

› WHITEPAPER

EEN KLIMAATNEUTRAAL ENERGIESYSTEEM VOOR NEDERLAND

NIEUWE VERKENNING TOONT GRENZEN
MOGELIJKHEDEN

TNO innovation
for life

› Martin Scheepers

› april 2022

› EEN KLIMAATNEUTRAAL ENERGIESYSTEEM VOOR NEDERLAND

NIEUWE VERKENNING TOONT GRENZEN MOGELIJKHEDEN

SAMENVATTING

Volgens het regeerakkoord van Rutte IV zullen de broeikasgasemissies in 2030 met tenminste 55% moeten worden gereduceerd en zal Nederland in 2050 klimaatneutraal moeten zijn. Hiermee geeft Nederland invulling aan de aangescherpte Europese doelstellingen. Ook komt er een klimaatdoel voor circulaire economie dat zal moeten leiden tot verduurzaming van grondstoffen en materialen. TNO heeft de in 2020 opgestelde scenario's (ADAPT en TRANSFORM) aangepast om te onderzoeken wat aanscherping van de doelstellingen betekent voor het verduurzamen van het Nederlandse energiesysteem in de periode na 2030. In het TRANSFORM-scenario, dat qua duurzaamheid ambitieuzer is dan ADAPT, worden in de nieuwe analyse geheel nieuwe industriële processen toegepast voor productie van chemicaliën en brandstoffen; in ADAPT zijn de veranderingen in de industrie beperkter. Daarnaast is voor het TRANSFORM-scenario een duurzaamheidsdoelstelling van toepassing voor koolwaterstoffen die gebruikt worden voor de productie van chemicaliën en kunststoffen. Hiermee is de lat voor TRANSFORM hoger gelegd dan bij de scenarioanalyse van 2020. Andere scenarioveronderstellingen zijn gelijk gebleven: door gedragsverandering en verdergaande energiebesparing is de energievraag in het TRANSFORM-scenario bijvoorbeeld lager dan in ADAPT en de reductiemaatregelen voor de internationale luchtvaart en scheepvaart, waarvan de emissies buiten de nationale klimaatdoelstelling vallen, zijn in TRANSFORM strenger in vergelijking met ADAPT. Het ADAPT-scenario is minder ambitieus dan TRANSFORM doordat fossiele brandstoffen gebruikt kunnen blijven worden. In ADAPT voldoet Nederland wel aan de Europese doelstellingen, maar is de bijdrage aan het halen van het Parijse klimaatdoel beperkter dan in TRANSFORM.

Voor beide scenario's is in deze nieuwe studie verondersteld dat het grootste deel van de energievraag, met uitzondering van import van biomassa en elektriciteit, wordt voorzien vanuit energieproductie in Nederland. De scenario's zijn doorgerekend met een energiesysteemmodel dat voor Nederland een energiesysteem bepaalt waarmee tegen de laagste maatschappelijk kosten de energievraag kan worden gedekt en de emissiedoelstellingen kunnen worden gerealiseerd.

De resultaten van deze nieuwe scenariostudie kunnen worden samengevat in de volgende kernboodschappen:

1. Nederland is in staat om in grote mate zelf te voorzien in de toekomstige energievraag met hernieuwbare energiebronnen. Wind- en zonne-energie zijn de belangrijkste bronnen en afhankelijk van de groei van de energievraag zal kernenergie deel kunnen uitmaken van de energiemix. Wel blijft Nederland voor fossiele brandstoffen van importen afhankelijk in de periode waarin het Nederlandse energiesysteem nog niet volledig is verduurzaamd. Er is ook een energiesysteem mogelijk waarin fossiele brandstoffen in 2050 een rol blijven spelen, en dat toch aan de Europese broeikasgasreductiedoelen voldoet.
2. Een toekomstig energiesysteem met ambitieuze duurzaamheidsambities hoeft niet duurder te zijn dan een energiesysteem waarmee Nederland wel voldoet aan de in Europa afgesproken reductiedoelen, maar waarin de transitie minder ver is doorgevoerd bij onder andere gebruik van duurzame grondstoffen en productie van duurzame brandstoffen voor lucht- en scheepvaart.
3. De elektriciteitsvraag groeit fors van 110 TWh nu naar ruim 300 TWh tot mogelijk meer dan de 500 TWh in 2050. Naast elektrificatie van energiegebruik in alle eindgebruikerssectoren is de groei vooral afhankelijk van de vraag naar waterstof vanuit de industrie en in hoeverre deze in Nederland uit groene stroom wordt geproduceerd. De vraag naar groene waterstof kan zeer groot worden als de grondstoffen in de industrie verder worden verduurzaamd en duurzame brandstoffen voor lucht- en scheepvaart in Nederland worden geproduceerd.
4. Voor het produceren van duurzame chemicaliën en kunststoffen zijn, naast gerecyclede plastics, biograndstoffen nodig. Biograndstoffen zijn ook nodig voor biobrandstoffen voor onder meer de luchtvaart. Biograndstoffen moeten voor een deel worden geïmporteerd, omdat Nederland zelf hier onvoldoende in kan voorzien.
5. Negatieve emissies zijn nodig om bepaalde moeilijk te reduceren broeikasgasemissies te compenseren en zo in 2050 broeikasgasneutraliteit te bereiken. Negatieve emissies kunnen worden gerealiseerd door CO₂ afkomstig uit biomassa of uit de lucht op te slaan in lege gasvelden, of bijvoorbeeld meer bomen aan te planten die CO₂ uit de lucht vastleggen.

Deze whitepaper is gebaseerd op een scenariostudie waaraan is bijgedragen door Silvana Gamboa Palacios, Gaby Janssen, Jonathan Moncada Botero, Joost van Stralen, Carina Oliveira Machado dos Santos, Ayla Uslu en Kira West.

› INHOUD

INLEIDING

5

NIEUWE UITKOMSTEN ADAPT- EN TRANSFORM-SCENARIO'S

9

TRANSPORTBRANDSTOFFEN EN CHEMICALIËNPRODUCTIE

29

BIJLAGE

36

INLEIDING

In 2020 publiceerde TNO de resultaten van een scenariostudie naar een duurzame energiehuishouding voor Nederland in 2050¹. Die scenariostudie beschreef de mogelijke ontwikkeling van het Nederlandse energiesysteem aan de hand van twee scenario's: ADAPT en TRANSFORM. Scenariostudies hebben echter maar een beperkte 'houdbaarheid'. Nieuwe beleidsuitgangspunten en voortschrijdende kennis over het toekomstige energiesysteem en de daarin toe te passen technieken, maken het noodzakelijk dit soort studies regelmatig opnieuw uit te voeren. Om die reden zijn de ADAPT- en TRANSFORM-scenario's opnieuw door TNO doorgerekend. De nieuwe scenariostudie gaat uit van nieuwe aangescherpte reductiedoelstellingen voor broeikasgassen: 55% reductie ten opzichte van 1990 in 2030 (dat was bij de vorige scenariostudie 49%) en broeikasgasneutraliteit in 2050 (was 95% reductie), in lijn met het EU-beleid en het Regeerakkoord van Rutte IV. Ook zijn de techno-economische parameters van een groot aantal technologieën aangepast aan de laatste inzichten.

In het ADAPT-scenario bouwt de Nederlandse economie voort op de bestaande sterktes met behoud van de huidige levensstijl, maar met een aanzienlijke vermindering van de CO₂-uitstoot. In het TRANSFORM-scenario kiest de Nederlandse samenleving voor een structurele verandering naar een meer duurzame economie, waardoor Nederland minder energie-intensief wordt. Voor beide scenario's zijn met behulp van het energiesysteemmodel OPERA kwantitatieve projecties gemaakt voor een Nederlandse energiesysteem dat vanuit macro-economisch perspectief tegen de laagste kosten kan voldoen aan doelstellingen voor broeikasgasreductie.

Met deze scenariostudie wil TNO bijdragen aan weloverwogen beslissingen op het gebied van de energietransitie die zich kenmerken door langjarige trajecten en kapitaalintensieve investeringen. Energiescenario's kunnen beleidsmakers en andere partijen die betrokken zijn bij de energietransitie, zoals energiebedrijven, netbeheerders, technologieontwikkelaars en energiegebruikers, helpen bij het verkrijgen van inzicht in de ontwikkeling van het energiesysteem en bij het maken van goed doordachte keuzes en beslissingen. Daarbij geven energiescenario's, die zijn berekend tegen de laagste maatschappelijke kosten, richting aan beleid om het energiesysteem betaalbaar te houden. Op basis van deze scenariostudie zijn in Box 1 aanbevelingen geformuleerd voor het energie- en klimaatbeleid. Bij het realiseren van de energietransitie ontstaan knelpunten en die zullen door de aanscherping van de doelstellingen steeds meer worden gevoeld. De TNO-whitepaper 'De energietransitie moet sneller'² identificeert deze knelpunten en doet voorstellen voor maatregelen die de belemmeringen kunnen helpen wegnemen.

In de nieuwe scenariostudie heeft de productie van chemicaliën en transportbrandstoffen in de Nederlandse industrie bijzondere aandacht gekregen. In de petrochemische industrie zijn de productieprocessen voor deze verschillende producten sterk met elkaar verweven. Dit blijft ook zo als deze processen worden verduurzaamd en gebruikmaken van hernieuwbare energie en grondstoffen. Voor het TRANSFORM-scenario, waarin de maatschappij streeft naar een vergaande

1 Scheepers, Faaij, & van den Brink, Scenario's voor Klimaatneutraal Energiesysteem, Whitepaper, 2020

2 Andrés, Scheepers, van den Brink, Smokers, De energietransitie moet sneller, Whitepaper, 2022

verduurzaming, is in de nieuwe studie verondersteld dat in 2050 de geproduceerde hoogwaardige chemicaliën³ voor 90% worden gemaakt van hernieuwbare koolstof, dat wil zeggen koolstof die afkomstig is van biomassa of CO₂ uit de lucht. Daarnaast worden gerecyclede plastics gebruikt als circulaire optie. Dit sluit aan bij het Regeerakkoord dat spreekt over een ambitieus klimaatdoel voor de circulaire economie en bij adviezen die aangeven dat, naast vastlegging van koolstof in materialen, gestreefd moet worden naar recycling en toepassing van kort-cyclische koolstof^{4,5}. In het ADAPT-scenario is geen doelstelling voor verduurzaming van de koolstof in chemicaliën opgenomen, waardoor in dit scenario nog steeds fossiele brandstoffen als grondstof gebruikt kunnen blijven worden. Voor beide scenario's is in de nieuwe studie verder aangenomen dat alle brandstoffen die in Nederland worden getankt (inclusief brandstoffen voor vliegtuigen en zeeschepen) ook in Nederland worden geproduceerd. Er vindt geen brandstofproductie plaats voor de export. Daarnaast wordt rekening gehouden met import van fossiele brandstoffen en biomassa, en met uitwisseling van elektriciteit met onze buurlanden, maar vindt geen import plaats van andere energiedragers (waterstof, biobrandstoffen, etc.). Deze aannames maken het mogelijk om te beoordelen voor welke uitdagingen de energietransitie staat als duurzame energie en groene grondstoffen vanuit het buitenland beperkt beschikbaar zijn of duurder zijn in vergelijking met productie in Nederland. Door te 'draaien aan de knoppen' van het model is de gevoeligheid van de uitkomsten onderzocht voor een aantal veronderstellingen, waaronder verlagen van de biomassa-import, het verhogen van de fossiel brandstofprijzen en het toelaten van import van waterstof, bio-nafta en gerecyclede plastics.

De nieuwe modelresultaten voor de ADAPT- en TRANSFORM-scenario's worden in deze paper bondig gepresenteerd. 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 – Scenario update and analysis of heat supply and chemical and fuel production from sustainable feedstocks'⁶.

3 Hoogwaardige chemicaliën verwijzen naar olefinen (zoals ethyleen, propyleen en butadiëen) en aromaten (zoals benzeen).

4 SER, Biomassa in balans - Een duurzaamheidskader voor hoogwaardige inzet van biograndstoffen, 2020

5 Carus M., L. Dammer, A. Raschka, P. Skoczinski, C. vom Berg, Renewable Carbon – Key to a Sustainable and Future-Oriented Chemical and Plastic Industry, NOVA Institute, 2020

6 Scheepers M., S. Gamboa Palacios, G. Janssen, J. Moncada Botero, J. van Stralen, C. Oliveira Machado dos Santos, A. Uslu, K. West, Towards a sustainable energy system for the Netherlands in 2050 – Scenario update and analysis of heat supply and chemical and fuel production from sustainable feedstocks, TNO 2022 P10162

BOX 1: HANDELINGSPERSPECTIEF

De scenario's laten zien hoe een klimaatneutraal energiesysteem in Nederland kan worden gerealiseerd bij twee toekomstbeelden met verschillende verduurzamingsambities.

Uitgangspunt daarbij is het streven naar een energiesysteem met laagste maatschappelijke kosten. De scenario's geven daarbij inzicht in de mogelijke ontwikkeling van het toekomstige Nederlandse energiesysteem. Op basis hiervan zijn onderstaande aanbevelingen geformuleerd voor het Nederlandse energie- en klimaatbeleid:

ELEKTRICITEIT, WATERSTOF EN WARMTE

- Houd rekening met een groei van de elektriciteitsvraag van ca. 110 TWh tot boven de 300 TWh in 2050 (en mogelijk zelfs boven de 500 TWh). Naast elektrificatie van energiegebruik in de verschillende eindgebruikerssectoren is de groei vooral afhankelijk van de vraag naar waterstof vanuit de industrie en in hoeverre deze in Nederland kosteneffectief via elektrolyse kan worden geproduceerd. De waterstofvraag is daarbij afhankelijk van de mate waarin het grondstofgebruik wordt verduurzaamd en duurzame bunkerbrandstoffen voor lucht- en scheepvaart in Nederland worden geproduceerd.
- Zet kernenergie, als optie voor CO₂-vrije elektriciteit, in wanneer de elektriciteitsvraag boven de productie uitkomt dat maximaal met wind- en zonne-energie kan worden opgewekt. Inzet van kernenergie in plaats van wind- en zonne-energie kan leiden tot hogere maatschappelijke kosten.
- Stimuleer het gebruik van restwarmte in de industrie binnen de industriesector zelf en voor energielevering via warmtenetten aan gebouwde omgeving en glastuinbouw.

