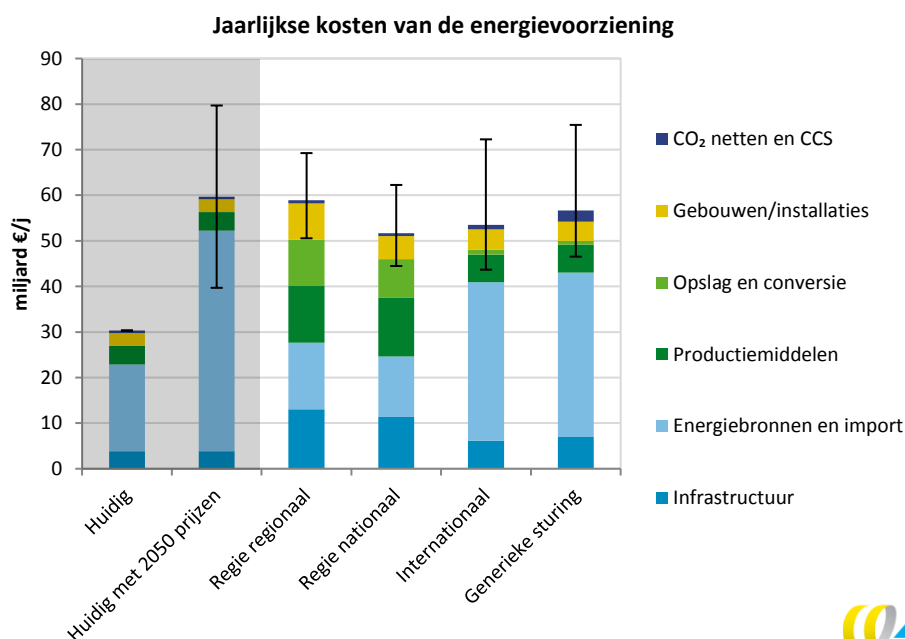
Pas rond 2035 zal bezien kunnen gaan worden in welke richting de transitie nu feitelijk tendeert. Tegen die tijd zal een deel van de netten overgedimensioneerd zijn - maar welk deel is op voorhand niet te voorspellen.

7 Conclusies

7.1 De netbeheerders houden veel wegen open

Om in 2050 een CO₂-neutrale samenleving te bereiken, zal de energievoorziening de komende decennia ingrijpend moeten veranderen. Maar hoe precies deze energietransitie vorm moet krijgen, is nu nog onduidelijk. Met verschillende scenario's proberen de beheerders van het energienet in Nederland daarom grip te krijgen op de mogelijke ontwikkelingen. Want de transitie zal de energie-infrastructuur voor de 2050 bepalen. En de investeringskeuzes van de netbeheerders kunnen de transitie versnellen.

Er staan veel wegen open om het doel van een klimaatneutrale energievoorziening te realiseren waarbij de soort bronnen en mate van import sterk verschillen. De totale kosten van elk beeld verschillen niet noemenswaardig; de kosten stijgen grofweg met 25 tot 30 miljard euro per jaar. Maar dat geldt ook voor een business as usual toekomstbeeld zoals in volgende figuur weergegeven. De onzekerheden zijn erg groot waarbij de toekomstbeelden met veel import gevoelig zijn voor de prijs van CO₂-vrije brandstoffen op de wereldmarkt, en de toekomstbeelden met regionale of nationale zelfvoorzienendheid gevoelig zijn voor kapitaalkosten. Het aandeel infrastructuur en energiebronnen verschilt echter wel sterk (van 13 tot 23%).



Voor alle toekomstbeelden geldt dat er naast de kosten ook (maatschappelijke) baten zijn zoals werkgelegenheid, luchtkwaliteit, beperken van klimaatverandering, deze verschillen in de scenario's. Deels liggen ze ook in de risico-sfeer (geopolitiek, energie-zelfvoorzienendheid, mate aan blootstelling van prijsvolatiliteit energiedragers). Op basis van een nauwe beschouwing van alleen de systeemkostenkant kan geen oordeel gevormd worden over de aantrekkelijkheid van de geschetste scenario's.

