

Whitepaper

# Toekomst van het Nederlandse energiesysteem

Ontwikkeling energie-  
intensieve industrie  
bepalend voor de  
energietransitie

**Auteur**

Martin Scheepers

**Mei 2024**

**TNO** innovation  
for life



# Inhoudsopgave

Inleiding	3
Context van de Nederlandse energietransitie	8
Toekomstbeelden	9
Scenario-uitkomsten	12
Bijlagen	24

# Inleiding

Er is een breed besef dat de klimaatverandering die nu plaatsvindt mede het gevolg is van door de mens veroorzaakte broeikasgasemissies. Ook weten we dat daaraan iets gedaan kan worden: broeikasgasemissies kunnen worden vermeden door fossiele brandstoffen te vervangen door hernieuwbare energie. Zo'n transitie is echter niet eenvoudig. Het vereist andere keuzes en gedrag van consumenten, bedrijven en overheid. Dit kost tijd en het roept weerstand op. Overheden hebben hierbij een belangrijke rol te spelen, nationaal en internationaal, maar ook regionaal en lokaal. Niet alleen door doelstellingen af te spreken, maar ook door te zorgen voor concreet en doelmatig beleid dat voor een langere periode duidelijkheid biedt. Met inzet van onder meer financiële prikkels (zoals subsidieverlening en het via heffingen opnemen van milieukosten in marktprijzen), het opleggen van verplichtingen, het wegnemen van barrières en het reguleren van de energiemarkt kan de overheid sturen

op gewenst veranderingen, maar ook ongewenste uitkomsten tegengaan. Bij deze overheidssturing van de energietransitie is het belangrijk dat er een duidelijk beeld bestaat over hoe een toekomstig duurzaam energiesysteem er uit kan zien. Het gaat daarbij om vragen als: Hoe groot wordt de toekomstige energievraag en welke sectoren zijn daarbij bepalend? Hoeveel elektriciteit is er in de toekomst nodig en wat kan de bijdrage van kernenergie zijn naast elektriciteit uit wind en zon? Hoe kan de industrie verduurzamen en hoeveel elektriciteit, waterstof en biograndstoffen is daarvoor nodig? Zullen nog fossiele energiebronnen worden gebruikt? Welke duurzame brandstoffen zijn er nodig voor lucht- en scheepvaart? Wordt het wegtransport volledig geëlektrificeerd of zullen ook waterstof en biobrandstoffen gebruikt worden? Hoe zullen huizen en ander gebouwen worden verwarmd: met warmtepompen, warmtenetten, groen gas of waterstof? Gaan door verduurzaming de kosten van het energiesysteem omhoog? Om antwoorden op deze vragen te krijgen

kan met behulp van energiescenario's de toekomst van het duurzame energiesysteem worden verkend én de mogelijke routes daar naar toe.

In 2020 zijn door TNO twee scenario's opgesteld die zijn gebaseerd op verschillende toekomstbeelden (ADAPT en TRANSFORM) en die voldeden aan de toen afgesproken doelstellingen voor de reductie van broeikasemissies (Klimaatakkoord). Deze scenario's zijn in 2022 aangepast aan verwachtingen van de economische ontwikkelingen, nieuwe beleidsdoelen en verbeterde technologische inzichten en gegevens. Weer twee jaar later is er nu opnieuw reden de scenario's te vernieuwen en te baseren op de aangescherpte nationale en Europese doelstellingen en implementatie daarvan (Klimaatwet, Fit-for-55, REPowerEU). Voor 2030 wordt, naast het 55%-reductiedoel en streefwaarden per sector, onder meer rekening gehouden met aangescherpte doelen voor energiebesparing en duurzame energie. Ook wordt er van uitgegaan

dat bedrijven die onder het Europese emissiehandelssysteem (ETS) vallen vanaf 2040 netto geen broeikasgasemissies meer mogen uitstoten. Vergeleken met de vorige scenariostudies leidt dit tot een versnelling in de omschakeling van fossiele naar hernieuwbare energie.

De vorige scenariostudies hebben laten zien dat verduurzaming van de industriële energievraag een enorme uitdaging is. De industrie staat aan de vooravond van grote veranderingen. De plannen voor deze verduurzaming worden nu gemaakt. Daarbij wordt ook beseft dat de toekomst van met name de Nederlandse energie-intensieve industrie onzeker is en veranderingen in de industriële productievolumes een grote impact kan hebben op de ontwikkeling van het Nederlandse energiesysteem. Daarom is in deze nieuwe scenariostudie de focus gelegd op mogelijke marktontwikkelingen in de energie-intensieve industrie: wat verandert er als de energie-intensieve industrie internationaal gezien minder competitief wordt of als het energie-

intensieve deel van de productieketen naar het buitenland wordt verplaatst? Andere mogelijke onzekerheden, zoals ten aanzien van beschikbaarheid van technologie, materialen en menskracht, van geopolitieke ontwikkelingen en van de steun van de bevolking, zijn niet onderzocht. Ook de indirecte gevolgen van een eventuele krimp in de energie-intensieve industrie lag buiten de scope van dit onderzoek.

In deze whitepaper worden de resultaten van de nieuwe scenariostudie gepresenteerd. Naast resultaten van de vernieuwde ADAPT- en TRANSFORM-scenario's, die van elkaar verschillen wat betreft duurzaamheidsambities en consumentengedrag, worden in drie scenariovarianten mogelijke toekomstige ontwikkelingen verkend voor de Nederlandse energie-intensieve industrie. De hoofdboodschappen en aandachtspunten voor beleid staan in aparte kaders weergegeven. Tezamen met deze whitepaper is een achtergrondrapport

gepubliceerd<sup>1</sup> waarin de opzet van de studie en gebruikte aannames wordt verantwoord, en een meer uitgebreide analyse van de resultaten wordt gepresenteerd. Voor geïnteresseerden zijn grafieken en tabellen met kwantitatieve resultaten beschikbaar via de website [energyscenarios.tno.nl](https://energyscenarios.tno.nl).

Naast deze nieuwe scenariostudie van TNO zijn in 2023 door de Nederlandse netbeheerders ook lange termijn energiestudio's opgesteld (Integrale Infrastructuurverkenning 2030-2050) en is in 2024 door het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) de Trajectverkenning Klimaatneutraal 2050 gepubliceerd. De nieuwe TNO-scenario's onderscheiden zich daarmee door de focus op de ontwikkeling van de Nederlandse energie-intensieve industrie en de impact daarvan op het toekomstige duurzame energiesysteem van Nederland. Een beknopte vergelijking tussen de verschillende scenariostudies staat weergegeven in bijlage 2 van deze whitepaper.

<sup>1</sup> Martin Scheepers, Joost van Stralen, Juan Giraldo Chavarriaga, Ahmed Elberry, Ayla Uslu en Carina Oliveira; Towards a sustainable energy system for the Netherlands in 2050 - Scenario update and scenario variants for industry, TNO 2024 P10607

# Hoofdboodschappen van de scenariostudie

## Omvang energie-intensieve industrie en brandstoffenproductie voor internationaal transport bepalend voor de energievraag

De toekomstige ontwikkeling van de energie-intensieve industrie (raffinaderijen, organische basischemie, staalindustrie en kunstmestindustrie) en de vraag naar in Nederland geproduceerde brandstoffen voor de internationale lucht- en scheepvaart zijn bepalend voor de ontwikkeling van een klimaatneutraal energiesysteem voor Nederland. Als het productievolume van de energie-intensieve industrie nagenoeg ongewijzigd blijft dan zal ook in de toekomst de industrie (energetisch en non-energetisch verbruik) verantwoordelijk zijn voor 40 tot 50% van de Nederlandse energievraag. Ondervindt deze industrie meer internationale concurrentie waardoor de productie in Nederland vermindert en/of het energetisch intensieve deel van de productieketen naar het buitenland wordt verplaatst en als halffabricaten worden geïmporteerd, dan kan dit aandeel dalen naar iets boven de 30%. Het energievolume van de vanuit Nederland geleverde brandstoffen voor internationale lucht- en scheepvaart is nu ongeveer 600 PJ en vergelijkbaar met het energieverbruik van de gebouwde omgeving. Dit kan in de toekomst zo blijven of aanzienlijk afnemen als minder wordt gevlogen en zeeschepen een deel van de benodigde brandstoffen inslaan in buitenlandse havens.