BRANDSTOFFEN, GRONDSTOFFEN EN CO₂

- Stimuleer de Nederlandse chemische industrie tot omschakelen van fossiele naar hernieuwbare grondstoffen en gerecyclede plastics. Zorg met het faciliteren van de aanleg/uitbreiding van de benodigde infrastructuur en adequate marktinrichting dat de groei van duurzame elektriciteits- en waterstofproductie daarmee in de pas blijft lopen.
- Stimuleer de ontwikkeling van productie voor biobrandstoffen, met name voor de lucht- en scheepvaart.
- Zorg voor voldoende beschikbaarheid van duurzame biomassa voor productie van chemicaliën en biobrandstoffen. Naast biomassa uit Nederland gaat het daarbij vooral om import van houtige biomassa.
- Faciliteer de import van energiedragers, grondstoffen en halffabricaten.
De productie in Nederland van duurzame brandstoffen en chemicaliën legt een grote druk op het Nederlandse energiesysteem. Import van waterstof, maar in bijzonder van koolstofhoudende producten als methanol, biobrandstoffen (bijv. bio-kerosine, biodiesel, bio-HVO), bio-nafta en/of gerecyclede plastics, kan de groei van in Nederland geproduceerde elektriciteit en waterstof verkleinen en, als de importprijs lager is dan de kostprijs bij binnenlandse productie, leiden tot lagere systeemkosten.
- Stimuleer de ontwikkeling en toepassing van technologie voor CO₂-afvang uit industriële processen en uit de lucht. Deze technologie is belangrijk voor het realiseren van CO₂-reductie, maar ook voor beschikbaarheid van koolstof voor de productie van chemicaliën en synthetische brandstoffen. Afvang van CO₂ bij productie van biobrandstoffen kan daarbij zorgen voor duurzame CO₂ ten behoeve van industriële toepassingen.
- Maak opslag van tenminste 10 tot 20 Mton CO₂ per jaar mogelijk. Hiermee kunnen in 2050 moeilijk te reduceren broeikasgasemissies worden gecompenseerd met negatieve emissies (CO₂ afkomstig uit biomassaprocessen of afgevangen uit de lucht) als andere reductieopties niet of onvoldoende beschikbaar zijn.

GEBRUIK EN BESPARING

- Richt beleid op het verlagen van consumptie van producten en diensten die veel energie en grondstoffen vragen. Uit deze studie blijkt dat we tegen de grenzen van wat mogelijk is aan

kunnen lopen als we de energievoorziening en het grondstoffengebruik klimaatneutraal willen maken. Bovendien is er een aantal activiteiten, zoals veeteelt, lucht- en scheepvaart, die niet of moeilijk klimaatneutraal te maken zijn. Een lagere energievraag maakt het systeem goedkoper en eenvoudiger te realiseren.

- Stel energiebesparingsdoelen voor alle sectoren. Zelfs als het energieaanbod duurzaam wordt, blijft energiebesparing door betere isolatie, zuinigere vervoermiddelen, efficiëntere processen en het sluiten van kringlopen, belangrijk, omdat het de energievraag verlaagt en tot een goedkoper en eenvoudiger te realiseren energiesysteem leidt.
- Richt beleid in dat zorgt dat alle groepen in de samenleving mee gaan in de transitie - zowel arme als rijke huishoudens. De transitie naar een klimaatneutraal energiesysteem vergt investeringen en aanpassingen van huishoudens, bedrijven en de overheid. Om het doel van klimaatneutraal in 2050 moet iedereen meedoen.

ONDERZOEK

- Bevorder onderzoek waarmee kennis en inzichten worden vergroot rond ontwikkelingen die nog onzeker zijn, zoals bijvoorbeeld:
 - Welke duurzame brandstoffen in de zeescheepvaart de voorkeur zouden moeten krijgen?
 - Consequenties van de import van energiedragers en grondstoffen voor de coproductie van biobrandstoffen en duurzame chemicaliën en voor de ontwikkeling van bio-raffinaderijen en chemische industrie in Nederland.
- Laat, ter ondersteuning van het energie- en klimaatbeleid, in de komende jaren periodiek (om de twee tot drie jaar) een scenariostudie uitvoeren naar de lange termijn ontwikkelingen van het Nederlandse energiesysteem. Daarbij is het belangrijk dat de analyses betrekking hebben op het gehele energiesysteem en alle broeikasgassen die daarin een rol spelen. De in de analyses gebruikte parameters (onder meer voor de technologieopties) en mogelijke procesroutes zullen daarbij moeten worden geüpdatet en gebaseerd op de laatste wetenschappelijke inzichten.

› NIEUWE UITKOMSTEN ADAPT- EN TRANSFORM-SCENARIO'S

De twee energiestenario, ADAPT en TRANSFORM, komen voort uit een verschillende kijk op de toekomst. Box 2 beschrijft de toekomstbeelden en geeft een toelichting op de uitwerking van de scenario's. De kenmerken van de scenario's zijn in onderstaande tabel samengevat. De scenario's zijn ten opzichte van de vorige scenariostudie op een aantal punten gewijzigd. Allereerst zijn de reductiedoelen voor broeikasgassen aangepast aan de nieuwe Europese afspraken en het nieuwe Regeerakkoord⁷. Hierbij wordt uitgegaan van een reductiedoelstelling voor Nederland voor alle sectoren gezamenlijk waarbij vanaf 2035 ook emissies van landgebruik, verandering van landgebruik en bosbouw (LULUCF) meetellen. Daarnaast zijn de energievraagontwikkeling en de brandstofprijzen geactualiseerd en gebaseerd op de Klimaat- en energieverkenningen (KEV 2020) en van daaruit geëxtrapoleerd.

Box 4 maakt een globale vergelijking van de resultaten van de resultaten van nieuwe scenariostudie met de vorige en enkele andere voor Nederland gepubliceerde scenario's.

⁷ In het Regeerakkoord van Rutte IV is het reductiedoel voor 2030 tenminste 55% (waarbij het beleid streeft naar 60%), voor 2040 80% en in 2050 zal Nederland klimaatneutraal zijn. Voor de scenariostudie is uitgegaan van een broeikasgasreductiedoel van 55% in 2030, 77,5% in 2040 en broeikasgasneutraal in 2050.

	ADAPT	TRANSFORM
Nationaal broeikasgasreductiedoel 2030 t.o.v. 1990, excl. LULUCF	55%	55%
Nationaal broeikasgasreductiedoel 2050 t.o.v. 1990, incl. LULUCF	100%	100%
Broeikasgasreductiedoel in 2050 voor internationale luchtvaart (t.o.v. 2005) en scheepvaart (t.o.v. 2008)	50%	95%
Aandeel niet-fossiele koolstof in producten in 2050	0%	90%
Brandstofprijzen	Constant vanaf 2030	Constant vanaf 2030
Industrie		
Energievraag	↑	↓
Productie	↑	↓
Energievraag dienstensector	↑	↑ ↑
Energievraag agrarische sector	↑	↓
Mobiliteitsvraag		
Binnenland	↑	↓
Internationaal	↑	↓
Biomassa beschikbaarheid		
Binnenland	+++	++
Import	+++	++
Gebruik CO ₂ -opslag	+++	+
Gebruik kolencentrales	Nee	Nee

Onderscheidende invoerparameters in de ADAPT- en TRANSFORM-scenario's

↑ betekent groei, extra groei ↑ ↑ en ↓ krimp; +++ betekent ruime, ++ matige en + beperkte beschikbaarheid

BOX 2: 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 in 2030 gestreefd naar 55% reductie van broeikasgasemissies en in 2050 naar broeikasgasneutraliteit. De Nederlandse economie blijft in beide scenario's in dezelfde mate groeien. 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 overheid, burgers en bedrijven. Ander dimensies, zoals 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 dalen. In de afgelopen decennia hebben olie, kolen en gas gezorgd voor een sterke industrie, een sterke transport- en logistieke sector, 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 energiegebruikssectoren relatief beperkt is. 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 blijven groeien. Voor de internationale luchtvaart en scheepvaart, waarvan de broeikasgasemissies buiten de nationale doelstelling vallen, wordt gestreefd naar een halvering van de broeikasgasemissies. 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, energiezuinig 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 een stimulerende en voorwaardenscheppende rol en is niet bang om verstrekkende beslissingen te nemen.

Doordat burgers meer milieubewust zijn en daar ook naar handelen, neemt de energievraag 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, er worden zoveel mogelijk gerecyclede en duurzaam verkregen grondstoffen ingezet 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 een 95% reductiedoelstelling. CO₂-opslag wordt slechts beperkt toegepast en biomassa wordt vooral ingezet voor toepassingen waarvoor geen alternatieven zijn.

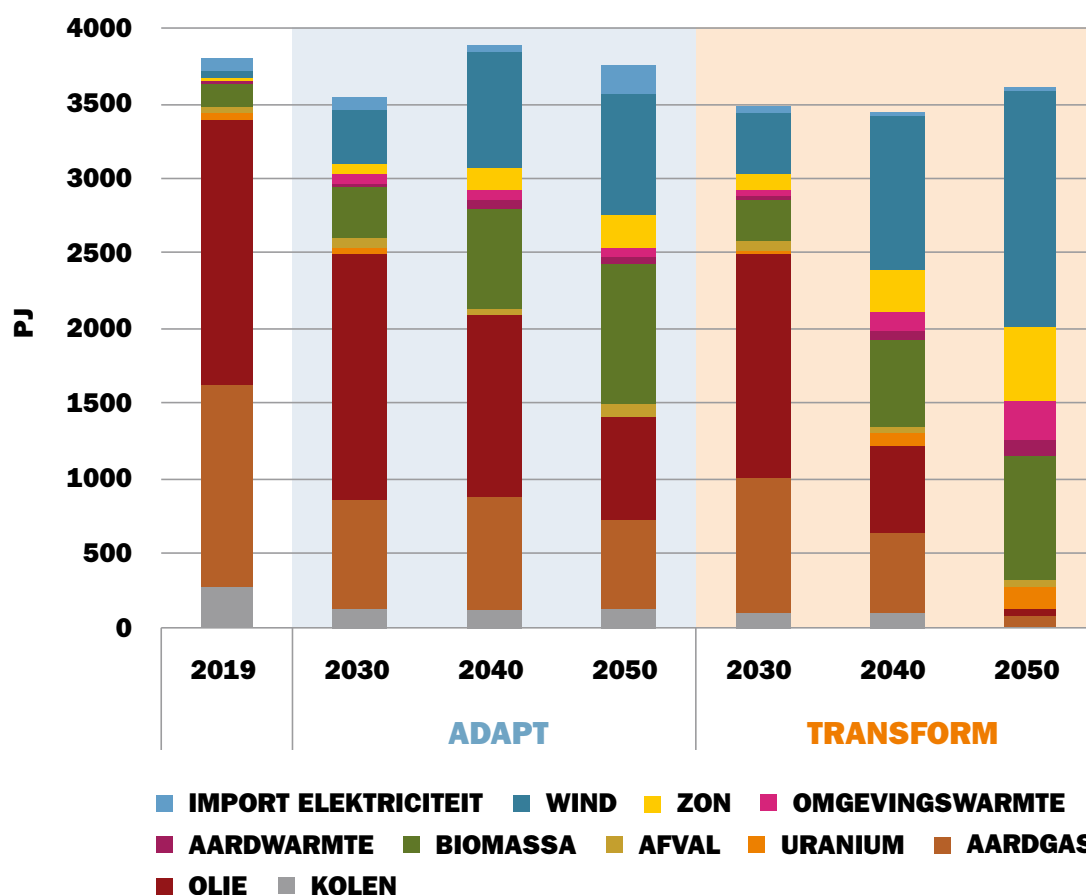
KWANTIFICERING VAN DE SCENARIO'S

Voor beide scenario's is de energiehuishouding voor drie zichtjaren berekend: 2030, 2040 en 2050. Voor de reductiedoelen voor broeikasgassen is aangesloten bij het Europese beleid (55% reductie in 2030 ten opzichte van 1990 en broeikasgasneutraal in 2050). Er is uitgegaan van een lineair reductiepad met een 77,5% reductie in 2040. De doelstellingen zijn niet gedifferentieerd naar ETS- en ESR-sector. De LULUCF-emissies tellen vanaf 2040 mee in de doelstelling. Voor de energievraagontwikkeling is aangesloten op de energievraag uit de Klimaat- en Energieverkenning 2020. De veronderstellingen van de scenario's zijn vertaald naar inputvariabelen voor het model die voor een aantal verschillend zijn (zie tabel). 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.

TOTAAL PRIMAIR ENERGIE-AANBOD

De primaire energie waarmee het Nederlandse energiesysteem de komende decennia zal worden voorzien bestaat in de ADAPT- en TRANSFORM-scenario's voor een steeds groter deel uit duurzame bronnen terwijl het aandeel fossiele brandstoffen afneemt. Door de mogelijkheid om CO₂ op te slaan in lege gasvelden in de Noordzee, chemicaliënproductie op basis van fossiel brandstoffen, en minder strenge reductiedoelen voor internationale lucht- en scheepvaart, bestaat het primaire energieaanbod in het ADAPT-scenario in 2050 nog voor 37% uit kolen, olie en aardgas, zie onderstaand figuur. In het TRANSFORM-scenario is het aandeel fossiele brandstoffen in het primaire aanbod veel kleiner dan in ADAPT, slechts 3% in 2050. Dit komt doordat CO₂-opslag sterk gelimiteerd is, chemicaliën worden geproduceerd met duurzame grondstoffen en de broeikasgasemissies van lucht- en scheepvaart sterk worden gereduceerd. Het duurzame aanbod bestaat in beide scenario's uit een mix van wind, zon, biomassa, aardwarmte (geothermie) en omgevingswarmte uit lucht, bodem en water. Daarnaast wordt elektriciteit geïmporteerd en wordt in het TRANSFORM-scenario ook stroom opgewekt met nieuwe kerncentrales. Recente geopolitieke ontwikkelingen maken het wenselijk de afhankelijkheid van aardgas te verkleinen. Box 3 drie gaat daar nader op in.

Door een lagere veronderstelde energievraag in het TRANSFORM-scenario voor industrie (ook lagere grondstofvraag), binnenlands en internationaal transport en landbouw is de hoeveelheid primaire energie lager dan in ADAPT. Een daling van de hoeveelheid primaire energie in beide scenario's in 2030 ten opzichte van 2019 is onder meer het gevolg van energiebesparing en verbeterde energie-efficiëntie zoals bij de elektriciteitsproductie (wind- en zonne-energie vervangen minder efficiënte thermische centrales) en in de transportsector (elektrische voertuigen vervangen voertuigen met minder efficiënte verbrandingsmotoren). Ook na 2030 is er verdere energiebesparing en verbeterde energie-efficiëntie, maar omzettingsverliezen, zoals bij productie van waterstof en synthetische brandstoffen, nemen toe, evenals de energievraag voor CO₂-afvang in de industrie, voor CO₂-afvang uit de lucht (TRANSFORM), en de groeiende energievraag in de meeste sectoren (ADAPT). Netto leidt dit in beide scenario's tot een wat hogere primaire energieaanbod in 2050 dan in 2030.



Totaal primair energieaanbod in 2019 en in 2030 tot 2050 volgens ADAPT- en TRANSFORM-scenario's. Cijfers zijn inclusief energie voor internationale luchtvaart en scheepvaart en grondstofgebruik voor chemicaliën- en kunststoffenproductie.

BOX 3: AFHANKELIJKHEID VAN AARDGAS

De wens om de afhankelijkheid van Russisch aardgas te verminderen naar aanleiding van recente geopolitieke ontwikkelingen, is naast broeikasgasreductie en beëindigen van de gasproductie in Groningen, een derde reden om over te schakelen van aardgas naar hernieuwbare energie. Het figuur met primaire energie-aanbod laat zien dat, ten opzichte van 2019, de vraag naar aardgas in de scenario's als gevolg van de 55%-reductiedoelstelling in 2030 daalt met 33% tot 46% (van ca. 38 tot 21 tot 25 miljard kubieke meter). In het TRANSFORM-scenario zet de daling daarna verder door, terwijl in ADAPT het aardgasverbruik in 2050 nog 17 miljard kubieke meter bedraagt. De reductie van de vraag naar aardgas is het gevolg van energiebesparing en overschakelen op andere energiedragers en -bronnen, zoals elektriciteit, duurzame warmte, waterstof (geproduceerd uit wind en zon) en groen gas. Om de afhankelijkheid van Russisch gas te verminderen kan omschakeling naar hernieuwbare energie worden versneld en de productie van aardgas uit kleine velden (onshore en offshore) en de import van LNG worden vergroot¹.