In de beelden “regionaal” en “nationaal” wordt de infrastructuur voor elektriciteit en warmte fors uitgebreid. Er is behoefte aan veel eigen energieproductie, dus de netten moeten deze vraag aankunnen. In de beelden “internationaal” en “generiek” groeit de duurzame elektriciteitsproductie slechts beperkt.

Tabel 9 - Benodigde capaciteiten elektriciteitsnet 2050

Capaciteit [GW]	Huidig	Regie regionaal	Regie Nationaal	Internationaal	Generieke sturing
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

Als er niet wordt gekozen, moeten de netbeheerders zich voorbereiden op bijvoorbeeld het beeld “regionaal” terwijl misschien over dertig jaar blijkt dat het beeld “internationaal” is gerealiseerd. Daar is veel minder infrastructuur voor nodig, wat leidt tot hogere maatschappelijke kosten. In het toekomstbeeld “generieke sturing” zijn deze kosten opgenomen voor de infrastructuur.

Er zijn kortom veel mogelijkheden om een klimaatneutrale energievoorziening te realiseren. Elk met verschillen in kosten, acceptatie bij de burgers, snelheid van realisering, en ook in baten, zoals mogelijkheden voor business en banen.

- In de beelden “Regie regionaal” en “Regie nationaal” is het mogelijk om te sturen op een energiesysteem dat goeddeels draait op Nederlandse hernieuwbare energie, hetzij via een mix van decentrale en centrale technieken, dan wel via een mix van centrale technieken met vooral veel wind op zee.
- In het beeld “Internationaal” kan de energietransitie via geïmporteerde bronnen plaatsvinden, waarbij de investeringen in elektriciteitsnetten en andere harde assets veel lager zijn.
- In het beeld “Generieke sturing” zal naast import ook fossiel + CCS een belangrijke optie zijn. Daarom is een keuze nodig over de rol van de netbeheerders bij het transport en opslag van CO₂. Als CO₂-opslag vanaf 2020 een rol van betekenis moet gaan spelen (toekomstbeeld 1 en 2 is die rol zeer beperkt, maar in toekomstbeeld 4 fors), dan moet die eventuele rol van de netbeheerder snel duidelijk zijn.

7.2 Elektriciteit én CO₂-vrij gas zijn de energiedragers voor de toekomst

Omdat de energiebronnen klimaatneutraal worden (zon, wind, biomassa, aardgas + CCS) zullen ook de energiedragers gas, elektriciteit en warmte klimaatneutraal worden. De afgelopen jaren is helder geworden dat de inzet van zon en wind z’n beperkingen heeft, zowel in volume (het is niet mogelijk om de hele Nederlandse energievraag met zon en wind te dekken) als in balanceren van vraag en aanbod op elk moment. Daarom zal hernieuwbaar gas een belangrijke rol spelen. Gas is een kosteneffectieve oplossing om energieoverschotten langdurig op te slaan. Flexibiliteit (bij tekort: vraag verschuiven, bij overschot: extra vraag creëren zoals warmtebuffering, power-to-heat) zal bijdragen aan de optimalisering van de kosten van het elektriciteitssysteem. Het zal echter nauwelijks een oplossing zijn voor de situatie 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 om centrales van in totaal circa 20 GW (net zoveel als de huidige kolen- en gascentrales) die in een gering aantal uren per jaar de investering moeten terugverdienen. In de transportsector nemen hernieuwbare gassen (biogas, waterstof) samen met elektriciteit de rol van benzine en diesel over.