## Elektrificatie en vraag naar groene waterstof zorgt voor forse groei elektriciteitsvraag

Door elektrificatie van de energievraag voor warmte en mobiliteit neemt de vraag naar elektriciteit fors toe. Ten opzichte van het huidige elektriciteitsverbruik zal de binnenlandse elektriciteitsvraag hierdoor met ongeveer een factor 2,5 groeien. Doordat in de toekomst elektriciteit ook wordt gebruikt voor de productie van groene waterstof, zorgt dat voor een verdere toename van de elektriciteitsvraag. De binnenlandse elektriciteitsvraag neemt dan toe met ongeveer een factor 3. De waterstof is voor meer dan 90% bestemd voor de industrie (o.a. voor duurzame productie van staal en kunstmest) en de productie van synthetische brandstoffen (o.a. voor de luchtvaart). Als de energie-intensieve industrie krimpt en/of het energie-intensieve deel van het

productieproces naar het buitenland wordt verplaatst, zal de elektriciteitsvraag, in plaats van met een factor 3, met ruim een factor 2 tot 2,5 groeien. Mocht die ontwikkeling plaatsvinden, dan hoeft de vraag naar waterstof niet te dalen. Voor de gebouwde omgeving kan het dan aantrekkelijk worden om waterstof in te zetten als brandstof voor verwarming (tot zo'n 14%), met name als de importprijs voor waterstof concurrerend is met de kosten voor binnenlandse waterstofproductie. Waterstofproductie kan ook op een kosteneffectieve manier bijdragen aan het opvangen van een te veel aan wind- en zonnestroom waarnaar geen vraag is. Ook elektriciteitsexport draagt bij aan het in balans houden van het elektriciteitssysteem. De omvang van die bijdrage is wel afhankelijk van de capaciteitsuitbreiding van de elektriciteitsnetwerken.

## Kernenergie kan aanvulling zijn op hernieuwbare elektriciteitsproductie uit zon en wind

Wind- en zonne-energie zijn de belangrijkste energiebronnen waaruit in de toekomst elektriciteit wordt geproduceerd. In 2030 ligt het aandeel wind en zon tussen 73% en 85% en in 2050 kan dat groeien naar 90%. Ten opzichte van 2022 zal de productiecapaciteit in 2050 groeien met een factor 3,5 tot 4,5, sterker dan de elektriciteitsvraag omdat windturbines en zonnepanelen niet alle uren van het jaar elektriciteit kunnen produceren. Kernenergie kan ook deel uit maken van de elektriciteitsproductiemix (met een aandeel van 7% tot 9% in 2050) als de plannen voor twee nieuwe kerncentrales (3 GW) worden gerealiseerd en ook small modular reactors met warmtelevering aan de industrie (SMR's) worden toegepast (tezamen 2 GW). Een toekomstig duurzaam energiesysteem zonder kernenergie is ook mogelijk, maar de maatschappelijke kosten voor het energiesysteem zijn dan hoger omdat met alleen wind- en zonne-energie meer kosten gemaakt moeten worden om in de vraag naar basislast te voorzien. Bij een krimpende industrie en/of import van halffabricaten uit het buitenland hoeft de elektriciteitsproductie in Nederland minder sterk te groeien. Doordat de basislastvraag kleiner is groeit de productie van elektriciteit uit kerncentrales relatief minder in vergelijking met die van wind en zon.



### **Koolstof blijft een belangrijke rol spelen in een klimaatneutraal energiesysteem**

Door de energietransitie zal de totale hoeveelheid koolstof in het energiesysteem nagenoeg gelijk blijven of tot 40% lager zijn dan nu het geval is. In een broeikasgasneutraal energiesysteem blijft koolstof nodig voor de productie van brandstoffen (o.a. voor de luchtvaart) en de productie van chemicaliën en plastics. De energietransitie kan er voor zorgen dat fossiele koolstof wordt vervangen door duurzame koolstof, zoals biograndstoffen en recyclede plastics. Maar voor een forse daling is extra beleid nodig (zie kader Aandachtspunten voor beleid). In een duurzaam energiesysteem zal ook nog fossiele koolstof aanwezig zijn. Raffinaderijen zullen namelijk nog fossiele brandstoffen exporteren en er zal nog fossiele koolstof worden gebruikt bij de productie van chemicaliën. Ook wordt fossiele koolstof opslagen als CO<sub>2</sub> in lege gasvelden onder de Noordzee en fossiele CO<sub>2</sub>-emissies worden gecompenseerd met negatieve emissies (opgeslagen niet-fossiele CO<sub>2</sub>). Het volledig uitbannen van het gebruik van fossiele brandstoffen kan leiden tot hoge kosten. Het is namelijk kosteneffectiever in beperkte mate fossiele brandstoffen te blijven gebruiken en de daarbij vrijkomende CO<sub>2</sub>-emissies te compenseren met opslag van biogene CO<sub>2</sub> die vrijkomt bij omzetting van biograndstoffen naar brandstoffen en chemicaliën. Vastlegging van koolstof of negatieve emissies is ook nodig ter compensatie van moeilijk te reduceren niet-CO<sub>2</sub> broeikasgasemissies, zoals methaanemissies uit veeteelt in de landbouw.

### **Primair energieverbruik neemt toe vanwege toepassing duurzame technieken**

In 2030 kan het energiesysteem voldoen aan het doel voor finaal energieverbruik uit de Energy Efficiency Directive (EED), maar het realiseren van het (indicatieve) doel voor primair energieverbruik is moeilijk. Na 2030 zal, zonder een expliciete doelstelling voor vermindering van het energieverbruik, het finaal energieverbruik 4% tot 10% boven de doelstelling liggen voor 2030. Voor het bereiken van de doelstelling voor

broeikasgasemissies worden ook veel efficiency maatregelen ingezet. Daarbovenop kan ook leefstijlverandering bijdragen aan zowel emissiereductie als een lager energieverbruik. Het primair energieverbruik neemt wel verder toe en komt ruim boven de indicatieve doel van 2030 uit. Dit komt door introductie van (nieuwe) technologieën voor de energieconversie die leiden tot extra energieverliezen (zoals elektrolyzers voor waterstofproductie, kerncentrales, processen die biograndstoffen omzetten in brandstoffen en chemicaliën) en nieuwe energievraag (zoals voor CO<sub>2</sub>-afvang). Een krimpende industrie en/of verplaatsing van energie-intensieve deel van de productieketen naar het buitenland zorgt voor een lager finale en primaire energieverbruik.