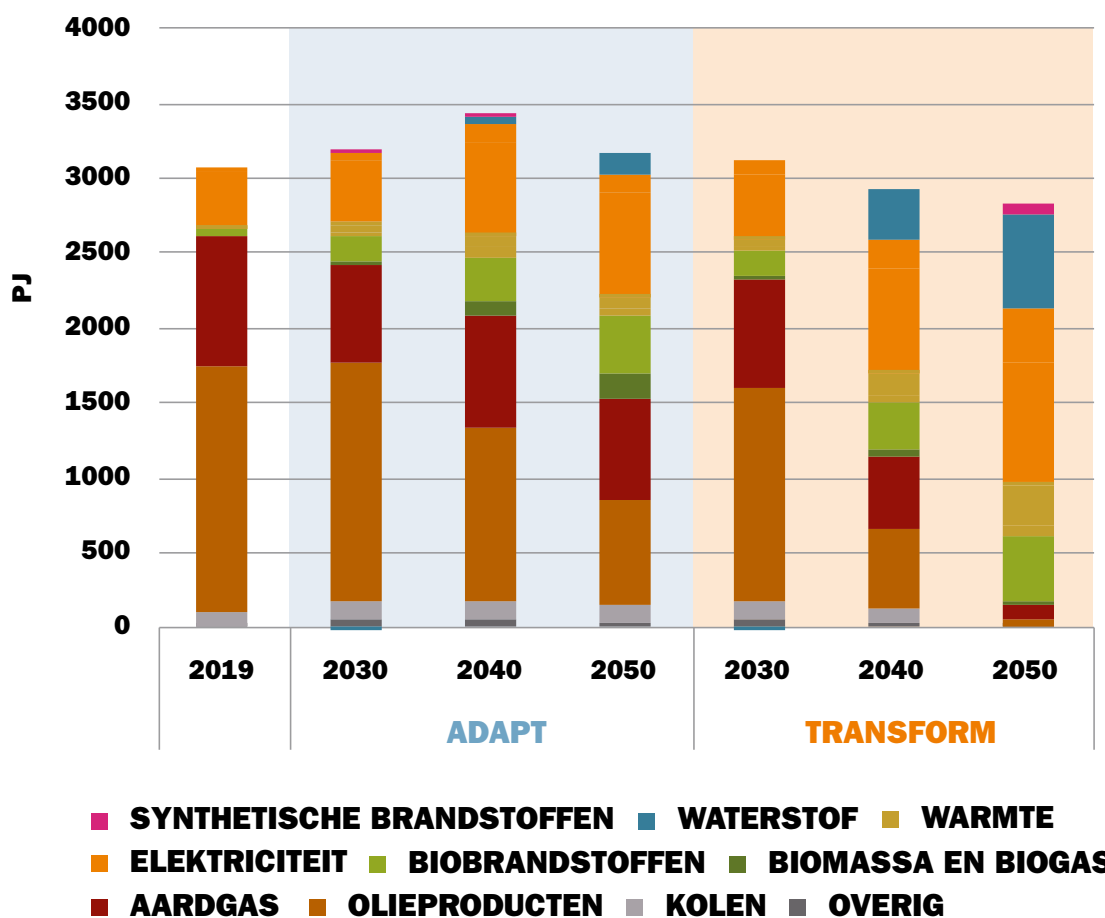
¹ Position paper TNO t.b.v. rondetafelgesprek Russisch Gas in de Tweede Kamer van 9 maart 2022

TOTAAL FINAAL ENERGIEGEBRUIK

Evenals bij het primaire energieaanbod daalt het aandeel fossiele brandstoffen bij het finale energiegebruik na 2030, maar is dat verschillend per scenario. Om redenen die bij totale primaire energie zijn toegelicht hebben fossiele brandstoffen nog een aanzienlijk aandeel in de finale energiemix in het ADAPT-scenario, maar nauwelijks in TRANSFORM. Elektriciteit, waterstof en biobrandstoffen zijn de belangrijke energiedragers. Zonne-energie (zon-PV en zon-thermisch), omgevingswarmte (uit lucht, bodem en water) en aardwarmte worden bij of in de nabijheid van de eindgebruikers geproduceerd en benut.

De totale finale energievraag is lager dan de primaire energie omdat energieverliezen die ontstaan bij omzetting van energie, zoals bij productie van waterstof en duurzame brandstoffen, en bij transport van energie niet meetellen. Het onderstaande figuur laat de totale finale energievraag zien van de industrie, de gebouwde omgeving, de landbouw, het binnenlands transport en de brandstoffen voor internationale lucht- en scheepvaart. In het ADAPT-scenario stijgt het totale finale eindgebruik in 2040, maar in 2050 is het weer ongeveer gelijk aan dat in 2030. Dat is het netto resultaat van groei van de energievraag en energiebesparing. Het finale energiegebruik voor het TRANSFORM-scenario is in 2040 en 2050 lager dan in 2030. Behalve energiebesparing is dit vooral het gevolg van de aanname van een lagere energievraag.

In TRANSFORM is vrijwel al het grondstofgebruik in 2050 afkomstig van niet-fossiele koolstof, zoals biomassa, synthetische methanol (geproduceerd uit waterstof en CO₂) en gerecyclede plastics. Voor het ADAPT-scenario is er geen doelstelling voor niet-fossiele koolstof voor grondstoffen. Hierdoor blijven grondstoffen voor productie van chemicaliën en kunststoffen afkomstig uit fossiele brandstoffen. In beide scenario's neemt het gebruik van elektriciteit aanzienlijk toe. Vanaf 2040 wordt ook waterstof gebruikt, meer in TRANSFORM dan in ADAPT. Voor verwarming wordt naast elektriciteit (met warmtepompen in combinatie met omgevingswarmte), zonne-energie (zon-thermisch), aardwarmte en biogas gebruikt. Energielevering van de ene aan de ander sector, zoals warmte van de industrie aan de gebouwde omgeving en glastuinbouw met behulp van warmtenetten, is in het figuur niet zichtbaar, maar wordt verderop in deze paper besproken.



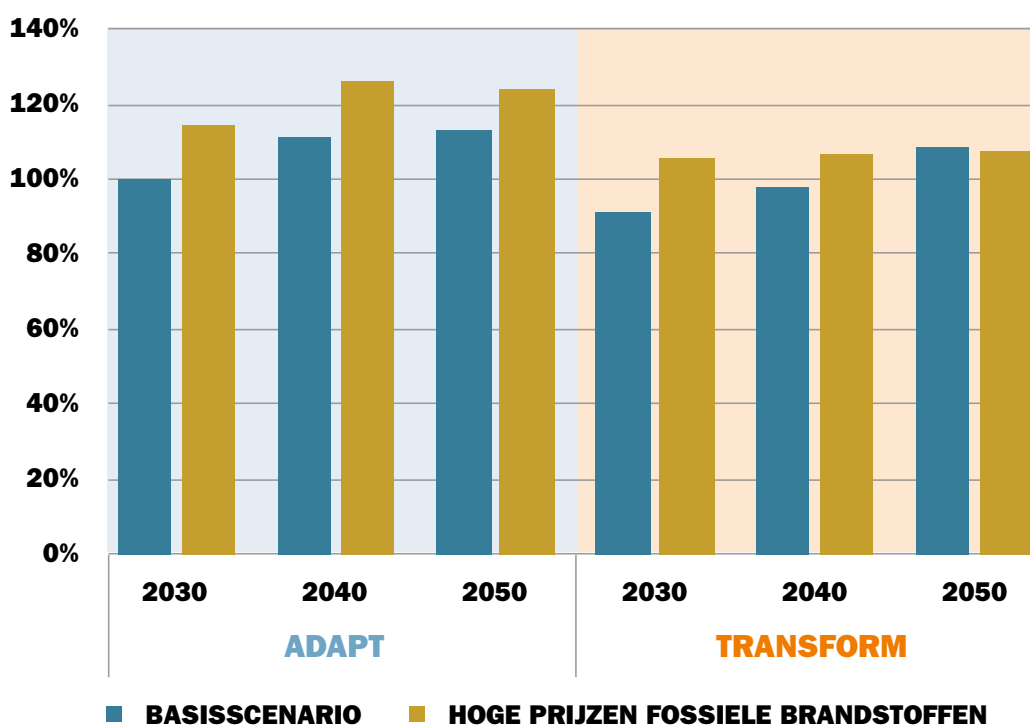
Totaal finale energiegebruik in 2019 en in 2030 tot 2050 volgens ADAPT- en TRANSFORM-scenario's. Cijfers zijn inclusief energie voor internationale luchtvaart en scheepvaart.

TOTALE KOSTEN VAN HET ENERGIESYSTEEM

De totale jaarlijkse kosten van het energiesysteem hebben betrekking op energieproductie, energietransport (elektriciteit, gas, warmte) en een deel van de energieapparaten en -installaties in de gebouwde omgeving, agrarische sector en industrie (bijv. warmtepompen, procesinstallaties in de industrie) en een deel van de voertuigen in de transportsector (o.a. auto's, vrachtauto's). Ook energiebesparingsmaatregelen (bijv. gebouwisolatie), infrastructuur voor CO₂-afvang, -transport en -opslag en maatregelen voor broeikasgasreductie in land- en bosbouw vallen onder de totale systeemkosten. De kosten voor import van onder andere biomassa en elektriciteit worden berekend op basis van het volume en marktprijs. Elektriciteitsexport levert voor het energiesysteem een opbrengst op.

Voor beide scenario's is het Nederlandse energiesysteem geoptimaliseerd tegen de laagste maatschappelijke kosten. Onderstaand figuur toont de verandering in kosten voor beide scenario's en verschillende jaren ten opzichte van ADAPT 2030. De systeemkosten voor het ADAPT-scenario stijgen na 2030 door een toename van de energievraag, maar ook omdat er meer inspanningen moeten worden geleverd om broeikasgassen te reduceren. De totale systeemkosten in het TRANSFORM-scenario zijn lager dan in ADAPT. Dit komt onder andere door de aanname van een lagere energievraag en lagere industriële productie. Net als in het ADAPT-scenario nemen de totale systeemkosten in TRANSFORM toe, waarbij in 2050 op grotere schaal gebruik wordt gemaakt van nieuwe, relatief dure, innovatieve technieken om de broeikassen netto naar nul te brengen. Beide scenario's gaan uit van een verlaging van de kosten voor de in te zetten technologie-opties door innovaties en het op grotere schaal toepassen van de technieken (technology learning). Hierdoor is de kostenstijging kleiner dan wanneer deze aanname niet zou zijn gemaakt. Meer import van energiedragers en grondstoffen kunnen leiden tot lagere systeemkosten, mits de importprijzen lager zijn dan de kostprijs voor in Nederland geproduceerde energie en grondstoffen. Beperking of geheel uitsluiten van opties zullen leiden tot hogere systeemkosten.

In de scenariostudie is uitgegaan van lagere prijzen voor olie, aardgas en kolen dan de, mede door geopolitieke ontwikkelingen, sterk gestegen energieprijzen van begin 2022. Hoewel het aandeel fossiele brandstoffen in de energiemix in de scenario's daalt, blijven ze er nog wel deel van uitmaken. Hogere fossiele brandstofprijzen hebben gevolgen voor de totale systeemkosten, zoals het onderstaande figuur ook laat zien; hiervoor zijn prijzen van fossiele brandstoffen met 50% verhoogd ten opzichte van het basisscenario. De totale systeemkosten voor het TRANSFORM-scenario worden geleidelijk minder gevoelig voor de prijsstijging. Voor ADAPT blijft er een significant kostenverschil bestaan, omdat fossiele brandstoffen niet geheel uit de energiemix verdwijnen. Hogere prijzen voor fossiel brandstoffen beïnvloeden de overschakeling naar hernieuwbare energie. Dit gebeurt eerder en in grotere mate in beide scenario's. Dit verklaart ook waarom de totale systeemkosten bij hogere fossiele prijzen in TRANSFORM in 2050 lager uitkomen dan in de base case. De transitie van een energiesysteem onder invloed van een broeikasgasreductiedoelstelling leidt tot lagere totale systeemkosten dan en energiesysteem waarbij geen broeikasgasreductie wordt gerealiseerd – dat is in de scenariostudie van 2020 aangetoond. Dit komt doordat fossiele brandstoffen een veel groter deel van de energiemix blijven uitmaken. Bij hogere prijzen voor fossiele brandstoffen neemt dit kostenverschil verder toe.



Relatieve verandering van de totale jaarlijkse kosten van het energiesysteem voor de ADAPT- en TRANSFORM-scenario's in vergelijking met de kosten voor ADAPT in de base case in 2030.

BOX 4: VERGELIJKING MET DE VORIGE SCENARIOSTUDIE EN ANDERE ENERGIESCENARIO'S VOOR NEDERLAND

NIEUWE EN VORIGE SCENARIOSTUDIE

Aanpassingen in de reductiedoelen voor broeikasgassen, updates van techno-economische parameters en potentiëlen, updates van projecties voor energievraag- en industriële productie, modelaanpassingen ten aanzien van industriële sectoren en processen en een extra doelstelling voor duurzame koolstof bij productie van chemicaliën en kunststoffen, leiden in een kosten-geoptimaliseerd energiesysteemmodel bij de finale energievraag tot veranderingen in de energie- en technologiemix, en verschuivingen in de energieproductiemix en de broeikasgasemissies. De meest opvallende verschillen in de resultaten ten opzichte van de vorige scenariostudie zijn:

- *Totale systeemkosten:* Evenals in de vorige studie, zijn de jaarlijkse kosten van het totale energiesysteem in de nieuwe studie voor het TRANSFORM-scenario lager dan die voor ADAPT. Het kostenverschil is in 2050 echter wel kleiner dan in de vorige scenariostudie. Door vergroening van de grondstoffen is het TRANSFORM-scenario verder verduurzaamd. Dat vertaalt zich in een toename van de totale systeemkosten.
- *Elektriciteit:* In het TRANSFORM-scenario ligt de elektriciteitsproductie in de nieuwe studie in 2050 38% hoger dan in het vorige studie. Dit komt onder meer door een aanzienlijk hogere elektriciteitsvraag voor waterstofproductie. Voor het ADAPT-scenario ligt de elektriciteitsproductie op ongeveer hetzelfde niveau. De import en export van elektriciteit toont zich gevoelig voor de veranderingen. Bij TRANSFORM is de import in 2050 lager, maar de export vergelijkbaar met het de vorige studie, hetgeen in de nieuwe studie leidt tot een hogere netto export. Bij het ADAPT-scenario valt de lagere export op, terwijl de import juist is toegenomen. Dit leidt in de nieuwe studie tot een netto import van elektriciteit voor ADAPT in 2050.
- *Waterstof:* Ten opzichte van de vorige scenariostudie is de vraag naar waterstof voor de scenario's in de nieuwe studie toegenomen. Dit komt door de aanname dat alle transportbrandstoffen in Nederland worden geproduceerd; in de vorige scenariostudie was nog sprake van import van biobrandstoffen. Daarnaast is er bij het TRANSFORM-scenario in de nieuwe studie meer vraag naar waterstof voor productie van synthetische methanol als transportbrandstof en grondstof voor chemicaliën- en kunststoffenproductie. In het ADAPT-scenario van de nieuwe studie wordt in 2050 in waterstoffabrieken ruim twee keer zoveel waterstof geproduceerd als in de vorige scenariostudie; voor TRANSFORM is dat meer dan een factor vier. Werd in de vorige studie bij het ADAPT-scenario nog blauwe waterstof geproduceerd uit aardgas met CO₂-afvang en -opslag, in de nieuwe studie wordt in beide scenario's waterstof voornamelijk geproduceerd met elektrolyzers. Dit komt door hogere kostenparameters voor CO₂-opslag waardoor de productie van blauwe waterstof minder kosteneffectief is dan groene waterstof.
- *Biomassa:* Voor de nieuwe scenariostudie is verondersteld dat meer biomassa beschikbaar is en geen biobrandstoffen worden geïmporteerd. Dit leidt bij het ADAPT-scenario tot verschuivingen in het gebruik (minder biomassa voor warmteproductie in de industrie, meer biobrandstoffen), maar de totale hoeveelheid biomassa blijft ongeveer gelijk. In de nieuwe studie ligt het biomassagebruik voor het TRANSFORM-scenario ongeveer 50% hoger. Dit komt vooral door een grotere biobrandstoffenproductie.
- *CO₂- en resterende broeikasgasemissies:* In de vorige scenariostudie was nog sprake van resterende broeikasgasemissies in 2050, waaronder LULUCF-emissies. In de nieuwe studie is de netto-emissie in beide scenario's nihil. In de vorige studie werd bij het TRANSFORM-scenario nauwelijks CO₂ afgevangen. Dat is wel het geval in de nieuwe studie omdat deze CO₂ (grotendeels afkomstig uit biomassa en de atmosfeer) gebruikt wordt voor productie van synthetische brandstoffen en methanol. Ook wordt in de nieuwe studie bij het TRANSFORM-scenario een beperkte hoeveelheid CO₂ opgeslagen in lege gasvelden. Hierdoor ontstaan negatieve emissies waarmee resterende

broeikasgasemissies worden gecompenseerd. Bij het ADAPT-scenario wordt in de nieuwe studie dezelfde hoeveelheid CO₂ opgeslagen als in de vorige scenariostudie. Bij de CO₂-afvang zijn er wel verschuivingen tussen de verschillende industriële processen ten opzichte van de vorige scenariostudie.