Er treden forse veranderingen op in alle vraagfuncties (industrie, lage temperatuurverwarming, vervoer, kracht & licht), waarbij substitutie door elektriciteit een duidelijke trend is. Een forse toename van elektriciteit uit zon en wind is een robuuste ontwikkeling. Zodra er echter steeds meer capaciteit voor wind en zon bij komt, zal op een gegeven moment een substantieel deel van de jaarproductie niet meer rechtstreeks gebruikt kunnen worden omdat die niet gelijk met de vraag naar elektriciteit plaatsvindt. De capaciteiten aan productievermogen, flexibel vraagvermogen en opslagvermogen verschillen sterk per toekomstbeeld.

Tabel 10 - Elektriciteitsaanbod, flexvraag en flexopties 2050

Vermogen (GW)	Toekomstbeeld Regie regionaal	Regie Nationaal	Internationaal	Generieke sturing
Elektriciteit				
Zon-PV	84	34	16	18
Wind op land	16	14	5	5
Wind op zee	26	53	6	5
Flexvraag	140	120	10	5
Opslag	63	50	5	3

De huidige tariefstelling voor infrastructuur zorgt niet voor de aanleg van een optimale infrastructuur. Om 84 GW zon-PV te bewerkstelligen zal zonder aanpassing van de huidige vrijstelling van transportkosten voor producenten de capaciteit moeten verviervoudigen terwijl het aantal uren dat deze capaciteit wordt gebruikt zeer klein is. De huidige prikkels naar de gebruikers zijn niet zodanig dat die hun vraag (of eigen productie) aanpassen. Het regulerend kader moet daarom in alle toekomstbeelden worden aangepast.

Zonder aanpassing van de regulering zorgt het gelijktijdig gebruik van warmtepompen én elektrisch vervoer daarnaast in alle toekomstbeelden voor een forse verzwaring van de netten. Met de huidige tarieven kunnen gebruikers met deze apparatuur zonder extra kosten het net gebruiken terwijl de gelijktijdigheid sterk toeneemt en de kosten over alle gebruikers worden uitgesmeerd. Er zal nagedacht moeten worden of deze gebruikers niet een prikkel moeten krijgen door de extra kosten ook aan hen toe te rekenen.

De kostprijs van elektriciteit wordt niet, zoals sommigen denken, nihil. 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 generiek sturen beeld 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 ct-5 ct/kWh in het generiek sturen scenario. Daarbij zijn de kosten voor het openhouden van de verschillende opties inbegrepen.

Elektriciteit	Toekomstbeeld Regie regionaal	Regie Nationaal	Internationaal	Generieke sturing
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 exclusief de inzet van elektrolyse en conversie naar H₂. 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. De kosten van gasbuffers zijn bij 'gas' geteld.

**** De kosten voor infrastructuur zijn weergegeven als de totale nationale infrastructuurkosten gedeeld door het volume aan geleverde elektriciteit. Deze weergave is dus niet hoe infrastructuurkosten momenteel in rekening worden gebracht.

Ombouw aardgas naar hernieuwbaar gas

Ondanks een toename van de elektrificatie zullen ook nieuwe schone gasen nodig zijn om de huidige fossiele brandstoffen in met name de industrie en het vervoer te vervangen. Het aardgas zal geleidelijk worden vervangen door meerdere CO₂-vrije gasen zoals groen gas, waterstof, biogas en bio-syngas (H₂ en CO van biogene herkomst).

De belangrijke toekomstige rol van waterstof in de industrie is eigenlijk geen onzekerheid meer, met de concrete projecten die momenteel tussen industriële clusters in Rotterdam, Zeeland en Groningen worden vormgegeven.

In de woonwijken, waar het aardgas vervangen wordt door een klimaatneutraal gas, zal de transitie schoksgewijs gaan doordat van de ene op de andere dag moet worden overgeschakeld van aardgas naar bijvoorbeeld waterstofgas. In het landelijke net kan het meer stapsgewijs gaan doordat parallelle transportpijpleidingen 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. Distributie van *aardgas* zal niet meer voorkomen. In gebieden met collectieve systemen (vooral in toekomstbeeld Regionaal) zal gasdistributie naar huizen verdwijnen, meteen bij de aanleg van een warmtenet, of na een overgangperiode. In andere toekomstbeelden zal de gasinfra worden omgebouwd naar distributie/transport van hernieuwbare gasen, zoals waterstof.