### **Grote investeringen nodig, maar ambitieuzer klimaatbeleid leidt niet tot aanzienlijk hogere systeemkosten**

Voor het realiseren van de energietransitie zijn aanzienlijke investeringen nodig die de komende decennia nog zullen toenemen. De toename van investeringen wordt gedempt door kostendaling als gevolg van innovatie en het op grotere schaal toepassen van nieuwe technologieën. De jaarlijkse kosten voor het hele energiesysteem (kapitaalskosten, operationele kosten, kosten energie-infrastructuur en kostensaldo van energie-import en -export) zullen toenemen richting 2050, met name als fossiele brandstoffen gebruikt blijven worden en consumenten hun leefstijl niet aanpassen. Gebeurt dat wel en daalt het gebruik van fossiele brandstoffen dan zullen de jaarlijkse kosten van het energiesysteem lager uitvallen. In de jaarlijkse systeemkosten vindt een verschuiving plaats van energie-inkoopkosten naar kapitaalskosten, met name door verduurzaming van het energiesysteem. De jaarlijkse systeemkosten voor de industrie blijven echter voor het grootste deel uit energie-inkoopkosten bestaan, hoewel die relatief wel enigszins kunnen dalen. In een scenario met vergaande verduurzaming zullen de systeemkosten voor de industrie veel lager uitvallen dan in een scenario met minder vergaande verduurzaming en waarbij nog een substantiële hoeveelheid fossiele brandstoffen gebruikt blijft worden.

# Aandachtspunten voor beleid

Deze scenariostudie toont hoe een toekomstig klimaatneutraal energiesysteem er uit zou kunnen zien. Om zo'n energiesysteem te realiseren zullen beleidskeuzes gemaakt moeten worden en is soms aanvullend overheidsbeleid nodig. Het gaat hierbij om:

## Mogelijk maken van waterstofproductie op platforms in de Noordzee

Grootschalige waterstofproductie met elektrolyzers kan het beste plaatsvinden in de nabijheid van offshore windparken. Over grote afstand is energietransport door pijpleidingen (zeker als daarvoor bestaande gasleidingen kunnen worden gebruikt) goedkoper dan door elektriciteitskabels. Bovendien kan waterstofproductie bijdragen aan het opvangen van overschotten aan windenergie.

## Locatiebeleid kleine kerncentrales

Nieuwe kerncentrales kunnen nu maar op een beperkt aantal plekken in Nederland worden gerealiseerd. Als de toepassing van kleine kerncentrales (SMR's) met warmtelevering aan de industrie wenselijk is, is nieuw locatiebeleid nodig dat locaties in de buurt van industrieclusters mogelijk maakt.

## Beleid gericht op internationale concurrentiepositie energie-intensieve industrie

Voor de toekomst van de energie-intensieve industrie is toegang tot voldoende hernieuwbare energie en duurzame koolstof tegen internationaal concurrerende prijzen essentieel. Daarvoor is een goede energie- en haveninfrastructuur nodig die tijdig wordt aangepast en uitgebreid op basis van de nieuwe behoeftes. Dit laatste is ook van belang om het voor bedrijven mogelijk te maken halffabricaten te importeren.

## Beleid voor uitfasering fossiele brandstoffen

Beleid om broeikasgassen te reduceren leidt niet vanzelf tot uitfasering van het fossiele brandstoffengebruik. Als het wenselijk is de importafhankelijkheid van fossiele brandstoffen te beperken of de transitie naar hernieuwbare energie en -grondstoffen

te versnellen, zal de opslag van CO<sub>2</sub> moeten worden beperkt, de internationale lucht- en scheepvaart moeten worden gestimuleerd over te schakelen op duurzame brandstoffen, en is beleid nodig voor gebruik van niet-fossiele koolstof bij productie van chemicaliën en plastics.

## Stimuleren afvang en opslag van biogene CO<sub>2</sub>

Om klimaatneutraliteit te bereiken is koolstofvastlegging (negatieve emissies) nodig door afvang en opslag van biogene CO<sub>2</sub> (BECCS). Hiermee kunnen moeilijk te reduceren broeikasgasemissies worden gecompenseerd. Ook na 2050 kan met BECCS negatieve emissies worden gerealiseerd om de concentratie CO<sub>2</sub> in de atmosfeer te verlagen. Het toepassen van BECCS kan in de toekomst zelfs goedkoper zijn dan afvangen van fossiele CO<sub>2</sub>. Bedrijven met bioprocessen moeten dan wel worden gestimuleerd BECCS toe te passen en in de CO<sub>2</sub>-boekhouding moet opslag van biogene CO<sub>2</sub> als negatieve emissies worden meegeteld.

## Stimuleren duurzaam consumentengedrag

Verandering van consumentengedrag kan bijdrage aan verlaging van het energieverbruik en reductie van broeikasgassen. De overheid kan er voor kiezen consumenten te stimuleren hun CO<sub>2</sub>-voetafdruk te beperken bij keuzes ten aanzien van wonen, mobiliteit en aanschaf van goederen. Hierbij is het voor de milieubewuste consument nodig inzicht te hebben in de CO<sub>2</sub>-voetafdruk en welke alternatieve keuzes gemaakt kunnen worden.

# Context van de Nederlandse energietransitie

In de afgelopen zeventig jaar heeft de Nederlandse energievoorziening gebruik kunnen maken van de gasvoorraden in Groningen en onder de Noordzee. Via de zeehavens zijn olie en kolen aangevoerd. De ombouw van dit fossiele energiesysteem naar een klimaatneutraal energiesysteem dat is gebaseerd op hernieuwbare energiebronnen is inmiddels begonnen en er is ook een versnelling ingezet. Hoewel Nederland relatief klein en dichtbevolkt is – en daarmee de ruimte schaars – heeft het de beschikking over een deel van de Noordzee dat qua oppervlak bijna 40% groter is dan Nederland. Daar is ruimte voor een aanzienlijke windenergiecapaciteit. Tezamen met wind op land, zonne-energie en geothermie heeft Nederland een aanzienlijk potentieel voor hernieuwbare energie. Lege gasvelden onder de Noordzee kunnen worden gebruikt voor CO<sub>2</sub>-opslag en zoutcavernes (op land en onder de Noordzee) kunnen worden gebruikt voor opslag van waterstof. Via de Nederlandse zeehavens kunnen biograndstoffen worden aangevoerd,

maar ook waterstof, ammoniak of andere halffabricaten voor de industrie. Rond de zeehavens en op andere plaatsen in Nederland heeft zich, door de ruime beschikbaarheid van fossiele brandstoffen, een aanzienlijke energie-intensieve industrie ontwikkeld. De toekomst voor deze energie-intensieve industrie in Nederland is echter onzeker. Industriële bedrijven nemen nu ruim 40% van de Nederlandse energievraag voor hun rekening en zijn verantwoordelijk voor meer dan 30% van de Nederlandse broeikasgasemissies. In de komende decennia zullen deze bedrijven hun broeikasgasemissies naar nul moeten terugbrengen en overschakelen op hernieuwbare energie en duurzame grondstoffen. Bedrijven kunnen besluiten hun nieuwe productiefaciliteiten buiten Nederland te bouwen, bijvoorbeeld op plaatsen waar hernieuwbare energie goedkoper en ruimer voorhanden is. Ook is het mogelijk dat alleen het energie-intensieve deel van de productieketen wordt verplaatst naar

het buitenland en dat halffabricaten, zoals waterstof, ammoniak, bio-olie, bio-methanol, etc. via de Nederlandse zeehavens worden geïmporteerd<sup>2</sup>. Een deel van de productieketen blijft dan in de nabijheid van de Europese afzetmarkt. De Nederlandse raffinaderijen hebben een internationale afzetmarkt. De toekomstige ontwikkeling van deze afzetmogelijkheden wordt deels bepaald door de toekomstige vraagontwikkeling, maar ook door concurrerende raffinaderijen buiten Nederland. Een andere onzekere ontwikkeling betreft de vraag naar bunkerbrandstoffen voor vliegtuigen en zeeschepen waarin nu wordt voorzien vanuit de Nederlandse raffinaderijen. Deze brandstofvraag is aanzienlijk (nu zo'n 600 PJ) en even groot als de totale warmte- en elektriciteitsvraag van alle woningen gebouwd in Nederland. Ook deze brandstoffen zullen moeten worden verduurzaamd, maar het is onzeker wat de toekomstige vraag naar bunkerbrandstoffen zal zijn.