- *Warmte*: De levering van restwarmte uit de industrie aan gebouwde omgeving en glastuinbouw is in de nieuwe scenariostudie aanmerkelijk kleiner dan in de vorige studie. Dit komt doordat restwarmte in het model beter is gespecificeerd en ook meer restwarmte binnen de industrie wordt hergebruikt waardoor er minder restwarmte in de industrie beschikbaar is voor levering aan andere sectoren. Hierdoor is de warmtelevering aan de gebouwde omgeving via warmtenetten in 2050 veel geringer. Die bedraagt zo'n 30% van de warmtelevering in de vorige scenariostudie. De productie van warmte uit aardwarmte is in de nieuwe scenario's wel groter: 35% meer in ADAPT en ruim twee keer zo veel in TRANSFORM.

RESULTATEN NIEUWE SCENARIOSTUDIE VERGELEKEN MET DE I13050-SCENARIO'S

Ten behoeve van de Integrale Infrastructuurverkenningen 2030-2050 (I13050)¹ zijn voor vier toekomstbeelden klimaatneutrale energiescenario's opgesteld voor 2050. Ten opzichte van de ADAPT en TRANSFORM-scenario's zijn er een paar belangrijke verschillen in scope en aanpak. Drie opvallende verschillen zijn:

- De I13050-scenario's hebben betrekking op alle energiesectoren en het niet-energetisch gebruik als grondstof, maar niet op het brandstofgebruik voor internationale lucht- en scheepvaart (bunkerbrandstoffen). De ADAPT- en TRANSFORM-scenario's houden wel rekening met de vraag naar bunkerbrandstoffen.
- De productiecapaciteiten voor onder andere wind en zon, de hoeveelheid waterstof en biomassa (in de vorm van groen gas) worden bij de I13050 scenario's als invoergegevens gebruikt, terwijl dit bij de ADAPT- en TRANSFORM-scenario's het resultaat is van een kostenoptimalisatie.
- Klimaatneutraal betekent voor de I13050-scenario's netto geen CO₂-emissies. Bij ADAPT en TRANSFORM gaat het om netto geen broeikasgassen, d.w.z. naast CO₂ ook geen andere broeikasgassen zoals methaan (CH₄) en lachgas (N₂O).

Onderstaande tabel vergelijkt een aantal resultaten van beide scenariostudies voor 2050. Om de scenario's enigszins vergelijkbaar te maken, is de productie van wind op zee bij de I13050 scenario's verhoogd in verband met de productie van synthetische bunkerbrandstoffen². De opvallende verschillen bij het ADAPT-scenario is de inzet van biomassa en fossiele brandstoffen en de omvang van de CO₂-opslag. Voor het TRANSFORM-scenario valt de hogere productie van wind op zee op, de productie van kernenergie³ en het relatief lage fossiele brandstofgebruik. Voor TRANSFORM kunnen de verschillen met name worden verklaard uit de vergroening van de koolwaterstoffen die als grondstof worden gebruikt. In plaats van fossiele brandstoffen wordt meer biomassa en waterstof ingezet, waarbij de waterstof wordt geproduceerd uit in Nederland opgewekte elektriciteit.

		II3050				TNO	
		Regionaal	Nationaal	Europees	Inter-nationaal	ADAPT	TRANS-FORM
Elektriciteitsproductie²	TWh	312	403	228	211	315	621
w.v. wind op zee²	TWh	162	269	157	144	192	386
w.v. wind op land	TWh	45	45	23	23	33	54
w.v. zon-PV	TWh	105	89	48	44	51	120
w.v. kernenergie	TWh	0	0	0	0	0	43
Import elektriciteit	TWh	12	10	21	22	53	8
Waterstof	PJ	342	518	500	1048	257	738
Biomassa	PJ	310	194	947	443	945	854
Geothermie	PJ	108	47	4	4	58	88
Fossiele brandstoffen	PJ	374	511	1073	734	1415	125
CO₂-opslag	Mton	5	6	27	26	50	15

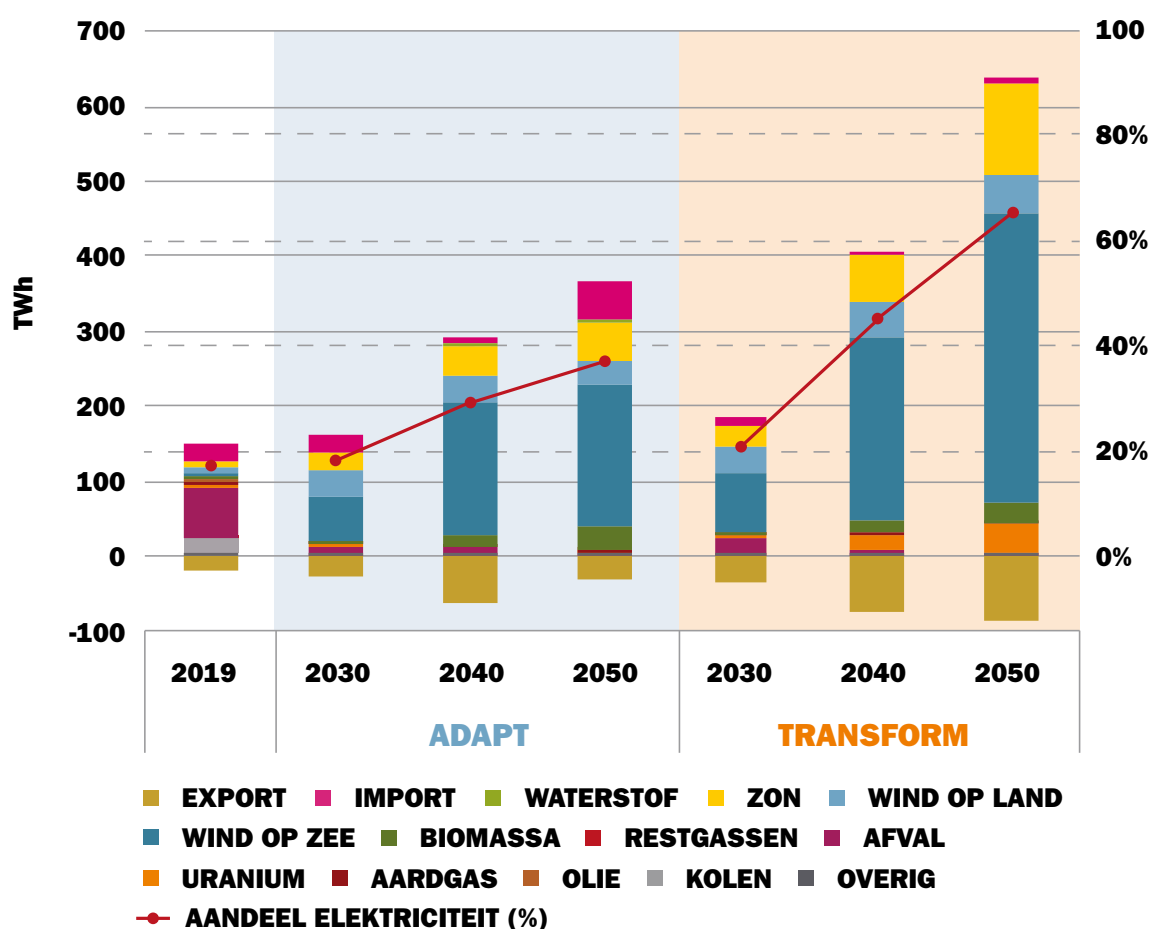
¹ Netbeheer Nederland, Het Energiesysteem van de Toekomst - Integrale Infrastructuurverkenning 2030 -2050 (II3050), April 2021

² De impact die brandstoflevering aan internationale lucht- en zeevaart is voor de II3050 studie wel apart onderzocht. Hiervoor is 40% extra windvermogen op zee nodig. De cijfers voor wind op zee zijn in de tabel hiervoor aangepast.

³ De impact van kernenergie op de II3050 scenario's zijn onderzocht door Berenschot en Kalavasta in 'Systeemeffecten van nucleaire centrales in Klimaatneutrale Energiescenario's 2050,' 2020

ELEKTRICITEIT

In beide scenario's neemt de elektriciteitsvraag sterk toe. Dit komt door een toenemende elektrificatie van energiefuncties in de eindgebruikerssectoren, zoals de toepassing van elektrische boilers en warmtepompen (in gebouwde omgeving, glastuinbouw en industrie), het gebruik van elektrische voertuigen (transport), geëlektrificeerde productieprocessen (industrie), maar ook door de productie van waterstof uit elektriciteit. Het bijgaande figuur toont dat de elektriciteitsproductie in het ADAPT-scenario in 2050 stijgt tot een niveau dat bijna drie keer zo hoog is als in 2019. In TRANSFORM is de omvang van de elektriciteitsproductie zelfs bijna vijf keer zo hoog. In het ADAPT-scenario is het elektriciteitsaandeel in het energieaanbod (voordat elektriciteit in andere energiedragers wordt omgezet) meer dan verdubbeld ten opzichte van 2019 en in TRANSFORM is het aandeel ruim vier keer zo hoog.



Elektriciteitsproductie in 2019 en voor 2030 tot 2050 volgens ADAPT- en TRANSFORM-scenario's. Aandeel elektriciteit ten opzichte van het totale energieaanbod is weergegeven (rechter as) evenals de elektriciteitsexport (negatieve cijfers).

Bedraagt het aandeel elektriciteit uit wind, zon en biomassa in 2019 zo'n 17%, in 2030 ligt dat in beide scenario's rond de 80% en in 2050 boven de 90%. De productiecapaciteit voor wind- en zonne-energie bereikt in het TRANSFORM-scenario het maximaal beschikbare potentieel: 70 GW wind op zee, 12 GW wind op land en 132 GW zon-PV. In het ADAPT-scenario zijn de productiecapaciteiten lager: 36 GW wind op zee, 7,5 GW wind op land en 55 GW zon-PV en worden de beschikbare potentiëlen voor wind op zee en zon-PV niet volledig benut. Ongeveer 7% van de elektriciteit is in het TRANSFORM-scenario in 2050 afkomstig van nieuwe

kerncentrales (5 GW) (zie ook Box 5). Er worden geen nieuwe kerncentrales gebouwd in het ADAPT-scenario. Het in balans houden van de fluctuerende elektriciteitsvraag met variabele elektriciteitsproductie uit zon en wind gebeurt voor een deel door elektriciteitsuitwisseling met het buitenland via verbindingen met Duitsland, België, Verenigd Koninkrijk, Noorwegen en Denemarken. In 2050 resulteert dat over het gehele jaar bij het ADAPT-scenario in een netto-import en bij TRANSFORM in een netto-export. Andere flexibiliteitsopties die worden ingezet om elektriciteitsvraag en -aanbod te balanceren zijn vraagrespons (onder meer elektrolyzers voor waterstofproductie en opladen van elektrische auto's), beperking van wind- en zonne-energieproductie, piekcentrales (waterstof) en energieopslag (batterijen en waterstofopslag in zoutcavernes). De capaciteiten voor deze flexibiliteitsopties zijn in het algemeen groter in het TRANSFORM-scenario dan in ADAPT.

BOX 5: SCENARIO'S MET EN ZONDER KERNENERGIE

In het TRANSFORM-scenario worden in 2040 en 2050 nieuwe kerncentrales ingezet, maar in het ADAPT-scenario niet. De belangrijkste reden voor de inzet van kerncentrales in TRANSFORM is dat de elektriciteitsproductiecapaciteit voor windenergie en zon-PV hun maximaal veronderstelde potentieel bereiken. Het productievermogen ligt in ADAPT-scenario onder deze grens.

TRANSFORM-SCENARIO ZONDER KERNENERGIE

Dit roept de vraag op wat er zou gebeuren als kernenergie veel duurder zou zijn dan in deze scenarioanalyse wordt berekend of als gebruik van kernenergie geen maatschappelijk draagvlak kent en daardoor als optie wordt uitgesloten. Dit is onderzocht in een niet-nucleaire variant van het TRANSFORM-scenario. Deze scenariovariant laat zien dat zonder kernenergie het in het TRANSFORM-scenario nog steeds mogelijk is om de energievraag te dekken en de doelstelling van een broeikasgasneutraal energiesysteem te realiseren.

De totale elektriciteitsproductie in de niet-nucleaire variant neemt af. In 2050 wordt de afwezigheid van 153 PJ (42,5 TWh) kernenergie bijna volledig gecompenseerd door verminderd elektriciteitsgebruik voor warmte. In plaats daarvan worden meer hernieuwbare warmtebronnen ingezet: aardwarmte (+49 PJ), omgevingswarmte (+42 PJ) en thermische zonnewarmte (+55 PJ). De inzet van warmtepompen in plaats van elektrische boilers voor verwarming leidt tot een efficiënter gebruik van de elektriciteit. Ook wordt minder elektriciteit gebruikt voor direct air capture dat overschakelt naar een proces dat warmte op lage temperatuur gebruikt die wordt geleverd door aard- en zonnewarmte.

De productie en het verbruik van waterstof is iets verminderd (-25 PJ) met kleine effecten op de productie van chemicaliën en brandstoffen voor zeeschepen.