De hoeveelheid te transporteren en distribueren gas verschilt sterk per toekomstbeeld, van 750 PJ in het beeld Regionaal tot 1500 PJ in beeld Generiek. Het gaat hier om het totaal aan gasvormige energiedragers, dus zowel aardgas, groen gas en waterstof. De manier waarop verschilt sterk per scenario. Zo gaat er in de beelden Nationaal en Internationaal waterstof naar de stedelijke distributie, terwijl in de beelden Regionaal en Generiek een rol is weggelegd voor groen gas.

De kosten van gas stijgen van € 5 per GJ (15 ct per m³) naar 12-25 € per GJ.

Tabel 11 - Totaal gasvormige energiedragers (aardgas, groen gas, waterstof)

Gas	Toekomstbeeld Regie regionaal	Regie Nationaal	Internationaal	Generieke sturing
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	0,60	0,50	0,40
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 scenario's).

De Rijksoverheid zal een keuze moeten maken tussen meer regie met duidelijkheid over de vraag waar en wanneer gasnetten verdwijnen en aan de andere kant meer keuzevrijheid voor energiegebruikers. De regelgeving zal aangepast moeten worden zodat het mogelijk wordt om gasnetten met andere kwaliteiten toe te passen.

De gasnetten zullen geschikt gemaakt moeten worden voor waterstof t.b.v. levering en opslag-faciliteiten. Dit geldt in ieder geval voor transportleidingen (GTS) maar mogelijk ook voor netten voor de distributie. De transportleidingen zullen ook verschillende andere CO₂-neutrale gasnetten moeten vervoeren.

Voor de warmtevraag in de gebouwde omgeving zal met vele lokale partijen gezocht gaan worden naar de beste invulling per locatie. Onderdeel hiervan is een optimaal gebruik van de gasinfrastructuur om tegen de laagste maatschappelijke kosten en met het grootst mogelijke draagvlak de verwarming klimaatneutraal te maken.

De distributie en eindtoepassing van waterstof, inclusief verbranding in hybride-warmtepomp (en HR-ketel) is onderdeel van een aantal beelden. Dit kan een kansrijke en betrekkelijk kosteneffectieve optie zijn, maar er is nog wel R&D en innovatie nodig om dit te verwezenlijken (technische- en veiligheidsaspecten). Nederland vervult op dit gebied nu al wel een voortrekkersrol met de ontwikkelingen in de industrie.

Warmtenetten

Vooral toekomstbeeld Regionaal vergt forse investeringen in warmtenetten. In de beelden Nationaal en Internationaal is er een beperkte, maar wel grotere dan de huidige rol voor warmtenetten. Duidelijkheid over het transport van warmte, en ook over de rol van netbeheerders daarbij is noodzakelijk. Het huidige wettelijk kader lijkt niet toereikend (ook niet de vernieuwde Warmtewet) om een belangrijke rol voor warmtelevering mogelijk te maken. De vraag is of netbeheerders een rol moeten spelen bij de aanleg en het beheer van transportnetten, inclusief het systeembeheer.

De winterpiek - het overbruggen van de seizoenen met opslag

De netbeheerders (gas, elektriciteit en warmte) moeten ervoor zorgen dat ze ook in extreme situaties, zoals langdurige koude periodes voldoende energie leveren. Dat is een uitdaging. Want veel mensen hebben de indruk dat met name bij de verwarming van gebouwen de elektriciteit die zomers te veel is opgewekt in de winter gemakkelijk van het net kan worden gehaald. Maar een koude winter, met gedurende langere tijd geen zon en weinig wind zal ondanks de klimaatverandering toch regelmatig voor blijven komen. Seizoensopslag en productie van elektriciteit voor deze extreme momenten zijn wezenlijke uitdagingen waarbij het de vraag is of de markt daar met de huidige regels mee uit de voeten kan.