<sup>2</sup> Door Guidehouse zijn in 2023 voor het Programma Verduurzaming Industrie ook analyses gemaakt van verschillende ontwikkelpaden voor de Nederlandse energie-intensieve industrie. Deze TNO-scenariostudie onderscheidt zich daarmee doordat het de impacts voor het totale Nederlandse energiesysteem onderzoekt.



# Toekomstbeelden

De scenario's zijn gebaseerd op twee toekomstbeelden voor Nederland voor de periode 2030-2050: ADAPT en TRANSFORM. Deze toekomstbeelden zijn ook in de twee vorige TNO-scenariostudies gebruikt. In beide toekomstbeelden dalen de broeikasgasemissies en worden de klimaatdoelstellingen gehaald. De manier waarop dat gebeurt verschilt. De Nederlandse maatschappij streeft in ADAPT naar het handhaven van de huidige levensstijl en behoud van de economische structuur, waaronder een sterke industriesector. Fossiele energiedragers kunnen gebruikt blijven worden en worden klimaatneutraal gemaakt door toepassing van CO<sub>2</sub>-opslag. Verduurzaming van fossiele brandstoffen die als grondstof worden gebruikt wordt niet nagestreefd. Ook zijn er beperkte ambities om brandstoffen voor internationale lucht en scheepvaart (waarvan de emissies buiten de Nederlandse klimaatdoelstelling vallen) te verduurzamen.

In TRANSFORM zijn de Nederlandse en Europese burgers bereid hun gedrag aan te passen met als motivatie hun CO<sub>2</sub>-voetafdruk te verminderen. Als gevolg van deze leefstijlverandering verandert de mobiliteitsvraag – er wordt minder

	ADAPT			TRANSFORM		
	2030	2040	2050	2030	2040	2050
Nationaal broeikasgasreductiedoel <sup>b</sup>	55% <sup>a</sup>	80%	Klimaat-neutraal	55% <sup>a</sup>	80%	Klimaat-neutraal
Broeikasgasreductiedoel						
• Internationale luchtvaart		30%	50%		53%	100%
• Internationale scheepvaart		45%	50%		70%	100%
Aandeel circulaire koolstof voor productie van chemicaliën	0%	0%	0%	0%	40%	80%
Doel finale energiegebruik	1609 PJ	Geen doel		1609 PJ	Geen doel	
Energie en mobiliteitsvraag, vraag naar producten		Projectie van Klimaat- & energieverkenning (KEV) 2022 met extrapolatie voor 2050			Lager dan KEV 2022	
• Energievraag industrie					Lager dan KEV 2022	
• Productie industrie					Gelijk aan KEV 2022	
• Huishoudens					Lager dan KEV 2022	
• Binnenlandse mobiliteit					Hoger dan KEV 2022	
• Energievraag dienstensector					Lager dan KEV 2022	
• Energievraag agrarische sector					Lager dan KEV 2022	
Fossiele brandstofprijzen	Stijgende prijzen, gelijk aan KEV 2022					
Biomassa beschikbaarheid (PJ) <sup>c</sup>						
• Binnenlands	164	202	241	164	186 <sup>d</sup>	209 <sup>d</sup>
• Import uit buitenland	83	366	650	83	366	650
CO <sub>2</sub> -opslag (Mton) <sup>c</sup>	12,7	35	40	12,7	12,7	15
Maximale capaciteit (GW) <sup>c</sup>						
• Wind op zee	16	36	40	16	45	70
• Wind op land	7,8	7,8	7,8	7,8	10	12
• Zon-PV	37	69	109	43	84	132
• Kerncentrales <sup>e</sup>	0,5	3,45	5,2	0,5	3,45	5,2

**Tabel 1** Samenvatting van scenarioparameters

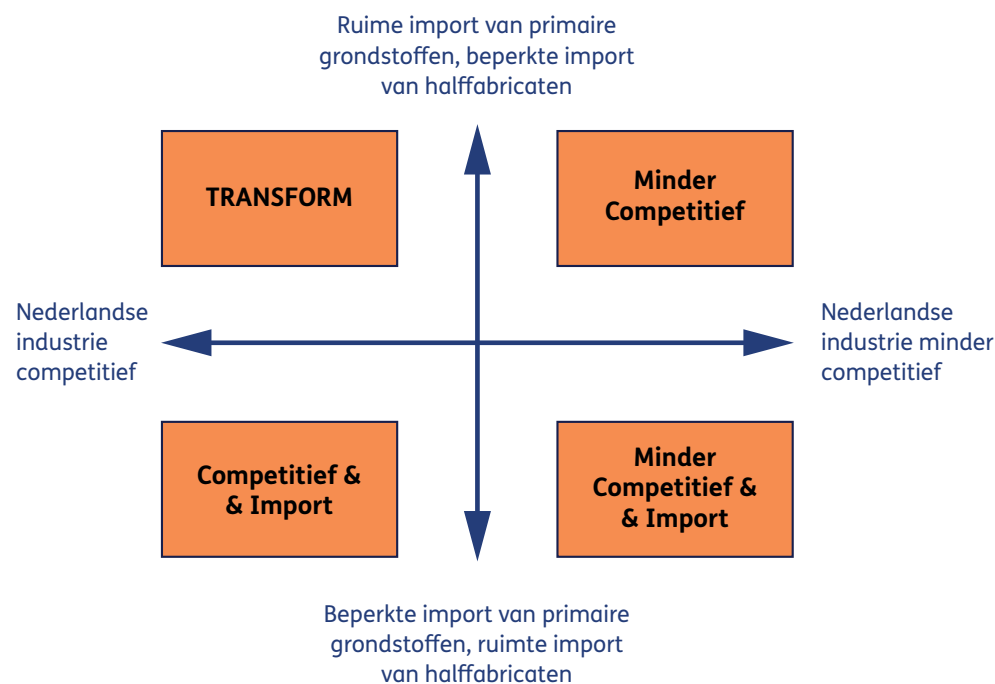
- a Voor 2030 is rekening gehouden met streefwaarden per sector, in de jaren daarna geldt alleen het integrale doel  
b CO<sub>2</sub> en overige broeikasgassen, alsmede emissies van landgebruik  
c Maximum dat kan worden ingezet. Het model kan uitkomen op lagere waarden.  
d Door gedragsverandering bij consumenten is er in TRANSFORM minder biogeen afval dan in ADAPT  
e Huidige Borssele kerncentrale (0,5 GW in 2030 en 2040), nieuwe grootschalige kerncentrales (3 GW in 2040 en 2050), small modular reactoren (0,45 GW in 2040 en 2 GW in 2050) en geavanceerde reactoren (0,2 GW in 2050)

gevolgen, meer gebruik gemaakt van openbaar vervoer en de fiets – en de vraag naar industriële en agrarische producten verandert, bijvoorbeeld minder vraag naar vlees. In dit toekomstbeeld investeren bedrijven in aanpassing en vernieuwing van productieprocessen op basis van hernieuwbare energie en duurzame en gerecyclede grondstoffen. De CO<sub>2</sub>-opslag wordt beperkt tot wat nodig is om moeilijk te reduceren broeikasgassen te compenseren met negatieve emissies (vastleggen van niet-fossiele CO<sub>2</sub>). Daarnaast worden in TRANSFORM de brandstoffen voor internationale lucht- en scheepvaart volledig verduurzaamd zodat geen broeikasgasemissies kunnen ontstaan.