In het basisscenario wordt kernenergie gebruikt voor de levering van basislast-elektriciteit. In de niet-nucleaire variant is deze basislastproductie afwezig en neemt de vraag naar flexibiliteit toe. De extra flexibiliteit wordt geleverd door meer elektriciteit- en waterstofopslag.

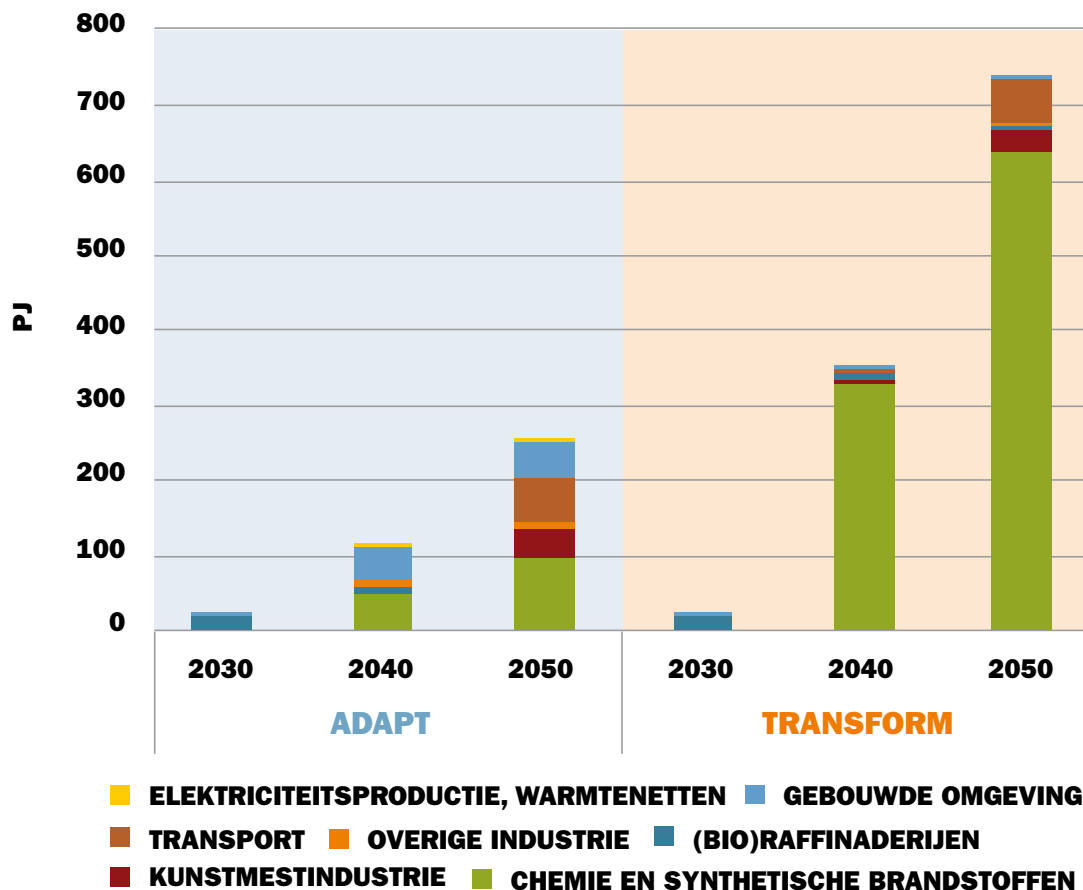
Zoals te verwachten is, zijn de totale systeemkosten hoger in de scenariovariant zonder kernenergie (+8% in 2050). Dit is het gevolg van meer inzet van hernieuwbare warmtebronnen en warmtepompen, meer investeringen in energiebesparing in de gebouwde omgeving, duurdere direct air capture-technologie en meer investeringen in energieopslag.

TRANSFORM-SCENARIO MET MEER KERNENERGIE

Het tempo waarin nieuwe kerncentrales gebouwd kunnen worden kent praktische grenzen (zoals doorlooptijden voor vergunningen en bouw, beschikbaarheid van voldoende gespecialiseerd personeel, etc.). In de basisscenario's is daarom aangenomen dat in 2040 2,5 GW nieuw nucleair vermogen kan worden gerealiseerd en in 2050 nog eens 2,5 GW. In een scenariovariant waarin het potentieel voor kernenergie wordt vergroot van 5 naar 12 GW in 2050 blijkt dat bij deze nieuwe limiet in TRANSFORM extra kernenergie wordt ingezet, maar dat dit niet ten koste gaat van de elektriciteitsproductie uit wind en zon. In het kosten geoptimaliseerde energiesysteem dekt de extra elektriciteitsproductie de groei van de elektriciteitsvraag voor de warmtevoorziening van de gebouwde omgeving en agrarische sector en de productie van waterstof. Ook de elektriciteitsvraag in de chemische industrie neemt toe. Deze verschuiving leidt tot lagere totale systeemkosten (-5% t.o.v. het basisscenario). De hoeveelheid elektriciteit die beschikbaar is, heeft een grote impact op het elektriciteitsverbruik in de eindgebruikerssectoren. Dit is ook zichtbaar als de elektriciteitsexport in het TRANSFORM-scenario beperkt blijft tot de helft van het basisscenario. Dat heeft nauwelijks effect op de omvang van de elektriciteitsproductie of het gebruik van kernenergie. De elektriciteit die niet geëxporteerd wordt, wordt gebruikt in de industrie, voor waterstofproductie en voor warmtelevering aan de gebouwde omgeving.

WATERSTOF

In Nederland wordt momenteel bijna alle waterstof gebruikt en geproduceerd door de industrie uit fossiele brandstoffen en als bijproduct bij de elektrolytische chloorproductie (in totaal ca. 180 PJ). Deze conventionele waterstofproductie uit fossiele bronnen zal vanaf 2030 grotendeels verdwijnen (raffinaderijen) en overgenomen worden door speciale waterstoffabrieken. In de ADAPT- en TRANSFORM-scenario's neemt de industriële waterstofvraag voor de productie van chemicaliën en synthetische brandstoffen toe tot respectievelijk 195 en 728 PJ in 2050. Bijgaand figuur toont de groei van de waterstofvraag die kan worden geleverd door deze waterstoffabrieken. In het ADAPT-scenario groeit de vraag naar waterstof aanvankelijk in de gebouwde omgeving en industrie (o.a. voor productie van methanol, synthetische brandstoffen en kunstmest) en later ook in de transportsector. In het TRANSFORM-scenario wordt de vraaggroei vooral gedreven door de industrie voor productie van chemicaliën en synthetische brandstoffen. Het waterstofverbruik in de gebouwde omgeving is in TRANSFORM zeer beperkt en voor transport vergelijkbaar met dat in ADAPT. In beide scenario's wordt waterstof niet gebruikt voor staalproductie. In het ADAPT-scenario wordt steenkool gebruikt voor staalproductie in combinatie met CO₂-afvang en -opslag en in het TRANSFORM-scenario wordt in 2050 staal geproduceerd met behulp van elektriciteit in een elektrochemisch proces.



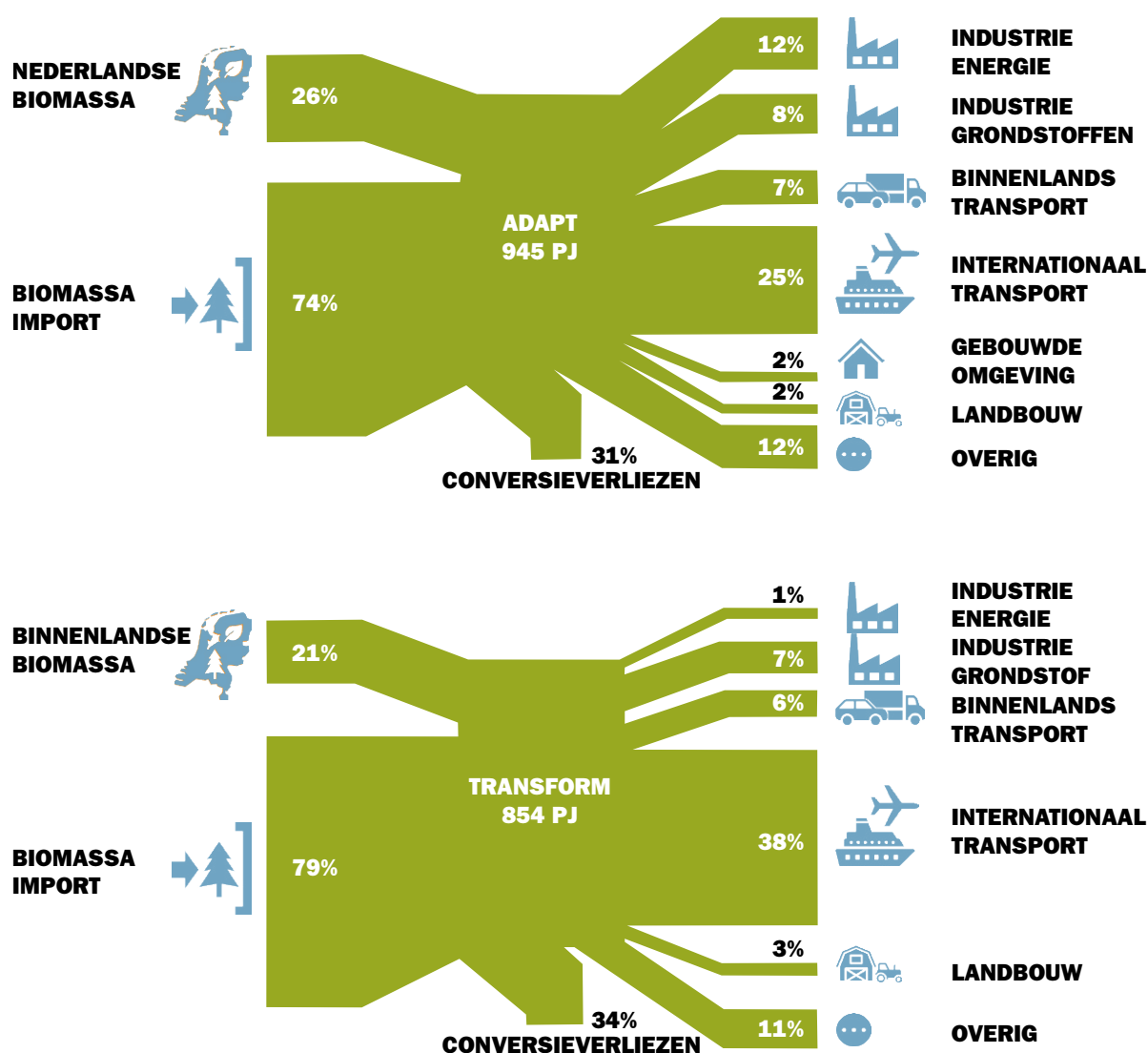
Waterstofverbruik in 2030 tot 2050 volgens ADAPT- en TRANSFORM-scenario's. Cijfers zijn exclusief waterstof die ontstaat en wordt gebruikt binnen chemische processen.

In beide scenario's wordt de meeste waterstof geproduceerd met elektrolyzers, dus uit hernieuwbare elektriciteit (groene waterstof). In beide scenario's wordt een kleine hoeveelheid waterstof (minder dan 10 PJ) geproduceerd uit aardgas met steam methane reforming (SMR) en CO₂-opslag (blauwe waterstof). Na 2030 is de productie van groene waterstof kosteneffectiever dan blauwe waterstof. Het grootste deel van de waterstofproductie vindt in 2050 offshore plaats op platforms bij offshore windparken en wordt via pijpleidingen naar land getransporteerd. Door de fluctuerende productie van windenergie varieert ook de waterstofproductie op deze platforms. Deze fluctuaties worden opgevangen door de waterstofopslag in zoutcavernes.

BIOMASSA

In beide scenario's wordt naast binnenlandse biomassa ook houtachtige biomassa geïmporteerd. Hoewel het potentieel voor zowel binnenlandse biomassa als biomassa-import aanzienlijk groter is in het ADAPT-scenario dan in TRANSFORM, wordt alleen in TRANSFORM het potentieel in 2050 bijna volledig benut. Hierdoor is het verschil in biomassagebruik tussen beide scenario's niet heel groot (zie figuur). In beide scenario's wordt een aanzienlijk deel van de biomassa gebruikt voor de productie van vliegtuig- en scheepsbrandstoffen en brandstoffen voor de binnenvaart en mobiele werktuigen. Ook maakt de industrie gebruik van biomassa, zowel voor energietoepassingen als voor de productie van chemicaliën en kunststoffen

(niet-energetisch gebruik). Het aandeel van energietoepassingen in de industrie is in het TRANSFORM-scenario aanzienlijk kleiner dan in ADAPT. Het gebruik van biomassa voor transportbrandstoffen is in 2050 in TRANSFORM bijna 20% hoger dan ADAPT. Dit komt, ondanks een lagere transportvraag dan in ADAPT, door de strengere reductiedoelstellingen voor de internationale lucht- en scheepvaart voor het TRANSFORM-scenario. De productie van transportbrandstoffen uit biomassa geniet de voorkeur boven het gebruik ervan in energetische en niet-energetische toepassingen in de industrie. In de industrie zijn voor energetisch gebruik alternatieve opties beschikbaar, zoals elektrische boilers en warmtepompen. De industrie blijft in het ADAPT-scenario olie en aardgas als grondstof gebruiken. Een belangrijke grondstof in TRANSFORM wordt synthetische methanol, overigens wel op basis van CO₂ die vrijkomt bij bioraffinageprocessen.

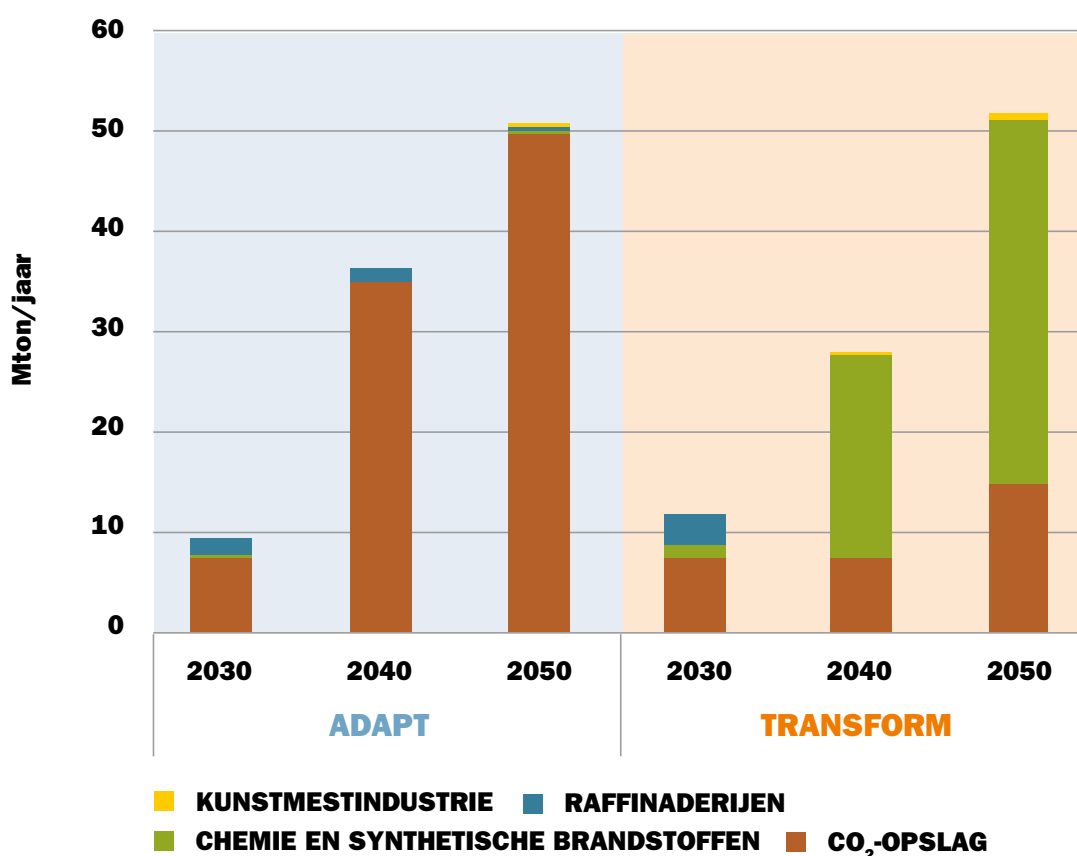


Herkomst en bestemming van biomassa in 2050 volgens ADAPT- en TRANSFORM-scenario's.