In alle scenario's is een vergroting van de seizoensopslag nodig. Dat is altijd in de vorm van gasvormige drager in lege gasvelden of zoutcavernes, en betreft een volume van 9-11 miljard m³ (aardgas-equivalent).

In alle toekomstbeelden is een omvangrijk productie-park van snel reagerende elektriciteitscentrales (gasturbines, gasmotoren) inbegrepen, dit is naast opslag in accu's nodig om periodes zonder hernieuwbare productie te overbruggen.

De zomerpiek met veel (over)productie van hernieuwbaar kan voor problemen zorgen als er onverwachtse fluctuaties zijn. In de beelden met veel hernieuwbare energie zorgt de opslag in accu's voor opvangen van korte termijn terugval van hernieuwbaar. Overschotten kunnen worden geladen, omgezet in warmte, of uiteindelijk worden 'gecurtailed'.

Grondstoffen

Als ook de productie van grondstoffen verduurzaamt, zoals de inzet van waterstof voor kunstmest en chemische industrie, kan de vraag naar elektriciteit en/of waterstof fors toenemen. Bovendien zou deze switch een belangrijke stap voor de vergroting van het aandeel van waterstof als energiedrager kunnen zijn. In het meest extreme scenario staat 58 GW offshore windvermogen opgesteld, die dan grotendeels gebruikt wordt om waterstof te maken voor de verschillende energiefuncties. Zeker is dat allerminst. Want ook biomassa kan als substituuut gaan optreden en dat heeft dan weer weinig gevolgen voor de gas en elektriciteitsinfrastructuur.

Vervoer

De impact van de substitutie van benzine/diesel naar elektriciteit voor het personenvervoer en mogelijk ook voor een deel van het vrachtvervoer, is evenmin helder. Het is nog niet duidelijk of elektrische auto's vooral thuis of bij de werkplek zullen worden geladen en wie de meters van de infrastructuur beheert. De verwachting is wel dat de vraag beheersbaar zal worden en dat de voertuigen geladen zullen worden op momenten dat het systeem optimaal is.

De netbeheerders zullen de komende jaren de laadinfrastructuur voor elektrische auto's mogelijk blijven maken en de netten daarvoor verzwaren, volgend aan de behoefte op woon en werklocaties. De onzekerheden die er op de middellange termijn bestaan, bijvoorbeeld rond wat autonoom rijden betekent voor het aantal auto's en de behoefte aan laadinfrastructuur, zullen samen met de betreffende stakeholders scherp in de gaten gehouden worden, zodat ze geleidelijk kunnen worden opgelost.

7.3 Transitie vergt snel, actief overheidsbeleid

Fossiele energie wordt niet vanzelf vervangen door klimaatneutrale energie, tenzij de overheid forse incentives als beprijzing of regulering invoert. Bovendien dringt de tijd omdat 32 jaar krap is voor vervanging, aanpassing en introductie van nieuwe infrastructuur en installaties bij de energiegebruikers en energiebronnen. Als we lang wachten met het uitvoeren van de energietransitie zal er onvoldoende tijd en onvoldoende werknemers beschikbaar zijn om alle maatregelen voor te bereiden en uit te voeren. Een Klimaatneutraal Nederland in 2050 is dan niet haalbaar.

Duidelijkheid over de manier waarop een forse reductie van de vraag naar energie tot stand komt, ontstaat niet vanzelf. Daarvoor zijn normen voor energie-efficiëntie en prijsprikkels nodig. Slimme meters en goede afreken-systemen kunnen daarbij een belangrijke rol spelen. Er is op zeer korte termijn duidelijkheid nodig over welke eisen gesteld moeten worden aan die meters en de afreken-systemen, omdat de ontwikkeling hiervan tijd kost en de implementatie vele jaren vergt.

