

› WHITEPAPER

SCENARIO'S VOOR KLIMAATNEUTRAAL ENERGIESYSTEEM

SLIMME COMBINATIES VAN ENERGIE-OPTIES LEIDEN TOT DUURZAME EN BETAALBARE ENERGIEHUISHOUDING

Martin Scheepers, André Faaij, Ruud van den Brink



TNO innovation
for life

› mei 2020

Het **doel** is duidelijk: Nederland moet volgens de Klimaatwet in **2050** een **klimaatneutraal energiesysteem** hebben. Maar hoe kunnen we dat doel bereiken? Gaan we de doelen halen door de economie radicaal te **hervormen** of proberen we ongeveer hetzelfde te blijven doen, maar dan **zonder CO₂** uit te stoten? Wat zijn de gevolgen van onze keuzes voor de energievoorziening? Hoe de **toekomst** eruit zal zien is niet te voorspellen. Een energievoorziening zonder CO₂-emissies is zeker voorstelbaar, maar over hoe die eruitziet wordt **verschillend** gedacht, evenals over de economische implicaties. In de komende jaren zullen we **keuzes** moeten maken over hoe het Nederlandse energiesysteem er de komende decennia uit gaat zien. Het is belangrijk om de **consequenties** van die keuzes te **verkennen**.

Door TNO zijn twee scenario's opgesteld (ADAPT en TRANSFORM) waarmee met name de grote veranderingen in het Nederlandse energiesysteem zijn verkend die kunnen (moeten) plaatsvinden in de periode na 2030.

Het onderscheid tussen het ADAPT en TRANSFORM scenario zit in het verschil in intrinsieke motivatie van burgers en bedrijven. In het ADAPT-scenario bouwt Nederland voort op zijn huidige economische sterktes en kiest het voor zekerheid en behoud van de huidige levensstijl, maar zorgt het er wel voor dat de doelstellingen voor broeikasgasreducties worden gehaald. In het TRANSFORM-scenario is Nederland bereid tot gedragsverandering en schakelt over op een schone, energiezuinige economie met nieuwe innovatieve technologieën. Hierdoor wordt Nederland minder energie-intensief.

De modelanalyses laten zien dat voor beide energiescenario's de doelstellingen voor broeikasgasreductie kunnen worden gerealiseerd. De kosten van het energiesysteem liggen bij beide scenario's

lager dan voor een scenario waarbij niet gestreefd wordt naar een klimaatneutraal energiesysteem en zijn het laagste voor het TRANSFORM scenario. Door toenemende elektrificatie van energiefuncties in bijna alle sectoren wordt elektriciteit twee tot drie keer zo belangrijk als nu. In 2050 is nagenoeg alle elektriciteit afkomstig uit wind en zon. Maar ook andere duurzame bronnen zijn belangrijk, zoals geothermie in de warmtevoorziening en biomassa voor de industrie en als transportbrandstof. Voor het aardgasvrij maken van de gebouwde omgeving is restwarmte uit de industrie belangrijk. Waterstof speelt een beperkte maar cruciale rol en wordt voornamelijk toegepast voor transport en in de industrie.

Zelfs als bepaalde aanpassingen van het energiesysteem minder makkelijk zijn te realiseren of technologie-oplossingen maatschappelijk minder gewenst zijn, blijft het doel van een klimaatneutraal energiesysteem realiseerbaar. Maar beperken van duurzame energie-opties leidt wel tot hogere systeemkosten. Worden te veel opties tegelijk beperkt dan zal het niet langer mogelijk zijn de energievraag op een duurzame manier te dekken. Snellere technologie-ontwikkeling door innovatie- en implementatiebeleid heeft een gunstig effect op de versnelde kostendaling van technologie, waardoor de toekomstige kosten voor het energiesysteem juist significant lager kunnen uitvallen. Verder onderzoek en ontwikkeling is uiteraard nodig, niet alleen voor technologieontwikkeling, maar zeker ook om de verdere implementatie te kunnen faciliteren. De scenario-analyses maken duidelijk hoe de energietransitie kan worden beïnvloed om het toekomstige Nederlandse energiesysteem betaalbaar en duurzaam te maken.

INHOUDSOPGAVE

INLEIDING

5

GENERIEKE INZICHTEN

7

HET ADAPT- EN HET TRANSFORM-SCENARIO NADER BEKEKEN

14

› INLEIDING

In 2019 heeft TNO een paper gepubliceerd over de kosten van de energietransitie. Daarin wordt geconcludeerd dat door doelgerichte innovatie en een goed gecoördineerde aanpak de kosten van de energietransitie kunnen worden beïnvloed en beheersbaar worden gehouden. In veel van de afgelopen jaren gepubliceerde scenario's over de Nederlandse energietransitie blijft dat kostenaspect onderbelicht. Deze scenario-studies geven een grote variëteit aan van mogelijke toekomstige energiesystemen voor Nederland. Waardoor deze uitkomsten worden bepaald is echter vaak onvoldoende duidelijk. Wat bepaalt dat een aantal duurzame energie-opties in de meeste scenario's voorkomt, terwijl dit voor andere opties onzeker lijkt? En hoe beïnvloedt de keuze voor dan wel het beperken van bepaalde opties de kosten van het energiesysteem. Partijen die betrokken zijn bij de energietransitie, zoals beleidsmakers, energiebedrijven, netbeheerders, technologie-ontwikkelaars, maatschappelijke organisaties en energiegebruikers hebben behoefte aan inzichten in deze factoren en hoe die mogelijk zijn te beïnvloeden.

Door TNO zijn twee scenario's opgesteld (Zie box 1 op pagina 12) waarmee met name de grote veranderingen in het Nederlandse energiesysteem verkend worden die zullen plaatsvinden in de periode na 2030. Voor beide scenario's is het doel van de Nederlandse Klimaatwet als uitgangspunt genomen: een stapsgewijs terugdringen van de emissies van broeikasgassen in Nederland, tot een niveau dat 95% lager ligt in 2050 dan in 1990, waarmee invulling wordt gegeven aan het Parijs-akkoord om de opwarming van de aarde onder de 1,5 graad te houden. Een tweede doelstelling is die uit het Klimaatakkoord: reductie van de broeikasgasemissies in 2030 met 49%. Verder blijft de Nederlandse economie in beide scenario's groeien. De scenario's verschillen in de manier waarop de doelen gehaald worden, met name in het verschil in intrinsieke motivatie van burgers en bedrijven. In het ADAPT-scenario bouwt de Nederlandse economie voort op de huidige sterktes, kiest het voor zekerheid en behoud van de huidige levensstijl, maar dan met een sterke beperking van de CO₂-emissies. In het TRANSFORM-scenario is Nederland bereid tot gedragsverandering en kiest het voor een structuurverandering en een verduurzaming van de economie. Van beide scenario's zijn kwantitatieve projecties gemaakt met behulp van een technoeconomische optimalisatiemodel waarmee de hele Nederlandse energiehuishouding in samenhang is doorgerekend (zie box 2 op pagina 19).

De kosten van de energietransitie kunnen worden beïnvloed en beheersbaar worden gehouden.

Het is goed mogelijk dat de technologische ontwikkelingen anders verlopen dan in de scenario's zijn verondersteld. Zo kunnen de kosten van bepaalde technologische opties sneller dalen dan die van andere. In een kosten geoptimaliseerd systeem leidt dit tot verschuivingen in de energiemix, zowel bij productie als verbruik. Versnelde kostendaling kan het gevolg zijn van (wereldwijde) marktontwikkelingen, maar ook gericht Nederlands overheidsbeleid kan, zowel met betrekking tot technologie-ontwikkeling als -implementatie, kostendaling van bepaalde technologieën versnellen. In de afgelopen jaren hebben we dit kunnen zien bij onder meer zonnepanelen, windturbines en batterijen in elektrische auto's.

Ook de maatschappelijke opvattingen over het energiesysteem kunnen zich anders ontwikkelen dan die voor de scenario's zijn verondersteld. Er kunnen bezwaren rijzen tegen de toepassing van bepaalde energie-opties, maar er kunnen ook opties zijn die juist een brede maatschappelijke steun genieten, soms ondanks hogere kosten. Beperking of uitbreiding van de inzet van opties zijn vaak politieke of beleidskeuzes. Voorbeelden hiervan zijn: afspraken over het gebruik van de Noordzee (onder meer voor offshore windenergie), vergunningen voor ondergrondse opslag van CO₂, duurzaamheidscriteria bij import van biomassa, etc.

Scenario's: verschil in intrinsieke motivatie burgers en bedrijven

Deze verschillende mogelijke ontwikkelingen zijn voor de scenario's met behulp van het optimalisatiemodel nader onderzocht. Er is "gedraaid aan de knoppen" van het model. Naast dat dit soort analyses de mate van gevoeligheid laat zien van de uitkomsten voor veranderingen in de aannames en randvoorwaarden (en daarmee de robuustheid van de verkregen inzichten), geeft het ook inzicht in de achterliggende mechanismen die bepalend zijn voor de uitkomsten in een kosten-geoptimaliseerd scenario. Dit laat beleidsmakers, technologieontwikkelaars en maatschappelijke organisaties zien wat de rol van bepaalde technologische innovaties kan zijn in het toekomstige energiesysteem en toont de effecten van promoten of beperken van bepaalde oplossingen.

In dit paper worden eerst de inzichten gepresenteerd die met de scenario-analyses zijn verkregen die betrekking hebben op het hele energiesysteem, waaronder het effect van technologische- en beleidsverandering op de kosten van het Nederlandse energiesysteem. Daarna wordt voor beide scenario's ingegaan op verschillende elementen van het toekomstige Nederlandse energiesysteem en de daaruit verkregen inzichten toegelicht. Een meer uitgebreide beschrijving van de scenario's en de resultaten van de analyses is te vinden in het TNO rapport "Towards a sustainable energy system for the Netherlands in 2050".

Draaien aan de knoppen van de energietransitie

› GENERIEKE INZICHTEN

SOMMIGE DUURZAME ENERGIE-OPTIES KOMEN IN BEIDE SCENARIO'S VOOR, ANDEREN ALLEEN ONDER BEPAALDE OMSTANDIGHEDEN

De twee scenario's laten voor 2050 een aantal robuuste elementen zien van een toekomstig Nederlands energiesysteem. De omvang waarmee energie-opties worden ingezet verschilt per scenario, maar bij wijziging van de veronderstellingen, zoals technologiekosten of mate van beschikbaarheid, zijn de veranderingen beperkt:

- Het aandeel elektriciteit neemt sterk toe en kan verdubbelen tot verdrievoudigen, waarbij het aandeel elektriciteit in het energie-aanbod groeit van 19% naar, afhankelijk van het scenario, 43% tot 71%. In 2050 wordt 99% van de elektriciteit opgewekt met windturbines en zonnepanelen. De toename van elektriciteit in het Nederlandse energiesysteem wordt veroorzaakt door elektrificeren van energiefuncties in alle sectoren: elektrische voertuigen in de transportsector, elektrische warmtepompen in de warmtevoorziening voor industrie, gebouwde omgeving en agrarische sector en elektrificatie van industriële processen. Alleen bij internationale luchtvaart en scheepvaart wordt elektriciteit niet direct toegepast (wel indirect bij de productie van synthetische brandstoffen).
- Biomassa wordt voornamelijk ingezet in de industrie (27% tot 48% van de biomassa) en voor de productie van brandstoffen voor binnenlands en internationaal transport (32% tot 48% van de biomassa).
- Elektrificatie van de warmtevoorziening (ca. 30%) en CO₂-neutrale restwarmte van de industrie en afvalverbranding (ca. 50%) spelen een belangrijke rol bij het aardgasvrij maken van de gebouwde omgeving.
- De agrarische sector wordt aardgasvrij door restwarmte van de industrie (27% tot 42%), geothermie (17%-19%) en biomassa (28%-44%).
- De broeikasgasemissiereductie in de industrie wordt bereikt door inzet van elektriciteit (22% tot 55%) en biomassa (28% tot 42%).
- In de transportsector zijn elektriciteit (31% tot 44%) en waterstof (32% tot 44%) de belangrijkste energiedragers. Waterstof wordt vooral gebruikt door vrachtwagens.