CO₂-OPSLAG EN -GEBRUIK

In het ADAPT-scenario zijn bestaande fabrieken voor de productie van chemicaliën en kunstmest uitgerust met CO₂-afvangtechnologie, terwijl in het TRANSFORM-scenario nieuwe processen (bijvoorbeeld geëlektrificeerde processen en processen met biomassa en gerecyclede plastics) worden geïntroduceerd die geen CO₂ uitstoten. In beide scenario's wordt een aanzienlijke hoeveelheid CO₂ afgevangen bij (bio) raffinaderijen. In 2050 is dat 29 Mton in ADAPT en 25 Mton in TRANSFORM. Bij het TRANSFORM-scenario gaat het om bioraffinaderijen en afvang van kortcyclische koolstof die gebruikt wordt als duurzame grondstof voor chemicaliën- en kunststofproductie. In het TRANSFORM-scenario wordt voor staalproductie een transitie gemaakt van staalproductie met kolen naar elektrochemische staalproductie zonder CO₂-uitstoot. De staalproductie in het ADAPT-scenario blijft kolen gebruiken, maar met CO₂-afvang. In 2050 wordt in het TRANSFORM-scenario net iets meer CO₂ afgevangen (54 Mton) dan in ADAPT (51 Mton), waarbij in TRANSFORM 18 Mton het gevolg is van de inzet van directe CO₂-afvang uit de lucht.

Onderstaand figuur toont de bestemming van de afgevangen CO₂. In beide scenario's wordt CO₂ opgeslagen in lege gasvelden op de Noordzee. In 2030 zijn de hoeveelheden voor beide scenario's gelijk (7,5 Mton). Daarna nemen de opgeslagen hoeveelheden in het ADAPT-scenario toe tot 50 Mton in 2050, het maximum opslagpotentieel. Ook in het TRANSFORM-scenario wordt in 2050 het maximum potentieel (15 Mton) voor CO₂-opslag benut. Ruim 70% van de afgevangen CO₂ wordt in TRANSFORM gebruikt voor de productie van chemicaliën. In 2030 wordt in beide scenario's nog een klein deel van de afgevangen CO₂ toegepast in raffinaderijen bij power-to-liquid (P2L) processen, maar die toepassing verdwijnt in beide scenario's. Ook wordt in beide scenario's in 2050 een klein deel van de CO₂ gebruikt bij kunstmestproductie (ureum).



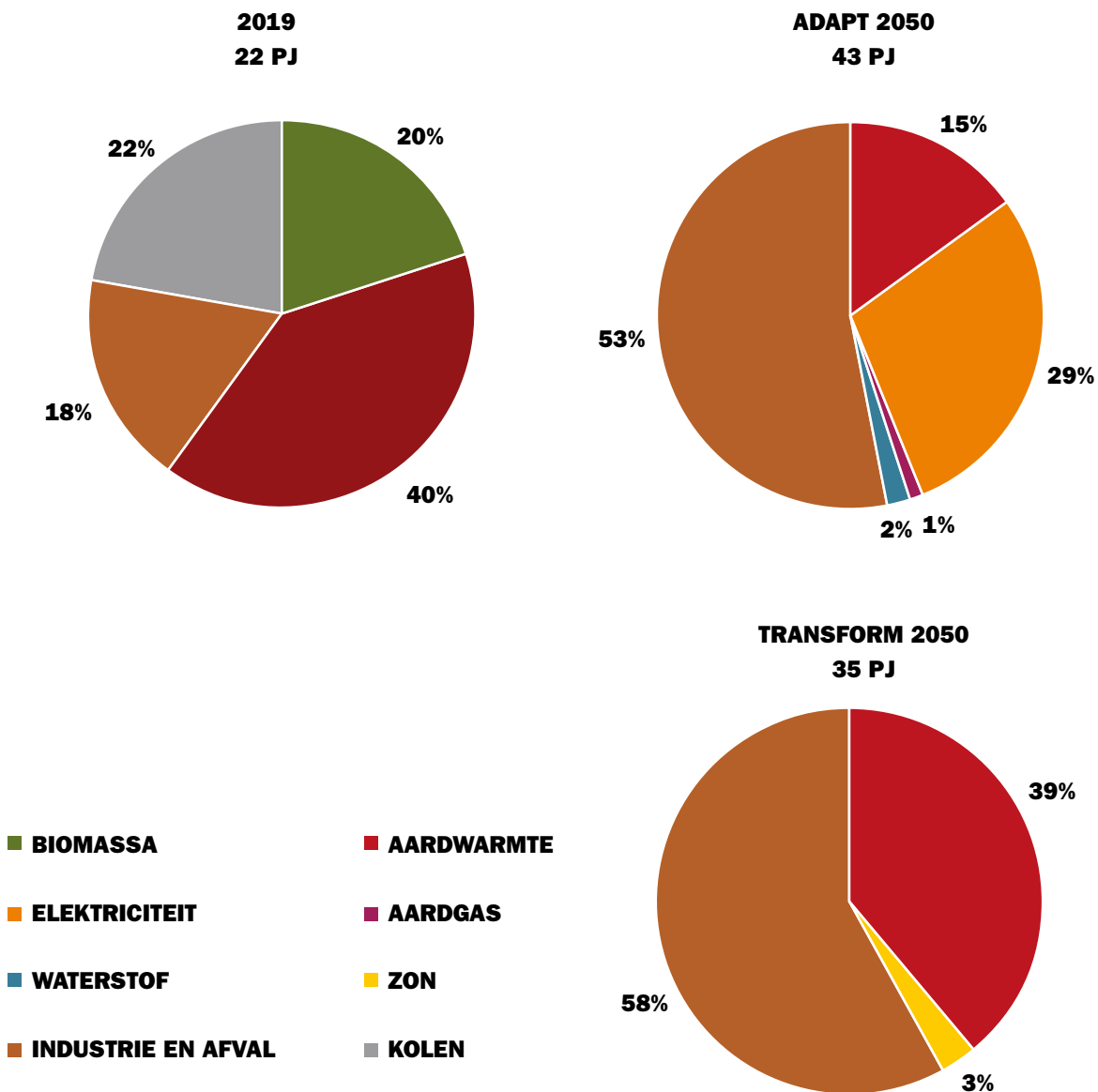
CO₂-opslag en -gebruik in 2030 tot 2050 volgens ADAPT- en TRANSFORM-scenario's.

WARMTE

Het gebruik van aardgas in de gebouwde omgeving neemt in beide scenario's af: in het TRANSFORM-scenario tot vrijwel nihil en in ADAPT daalt de gaslevering tot circa 80 PJ in 2050, maar bijna de helft daarvan is dan groen gas. De warmtevoorziening in de gebouwde omgeving schakelt in beide scenario's vooral over naar elektrische boilers en warmtepompen. In het TRANSFORM scenario groeit deze vorm van warmtelevering sterker dan in ADAPT. Ook in het ADAPT-scenario wordt waterstof ingezet ter vervanging van aardgas. Toepassing van waterstof in het TRANSFORM-scenario is beperkt tot 5 PJ in 2050, hoewel dit in sommige scenariovarianten kan toenemen, bijvoorbeeld wanneer waterstof wordt geïmporteerd of er minder waterstof vraag is in de chemische industrie bij import van bio-nafta. Zowel bij ADAPT als TRANSFORM wordt een beperkt deel van de warmtevraag gedekt door warmtenetten. In beide scenario's wordt ook zonnewarmte gebruikt.

De totale warmtevraag van de landbouwsector neemt in beide scenario's af. In TRANSFORM is dat sterker omdat uitgegaan wordt van een kleinere omvang van de glastuinbouw. Aardgas voor de verwarming van kassen wordt vervangen door aardwarmte, biogas en biomassa. In het ADAPT-scenario wordt ook restwarmte via warmtenetten aan de glastuinbouw geleverd; in TRANSFORM is dat in 2050 verwaarloosbaar.

Een deel van de gebouwde omgeving en de agrarische sector wordt in de scenario's voorzien van warmte uit warmtenetten. Het warmteaanbod voor deze warmtenetten voor 2019 en 2050 is weergegeven in onderstaand figuur. Ten opzichte van 2019 zal de warmtelevering via warmtenetten in beide scenario's (bijna) verdubbelen. Biomassa verdwijnt uit de energiemix voor warmtenetten omdat biomassa wordt gebruikt voor de productie van transportbrandstoffen, chemicaliën en kunststoffen en warmteproductie met elektriciteit kosteneffectiever is. In 2050 wordt aardwarmte gebruikt in zowel het ADAPT- als het TRANSFORM-scenario. Verder worden nieuwe vormen van warmteproductie toegepast: waterstofketels in ADAPT en zonnewarmte in TRANSFORM. De warmtelevering uit afvalverbranding neemt af (in figuur samengevoegd met restwarmtelevering industrie) omdat er minder afval wordt verbrand en CO₂-afvang bij de afvalverbrandingsinstallaties wordt toegepast waardoor minder restwarmte beschikbaar is.



Warmteproductie voor warmtenetten in 2019 en voor de ADAPT- en TRANSFORM-scenario's in 2050.

› TRANSPORTBRANDSTOFFEN EN CHEMICALIËNPRODUCTIE

ONTWIKKELINGEN IN DE TRANSPORTSECTOR

Het binnenlandse vervoer (weg, spoor, binnenvaart) is verantwoordelijk voor ongeveer een vijfde van het Nederlandse energiegebruik. Ook vliegtuigen en zeeschepen worden in Nederland van brandstoffen voorzien. Als deze bunkerbrandstoffen worden meegeteld is de transportsector verantwoordelijk voor ruim een derde van het Nederlandse energiegebruik. Op dit moment is zowel het binnenlands als het internationale transport nog grotendeels afhankelijk van fossiele brandstoffen en neemt de transportvraag nog steeds toe.

In de vorige scenariostudie werd er van uitgegaan dat de helft van de bunkerbrandstoffen wordt voorzien vanuit het Nederlandse energiesysteem en de andere helft uit import van biobrandstoffen. In de nieuwe scenariostudie is onderzocht wat de effecten zijn voor de Nederlandse energieproductie als de energievraag van het binnenlandse en internationale transport volledig wordt gedekt vanuit het Nederlandse energiesysteem⁸.

De broeikasgasemissies voor het binnenlandse transport vallen onder de Nederlandse doelstellingen. Dat geldt niet voor het internationale transport. In zoverre het transport binnen de Europese Unie plaatsvindt, gelden wel de Europese reductiedoelstellingen voor broeikasgassen. In de scenario-analyse is verondersteld dat in het ADAPT-scenario in 2050 de broeikasgasemissies met 50% zijn gedaald en voor TRANSFORM met 95% (t.o.v. 2005 voor internationale luchtvaart en t.o.v. 2008 voor internationale scheepvaart). Door veranderingen in het gedrag van burgers en bedrijven neemt het internationale transport af en daalt de vraag naar bunkerbrandstoffen in het TRANSFORM-scenario; in ADAPT is nog sprake van een lichte groei.

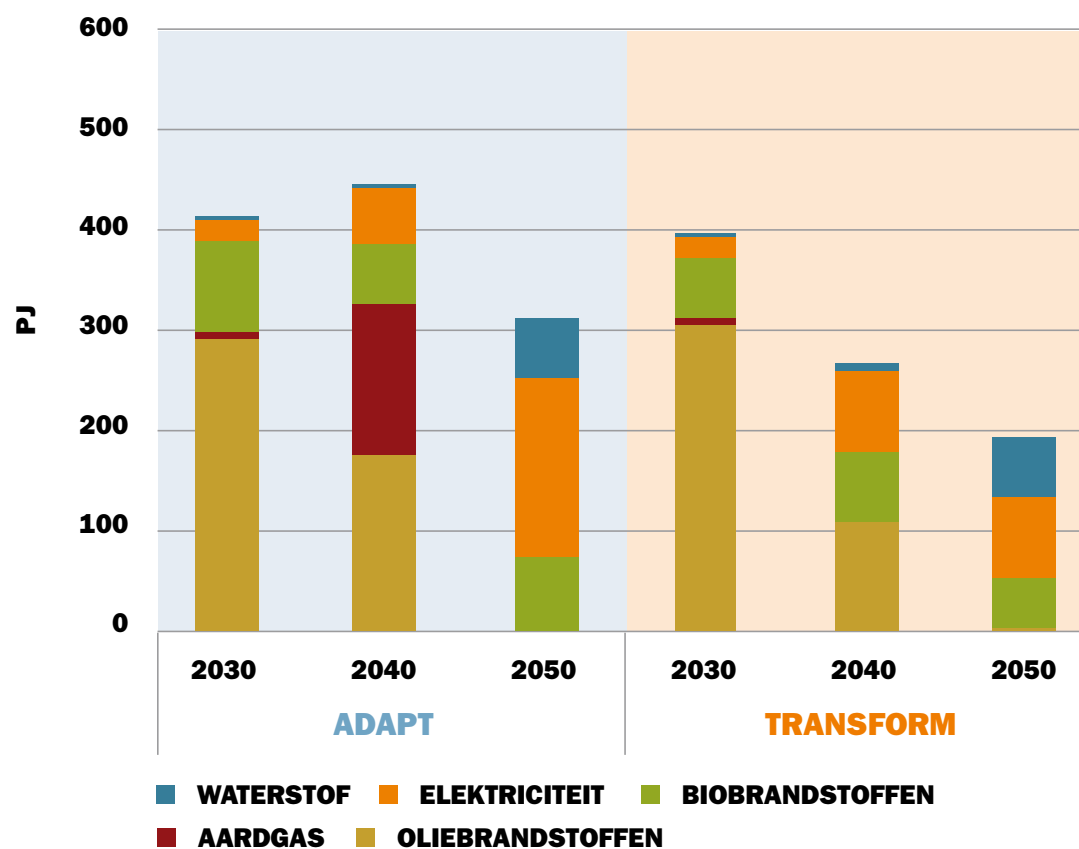
ENERGIE VOOR BINNENLANDS TRANSPORT

Voor het binnenlandse transport zijn fossiele brandstoffen volgens beide scenario's nog het belangrijkste in 2030, gevolgd door biobrandstoffen⁹ (zie figuur). In het ADAPT-scenario groeit het aantal elektrische voertuigen, maar blijven ook auto's met een interne verbrandingsmotor gebruikt worden en verschuift de brandstofvraag in 2040 voor een deel naar aardgas (compressed natural gas, CNG). CNG is een

⁸ Relevant is hierbij op te merken dat het OPERA-model de volledige waardeketen voor het wegvervoer beschouwt, d.w.z. energiekosten en de kosten van het wagenpark. Voor andere vervoerswijzen en bunkerbrandstoffen zijn de vlootgerelateerde kosten niet inbegrepen. De laagste kostenoptimalisatie heeft voor deze vervoerswijzen dus alleen betrekking op de brandstofvoorziening.