Uit de vier toekomstbeelden komt de vraag naar voren in hoeverre de overheid de regie neemt naast de introductie van sterke CO₂-gerichte incentives, zoals beprijzing en regulering?

Enkele vragen:

- Keuze voor technieken en energiedragers: concentreren, gericht stimuleren of vrij laten ontwikkelen?
- Keuzevrijheid beperken - hoe socialiseer je kosten?
- Hoe betrek je eindgebruikers zodat ze voldoende snelheid gaan maken?
- Moeten we tegelijk sturen op maatschappelijke centrale oplossingen én op regionale/decentrale regie, want we moeten versnellen op alle niveaus?
- Welk plan/traject is er voor ogen, liggen we op schema, en welke interventies liggen er op de plank?

Rechtvaardige kostentoedeling

De kostenstijging van een duurzame energievoorziening is evident.

Kostentoerekening en -verdeling is daarom essentieel. Kostentoerekening zorgt voor impulsen bij verbruikers en producenten om de totale kosten van het systeem zo laag mogelijk te houden.

Het is echter nog niet helder of iedereen die kosten altijd kan dragen. Het is evenmin duidelijk hoe “eerlijke” flexibele nettarieven eruit zouden moeten zien.

Welke kosten moeten gesocialiseerd worden (of lopen via de algemene middelen) met als gevolg dat er geen of slechts een kleine prikkel is om kosten te beperken. Dat is een afweging die nadrukkelijk bij de overheid ligt.

Systeemkeuze: Kleinschaligheid of import in relatie tot zelfvoorziening

Er is een trend naar kleinschaligheid en regionale zelfvoorziening, dit heeft veel draagvlak bij een deel van de bevolking. Lokale energieprojecten leiden (bij weer een ander deel van de bevolking) echter ook tot veel weerstand (gaswinning, wind, zon-PV, CCS, bio-warmte). Daarnaast kent maximaal inzetten op regionale zelfvoorziening boven een bepaald niveau ook hogere kosten, voor het energiesysteem als geheel en/of voor de netbeheerder. Deze kosten zijn niet altijd duidelijk voor de eindgebruiker.

Er zal altijd een afweging zijn tussen centrale en decentrale bronnen, en er is de mogelijkheid om energie te importeren. Bij de afweging moeten zaken als kosten, de mate van energie-zelfvoorzienendheid, voorzieningszekerheid, ruimte, draagvlak en risico's gewogen worden. Lokale en regionale overheden nemen vaak het initiatief tot een dergelijke afweging, netbeheerders kunnen hierbij helpen.

7.4 Draagvlak

Meer ruimte in de netten leiden tot hogere kosten maar zorgt wel voor het faciliteren van ‘meerdere wegen’ waardoor de energiegebruikers meer mogelijkheden hebben om eigen oplossingen te kiezen. Een sterke focus op kostenefficiëntie van de netten laat daarentegen minder ruimte voor keuzevrijheid, zeker bij de transitie van de lage temperatuur warmtevoorziening. Dit kan het draagvlak beperken. Een voorbeeld hiervan is om naast de netten voor elektriciteit (en warmte) ook gasnetten voor hernieuwbare gasen in stand te houden. Hierdoor neemt het draagvlak voor de energietransitie toe. Een goede balans tussen kosten-efficiëntie en draagvlak is noodzakelijk. Want alle energiegebruikers moeten meedoen om de energietransitie te laten slagen.

Er zullen in de energietransitie meer spanningen ontstaan tussen de kosten, draagvlak en de diversiteit aan klimaatneutrale systemen. Hoe meer energienetten, hoe minder optimaal ze worden benut. Als bijvoorbeeld naast een warmtenet ook een gasnet en een zwaarder elektriciteitsnet wordt aangelegd of in stand gehouden, is dat duurder dan wanneer voor één specifieke oplossing wordt gekozen.