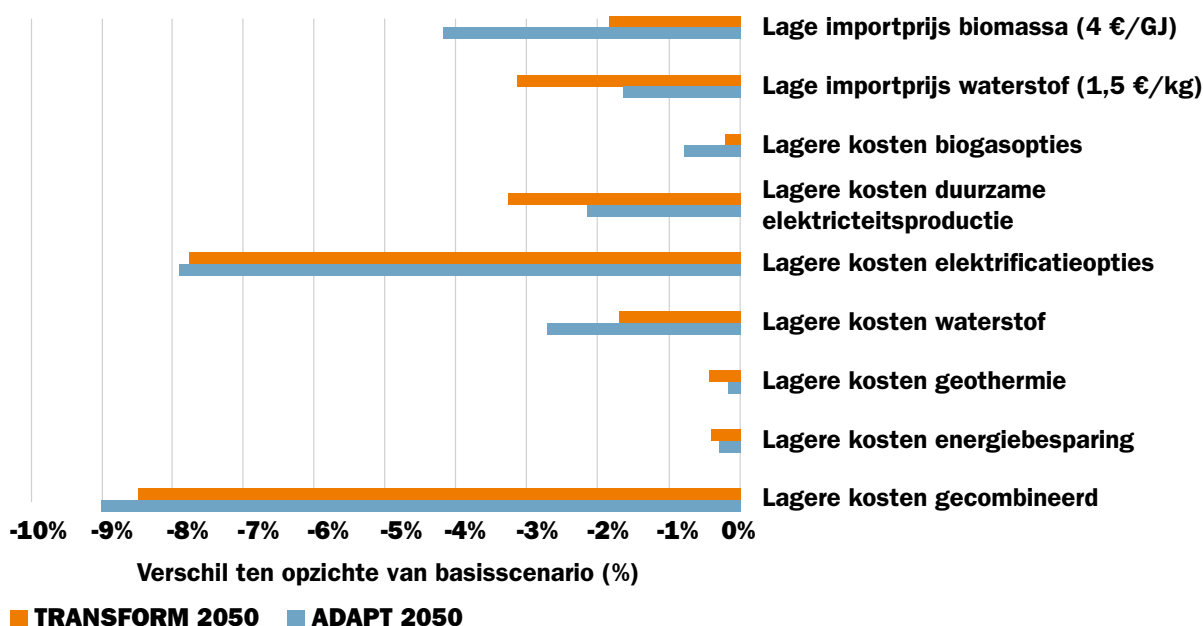
De scenario-analyses hebben ook laten zien dat de rol van een aantal energie-opties onzeker is. Ze zijn afhankelijk van het scenario of wijzigen sterk bij verandering van energiekosten of mate van beschikbaarheid:

- De waterstofproductie in Nederland zal internationaal moeten concurreren. Liggen de internationale handelsprijzen lager dan de kosten van binnenlandse productie, dan zal de binnenlandse productie gering zijn. Maar het omgekeerde geldt ook: bij hoge internationale handelsprijzen zal Nederland niet alleen waterstof produceren voor de binnenlandse markt, maar ook voor het buitenland.
- Als de mogelijkheid van CO₂-opslag bestaat, is productie van waterstof uit aardgas met CO₂-afvang en -opslag de meest gebruikte technologie. Als CO₂-opslag niet mogelijk is, dan zal waterstof geproduceerd worden met electrolyzers.

- Het potentieel voor geothermie wordt nog niet volledig gebruikt. Daling van de investeringskosten heeft een sterk effect op de inzet van geothermie, waarbij deze energie-optie dan ook ingezet wordt voor warmtevoorziening in de gebouwde omgeving.
- In de binnenlandse transportsector worden waterstof, elektriciteit en biobrandstoffen naast elkaar gebruikt. Bij personenauto's concurreert elektriciteit met waterstof en bij vrachtauto's waterstof met biobrandstoffen. Wat de preferente energiedrager wordt is sterk afhankelijk van de kosten van de brandstoffen en de kosten van de aandrijftechnologie van de voertuigen.

VERSNELDE KOSTENDALING DOOR INNOVATIE ZORGT VOOR LAGERE KOSTEN TOEKOMSTIG ENERGIESYSTEEM

Gericht innovatiebeleid kan zorgen voor een versnelde kostendaling van technologie-opties. Naar mate de rol van een technologie-optie in het energiesysteem groter is, zal het effect op de daling van de totale systeemkosten toenemen. Kostendaling kan er ook voor zorgen dat een optie relatief meer wordt gebruikt. Dit effect zal minder zijn als de optie al dicht bij het maximale potentieel zit. Wordt het gerichte innovatiebeleid op een breder palet aan technologie-opties toegepast, dan zal dit tot verdere daling van de systeemkosten leiden. Het is echter geen optelsom van de afzonderlijke effecten, aangezien technologie-opties met elkaar concurreren, zoals bijvoorbeeld elektrische auto's met waterstofauto's. Lagere prijzen voor geïmporteerde duurzame energie, zoals biomassa en waterstof, zullen ook leiden tot lagere totale jaarlijkse kosten voor het Nederlandse energiesysteem.



Relatieve daling totale systeemkosten ten opzichte van de ADAPT en TRANSFORM scenario's in 2050 bij lagere importprijzen voor biomassa en waterstof en verlaging investeringskosten (-20%) voor verschillende technologieën: elektrificatie-opties (warmtepompen, elektrische auto's, elektriciteitsopslag, etc.), duurzame elektriciteitsproductie (wind- en zonne-energie), waterstof (electrolyzers, waterstof-auto's, etc.), geothermie, energiebesparingsopties (gebouwde omgeving, industrie) en een combinatie daarvan.

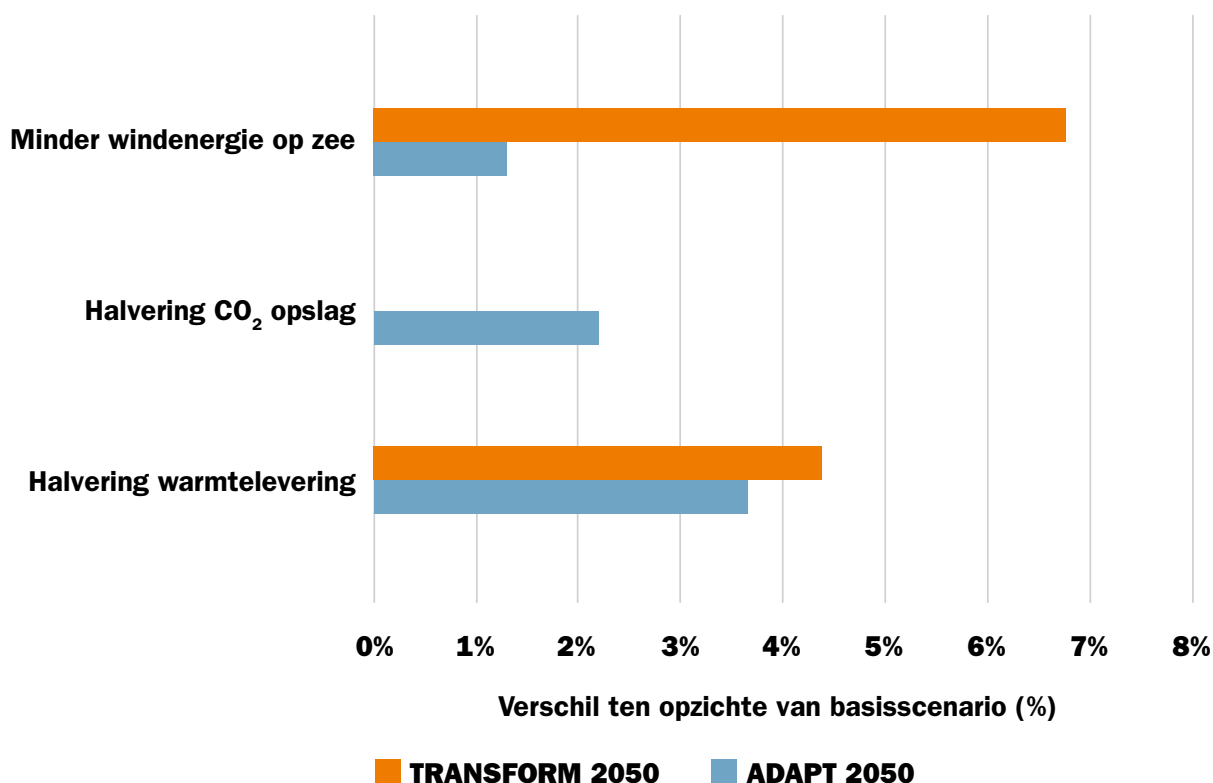
HANDELINGSPERSPECTIEF

De twee scenario's laten zien dat een klimaatneutraal energiesysteem voor Nederland in 2050 mogelijk is. Een aantal ontwikkelingen, zoals bevolkings- en economische groei en de energieprijzen, zijn gelijk voor beide scenario's en zijn minder beïnvloedbaar door Nederlandse beleidsmakers. Motivatie en gedrag van burgers en bedrijven is verschillend voor de twee scenario's. Beide scenario's gaan uit van voortgaande technologieontwikkeling en optimale en gecombineerde inzet van vele opties in de tijd. Op de volgende punten kan het Nederlandse energiebeleid invloed uitoefenen op de energietransitie:

- Bij klimaatmaatregelen om de 2030-doelstelling te realiseren moet rekening worden gehouden met de ontwikkeling van het energiesysteem op de langere termijn (2050). Omdat in de periode 2030-2050 grote veranderingen moeten plaatsvinden, is het van belang te voorkomen dat keuzes op de korte termijn tot een lock-in leiden, d.w.z. een oplossing die op de korte termijn optimaal lijkt, maar op de langere termijn duurder is.
- Voor een tijdige uitrol van een groot aantal verschillende duurzame energie-opties en -diensten moeten juiste randvoorwaarden worden gecreëerd: goed stimuleringsbeleid, goede participatieprocessen, heldere vergunningsvoorwaarden, adequate energie-infrastructuur, etc. Ook is er maatschappelijk draagvlak nodig voor verandering van het energiesysteem en introductie van nieuwe duurzame technologie. Moeizame introductie van opties of beperking daarvan kan leiden tot hogere systeemkosten. Gedegen kennis bij overheden, burgers en bedrijfsleven over de energietransitie en implicaties die dit kan hebben is daarvoor essentieel, zodat goed en flexibel kan worden ingespeeld op nieuwe ontwikkelingen in de energietransitie. Daarnaast zullen burgers en bedrijven, als belangrijke actoren in de energietransitie, ondersteund moeten worden bij het maken van keuzes en investeringsbeslissingen.
- Kostendaling van duurzame energietechnologie wordt bepaald door twee aspecten: de groei van het wereldwijde gebruik van de technologie en technologieverbetering door innovatie. Op de toename van het gebruik van energietechnologie heeft Nederland als klein land relatief weinig invloed. Nederland is echter wel een belangrijk innovatieland – Nederland staat in de top 10 van meest innovatieve economieën – en kan bijdragen aan de kostendaling van energietechnologie door gericht R&D-beleid. Gericht R&D-beleid zal er voor zorgen dat nieuwe technologie sneller beschikbaar komt en reeds beschikbare technologie verder wordt verbeterd.
- Gedegen kennis over implementatietrajecten kan tot aanzienlijke kostenbesparingen leiden, niet alleen van de klimaatneutrale energievoorziening zelf, maar ook bij de noodzakelijk stimulering en inzet van financiële instrumenten, zoals subsidies, op weg daar naar toe. Zwaardere inzet op kennis en innovatie, kan de behoefte aan (dure) subsidies verminderen en daarmee is onderzoek en ontwikkeling een cruciaal instrument voor een kosteneffectieve energietransitie.