⁹ Hierbij is rekening gehouden met plafonds voor biobrandstoffen uit voedsel- en voedergewassen (max. 1,2% van de totale finale energievraag) en een maximum voor biobrandstoffen geproduceerd uit gebruikte frituurolie en dierlijke vetten (max 4,2% van de finale energievraag binnenlands vervoer). Ten minste 3,5% van de binnenlandse vraag naar transportbrandstoffen komt van geavanceerde biobrandstoffen.

relatief goedkope optie om de uitstoot van broeikasgassen te verminderen dankzij de lagere CO₂-uitstoot in vergelijking met benzine. Deze keuze is echter wel afhankelijk van de gasprijs in verhouding tot elektriciteit en biobrandstoffen en de kosten voor de CNG-tankinfrastructuur, die niet zijn meegenomen in de optimalisatie. In het TRANSFORM-scenario zet de elektrificatie van de personen- en bestelauto's eerder in dan in ADAPT en in 2050 bestaat dit wagenpark in beide scenario's vrijwel geheel uit elektrische voertuigen. Vrachtauto's blijven tot 2040 nog grotendeels fossiele brandstoffen gebruiken en schakelen daarna over op aandrijvingen met brandstofcellen en waterstof. Het model gaat uit van een gemiddeld aantal kilometers voor alle vrachtauto's en maakt geen onderscheid tussen kort- en lange afstandstransport. Zou dat wel het geval zijn, dan zal waarschijnlijk een deel van de vrachtauto's, met name dat voor de kortere afstand, gebruik maken van een elektrische aandrijving.

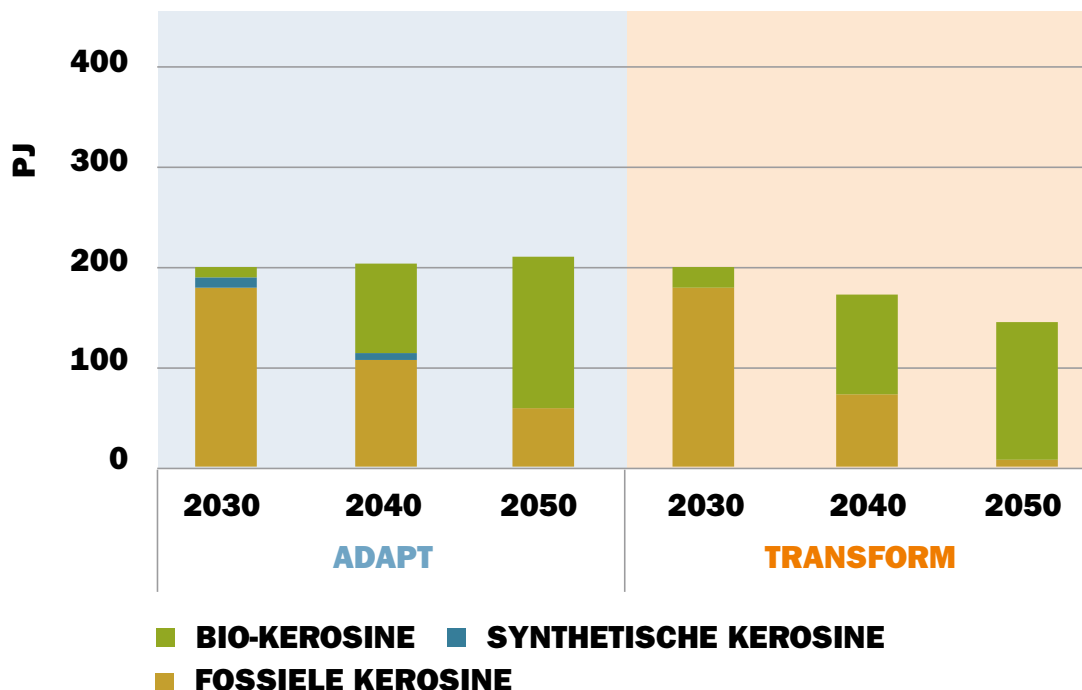


Energiegebruik van personen-, bestel- en vrachtauto's in Nederland voor 2030 tot 2050 volgens ADAPT- en TRANSFORM-scenario's.

LUCHTVAARTBRANDSTOFFEN

De modelresultaten laten zien (zie onderstaand figuur) dat in 2030 10% van de vliegtuigbrandstoffen uit bio- en/of synthetische kerosine zal bestaan. Daarna neemt in het ADAPT-scenario de vraag naar met name bio-kerosine toe tot ruim 70% in 2050. De groeiende vraag naar bio-kerosine heeft te maken met de voor dit scenario veronderstelde toename van het vliegverkeer en de te realiseren emissiereducties. In het TRANSFORM-scenario resulteert de afname van het vliegverkeer en een ambitieuzere reductie van broeikasgasemissies in een groter aandeel bio-kerosine dan in ADAPT. Beide scenario's laten een beperkte rol zien

voor synthetische kerosine. Hiervoor zijn een aantal redenen: ten eerste leidt, volgens de modelberekeningen, de productie van bio-kerosine in bioraffinaderijen, met bijproducten als bio-nafta en biogene CO₂, tot een goedkopere duurzame brandstof dan synthetische kerosine. Ten tweede wordt biogene CO₂ bij productie van bio-kerosine afgevangen en opgeslagen in het ADAPT-scenario (hetgeen zorgt voor negatieve emissies) of in het TRANSFORM-scenario gebruikt in de industrie voor de productie van chemicaliën (waarbij ook de bio-nafta wordt gebruikt) en synthetische brandstoffen. Toch worden tot 2040 in ADAPT ook synthetische brandstoffen ingezet, maar die verdwijnen na 2040. Dit heeft te maken met de beschikbaarheid van biomassa die tot 2040 de inzet van biobrandstoffen nog beperkt, maar in 2050 niet meer.

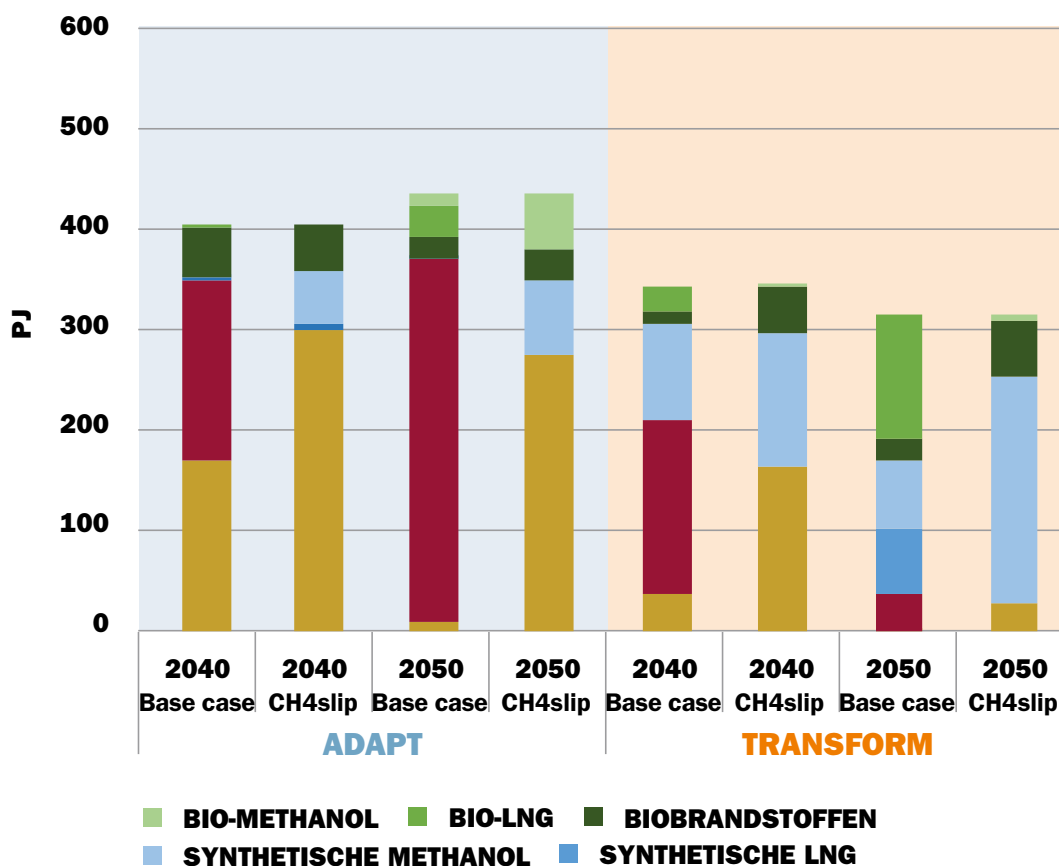


Brandstofgebruik van de internationale luchtvaart die vanuit Nederland wordt voorzien van brandstoffen volgens ADAPT- en TRANSFORM-scenario's.

BRANDSTOFFEN INTERNATIONALE SCHEEPVAART

Volgens beide scenario's maakt zware stookolie in 2030 zo'n 90% van de scheepsbrandstoffen uit. In het ADAPT-scenario, waar 50% reductie van de broeikasgasemissie wordt nagestreefd, wordt zware stookolie vanaf 2040 vervangen door fossiel LNG (zie figuur). Deze brandstof heeft een lagere CO₂-uitstoot in vergelijking met zware stookolie. Bij toepassing van LNG in scheepsmotoren komt echter een geringe hoeveelheid methaan in de uitlaatgassen terecht (methaanslip). Aangezien methaan een sterk broeikasgas is, versterkt dit de broeikasgasemissies. Als met deze methaanslip rekening wordt gehouden is fossiele LNG niet langer de geprefereerde brandstof in het ADAPT scenario, maar wordt zware stookolie (gedeeltelijk) vervangen door biobrandstoffen en methanol (bio en synthetisch). Ook in het TRANSFORM-scenario vervangt fossiele LNG vanaf 2040 de zware stookolie, maar daarnaast, als tweede optie, wordt ook synthetische methanol ingezet, geproduceerd uit groene waterstof. Omdat in TRANSFORM in 2050 een 95%

emissiereductie moet worden bereikt, ontstaat een verschuiving van fossiele LNG naar synthetische en bio-LNG. Synthetische methanol wordt in het TRANSFORM-scenario de dominante scheepsbrandstof als rekening wordt gehouden met de methaanslip. Dan zullen er ook meer biobrandstoffen worden ingezet. Of methaanslip bij scheepsmotoren kan worden tegengegaan is dus sterk bepalend voor de vraag aan welk duurzame brandstoffen in de scheepvaart de voorkeur zal worden gegeven.



Brandstofgebruik van de internationale scheepvaart die vanuit Nederland wordt voorzien van brandstoffen volgens ADAPT- en TRANSFORM-scenario's als er geen methaanemissies plaatsvinden (baseline) en wanneer dat wel het geval is (CH4slip).

MINDER BIOMASSA

In het ADAPT-scenario is in 2050 32% (302 PJ) van de biomassa bestemd voor biobrandstoffen en in TRANSFORM is dat 44% (372 PJ). Er bestaat echter onzekerheid over de hoeveelheid biomassa die beschikbaar is. Naast de binnenlandse biomassa is in deze scenariostudie uitgegaan van biomassa-import vanuit andere EU-landen. De maximale import is daarbij gebaseerd op de beschikbare biomassa in de EU¹⁰ en het Nederlandse aandeel daarvan op basis van het aantal inwoners in Nederland ten opzicht van het totale aantal inwoners in de EU. In een scenariovariant is het effect onderzocht van de beperking van de maximale biomassa-import voor ADAPT met 50% en voor TRANSFORM met 25%¹¹. Aangezien in het ADAPT-basisscenario nog geen twee derde van de beschikbare

¹⁰ Strengers, B en H. Elzenga, Beschikbaarheid en toepassingsmogelijkheden van duurzame biomassa, PBL, 2020

¹¹ Het importmaximum is voor het TRANSFORM-scenario lager dan voor ADAPT. Bij een 50% reductie van de maximale biomassa-import is het vrijwel niet mogelijk om in 2050 de energievraag te dekken met een broeikasgasneutraal energiesysteem.

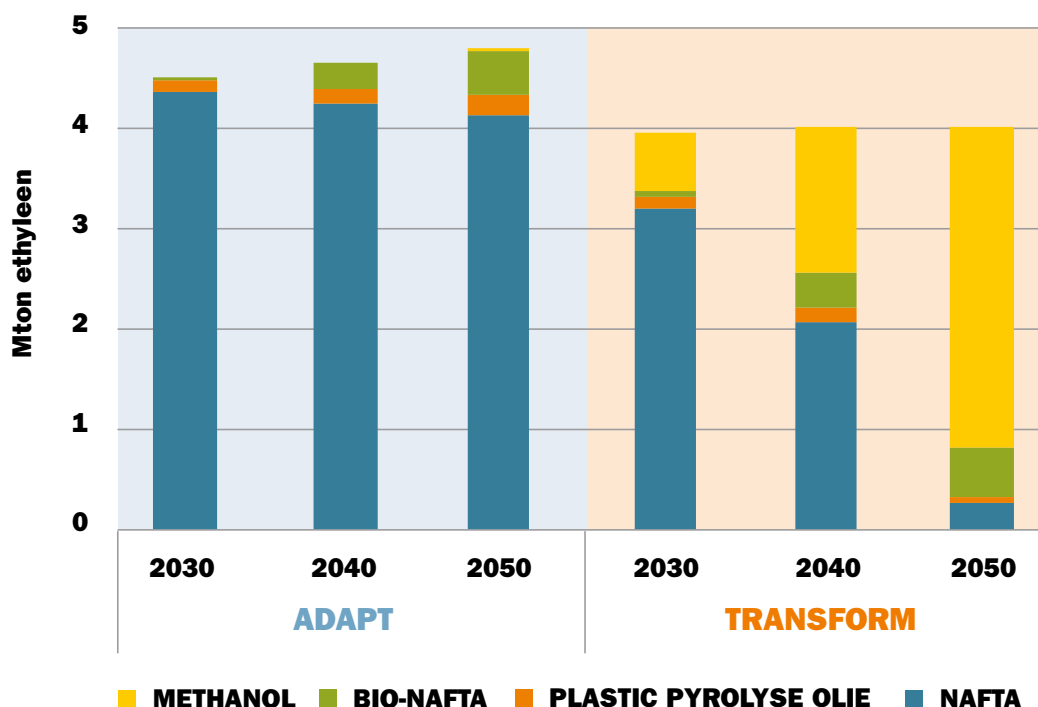
biomassa wordt benut, heeft een verlaging van de maximale biomassa-import met 50% voor het ADAPT-scenario beperkte gevolgen. De veranderingen bij het gebruik van biobrandstoffen in het binnenlands transport, van bio-kerosine in de luchtvaart en van biobrandstoffen voor de scheepsvaart zijn marginaal. Dit ligt anders voor het TRANSFORM-scenario, waar in het basisscenario vrijwel alle beschikbare biomassa wordt ingezet. Door verlaging van de maximale biomassa-import worden, ten opzichte van het basisscenario, in 2050 voor het binnenlands transport 20% minder biobrandstoffen gebruikt. Dit wordt gecompenseerd door meer elektrificatie. Het gebruik van biobrandstoffen en bio-LNG bij de zeescheepvaart halveert in 2050 ten opzichte van het basisscenario. Dit wordt gecompenseerd met synthetische LNG of synthetische methanol, al naar gelang methaanslip een rol speelt. Voor de luchtvaart verandert er weinig: ook in de scenariovariant met beperkte biomassa-import blijft bio-kerosine de preferente brandstof. De verlaging van de maximale biomassa-import heeft ook gevolgen voor andere vormen van biomassagebruik, met name de chemicaliënproductie in TRANSFORM (zie hierna). Door elektrificatie en toename van de synthetische brandstofproductie neemt in 2050 de waterstofproductie in ADAPT toe met 8% en in TRANSFORM met 14%. De elektriciteitsproductie neemt in 2050 in het ADAPT-scenario met 4% toe (met name door wind-op-zee), maar in het TRANSFORM-scenario kan de elektriciteitsproductie niet verder toenemen, omdat het maximumpotentieel voor wind-, zonne- en kernenergie in het basisscenario al bereikt is. Extra elektriciteitsvraag voor productie van synthetische brandstoffen leidt tot verschuiving in het gebruik van elektriciteit, zoals een efficiënter elektriciteitsgebruik door inzet van warmtepompen (met gebruik van meer omgevingswarmte) ten koste van goedkopere, directe elektrische verwarming.