De verscheidenheid aan verschillende energienetten kan ook de businesscase voor een collectief systeem in de weg staan. Als iedereen meedoet, is dat goedkoper dan wanneer ieder huishouden kiest voor een andere oplossing. Voor alle duidelijkheid, een warmtenet is lang niet altijd goedkoper

dan een all-electric of een groen gas oplossing, maar in een groot aantal situaties wel. Dit hangt tevens af van de kostprijzen van elektriciteit, gas en warmte in de vier maatschappijbeelden. Een systeemkeuze om gebouwen te verwarmen met een lage temperatuursysteem geeft veel flexibiliteit, want het is dan veel eenvoudiger om te kiezen tussen bijvoorbeeld all-electric, een warmteaansluiting, en een hybride oplossing zal energetisch beter presteren. Door standaardisering nemen bovendien de kosten af.

Collectieve oplossingen

Door het maken van systeemkeuzes kan de overheid in situaties waar collectieve oplossingen goedkoper zijn dan individuele, de totale maatschappelijke kosten verlagen. Het vinden van draagvlak hiervoor is echter een steeds groter probleem, net zoals voor het ontwikkelen van een windpark op land of locaties voor CO₂-opslag.

Regie door de overheid kan de energiekosten voor alle energiegebruikers verlagen doordat er minder geld gaat naar infrastructuur die niet optimaal gebruikt wordt. Ook kunnen ontwikkelaars van windprojecten en warmteprojecten sneller een businesscase realiseren.

Aan de andere kant kan het beperken van de keuzevrijheid ook leiden tot maatschappelijke weerstand. Het is het overwegen waard om ten behoeve van het creëren van meer draagvlak voor de energietransitie soms de hogere kosten te accepteren. Een voorbeeld hiervan is het behoud van het gasnet als collectieve opties niet evident zijn.

Ruimtegebruik

Zowel voor de infrastructuur (trafo's, hoogspanningsleidingen) als opslag (elektrolyse en opslag-faciliteiten in beelden Regionaal en Nationaal), als 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 (zie Bijlage B van het achtergrondrapport).

Nieuwe projecten kunnen veel weerstand opleveren bij de bevolking. Het ruimtebeslag, met name bij het beeld Regionaal zelfvoorzienend, kan knellend worden en een afweging vergen met andere toepassingen, waarbij meer energie wordt geïmporteerd (zoals in beeld Internationaal).

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 groen gas, biofuels en vaste biomassa. In de toekomstbeelden Regionaal en Nationaal wordt er geen biomassa geïmporteerd, maar wel in Internationaal en Generiek. 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 is dit toegelicht.

Een punt van discussie is wel hoe realistisch dit is, de potentiële doen in de regel geen correctie voor de effecten van klimaatverandering op het aanbod, en daarnaast kan de druk voor voedsel toenemen. En er zijn partijen die van mening zijn dat biomassa in het geheel niet voor energetische toepassingen aangewend zou moeten worden.

Ruimte voor mislukkingen

Een ingrijpende verandering als de energietransitie zal ongetwijfeld met mislukkingen gepaard gaan. Ook de netbeheerders zullen wellicht projecten opzetten die niet opleveren wat op voorhand wordt verwacht. Dit is echter een onvermijdelijk onderdeel van het leerproces. Toch moeten we niet wachten totdat bijvoorbeeld de kostprijs van nieuwe technieken verder daalt, want we moeten de transitie in gang zetten. Bovendien kan de kostprijs kan alleen dalen als er voldoende vraag is naar die nieuwe technieken.

Lokale oplossingen en lokale partijen

Lokale energie-initiatieven kunnen een belangrijke rol spelen, zo blijkt in het toekomstbeeld Regionaal. Het vergt forse investeringen in zowel productie als opslag. Incentives die burgerinitiatieven tot betaalbare oplossingen prikkelt, kunnen daarbij helpen.

Er is een trend van diverse partijen om op een regionale schaal energieneutraal te worden. Dit vergt veel lokale bronnen met impact op ruimte en infrastructuur die niet altijd door partijen wordt onderkend. Er zal altijd een bepaalde afweging zijn of een mix tussen centrale en decentrale bronnen, en er is de mogelijkheid om energie te importeren. Bij de invulling moeten zaken als kosten, zelfvoorzienendheid, ruimte, draagvlak en risico's gewogen worden.