BEPERKEN VAN DUURZAME ENERGIE-OPTIES ZAL LEIDEN TOT HOGERE SYSTEEMKOSTEN

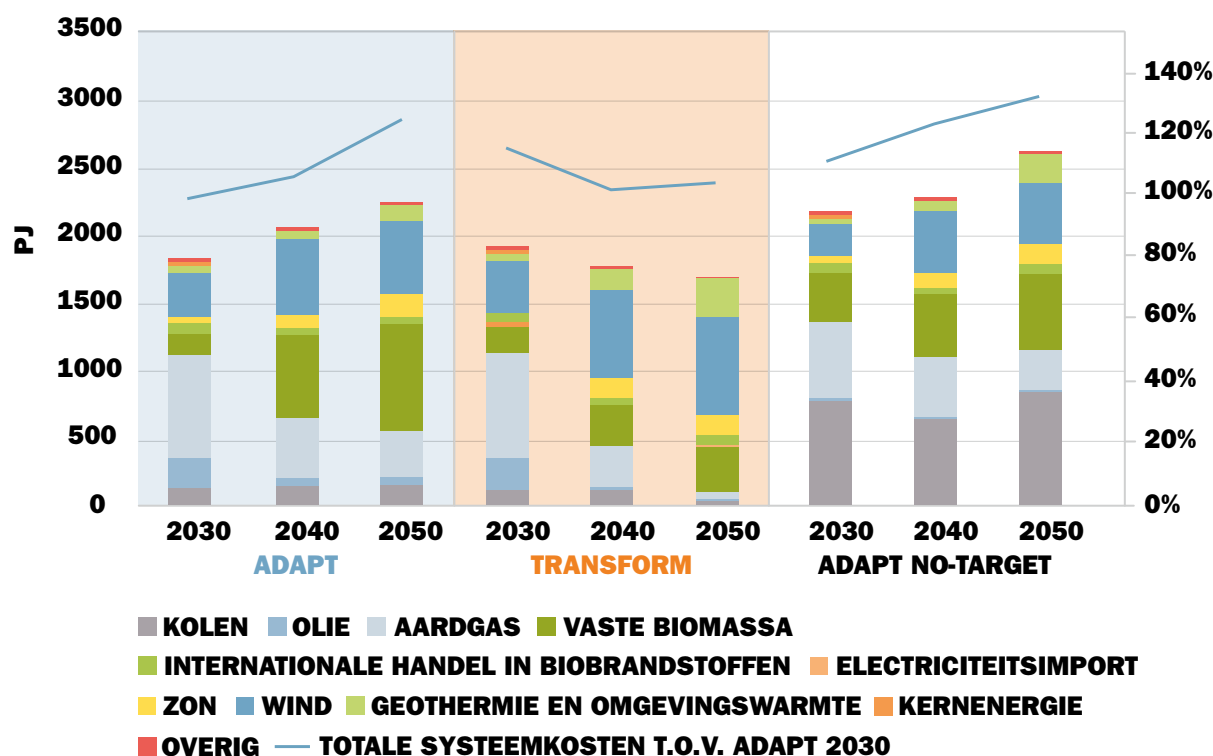
Sommige energie-opties zijn mogelijk minder makkelijk te realiseren vanwege technische obstakels of omdat er onvoldoende maatschappelijke draagvlak voor bestaat. Dit kan dan leiden tot andere beleidskeuzes. Als de inzet van opties wordt beperkt zullen, om de broeikasgasreductiedoelstelling toch te kunnen realiseren, duurdere opties worden ingezet. Beperking van één optie wordt gecompenseerd door een grotere inzet van meerdere andere opties, of door technologieën die nog niet werden toegepast. Worden echter meerdere opties tegelijk beperkt, of zelfs helemaal niet toegestaan (zoals geen CO₂ opslag en beperking van biomassa-import of sterke beperking van duurzame elektriciteitsproductie), dan zal het niet langer mogelijk zijn de energievraag op een duurzame manier te dekken.



Relatieve toename van de totale systeemkosten bij beperking van opties: beperking van windenergie op zee (van 40 naar 30 GW in het ADAPT-scenario en van 60 naar 40 GW in het TRANSFORM scenario), halveren van de CO₂-opslagcapaciteit (van 50 naar 25 Mton) in 2050 in het ADAPT-scenario en halveren van de warmtelevering van de industrie naar gebouwde omgeving en glastuinbouw in 2050 voor beide scenario's.

KOSTEN VAN DUURZAAM ENERGIE-SYSTEEM LIGGEN LAGER DAN DIE VAN EEN ENERGIESYSTEEM ZONDER BROEIKASGASREDUCTIEDOELEN

De totale systeemkosten van het ADAPT- en TRANSFORM-scenario liggen lager in vergelijking met een scenario waarbij er geen broeikasreductiedoelstelling geldt. Dit no-target scenario gebruikt dezelfde aannames als het ADAPT-scenario, behalve dat door schaarste aan fossiele brandstoffen die op den duur zal ontstaan, de prijzen voor fossiele brandstoffen toenemen – in het ADAPT- en het TRANSFORM-scenario is uitgegaan van constante prijzen – en kolencentrales gebruikt blijven worden. Opvallend genoeg is er zelfs in het no-target-scenario een forse daling van de broeikasgasemissies van 60%. Door de combinatie van stijgende fossiele prijzen, maar dalende kosten voor duurzame energie technologie, is in dit scenario in 2050 toch een aanzienlijk deel van de energieproductie verduurzaamd, met name door een sterke groei van wind- en zonne-energie. Nederland blijft evenwel in het no-target scenario sterk afhankelijk van import van fossiele brandstoffen. Deze import zorgt er voor dat de systeemkosten jaarlijks meer dan 10 miljard euro per jaar hoger liggen dan in het ADAPT-scenario.



Staafdiagram geeft primair energieaanbod weer en de lijnen de totale systeemkosten voor het ADAPT- en TRANSFORM-scenario (ADAPT in 2030 = 100). Daarnaast primair energieaanbod en systeemkosten voor het ADAPT-scenario als er geen reductiedoelstelling voor broeikasgassen geldt. Primair energieaanbod is exclusief non-energetisch gebruik als grondstof en exclusief energie voor internationale luchtvaart en scheepvaart.

In het ADAPT-scenario nemen de totale systeemkosten vanaf 2030 toe. De totale systeemkosten in het TRANSFORM-scenario liggen in 2030 iets boven die van het ADAPT-scenario, maar dalen daarna. Hierdoor is er tussen beide scenario's in 2050 een substantieel verschil in kosten. De verandering in de totale systeemkosten is een combinatie van groeiende energievraag (m.n. in het ADAPT-scenario), dalende technologiekosten en het toepassen van nieuwe, maar duurdere technologieën (in beide scenario's).

	ADAPT	TRANSFORM	ADAPT no-target
Nationaal BKG reductiedoel	-49% 2030, -95% 2050	-49% 2030, -95% 2050	geen
BKG reductiedoel internationale lucht en scheepvaart	-50%	-95%	geen
Prijzen fossiel brandstoffen	Na 2030 constant	Na 2030 constant	
Industrie			
• Energievraag	↑	↓	↑
• Productie	↑	↓	↑
Energievraag dienstensector	↑	↑↑	↑
Energievraag agrarische sector	↑	↓	↑
Mobiliteitsvraag			
• Binnenland	↑	↓	↑
• Internationaal	↑	↓	↑
Biomassa beschikbaarheid			
• Binnenland	○○○	○	○○○
• Import uit buitenland	○○○	○	○○○
Toepassing CO ₂ afvang en opslag	Ja	Nee	Ja
Toepassing kolencentrales	Nee	Nee	Ja

Onderscheidende invoervariabelen bij de scenario's; ↑ betekent groei, ↓ krimp en ↑↑ extra groei, ○○○ betekent ruime en ○ beperkte beschikbaarheid; BKG: broeikasgas

BOX 1: TWEE TOEKOMSTBEELDEN

Deze studie onderzoekt de Nederlandse energiehuishouding in twee verschillende plausibele toekomstbeelden voor de periode 2030-2050: het ADAPT-scenario en het TRANSFORM-scenario. In beide toekomstbeelden wordt de CO₂-uitstoot uiteindelijk met 95% gereduceerd en blijft de Nederlandse economie groeien. Maar de manier waarop die doelen gehaald worden is anders. Het onderscheid tussen beide scenario's zit in het verschil in intrinsieke motivatie en draagvlak voor verandering bij burgers en bedrijven. Ander dimensies, zoals verschil in coördinatie van de overheid, verschil in internationale samenwerking, zijn hierin meegenomen.

ADAPT

In het ADAPT-toekomstbeeld bouwt Nederland voort op zijn huidige sterktes, maar zorgt het er wel voor dat de CO₂-emissies met 95% dalen. In de afgelopen decennia hebben olie, kolen en gas gezorgd voor een sterke industrie, een sterke transport- en logistieksector, een betrouwbare elektriciteitsvoorziening en comfortabel verwarmde huizen. In dit toekomstbeeld kiezen de Nederlanders voor zekerheid: behoudt van werkgelegenheid en van de huidige comfortabele levensstijl. Duurzaamheid wordt minder belangrijk gevonden. Dat vraagt om energiedragers die lijken op wat we nu hebben, maar dan CO₂-neutraal. Het huidige systeem wordt aangepast en geoptimaliseerd, terwijl de impact op energieverbruikende sectoren worden beperkt. Nationale en lokale overheden nemen het voortouw en sturen

burgers en bedrijven bij het maken van keuzes ten aanzien van de energietransitie met concrete beleidsmaatregelen.

De mobiliteitsvraag en ook de industriële productie blijft groeien. Voor de internationale luchtvaart en scheepvaart, waarvan de broeikasgasemissies buiten de nationale doelstelling vallen, wordt gestreefd naar een halvering van de emissies. In dit scenario zijn geen grote maatschappelijke bezwaren tegen gebruik van fossiele brandstoffen in combinatie met CO₂-afvang en -opslag. Ook wordt een ruime import voor biomassa geaccepteerd.

TRANSFORM

In het TRANSFORM-toekomstbeeld loopt Nederland en Europa voorop in de strijd tegen klimaatverandering en voor duurzaamheid. Met zijn sterke kennisinfrastructuur en innovatieve bedrijfsleven is Nederland ideaal gepositioneerd om een nieuwe schone, energiezuinige economie op te bouwen. De bewustheid van de Nederlanders van hun energiegebruik en hun CO₂-voetafdruk leidt tot een gedragsverandering en allerlei duurzame initiatieven. Nieuwe technologieën worden enthousiast omarmd. De overheid heeft hier vooral een stimulerende en voorwaarden scheppende rol. Doordat burgers meer milieubewust zijn en daar ook naar handelen, neemt de energievraag sterker af, verandert de mobiliteitsvraag (bijv. meer gebruik van openbaar vervoer en fiets) en de vraag naar milieubelastende industriële en agrarische producten (bijv. dalende vleesconsumptie). Ook bedrijven nemen initiatieven tot een ambitieuze transformatie door bestaande processen te vervangen door duurzame alternatieven. De industrie wordt minder energie-intensief en een deel van de economische activiteit verschuift naar de dienstensector die daardoor groeit. Ook leidt de maatschappelijke verandering tot aanpassingen in de agrarische sector, zoals meer duurzame landbouw en minder veeteelt. Voor de internationale luchtvaart en scheepvaart, waarvan de broeikasgasemissies buiten de nationale doelstelling vallen, geldt ook een 95% reductiedoelstelling. Er is geen maatschappelijk draagvlak voor CO₂-afvang en -opslag en de import van biomassa blijft beperkt.

KWANTIFICERING VAN DE SCENARIO'S

Voor beide scenario's is de energiehuishouding voor drie zichtjaren berekend: 2030, 2040 en 2050. Voor 2030 geldt het doel van het Klimaatakkoord (-49% broeikasgasreductie) en is de energievraag vergelijkbaar met die in de Klimaat- en Energieverkenning 2019. Voor 2050 is het doel uit de Klimaatwet overgenomen (-95% broeikasgasreductie). De veronderstellingen van de scenario's zijn vertaald naar inputvariabelen voor het model die voor een aantal verschillend zijn (zie tabel op pagina 13). Voor beide scenario's zijn ook een aantal variabelen gelijk gehouden, zoals economische groei (BBP groei van 1,5% per jaar), bevolkingsgroei, de prijs voor fossiele brandstoffen (vanaf 2030 constant) en de energievraag van huishoudens. De kosten voor met name nieuwe technologieën zullen dalen als gevolg van innovatie en implementatie. De mate van kostendaling is per technologie verschillend, maar voor beide scenario's hetzelfde gehouden. De kwantificering van de scenario's resulteert in projecties van het Nederlandse energiesysteem in 2030, 2040 en 2050 uitgedrukt in technische en economische parameters.