Voor beide scenario's is met behulp van het energiesysteemmodel OPERA een energiesysteem voor Nederland berekend voor de periode 2030-2050 met stappen van vijf jaar. Bijlage 1 bevat een beknopte beschrijving van het OPERA-model. Rekening houdend met de verschillen tussen beide

toekomstbeelden zijn verschillende aannames gehanteerd met betrekking tot doelstellingen, vraagontwikkeling en potentiëlen voor energietechnologie. Tabel 1 geeft hiervan een samenvatting. Voor beide scenario's is verondersteld dat de economische groei (BBP groei van 1,5% per jaar) en bevolkingsgroei gelijk is. Ook de technologiekosten zijn voor beide scenario's gelijk, waarbij de kosten voor nieuwe technologieën zullen dalen als gevolg van innovatie en implementatie.

Het ADAPT-scenario veronderstelt dat de Nederlandse energie-intensieve industrie een sterke concurrentiepositie behoudt. Voor het TRANSFORM-scenario ligt dat anders en daarom zijn drie varianten verkend met een andere ontwikkeling van de energie-intensieve industrie ten aanzien van de internationale concurrentiepositie<sup>3</sup>. Het gaat hierbij om vier typen industrie: raffinaderijen, productie van organische chemicaliën (olefinen, zoals ethyleen, propeen, etc. en aromaten), staalproductie en kunstmestproductie<sup>4</sup>. Deze industrieën kunnen te maken krijgen met twee



Figuur 1 TRANSFORM-scenario en industrievarianten

<sup>3</sup> Onzekerheden ten aanzien van beschikbaarheid van technologie, materialen en menskracht, van geopolitieke ontwikkelingen en van de steun van de bevolking, etc. zijn niet onderzocht. Ook lagen gevolgen van een eventuele krimp in de energie-intensieve industrie buiten de scope van dit onderzoek.

<sup>4</sup> Bij het opstellen van de industrievarianten zijn vertegenwoordigers van de vier industrieën geraadpleegd.

vormen van internationale concurrentie: concurrentie bij de afzet van producten die zij maken of concurrentie bij productie van (energie-intensieve) halffabricaten. Voor het TRANSFORM-scenario geldt de veronderstelling dat de Nederlandse energie-intensieve industrie internationaal goed kan concurreren en de productie plaatsvindt op basis van geïmporteerde primaire grondstoffen. In de variant Minder Competitief (zie Figuur 1) ondervindt de industrie veel internationale concurrentie hetgeen leidt tot een productievermindering, maar worden de producten nog steeds gemaakt uit primaire grondstoffen. In de variant Competitief & Import is de Nederlandse energie-intensieve industrie internationaal concurrerend, maar is het kosteneffectiever om de omzetting van primaire grondstoffen naar halffabricaten in het buitenland te laten plaatsvinden waar duurzame energie goedkoper en ruimer beschikbaar is. De variant Minder Competitief en Import is een combinatie van de twee vorige varianten: veel internationale concurrentie en import van halffabricaten in plaats van primaire grondstoffen. Hoe de industrievarianten zijn uitgewerkt voor de vier industriesectoren wordt getoond in Tabel 2.

	<b>TRANSFORM</b>	<b>Competitief &amp; Import</b>	<b>Minder Competitief</b>	<b>Minder Competitief &amp; Import</b>
Raffinaderijen	<ul style="list-style-type: none"> <li>Voorziet in 10% van de EU-vraag.</li> <li>Import van houtchips and -pellets.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Voorziet in 10% van de EU-vraag.</li> <li>50% van de hernieuwbare brandstoffen gebaseerd op de import van hernieuwbare halffabricaten (bio-tussenproducten, zoals bio-olie, bio-ethanol, en waterstof)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Voorziet in 5% van de EU-vraag.</li> <li>Import van houtchips and -pellets.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Voorziet in 5% van de EU-vraag.</li> <li>50% van de hernieuwbare brandstoffen gebaseerd op de import van hernieuwbare halffabricaten (bio-tussenproducten, zoals bio-olie, bio-ethanol, en waterstof).</li> </ul>
Organische chemicaliën productie (high value chemicals, HVC's)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Productie is 40% lager dan ADAPT (en 20% lager dan in 2019).</li> <li>Import van houtchips en -pellets.</li> <li>Beschikbaarheid plastic afval blijft beperkt tot Nederlandse aanbod.</li> <li>Circulariteit zorgt voor veranderingen in productontwerp, met als resultaat hogere mechanische plastic recycling.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Productie is 40% lager dan ADAPT (en 20% lager dan in 2019).</li> <li>Import van bio/hernieuwbare nafta, bio-olie, ethanol, bio/hernieuwbare methanol, plastic afval uit de EU en waterstof.</li> <li>Circulariteit zorgt voor veranderingen in productontwerp, met als resultaat een hogere mechanische plastic recycling.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verlaging productie tot 50% t.o.v. 2019.</li> <li>Beschikbaarheid plastic afval blijft beperkt tot Nederlandse aanbod.</li> <li>Samenstelling plastic afval vergelijkbaar met de huidige samenstelling.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verlaging productie tot 50% t.o.v. 2019.</li> <li>Import van bio/hernieuwbare nafta, bio-olie, ethanol, bio/hernieuwbare methanol, plastic afval uit de EU en waterstof.</li> <li>Circulariteit zorgt voor veranderingen in productontwerp, met als resultaat een hogere mechanische plastic recycling.</li> </ul>
Staalproductie	<ul style="list-style-type: none"> <li>Staalproductie daalt geleidelijk tot 75% van ADAPT.</li> <li>In 2030/35 DRI op aardgas, geen CCS; vanaf 2040 DRI op waterstof.</li> <li>Staalproductie op basis van electric arc furnace (EAF).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Productievolume gelijk aan TRANSFORM.</li> <li>IJzerproductie op basis van DRI met waterstof.</li> <li>IJzerproductie wordt beperkt, in plaats daarvan import van hot bricket iron (HBI).</li> <li>Verhoging schrootgehalte tot 30% zonder de kwaliteit van het staal te verminderen.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Productievolume 50% ten opzichte van TRANSFORM.</li> <li>In 2030/35 direct reduced iron (DRI) met aardgas, geen CCS; vanaf 2040 DRI op waterstof.</li> <li>Staalproductie op basis van electric arc furnace (EAF).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Productievolume 50% ten opzichte van TRANSFORM.</li> <li>Geen ijzerproductie, in plaats daarvan import van hot bricket iron (HBI).</li> <li>Verhoging schrootgehalte tot 30% zonder de kwaliteit van het staal te verminderen.</li> </ul>
Kunstmestproductie	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kunstmestproductie is 42% van ADAPT</li> <li>Twee Nederlandse kunstmestfabrieken in bedrijf met eigen ammoniak productie en beperkte import van groene ammoniak (15%).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>De twee Nederlandse kunstmestfabrieken blijven in bedrijf. De ene kunstmestfabriek schakelt volledig over op import van groene ammoniak, terwijl de andere kunstmestfabriek ammoniak produceert uit geïmporteerde waterstof.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eén van de twee fabrieken sluit.</li> <li>Beperkte import van groene ammoniak (15%).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eén van de twee fabrieken sluit.</li> <li>De kunstmestproductie is gebaseerd op geïmporteerde ammoniak.</li> </ul>

Tabel 2 Scenarioveronderstellingen voor TRANSFORM en de industrievarianten

# Scenario-uitkomsten

Voor de scenario's en de industrievarianten is met behulp van het OPERA-model een verkenning gemaakt van het toekomstige Nederlandse energiesysteem. In onderstaande paragrafen worden de uitkomsten daarvan toegelicht. Uitkomsten worden getoont voor 2030, 2040 en 2050, waarbij soms een vergelijking wordt gemaakt met 2022<sup>5</sup>. Bij de toelichting wordt, gebruikmakend van de uitkomsten van de industrievarianten, in het bijzonder ingegaan op de ontwikkeling van de industrie en de impact die dat heeft op het toekomstige energiesysteem van Nederland.