7.5 Volgende stappen

De brede verkenning leert dat we de energietransitie op verschillende manieren kunnen invullen. Klimaatneutraal vergt bijzonder ingrijpende veranderingen, zowel in het beprijzen of verbieden van fossiele brandstoffen, en het gebruik van nieuwe technieken. Het inzetten hierop zal ook innovaties gaan opleveren die we nu nog niet kunnen bevroeden.

Tegelijkertijd bestaan er - zoals in deze studie is onderzocht - grote onzekerheden die het werk voor netbeheerders en hiermee ook de voortgang van de energietransitie compliceren. Om deze geschetste onzekerheden zo veel mogelijk weg te nemen en ook voor de toekomst een hoogstaande en betaalbare energievoorziening te garanderen, zijn nu acties en handelingsperspectief nodig, voor de korte én de lange termijn.

Er zijn in het voorgaande van dit conclusiehoofdstuk reeds de nodige acties aan bod gekomen. Mede op basis hiervan is door de netbeheerders een discussie-agenda opgesteld - *'10-puntenplan voor een succesvolle energietransitie'*. Deze discussie-agenda bevat de 10 meest belangrijke zaken waar - op grond van de expertise van de netbeheerders en de analyses in 'Net voor de Toekomst', aan gewerkt moet worden om de energietransitie te versnellen.

De komende tijd zullen de Nederlandse netbeheerders over deze tien punten het gesprek aangaan met overheden, marktpartijen, burgers en andere stakeholders. Immers, alleen door samen te werken en optimaal elkaars sterke kanten te gebruiken, kunnen we als maatschappij succesvol zijn in de energietransitie.

8 Referenties

CE Delft, 2010. Achtergrondrapportage bij NET-document Netbeheer Nederland, Delft: CE Delft.

CPB; PBL, 2015. Welvaart en Leefomgeving 2015. [Online]

Available at: www.wlo2015.nl

[Geopend 2017].

ECN & DNV GL, 2016. Eindadvies basisbedragen SDE+ 2017, Petten: ECN.

European Biogas Association, 2015. Biomethane & Biogas Report 2015, Brussels: European Biogas Association.

Groen Gas Forum, 2014. Routekaart hernieuwbaar gas, sl: RVO, Groengasnl.

KNMI, 2016. Klimaatatlas. [Online]

Available at:

www.klimaatatlas.nl/klimaatatlas.php?wel=zon&ws=kaart&wom=Gemiddelde%20globale%20straling

Ministerie van EZ, 2016. Energieagenda "Naar een CO₂-arme energievoorziening, Den Haag:

Ministerie van Economische Zaken (EZ).

Netbeheer Nederland, 2011. Net voor de Toekomst, Arnhem: Netbeheer Nederland.

PBL, 2017. Investerings Energietransitie en financierbaarheid, Den Haag: Planbureau voor de

Leefomgeving (PBL).

Quintel Intelligence, 2017. Peer review van de studie "Net voor de Toekomst"(intern), Amsterdam:

Quintel.

RLI, 2015. Rijk zonder CO₂: naar een duurzame energievoorziening in 2050, Den Haag: Raad voor de

Leefomgeving en Infrastructuur (RLI).

Sijmons, Dirk; Hugtenburg, Jasper; Hoorn, Anton van, 2014. Landschap en energie: Ontwerpen voor transitie. Rotterdam: NAI010.

VEMW, 2016. Samen op weg naar minder: Hoe Nederlandse energie-intensieve bedrijven helpen om de CO₂-uitstoot te verlagen, Woerden: VEMW.

Wuppertal Institute, 2016. Decarbonisation pathways for the industrial cluster of the Port of Rotterdam, Wuppertal: Wuppertal Institute.