PRODUCTIE VAN CHEMICALIËN

Als het gebruik van fossiele brandstoffen voor chemicaliënproductie wordt meegerekend, is de Nederlandse industrie op dit moment goed voor 38% van het totale Nederlandse finale energiegebruik. Daarvan gaat driekwart naar de chemische en petrochemische industrie voor energetisch en niet-energetische toepassingen. Het klimaatbeleid richt zich op het reduceren van de directe schoorsteenemissies (scope 1-emissies) en emissies van warmte- en elektriciteitsvoorziening (scope 2-emissies). Indirecte emissies, upstream en downstream (scope 3), kunnen worden verminderd door fossiele brandstoffen te vervangen door hernieuwbare grondstoffen of producten aan het einde van hun levensduur te hergebruiken. Hoe de biogene koolstof in producten in de boekhoudingsmethoden voor broeikasgassen moeten worden verwerkt is nog niet volledig duidelijk. Hoewel sommigen suggereren dat biogene CO₂ opgeslagen in producten als negatieve emissies moet worden beschouwd, hangt het klimaatmitigatiepotentieel van dergelijke producten sterk af van de levensduur van het product en wat er gebeurt aan het einde van de levensduur. De nieuwe scenariostudie introduceert voor het TRANSFORM-scenario een specifiek doel voor het gebruik van hernieuwbare grondstoffen en veronderstelt daarnaast het gebruik van gerecyclede plastics als grondstof voor de chemische industrie. Dit maakt een beter begrip mogelijk van de belangrijkste knelpunten van het re-carboniseren van de petrochemische industrie als onderdeel van een geïntegreerd, broeikasgasemissieneutraal energiesysteem.

Het TRANSFORM-scenario laat dit zien voor een belangrijke groep basischemicaliën die door de Nederlandse industrie worden geproduceerd: high value chemicals (HVC's zijn ethyleen, propyleen, butadien en benzeen). Deze chemicaliën zijn de bouwstenen voor productie van onder meer kunststoffen en worden nu nog met stoomkrakers geproduceerd uit nafta (een olieproduct), LPG en aardgascondensaten. Dit proces is nu verantwoordelijk voor 70% van het fossiele brandstoffengebruik in de chemische sector exclusief kunstmestproductie. Voor het TRANSFORM-scenario is een lager productieniveau voor HVC's verondersteld dan in ADAPT, waarbij voor de vraag naar HVC's tot 2050 nog een lichte groei is aangenomen. In het TRANSFORM-scenario is verondersteld dat 90% van de koolstof voor HVC's afkomstig is uit hernieuwbare koolstofbronnen. Dit criterium geldt niet voor het ADAPT-scenario. Bovendien is voor TRANSFORM verondersteld dat alle plastics in Nederland mechanisch of chemisch gerecycled worden. De gerecyclede plastics kunnen als grondstof voor HVC-productie worden gebruikt via chemische recycling d.m.v. pyrolyse. Deze pyrolyse-olie kan tot 30% worden bijgemengd bij (bio-)nafta.

Onderstaand figuur – ethyleenproductie wordt weergegeven als proxy voor de productie van HVC's – laat zien dat fossiele nafta in het ADAPT-scenario de belangrijkste grondstof voor stoomkrakers blijft. Bio-nafta heeft in dit scenario een beperkte rol omdat in het basisscenario alleen in eigen land geproduceerde bio-nafta kan worden gebruikt (het basisscenario veronderstelt geen bio-nafta import). Aangezien bio-nafta het bijproduct is van de biobrandstoffenproductie (via Fischer-Tropsch-synthese en de productie van Hydrotreated Vegetable Oils) wordt de beschikbaarheid ervan beperkt door de hoeveelheid van dergelijke biobrandstoffen.

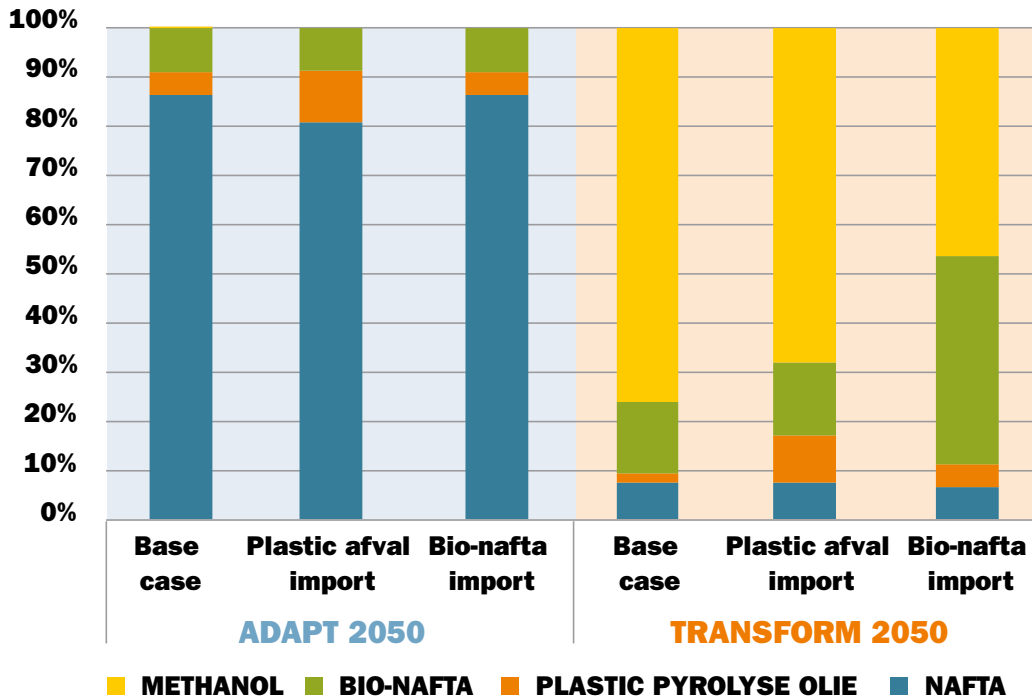


Ethyleenproductie in ADAPT- en TRANSFORM-scenario's.

Het TRANSFORM-scenario laat een substantiële verschuiving zien van conventioneel stoomkraken naar HVC-productie uit synthetische methanol (methanol gemaakt uit waterstof en CO₂). Om te voldoen aan de reductiedoelstellingen voor broeikasgassen wordt in TRANSFORM de meeste biomassa gebruikt voor de productie van transportbrandstoffen, met name voor de luchtvaart en de internationale scheepvaart. Onder meer vanwege het hogere omzettingsrendement heeft de productie van biobrandstoffen de voorkeur boven de productie van lichte koolwaterstoffen uit biomassa. Alleen het bijproduct bio-nafta wordt gebruikt als grondstof in de chemische industrie. Een groot deel van de CO₂ die wordt gebruikt om synthetische methanol te produceren is toch afkomstig van biogene bronnen. Biogene CO₂ dat vrijkomt bij de productie van biobrandstoffen (met name vergassing en Fischer-Tropsch-synthese) wordt namelijk gebruikt om synthetische methanol te produceren. Om in de chemische industrie uiteindelijk tot nul CO₂-emissies te komen, en de beschikbaarheid van biomassa in het scenario beperkt is, wordt dit aangevuld met CO₂ die wordt afgevangen uit de lucht (CO₂ direct-air-capture).

In de basisscenario's vindt alleen import van biomassa plaats. Met enkele scenariovarianten is onderzocht wat het effect is als daarnaast import van bio-nafta, gerecyclede plastics of waterstof plaatsvindt. Onderstaand figuur laat zien dat, als meer gerecyclede plastics beschikbaar zijn, het aandeel pyrolyse olie in ADAPT toeneemt ten koste van nafta en bio-nafta. Toename van de hoeveelheid gerecyclede plastics of bio-nafta leidt in het TRANSFORM-scenario vooral tot afname van het gebruik van methanol voor de productie van HVC's. Het verruimen van de importmogelijkheden voor duurzame grondstoffen zorgt in beide scenario's slechts voor marginale veranderingen in de vraag naar elektriciteit en waterstof in het totale energiesysteem. Relatief heeft de bio-nafta import in het TRANSFORM-scenario het grootste effect op de waterstofvraag: die is 2% lager dan in het basisscenario. Opvallend is dat in de twee varianten van dit scenario de methanolproductie niet afneemt, maar het methanolgebruik zich verplaatst naar brandstofinzet voor de zeescheepvaart: het methanolgebruik door de internationale scheepvaart neemt met ruim een factor twee toe bij bio-nafta-import en bij import van gerecyclede plastics is dat meer dan tweeëneenhalf keer zo groot. Import van waterstof leidt ook tot een grotere inzet van methanol door de internationale scheepvaart, maar geen significante verandering in het gebruik van methanol voor HVC-productie. Voor extra synthetische methanolproductie is echter meer CO₂ nodig dat verkregen wordt met meer CO₂-afvang uit de lucht, aangezien het biomassa potentieel in het TRANSFORM-scenario al volledig wordt benut. Beperking van de maximaal beschikbare biomassa-import (-50% in ADAPT en -25% in TRANSFORM ten opzichte van de basisscenario's) leidt in beide scenario's niet tot merkbare verschuivingen in de grondstoffenmix voor HVC-productie, maar leidt ook in het TRANSFORM-scenario wel tot meer CO₂-afvang uit de lucht. Dit is enerzijds nodig ter compensatie van de vermindering van biogene CO₂ voor de productie van HVC's, maar daarnaast omdat minder biogene CO₂-opslag (BECCS) plaatsvindt voor het realiseren van negatieve emissies.

Hoewel niet verder onderzocht in deze studie, is de verwachting dat import van biobrandstoffen een significant effect zal hebben op de HVC-productie. Omdat bio-nafta een bijproduct is van de bio-raffinage, zal er minder bio-nafta beschikbaar zijn, wat vooral in TRANSFORM zal leiden tot een verminderd gebruik van gerecyclede plastics vanwege de verhouding tussen pyrolyse olie en nafta. Voor productie van synthetische methanol betekent import van biobrandstoffen bovendien minder beschikbaarheid van biogene CO₂, die gecompenseerd dient te worden met meer CO₂-afvang uit de lucht.



Effect van import van gerecyclede plastics en bio-nafta op grondstofgebruik voor productie van ethyleen voor ADAPT- en TRANSFORM-scenario's.

› BIJLAGE

KWANTIFICERING VAN DE SCENARIO'S MET HET OPERA-MODEL

De twee scenario's zijn gekwantificeerd met behulp van het energiesysteemmodel 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 bijv. CH₄ en N₂O-emissies) van Nederland, inclusief de emissies voor landgebruik, veranderingen in landgebruik en bosbouw (LULUCF). 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 de voorgaande jaren en de technische levensduur.

Techno-economische optimalisatie

Het OPERA-model is een optimalisatiemodel: het model rekent het energiesysteem en de bijbehorende emissies uit, gegeven bepaalde doelen (bijv. broeikasgas-reductiedoel) en randvoorwaarden, tegen de laagste maatschappelijke kosten. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de nationale kosten-batenanalysemethode. 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. beperkte CO₂-opslag en biomassabeschikbaarheid) en fysieke limitering (bijv. transport van warmte of elektriciteit) of beleidsmatige technologie uitsluiting (bijv. 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, kernenergie, CO₂-opslag en biomassa uit binnen- en buitenland.

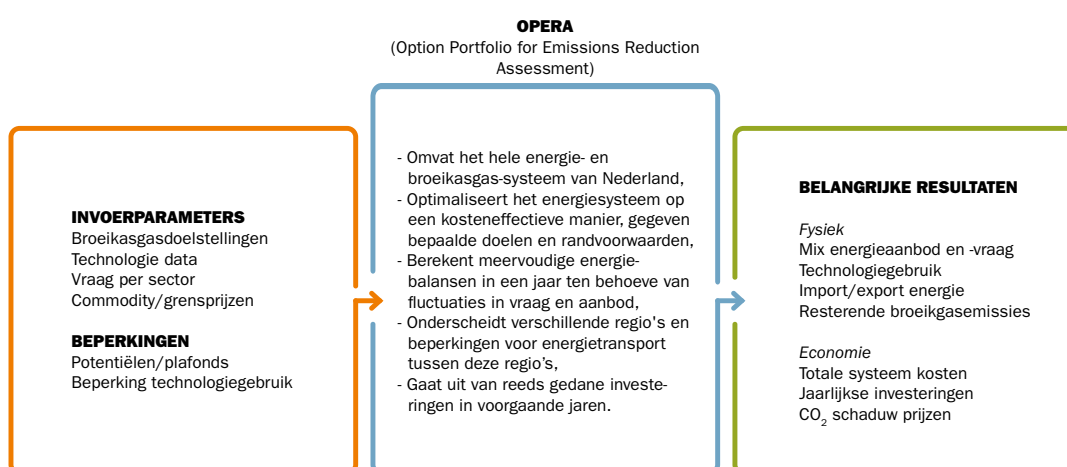
Modelaanpassingen

Voor de nieuwe scenariostudie is het model op een aantal punten aangepast. Dit betreft ondermeer:

- nieuwe innovatieve productieroutes voor productie van chemicaliën en brandstoffen.
- warmteopwekking en -gebruik in de industrie.

Invoervariabelen

Voor de techno-economische optimalisatie gebruikt het model een doelstelling. In dit geval een maximale emissie van broeikasgassen. Andere inputvariabelen zijn: technische en economische data van technologie-opties (er zijn meer dan 600 technologieën waaruit het model kan kiezen, waaronder ook energiebesparings-opties 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. Dit zijn ook invoervariabelen. 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 eindgebruikerssectoren, 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) discountvoet van 2.25%, 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.

› **CONTACT**

Martin Scheepers
Senior consultant energy transition

E martin.scheepers@tno.nl