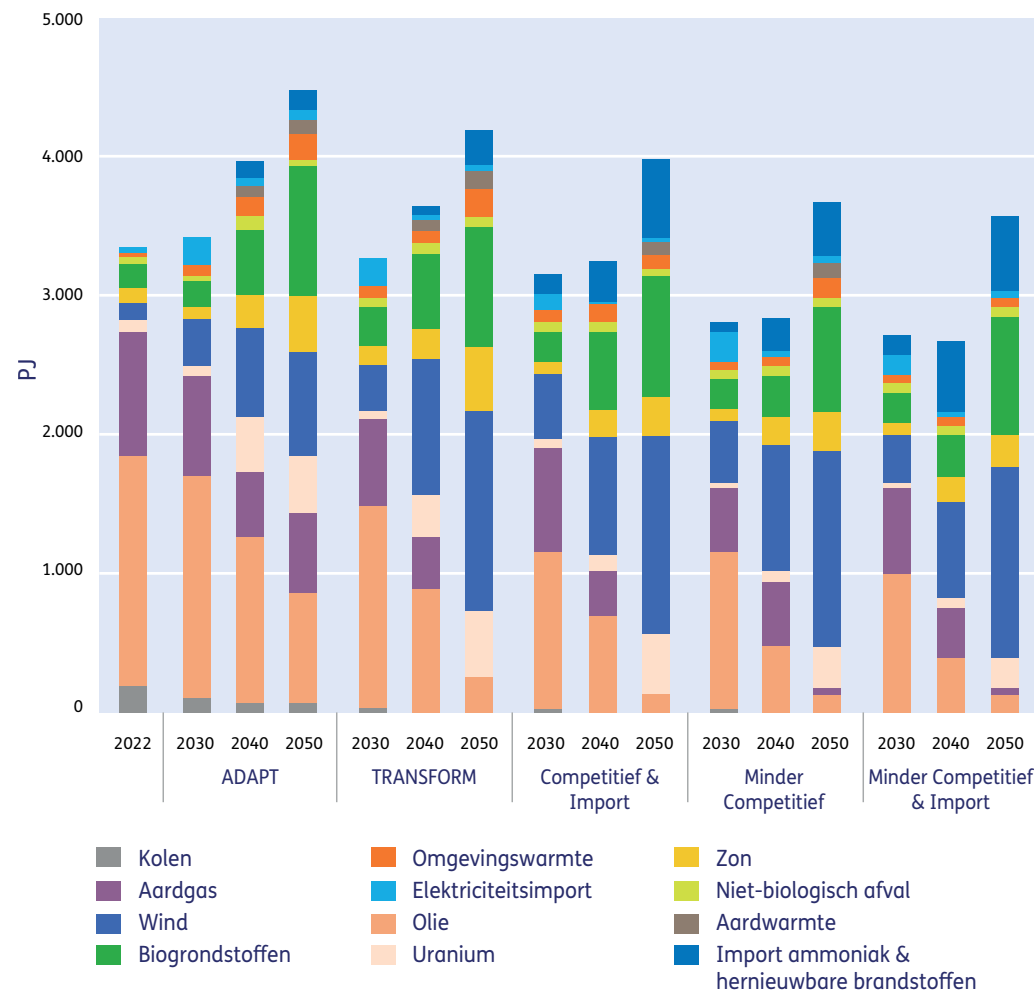
## Energieaanbod en -verbruik

Vervanging van fossiele elektriciteitscentrales door elektriciteit uit wind en zon, elektrificatie van de mobiliteit, toepassing van warmtepompen en energiebesparingsmaatregelen zorgen voor een daling van het energiegebruik. Het energiegebruik neemt daarentegen toe als gevolg van een groeiende vraag naar energie, mobiliteit en producten. Figuur 2 laat daarvan het effect zien op het primaire energieaanbod weergegeven

inclusief grondstofgebruik en brandstoffen voor internationale lucht- en scheepvaart (bunkerbrandstoffen).

Voor ADAPT is het primaire aanbod in 2030 hoger dan in 2022, maar in TRANSFORM en de industrievarianten lager. Door verandering van consumentengedrag is de toename na 2030 voor TRANSFORM en de industrievarianten minder groot dan voor ADAPT. Bovendien is de energievraag bij de twee minder competitieve varianten lager door krimp bij de industrie. De stijging van het primaire energieverbruik is ook het gevolg van nieuwe technologieën die leiden tot extra energieverbruik (bijv. CO<sub>2</sub>-afvangtechnologie) of extra conversieverliezen (bijv. elektrolyzers, kerncentrales).

Het fossiele aandeel in het energieaanbod (kolen, olie en aardgas) is in 2022 84%. Dit aandeel daalt in ADAPT naar 69% in 2030 en 29% in 2050. In TRANSFORM vindt, met een fossiel aandeel van 66% in 2030 en 6% in 2050, een verdere uitfasering van fossiele energie plaats, maar verdwijnt fossiel niet geheel uit de energiemix.



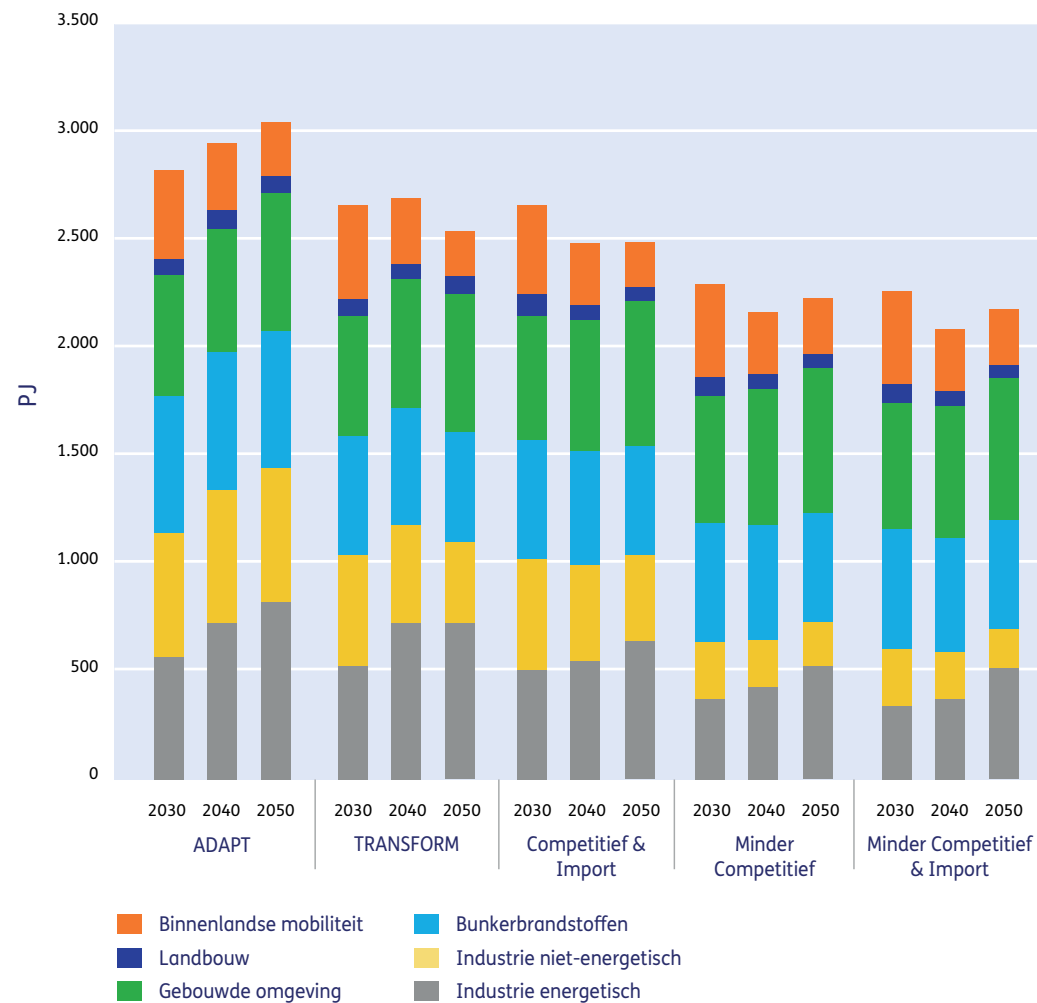
Figuur 2 Primair energieaanbod, inclusief grondstoffen en bunkerbrandstoffen