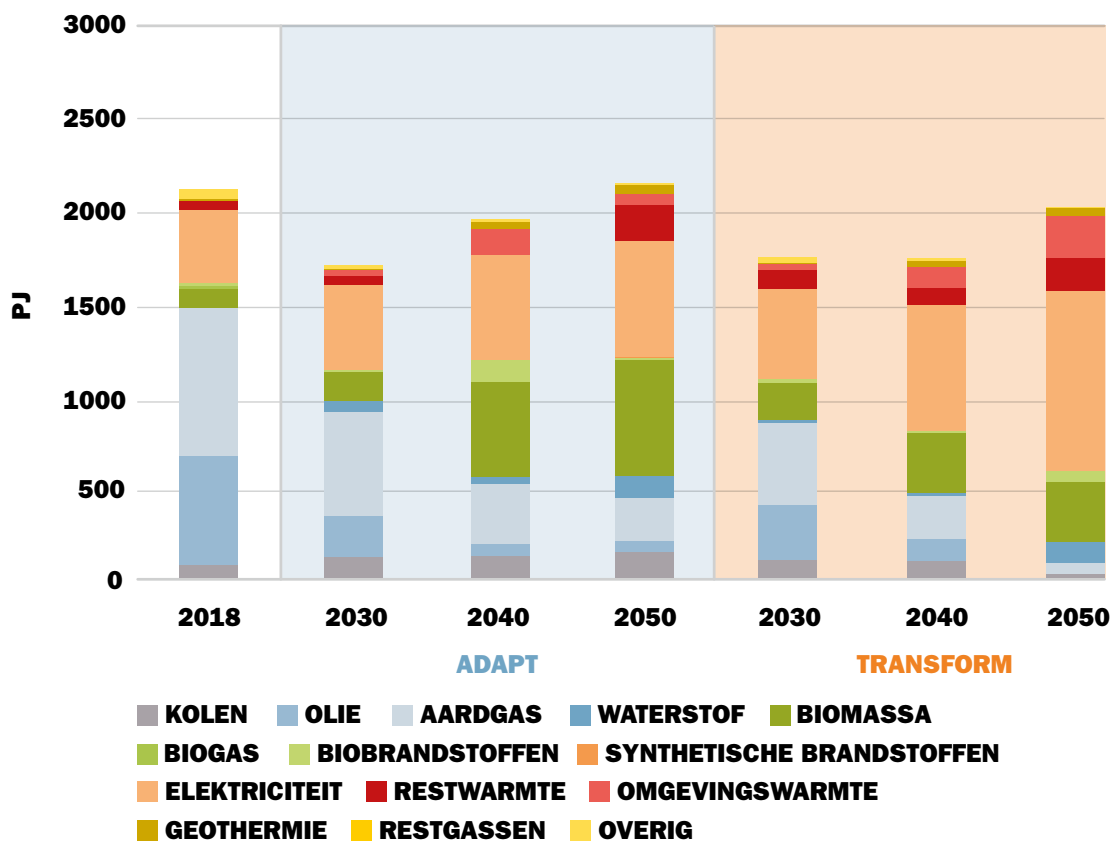
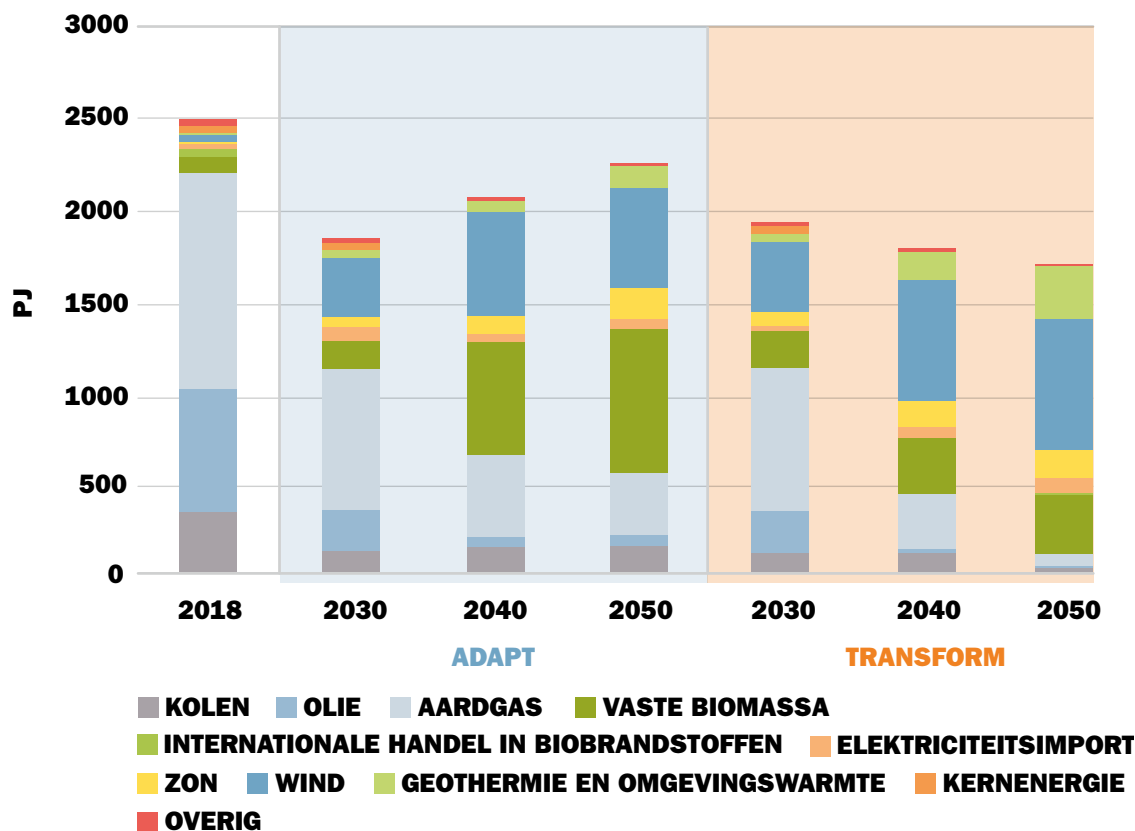
› HET ADAPT- EN HET TRANSFORM-SCENARIO NADER BEKEKEN

VAN FOSSIEL NAAR DUURZAAM

In zowel het ADAPT- als het TRANSFORM-scenario neemt de vraag naar warmte door energiebesparing in alle sectoren af, terwijl de vraag naar elektriciteit toeneemt. Dit laatste heeft te maken met toenemende elektrificatie van energiefuncties, zoals elektrisch rijden en toepassen van warmtepompen. Door deze verschuiving in de energievraag nemen conversieverliezen af, o.a. door vervanging van verbrandingsmotoren door elektrische aandrijving en minder elektriciteitscentrales. Energiebesparing en verbetering van de energie-efficiency zorgen voor een daling van het totale energievraag tussen 2018 en 2030, ondanks economische groei. Door productie-groei in de industrie en toenemende transportvraag neemt het energieverbruik in het ADAPT-scenario daarna weer toe, waardoor het totale energieaanbod in 2050 ongeveer gelijk is aan die in 2018. In het TRANSFORM-scenario zorgt een economische structuurverandering (d.w.z. lagere productievolume) dat de energievraag van de industrie afneemt. De afnemende economische productie wordt gecompenseerd door de groei van de dienstensector, die echter minder energie-intensief is. Deze scenarioveronderstellingen leiden er toe dat Nederland in 2050 in het TRANSFORM-scenario zo'n 18% minder energie-intensief is dan in 2018. Vanaf 2040 neemt ook in het TRANSFORM scenario het energieaanbod overigens weer toe. Dat wordt veroorzaakt door een toename van de productie van waterstof en vloeibare brandstoffen, waarbij substantiële conversieverliezen optreden.

In het TRANSFORM-scenario zorgt een economische structuurverandering dat de energievraag van de industrie afneemt

In beide scenario's is uitgegaan van het sluiten van de kolencentrales in 2030 en sluiting van de kerncentrale Borssele in 2033. Het aandeel fossiele energie daalt van 90% in 2018 tot 26% in 2050 in het ADAPT-scenario en 4% in het TRANSFORM-scenario. Fossiele energie daalt in het ADAPT-scenario minder omdat in dit scenario het gebruik van CO₂-afvang en -opslag mogelijk is. In het ADAPT-scenario is de beschikbaarheid van binnenlandse biomassa zo'n 30% hoger dan in het TRANSFORM-scenario en de invoer van biomassa vanuit het buitenland meer dan drie keer zo hoog. In het TRANSFORM-scenario wordt fossiele energie vooral vervangen door energie uit wind en zon en daarnaast door biomassa, geothermie en omgevingswarmte (warmtepompen).

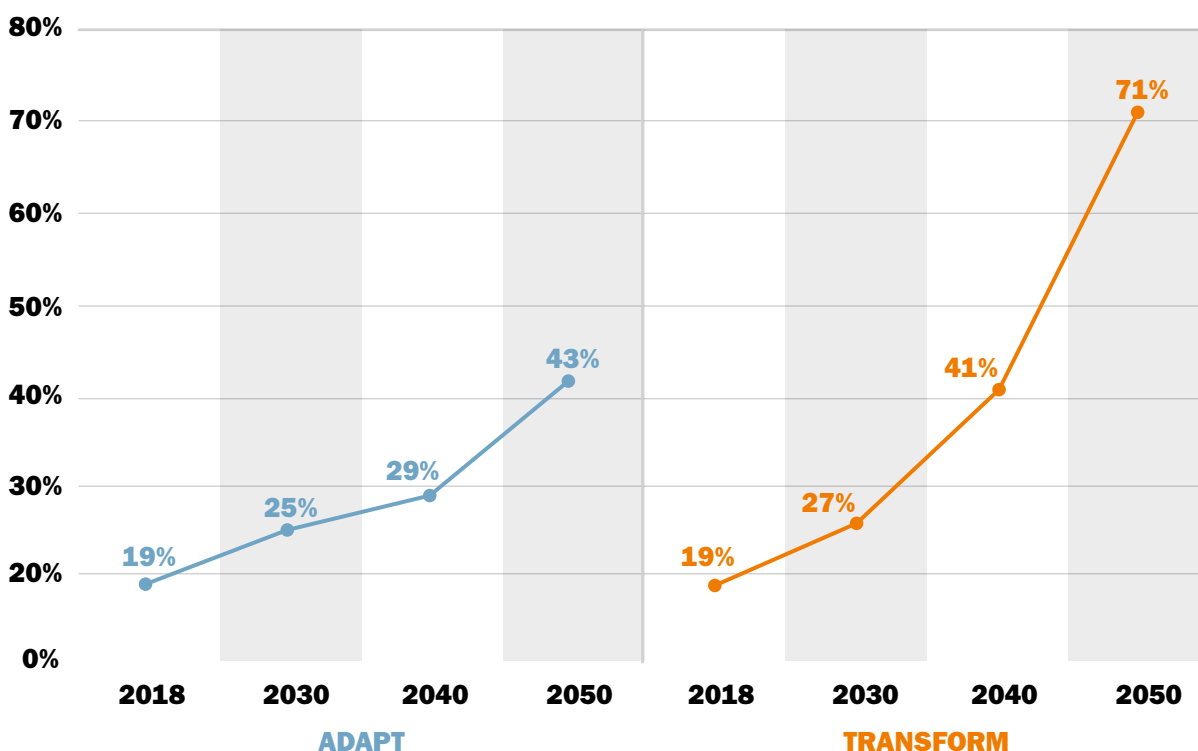


Primaire energieaanbod (boven) en finaal energiegebruik (onder) voor de ADAPT- en TRANSFORM-scenario's, exclusief non-energetisch gebruik als grondstof en exclusief energie voor internationale lucht- en scheepvaart. 2018 cijfers voor primair energieaanbod zijn aangepast zodat oliegebruik van raffinaderijen alleen betrekking heeft op binnenlands brandstofverbruik. Naarmate het energiesysteem duurzamer wordt, is de uitwisseling van energie tussen sectoren groter (bijv. restwarmte van industrie naar gebouwde omgeving en agrarische sector en waterstof en biobrandstoffen van industrie naar transportsector) waardoor sommatie van finaal energiegebruik hoger is dan het totaal primair energieaanbod.