<sup>5</sup> Daar waar scenarioprojecties worden vergeleken met realisaties gebeurt dit met CBS-gegevens uit 2022

Hernieuwbare energiebronnen nemen de rol van fossiele energie over. Windenergie levert de grootste bijdrage, gevolgd door biogrondstoffen<sup>6</sup>, en zonne-energie. Andere energiebronnen zijn aardwarmte (geothermie) en omgevingswarmte die door warmtepompen wordt gebruikt. In de scenario's maakt ook uranium als energiebron voor kerncentrales deel uit van de energiemix. Naast import van olie en kolen zal aardgas ook steeds meer worden geïmporteerd. Dat geldt ook voor biogrondstoffen (in 2050 wordt daarvan ca. 75% geïmporteerd) en in de industrievarianten ook voor ammoniak, waterstof en biobrandstoffen. Door toename van de binnenlandse energieproductie (met name wind en zon) neemt per saldo de importafhankelijkheid af van iets meer dan 75% nu naar in 2050 zo'n 50% in ADAPT en 40% in TRANSFORM en de industrievarianten.

Figuur 3 toont het finaal energieverbruik voor de scenario's en industrievarianten per sector. Finaal energieverbruik omvat het verbruik bij eindverbruikers

van energiedragers zoals elektriciteit, waterstof, biogas, warmte, etc. die uit primaire energiebronnen worden geproduceerd. Het totaal finaal energieverbruik is lager dan het totale primaire energieaanbod vanwege conversie- en transportverliezen. Het energieverbruik van de industrie (energetisch en non-energetisch/ grondstoffen) heeft in 2030 een aandeel van ongeveer 40%. Dit aandeel neemt in ADAPT toe tot bijna 50% in 2050, doordat de energievraag in de industrie relatief sterker groeit dan in andere sectoren. Ook in TRANSFORM stijgt het aandeel, maar minder sterk. De industrievarianten laten zien dat, bij krimpende industriële productie als gevolg van internationale concurrentie, het aandeel afneemt tot iets meer dan 30%. Hoewel internationale concurrentie ook invloed heeft op waar bunkerbrandstoffen worden geproduceerd, neemt het aandeel in de energievraag niet af. Dat aandeel daalt pas als zeeschepen een deel van hun brandstoffen niet meer in Nederland bunkeren<sup>7</sup>.



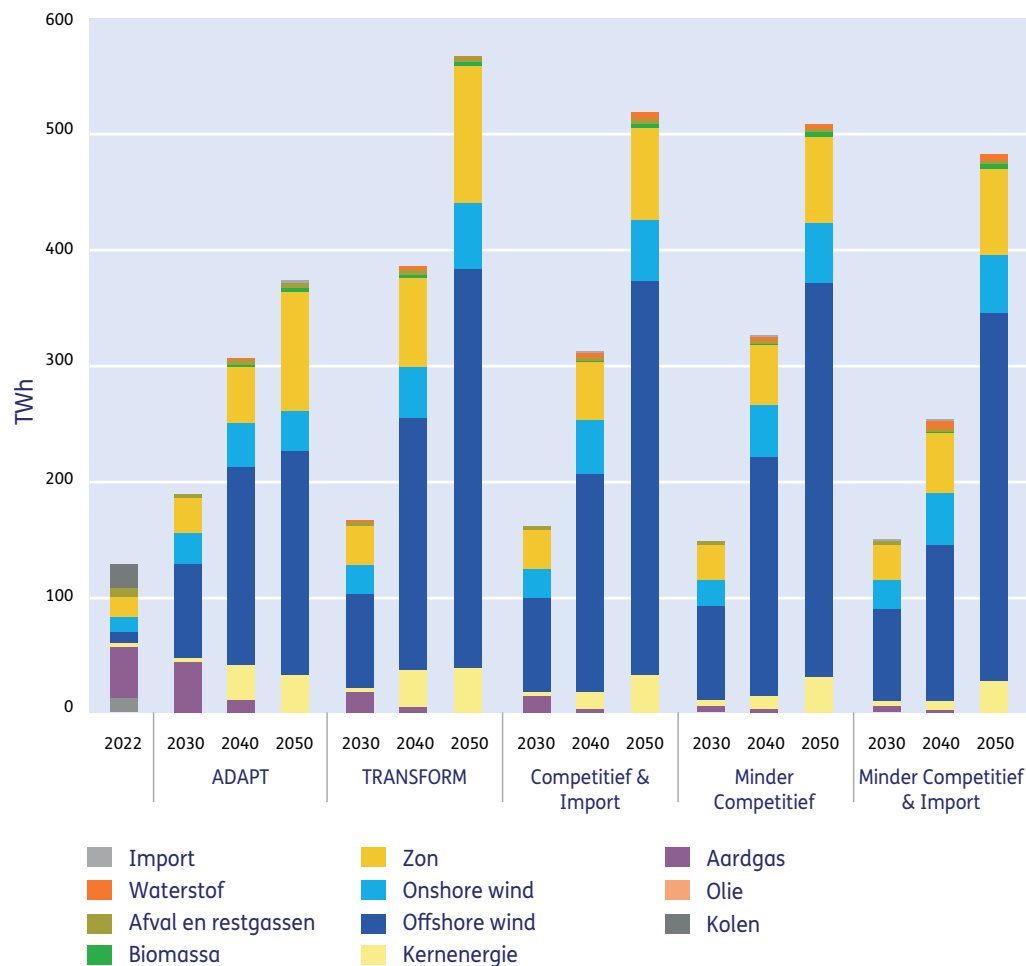
Figuur 3 Finaal energieverbruik per sector

<sup>6</sup> Ook wel aangeduid als biomassa. Biogrondstoffen worden vooral toegepast als grondstof voor productie van chemicaliën en plastics en voor biobrandstoffen

<sup>7</sup> Veel zeeschepen bunkeren hun brandstoffen nu nog in Nederland voor zowel de heen- als terugreis.