In beide scenario's wordt Nederland voor het energie-aanbod minder afhankelijk van het buitenland. Dit komt met name door de toename in de productie van wind en zonne-energie en de bijdrage van geothermie en omgevingswarmte (warmtepompen). Dat effect is in het TRANSFORM-scenario groter dan in het ADAPT-scenario, dat nog afhankelijk blijft van de import van olie en aardgas. Ook zal een deel van de biomassa, biobrandstoffen en mogelijk waterstof worden geïmporteerd. In beide scenario's zal vanaf 2030 sprake zijn van netto-export van elektriciteit, terwijl Nederland nu nog netto-importeur van elektriciteit is.

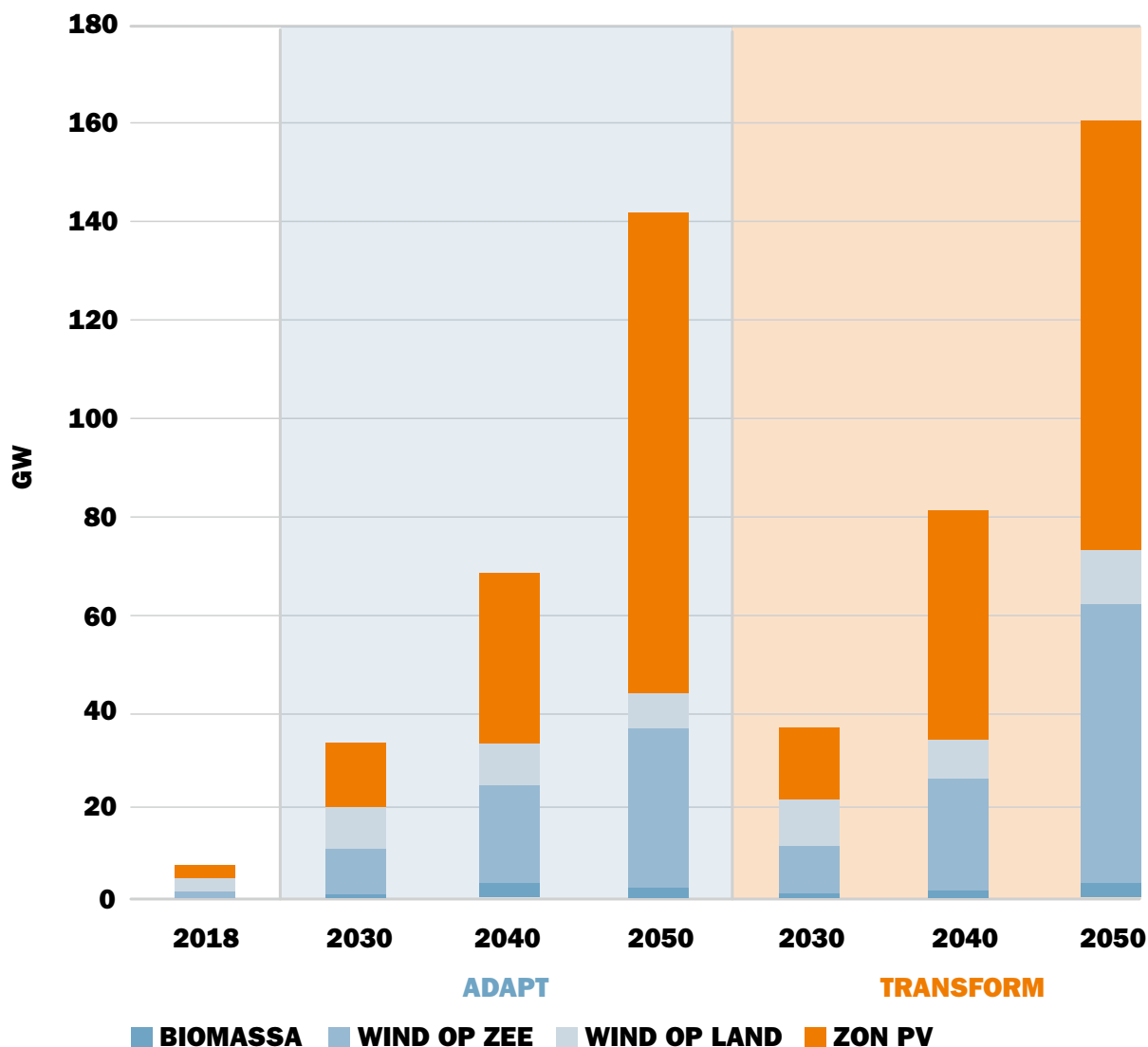
ELEKTRICITEIT WORDT TWEE TOT DRIE KEER ZO BELANGRIJK

Elektriciteit speelt in het huidige Nederlandse energiesysteem nog maar een relatief bescheiden rol. Dit komt doordat de meeste energie gebruikt wordt in de vorm van aardgas voor verwarmen van woningen, gebouwen en in de industrie, en aardolie voor brandstoffen in de transportsector. In 2018 was het aandeel elektriciteit in het Nederlandse energiesysteem zo'n 19%. Dit gaat echter veranderen. In de toekomst gebruiken we elektriciteit voor verwarming van gebouwen en industriële processen en wordt een groot deel van de auto's elektrisch aangedreven. Ook zal een deel van de elektriciteit ingezet worden voor het produceren van brandstoffen: waterstof en synthetische transportbrandstoffen. Hierdoor stijgt de elektriciteitsvraag en het aandeel van elektriciteit in de energievoorziening. In het ADAPT-scenario bestaat in 2050 43% van het energieaanbod uit elektriciteit. Dat is een verdubbeling van het aandeel. In het TRANSFORM-scenario is de groei nog groter.



Toename van het aandeel elektriciteit in het Nederlandse energiesysteem in beide scenario's

In 2050 zal ruim 70% van het energieaanbod uit elektriciteit bestaan, een meer dan verdrievoudiging van het aandeel. Tussen nu en 2030 zal een groot deel van de conventionele elektriciteitsopwekking vervangen worden door elektriciteit uit zon en wind. In 2030 stopt de elektriciteitsproductie uit kolen en in 2033 sluit de kerncentrale in Borssele. Ruim driekwart van de elektriciteitsproductie gaat in 2030 niet meer gepaard met CO₂-emissies. In beide scenario's is in 2050 99% van de elektriciteit duurzaam opgewekt. Hoewel beide scenario's inzet van kernenergie niet uitsluiten, laat het kosten geoptimaliseerde model geen inzet van kernenergie zien. De kosten van kernenergie is structureel hoger dan die van wind- en zonne-energie.



Groei van duurzame elektriciteitsproductie in beide scenario's. Productiecapaciteit voor wind op land bereikt maximaal potentieel in alle zichtjaren. Productiecapaciteit wind op zee bereikt maximaal potentieel alleen in 2050. Zon PV blijft onder het maximaal potentieel.

Bij de scenario's is verondersteld dat de capaciteit van de elektriciteitsnetten op land in 2050 2,5 maal groter is dan nu het geval. Het elektriciteitstransport tussen de verschillende regio's blijft, met uitzondering van een enkele verbinding, binnen de capaciteit van de netwerkverbindingen. Ook wordt uitbreiding van de elektriciteitsverbindingen met het buitenland verondersteld.

Netto exporteert Nederland in 2050 een deel van de geproduceerde elektriciteit naar het buitenland, 13% in het ADPAT-scenario en 8% in het TRANSFORM-scenario. Dat is 1,5 tot 2 keer meer dan Nederland nu importeert.

Een elektriciteitssysteem met een groot aandeel zon en wind heeft een grote behoefte aan flexibiliteit om te zorgen voor een balans tussen het fluctuerende aanbod van deze energiebronnen en de fluctuerende vraag naar elektriciteit. Deze flexibiliteit wordt geleverd door piekcentrales (aardgas), tijdelijk afschakelen van wind- en zonne-energie vermogen, vraagsturing (met name bij opladen elektrische auto's en waterstofproductie), uitwisseling met het buitenland en energieopslag (batterijen en ondergrondse energieopslag).

Het aandeel elektriciteit in het energiesysteem wordt bepaald door de kosten van elektriciteit (opwekking, transport en flexibiliteit) en de kosten van de elektrische gebruiksopties, zoals elektrisch vervoer, warmtepompen, geelektrificeerde industriële processen en energieopslag in het elektriciteitssysteem. Daarnaast is het aanbod van wind- en zonne-energie begrensd vanwege de ruimtelijke aspecten. In de twee scenario's geldt dat voor zowel wind-op-land als wind-op-zee het maximale potentieel wordt bereikt. Als de investeringskosten van de elektrische gebruiksopties in het TRANSFORM-scenario extra dalen – er is al een kostendaling in het scenario verondersteld – en het potentieel wordt verruimd, dan neemt het aandeel elektriciteit iets toe. Dit geldt nog sterker voor een extra daling van de investeringskosten voor windturbines en zonnepanelen, mits het aanbod door de ruimtelijke planning niet wordt beperkt. In het ADAPT-scenario ligt het aandeel elektriciteit veel lager en heeft de kostenverlaging nauwelijks effect.

CRUCIALE MAAR BEPERKTE ROL VOOR WATERSTOF

De toekomstige duurzame energievoorziening wordt soms voorgesteld als een waterstofeconomie. Zien we deze ontwikkeling in de twee scenario's optreden? Waterstof geproduceerd uit aardgas wordt nu nog alleen gebruikt in de industrie en bedraagt zo'n 100 PJ. In beide scenario's neemt het aandeel waterstof wel toe, maar die toename is beperkt. Waterstof is aantrekkelijk als CO₂-vrije brandstof in de transportsector, vooral voor vrachtwagens. Daarnaast zal het waterstofgebruik in de industrie groeien en wordt waterstof, in bescheiden hoeveelheden, ingezet voor verwarming in de gebouwde omgeving. Het aandeel waterstof in het energieaanbod in 2050 ligt in het ADAPT-scenario op ongeveer 8% en in het TRANSFORM-scenario op 10%.

BOX 2: KWANTIFICERING VAN DE SCENARIO'S MET HET OPERA MODEL

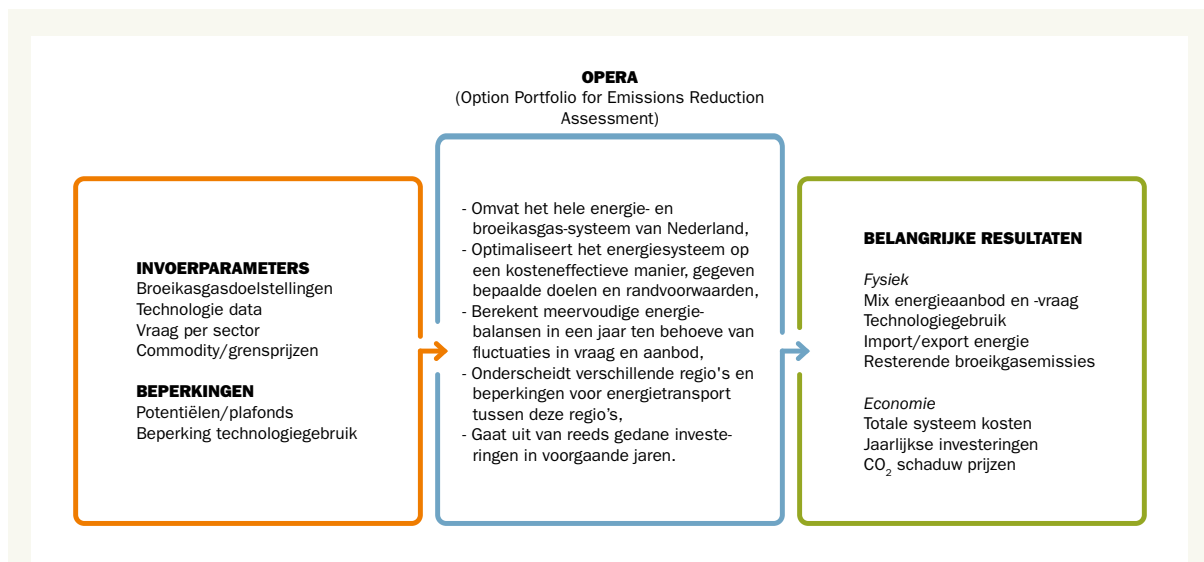
De twee scenario's zijn gekwantificeerd met behulp van het integrale energiemodel OPERA. Met het OPERA-model kunnen analyses worden uitgevoerd voor het geïntegreerde energiesysteem van Nederland. Het model bestrijkt het energiesysteem van alle sectoren (energieproductie, industrie, transport, gebouwde omgeving, agrarische sector en bunkerbrandstoffen voor internationale lucht- en scheepvaart) en het gehele broeikasgassysteem (naast CO₂ ook CH₄ en N₂O-emissies) van Nederland. Energie-uitwisseling met het buitenland is ook opgenomen in het model. Verder houdt het model rekening met pieken en dalen in vraag en aanbod van energie en wordt rekening gehouden met beperkingen in energietransport tussen verschillende regio's in Nederland. Bij bepalen van investeringen wordt rekening gehouden met investeringen die gedaan zijn in voorgaande jaren.

TECHNO-ECONOMISCHE OPTIMALISATIE

Het OPERA model is een optimalisatiemodel: het model rekent het energiesysteem en de bijbehorende emissies uit, gegeven bepaalde doelen (bijv. broeikasgasreductiedoel) en randvoorwaarden, tegen de laagste maatschappelijke kosten. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de nationale kosten-batenanalyse methode. Er worden in beginsel zo weinig mogelijk randvoorwaarden opgelegd. De enige randvoorwaarden die zijn toegepast hebben te maken met de veronderstellingen in de scenario's (bijv. geen CO₂-afvang en -opslag en beperking van het gebruik van biomassa in het TRANSFORM scenario) en fysieke limitering (bijv. transport van warmte of elektriciteit) of beleidsmatige technologie uitsluiting (geen kolencentrales). Voor een aantal opties wordt een maximaal technisch potentieel gehanteerd dat bij de optimalisatie niet kan worden overschreden. Deze potentiëlen hebben te maken met fysieke of beleidsmatige beperkingen. Maximale potentiëlen gelden voor: wind-op-land, wind-op-zee, zon-PV, geothermie, CO₂-opslag en biomassa uit binnen- en buitenland en import van biobrandstoffen en waterstof.

INVOERVARIABLEN

Voor de techno-economische optimalisatie gebruikt het model een doelstelling. In dit geval een maximale emissie van broeikasgassen. Andere invoervariabelen zijn: technische en economische data van technologie-opties (er zijn meer dan 650 technologieën waaruit het model kan kiezen, waaronder ook energiebesparingsopties en kerncentrales). Er wordt rekening gehouden met leereffecten, dat wil zeggen dat de technologiekosten naar beneden gaan en de prestaties verbeteren als gevolg van innovatie en het op steeds grotere schaal toepassen van de technologie. Verder bevat het model prijzen van energie- en energiedragers die worden geïmporteerd (olie, gas, kolen, biomassa, etc.) en de vraag naar energie (warmte, elektriciteit) van de verschillende eindverbruikerssectoren, productievolumes in de industrie (staal, ammoniak, chemicaliën) en vervoerskilometers in de transportsector.



RESULTATEN

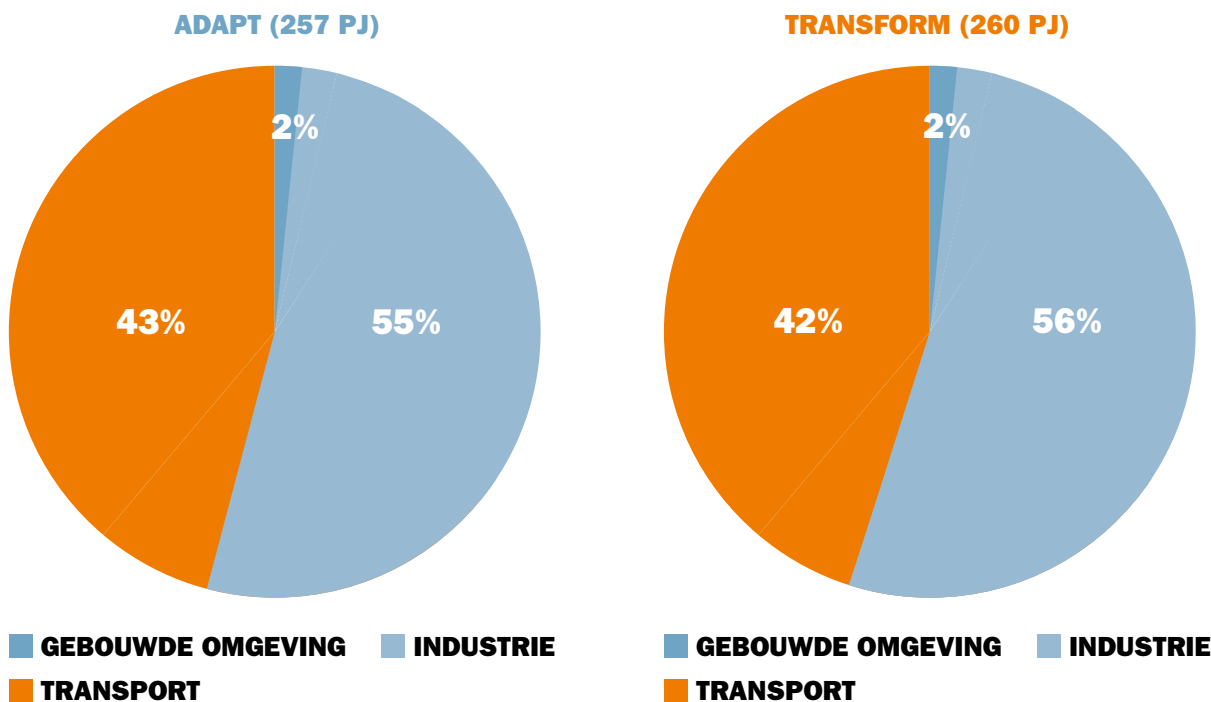
Het OPERA model levert een gedetailleerde kwantificering op van het energiesysteem. Er zijn twee typen resultaten: uitkomsten die het fysieke energiesysteem beschrijven (bijv. energieaanbod en energievraag per sector opgedeeld naar verschillende soorten energiedragers, capaciteit van energieproductie, import/export van energie, resterende broeikasgasemissies) en economische resultaten (bijv. systeemkosten, investeringskosten).

TOTALE SYSTEEMKOSTEN

Bij het bepalen van de totale systeemkosten worden alle kosten van de in het energiesysteem gebruikte technologie-opties bij elkaar opgeteld. Die kosten bestaan uit geannualiseerde investeringskosten op basis van de technische levensduur en een nationale (maatschappelijke) discontovoet van 3%, jaarlijkse operationele kosten en energiekosten. Het gaat daarbij niet alleen om technologieën voor productie of gebruik van energie, maar ook om energiebesparingsopties en kosten van infrastructuur, zoals kosten voor energietransport en -opslag. Bij de totale systeemkosten spelen belastingen en subsidies geen rol.

Het OPERA model is een optimalisatie-model: het model rekent het energiesysteem uit gegeven bepaalde doelen en randvoorwaarden.

In het ADAPT-scenario wordt waterstof grotendeels gemaakt uit aardgas. De daarbij vrijkomende CO₂ wordt afgevangen en opgeslagen in lege gasvelden onder de Noordzee. Dit wordt blauwe waterstof genoemd. De capaciteit van de CO₂-opslag wordt ook gebruikt voor CO₂ afkomstig van andere industriële processen. Dit beperkt de CO₂-opslagcapaciteit voor blauwe waterstof. Om toch aan de waterstofvraag te kunnen voldoen, wordt in het ADAPT-scenario in 2050 een klein deel van de waterstof geproduceerd met electrolyzers uit duurzaam opgewekte elektriciteit (groene waterstof). In het TRANSFORM-scenario wordt alleen groene waterstof geproduceerd. De productiecapaciteit van waterstof is in beide scenario's ongeveer 15 GW.



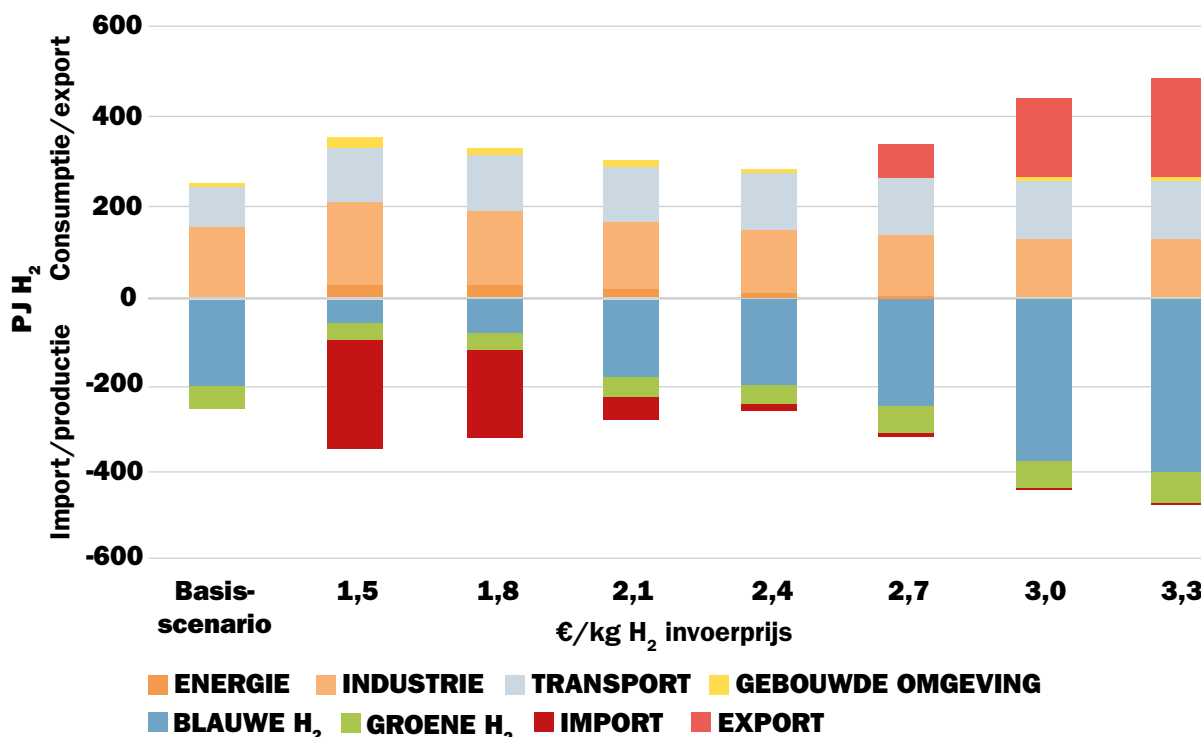
Waterstofgebruik in 2050 voor drie verschillende eindgebruikerssectoren voor het ADAPT- en TRANSFORM-scenario (incl. interne productie/gebruik industriële processen).

In beide scenario's wordt een groot deel van de geproduceerde waterstof gebruikt in de transportsector. Het aandeel waterstof in de transportsector is in het ADAPT-scenario 43% en 42% in het TRANSFORM-scenario. In beide scenario's wordt ook waterstof gebruikt in de industrie voor onder meer productie van ammonia en synthetische brandstoffen. Slechts een klein deel van de waterstof gaat naar de gebouwde omgeving.

Het gebruik van waterstof is van een groot aantal factoren afhankelijk: de kosten van waterstoftechnologieën (zowel productie als gebruik), de kosten van elektriciteit en beschikbaarheid van voldoende opwekvermogen voor wind- en zonne-energie, de beschikbare capaciteit en kosten van CO₂-opslag en de aardgasprijs (alleen voor het ADAPT-scenario) en de kosten van waterstofimport.

De inzet van waterstof is relatief beperkt, omdat er in veel sectoren andere, kosten-effectievere opties zijn om het CO₂-emissiereductiedoel te bereiken. Zowel de productie als het gebruik van waterstof zijn relatief duur. De transportsector blijkt het meest gevoelig voor verandering in de kosten: bij een extra daling van de kosten van de waterstoftechnologieën neemt met name het gebruik van waterstof van personenauto's toe. Dalen de kosten van elektrische voertuigen sterker dan bij waterstofauto's, dan gebeurt het omgekeerde. Het aandeel waterstof in het energiesysteem kan dan met enkele procentpunten toenemen. Een toename in de waterstofvraag leidt in beide scenario's tot vooral een hogere windenergieproductie op de Noordzee.

Als de prijs van in Nederland geproduceerd waterstof hoger is dan die in het buitenland, dan wordt waterstofimport interessant. De binnenlandse productie daalt, maar door de lagere prijs neemt het gebruik van waterstof toe, met name in de gebouwde omgeving. Bij lage importprijzen blijft een kleine hoeveelheid groene waterstofproductie bestaan, omdat hiermee bijgedragen wordt aan het opvangen van fluctuaties van het elektriciteitssysteem. Bij hoge prijzen op de internationale waterstofmarkt wordt het voor de Nederlandse waterstofproducenten interessant om te exporteren. De productie neemt toe waarbij het grootste deel van de geproduceerde waterstof voor de export bestemd is.

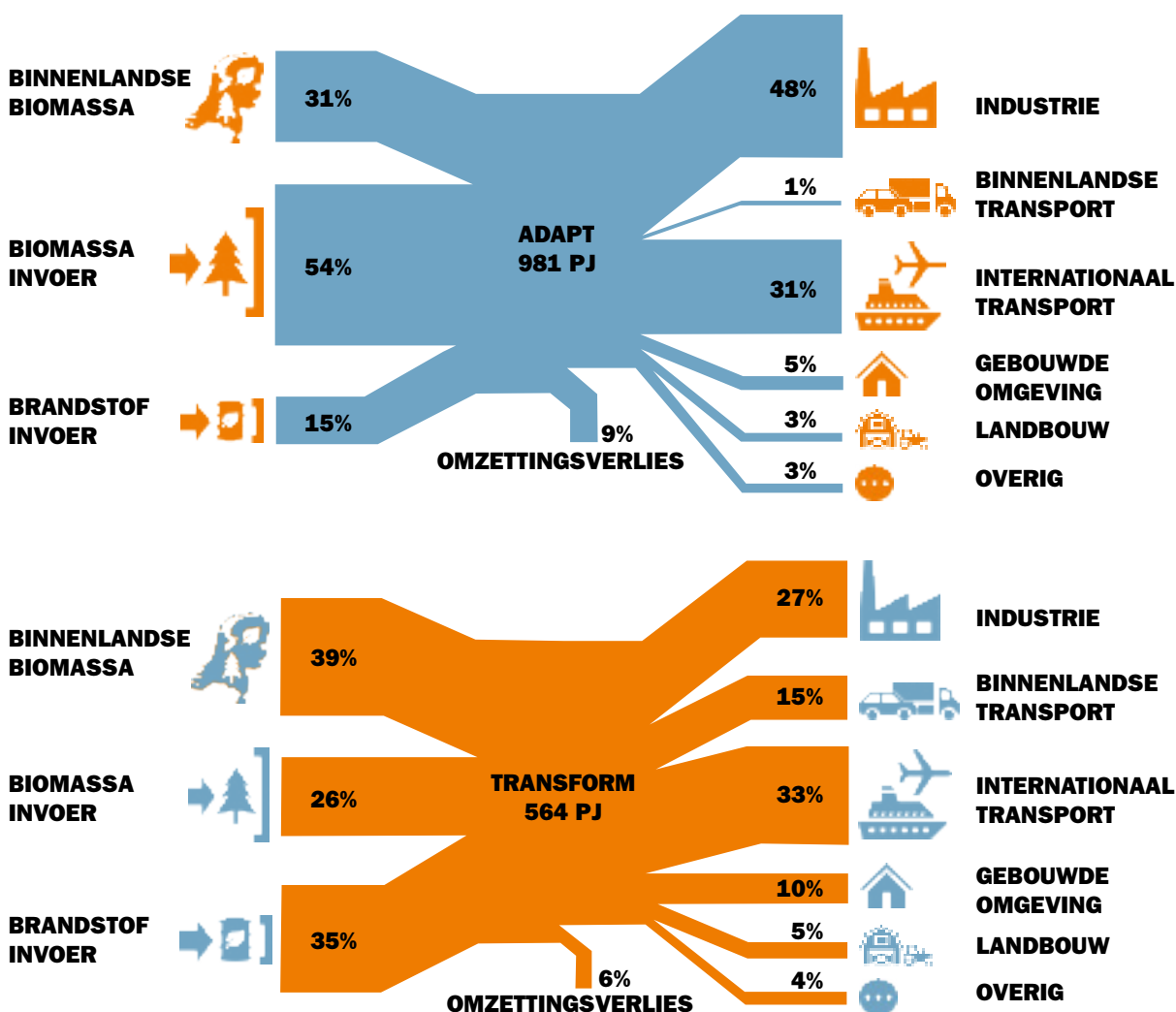


Involed van prijzen op de internationale waterstofmarkt op productie en gebruik van waterstof (excl. interne productie/gebruik industriële processen) in Nederland en op import en export van waterstof voor het ADAPT-scenario in 2050. De prijs van aardgas, relevant voor prijs van blauwe waterstof, is hierbij constant gebleven. Het TRANSFORM-scenario laat een vergelijkbaar figuur zien.

BIOMASSA VOOR INDUSTRIE EN TRANSPORTBRANDSTOFFEN

In 2018 vond ongeveer 60% van de duurzame energieopwekking in Nederland plaats met biomassa. Biomassa wordt gebruikt voor elektriciteitsopwekking, warmtevoorziening en als biobrandstof in de transportsector, in totaal 157 PJ. In het ADAPT-scenario is in 2050 het biomassa aanbod bijna 1000 PJ, waarvan twee derde wordt geïmporteerd. In het TRANSFORM-scenario bedraagt het biomassa aanbod in 2050 zo'n 340 PJ, waarvan ruim 40% wordt geïmporteerd. Naast ruwe biomassa worden ook biobrandstoffen geïmporteerd, in het ADAPT-scenario ruim 140 PJ en in het TRANSFORM-scenario 200 PJ.

In 2050 wordt biomassa niet langer ingezet voor elektriciteitsproductie. In het ADAPT-scenario wordt ongeveer de helft van de biomassa bestemd voor de industrie en ongeveer één derde voor transportbrandstoffen. De transportbrandstoffen worden vooral geproduceerd voor de internationale luchtvaart en scheepvaart. In het TRANSFORM-scenario ligt het gebruik juist andersom: ongeveer de helft van de biomassa is bestemd voor transportbrandstoffen en ongeveer één derde voor gebruik in de industrie.



Herkomst en bestemming van biomassa in 2050 voor het ADAPT-scenario (boven) en het TRANSFORM-scenario (onder)

Het biomassagebruik is afhankelijk van de beschikbaarheid van biomassa, die mede bepaald wordt door de duurzaamheidseisen die aan de biomassa worden gesteld. Daarnaast zijn de biomassa-prijs en de kosten van de biomassa-installaties bepalend.

Wanneer bovenop de verwachte kostendaling voor installaties die biomassa omzetten in gasvormige of vloeibare brandstoffen een verdere verlaging van investeringskosten wordt verondersteld en er meer import van biomassa wordt toegestaan, neemt in beide scenario's de productie van biobrandstoffen toe ten koste van de biobrandstofimport. Ook het gebruik van biobrandstoffen voor het binnenlands transport neemt dan toe, ten koste van het gebruik van waterstof. Voor internationale lucht- en scheepvaart blijft het gebruik daarvan onveranderd.

Halvering van de importprijs van biomassa en een toename van de biomassa-import laat een vergelijkbaar effect zien voor beide scenario's: vermindering van de biobrandstof-import en een toename van het gebruik van biobrandstoffen bij het binnenlands transport.

DUURZAME BRANDSTOFFEN VOOR INTERNATIONALE LUCHTVAART EN SCHEEPVAART

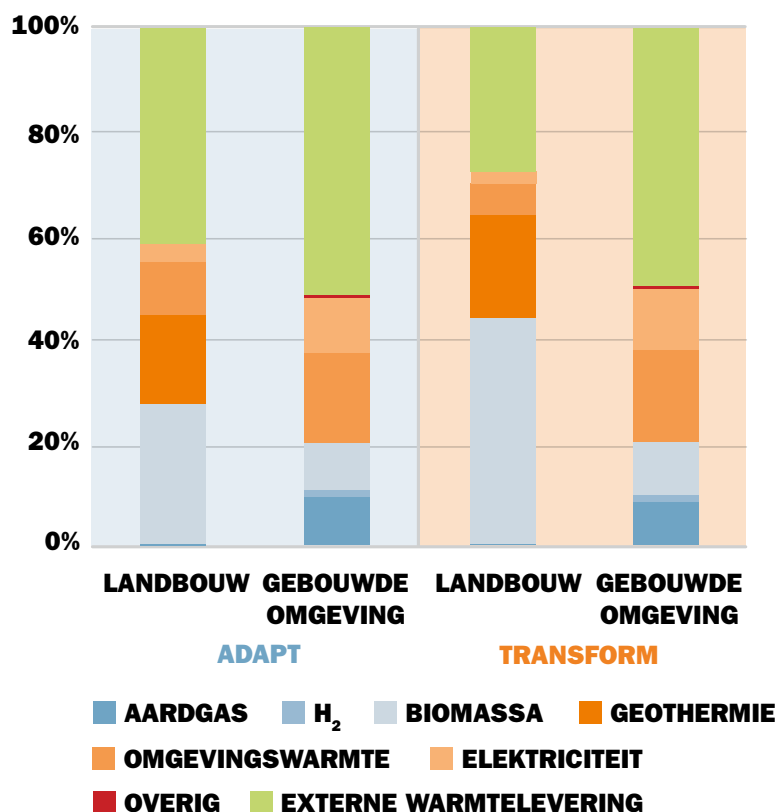
Hoewel de internationale luchtvaart en scheepvaart buiten de Nederlandse reductiedoelstelling voor broeikasgassen vallen, wordt de brandstoflevering (zgn. bunkerbrandstoffen) vanuit Nederland voor deze sectoren wel meegenomen in het OPERA model. De emissies die gepaard gaan met het produceren van deze brandstoffen tellen namelijk wel mee. Voor het ADAPT scenario is verondersteld dat de emissiereductie voor bunkerbrandstoffen 50% bedraagt.

In het TRANSFORM-scenario is de reductiedoelstelling voor bunkerbrandstoffen 95%. In het ADAPT-scenario, waarbij het in 2050 in totaal gaat om zo'n 850 PJ, wordt 55% van de fossiele brandstoffen (kerosine en zware stookolie) vervangen door biobrandstoffen (waarvan een deel wordt geïmporteerd) en synthetische brandstoffen, geproduceerd uit waterstof en CO₂. In het TRANSFORM-scenario is de omvang van de bunkerbrandstoffen 430 PJ. Hiervan bestaat ruim 50% uit synthetische brandstoffen en bijna 45% uit, voor een groot deel, geïmporteerde biobrandstoffen.

AARDGASVRIJ DOOR EEN MIX AAN ALTERNATIEVEN

Voor verwarming in de gebouwde omgeving wordt 84% aardgas ingezet. De landbouwsector, met name de glastuinbouw, heeft een vergelijkbaar percentage. Het versneld beëindigen van de Groningse gasproductie heeft de transitie naar een aardgasvrije energievoorziening een extra impuls gegeven. In 2030 zullen, volgens het Klimaatakkoord, 1,5 miljoen van de in totaal 7,5 miljoen woningen aardgasvrij moeten worden. Ook in andere sectoren (elektriciteitsproductie, industrie, agrarische sector) zal het aardgasverbruik gaan dalen.

De modelanalyses laten zien dat voor 2030 er voldoende kosteneffectieve opties zijn om het aardgasverbruik in beide scenario's met één derde te laten dalen. Dat is een snellere daling dan waarschijnlijk praktisch mogelijk is en waarvan het Klimaatakkoord uitgaat. In 2050 wordt nog een kleine hoeveelheid aardgas gebruikt voor elektriciteitsproductie, in de industrie (alleen in het ADAPT-scenario) en in de gebouwde omgeving.



Energiemix in de warmtevoorziening in 2050 voor de gebouwde omgeving en de landbouwsector in ADAPT en TRANSFORM scenario's

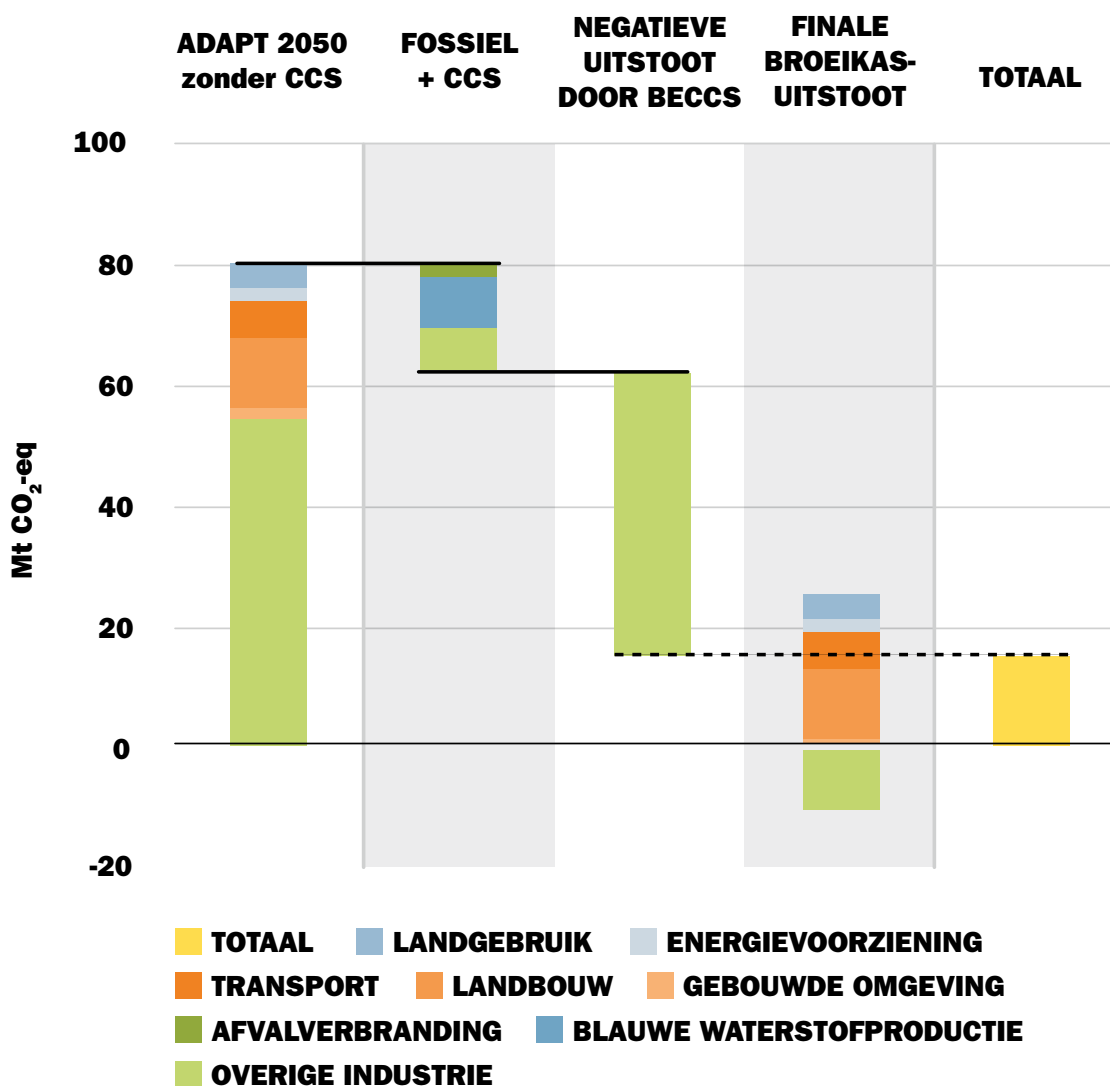
Aardgas wordt in de gebouwde omgeving vervangen door restwarmte van de industrie en afvalverbranding (warmtedistributie), warmtepompen (gebruik makend van omgevingswarmte), elektriciteit, waterstof en biomassa. Geothermie komt in geen van beide scenario's in de gebouwde omgeving voor. Dat geldt wel voor de warmtevoorziening in de glastuinbouw, waarvoor daarnaast ook restwarmte, biomassa en warmtepompen worden ingezet. Geothermie wordt naast de glastuinbouw ook gebruikt voor warmtevoorziening in de industrie. In totaal gaat het in het ADAPT-scenario in 2050 om 44 PJ en in het TRANSFORM-scenario om 39 PJ. Het gebruik van geothermie blijkt zeer gevoelig voor de kosten: als de kosten van geothermie verder dalen dan is verondersteld, verdubbelt het gebruik van geothermie en wordt deze energiebron ook gebruikt voor de warmtevoorziening in de gebouwde omgeving.

De huidige warmtelevering aan warmtenetten door elektriciteitscentrales zal verschuiven naar restwarmtelevering vanuit de industrie en fors toenemen. Het uitbreiden en realiseren van nieuwe warmtenetwerken kan in de praktijk lastig zijn. Daarvoor kunnen technische redenen zijn, maar ook maatschappelijke bezwaren, die kunnen voortkomen uit de perceptie bij afnemers dat warmtenetten duurder zijn en er geen keuzevrijheid is. Als de warmtelevering vanuit de industrie minder groot is dan in de basisscenario's is aangenomen, dan vindt in beide scenario's een verdere elektrificatie van de warmtevoorziening plaats (d.w.z. meer warmtepompen en elektroboilers). Hoewel de omvang verschilt, zijn de verschuivingen in de energiemix bij de gebouwde omgeving en de agrarische sector vergelijkbaar.

HOE WORDT DE BROEIKASGAS-EMISSIEREDUCTIE GEREALISEERD?

De emissies van broeikasgassen dalen door minder energievraag (met name in het TRANSFORM-scenario), energiebesparende maatregelen, vervanging van fossiele door duurzame energiebronnen, en door opslag van CO₂ (alleen in het ADAPT-scenario). In 2050 mag slechts een broeikasgasemissie van 15 Mton CO₂ equiv. overblijven. In het TRANSFORM-scenario zijn de resterende broeikasgasemissies in 2050 voor driekwart afkomstig van de landbouwsector (vooral methaan uit veeteelt), de transportsector en emissies door landgebruik, verandering in landgebruik en bosbouw (LULUCF). In het ADAPT-scenario zijn de resterende emissies 27 Mton (voor 85% afkomstig van agrarische sector, transport en LULUCF), maar wordt het doel toch bereikt door CO₂-opslag van biomassaprocessen in de industrie die leiden tot negatieve emissies.

In het ADAPT-scenario wordt in 2050 jaarlijks 50 Mton CO₂ opgeslagen. Hierbij is uitgegaan van de beschikbaarheid aan opslagcapaciteit op het Nederlandse deel van de Noordzee. De opslagcapaciteit op de hele Noordzee is aanzienlijk groter. In 2050 wordt CO₂ afgevangen en opgeslagen bij afvalverbranding, productie van blauwe waterstof, staal en chemicaliën en bij andere industriële processen. Het aandeel opgeslagen CO₂ afkomstig van de productie van blauwe waterstof is in 2050 zo'n 9 Mton CO₂. In beide scenario's wordt ook afgevangen CO₂ gebruikt bij de productie van synthetische brandstoffen (CO₂-afvang en gebruik). In het TRANSFORM scenario is die CO₂ afkomstig van biomassa-processen.



Deze watervalgrafiek laat zien hoe in het ADAPT scenario door CO₂-afvang en -opslag de uitstoot van broeikasgassen in de industrie vermindert tot negatieve waarden waardoor andere sectoren meer broeikasgassen kunnen uitstoten. Met de resterende broeikasgasemissies wordt de doelstelling van 95% reductie gehaald. (CCS = Carbon Capture & Storage; BECCS = Bio-Energie Carbon Capture & Storage)

Er kunnen verschillende redenen zijn waardoor CO₂-afvang en -opslag minder wordt toegepast of helemaal niet van de grond komt. Dit kunnen maatschappelijke bezwaren zijn (men ziet bijvoorbeeld nog veiligheidsrisico's of vreest vertraging van verduurzaming van de industrie) of vertraging bij de technische implementatie (bijvoorbeeld beschikbaarheid van geschikte gasvelden, beschikbaarheid van CO₂-pijplijn infrastructuur). Als minder CO₂ kan worden opgeslagen zal dit voor het ADAPT-scenario leiden tot een grotere productie van synthetische brandstoffen uit waterstof en afgevangen CO₂. Deze synthetische brandstoffen worden gebruikt in de internationale luchtvaart en scheepvaart, waarvoor in het ADAPT-scenario een minder strenge emissiereductiedoelstelling geldt. CO₂-opslag bij biomassa-processen, dat leidt tot negatieve emissies, blijft een belangrijke rol spelen. Er ontstaat meer vraag naar elektriciteit. De extra elektriciteitsproductie komt van windturbines op de Noordzee en van zonnepanelen.

VOOR VERGROTING VAN INZICHTEN ZIJN NOG MEER EN ANDERE MODELANALYSES NODIG

De uitgevoerde modelanalyses geven veel aanknopingspunten voor vervolgonderzoek. Wat zijn bijvoorbeeld de economische gevolgen van de twee toekomstbeelden en wat zijn de onderlinge interacties tussen de economische ontwikkeling van de verschillende sectoren. Ook de gevolgen van de scenario's voor de ruimtelijke ordening verdienen nadere analyse. Dit geldt verder voor analyses van andere milieueffecten die optreden bij toepassing van duurzame energie, zoals minder luchtvervuiling en stikstofemissies, en veranderingen in eindgebruik, zoals minder afvalproductie en meer circulair gebruik van producten en grondstoffen. Nederland is economisch sterk verbonden met andere landen en geografisch ingebed tussen landen rond de Noordzee. Ontwikkelingen elders in Europa en de wereld en energie- en klimaatbeleid in de ons omringende landen zullen invloed hebben op de energietransitie in Nederland. Hoewel de buitenlandse invloeden zijn meegenomen bij de aangenomen kostendaling van technologie en bij veronderstellingen over import/export van energie, zal een geïntegreerde analyse van ontwikkelingen in Nederland met die in Europa en de wereld het inzicht op deze invloeden kunnen vergroten. Ook macro-economische effecten van de transitie, zoals groei en krimp van verschillende sectoren, werkgelegenheid en effecten op de handelsbalans zijn zeer belangrijk in besluitvorming en verdienen nadere analyse. Bij al deze vragen gaat het om complexe interacties waarbij andere modelanalyses behulpzaam kunnen zijn om een nog beter inzicht te verkrijgen op de ontwikkeling van het toekomstige Nederlandse energiesysteem en de Nederlandse economie.

› EINDNOTEN

- 1 André Faaij en Ruud van den Brink, Energie wordt goedkoper – Innovatie maakt de energietransitie rendabel, TNO, maart 2019
- 2 Jos Sijm, Luuk Beurskens, Marc Marsidi, Robin Niessink, Martin Scheepers, Koen Smekens, Adriaan van der Welle, Hein de Wilde, Review of energy transition scenario studies of the Netherlands up to 2050, februari 2020, TNO 2019 P12095
- 3 Rijksoverheid, Klimaatwet, 2 juli 2019
- 4 Klimaatakkoord, Den Haag, 28 juni 2019
- 5 Martin Scheepers, Silvana Gamboa Palacios, Elodie Jegu, Larissa Pupo Nogueira De Oliveira, Loes Rutten, Joost van Stralen, Koen Smekens, Kira West, Towards a sustainable energy system for the Netherlands in 2050, TNO 2020 P10338, mei 2020

Contact

Martin Scheepers

RESEARCH MANAGER
ENERGY TRANSITION STUDIES

✉ martin.scheepers@tno.nl

André Faaij

WETENSCHAPPELIJK DIRECTEUR
TNO ENERGY TRANSITION

Ruud van den Brink

PROGRAMMAMANAGER
EMBEDDING & INTEGRATION
TNO ENERGY TRANSITION

TNO innovation
for life

TNO.NL