Voor 2030 is bij de modelberekeningen rekening gehouden met de doelstelling voor finaal energieverbruik uit de Energy Efficiency Directive (EED). Daarbij mag het finale energieverbruik van de gebouwde omgeving, binnenlandse mobiliteit, landbouw, industrie (exclusief raffinagesector) en luchtvaart niet meer dan 1609 PJ bedragen. Hierbij wordt omgevingswarmte niet meegeteld. Voor 2030 leidt het finale energiebesparingsdoel dan tot broeikasemissies die lager liggen dan de 55%-reductiedoelstelling. In de jaren na 2030 is deze energiebesparingsdoelstelling niet opgelegd en geldt alleen de reductiedoelstelling voor broeikasgas-emissies. Omdat voor het reduceren van deze emissies in de eindgebruikerssectoren ook energiebesparende maatregelen worden ingezet stijgt het finale energiegebruik maar beperkt (tot maximaal 8% boven 2030-doel). Sommige chemicaliën, zoals ammoniak en methanol worden ook als brandstof ingezet. Als de energiegebruik en conversieverliezen voor de productie hiervan niet wordt meegeteld (zoals bij de andere brandstoffen) stijgt het finale energieverbruik minder sterk. Bij de industrievarianten met een krimpende industrie komt het finaal energieverbruik zelfs onder het 2030-doel uit.

Voor 2030 geldt ook een indicatief EED-doel voor primaire energieverbruik van maximaal 1935 PJ. In alle scenario's en ook in de industrievarianten ligt het primaire energieverbruik in alle jaren ruim boven dit doel (tot 28% hoger). Hoewel conversieverliezen in de elektriciteitsproductie dalen (behalve kernenergie), nemen de conversieverliezen bij andere energiedragers toe, zoals bij waterstofproductie, productie van biobrandstoffen en groen gas en ook zijn er meer transportverliezen bij warmtewetten. Ook toepassing van CO<sub>2</sub>-afvang zorgt voor extra energieverbruik. Het primair energieverbruik daalt door import van energiedragers, maar dan is feitelijk sprake van verplaatsing van primair energieverbruik naar het buitenland. In de herziene Renewable Energy Directive (REDIII) is een bindende doelstelling afgesproken om het aandeel hernieuwbare energie in het totale Europese bruto eindverbruik te verhogen naar ten minste 42,5% in 2030, met ambitie om te streven naar 45%. De Nederlandse bijdrage aan deze doelstelling is 39% hernieuwbare energie in 2030. In de ADAPT en TRANSFORM scenario's wordt met een aandeel hernieuwbare energie van 43% ruim aan dit doel voldaan.



Figuur 4 Elektriciteitsaanbod



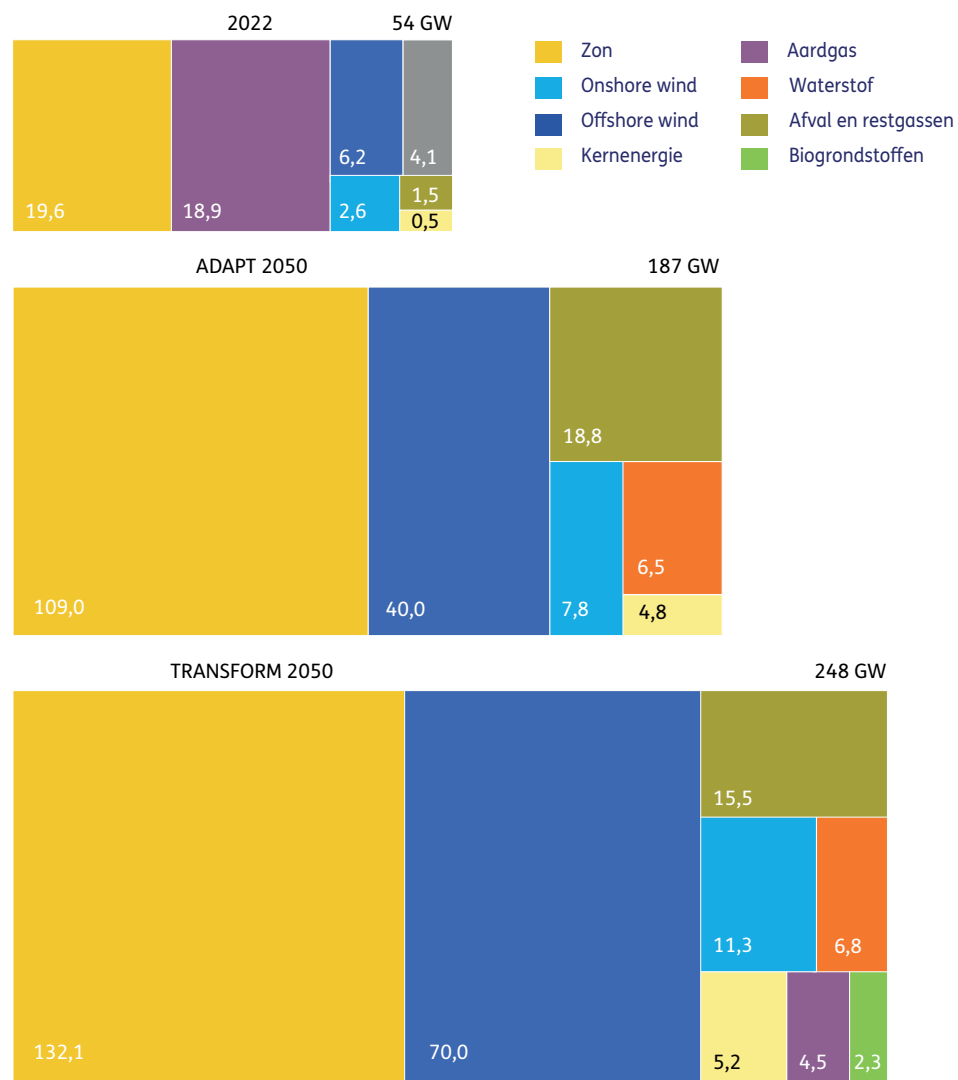
### Elektriciteit

De transitie naar een klimaatneutraal energiesysteem gaat gepaard met een sterke elektrificatie van het energieverbruik, zoals bij de warmtevoorziening en de mobiliteit. Tezamen met de stijgende energievraag door economische groei leidt dit tot een forse groei in de energievraag en -productie. Figuur 4 laat zien dat het elektriciteitsaanbod (productie en import) in ADAPT in 2050 ongeveer 3 maal groter is dan in 2022<sup>8</sup>. Ondanks dat door consumentengedrag de vraag naar energie, mobiliteit en producten in TRANSFORM lager is dan in ADAPT, is de elektriciteitsvraag fors groter door een sterkere elektrificatie en vergaande verduurzaming van brandstoffen en grondstoffen. Het elektriciteitsaanbod stijgt in TRANSFORM ten opzichte van 2022 met ruim een factor 4,5. Deze stijging is in de industrievarianten iets minder groot (toename met factor 3,7 tot 4) door een lagere elektriciteitsvraag in de industrie. In 2050 is in ADAPT en TRANSFORM ongeveer 30% van de elektriciteit bestemd voor waterstofproductie.

De verduurzaming van het energieaanbod verloopt in de elektriciteitsproductie relatief snel. In 2030 is, afhankelijk van het scenario, 75% tot 85% van de elektriciteit afkomstig uit hernieuwbare bronnen ten

opzichte van 13% tot 15% voor het gehele energiesysteem. In 2050 is ongeveer 90% van de opgewekte elektriciteit afkomstig uit wind en zon. Nieuwe kerncentrales zorgen er voor dat ook het aandeel kernenergie in de elektriciteitsproductiemix toeneemt: van 3% nu naar 7% tot 9%, afhankelijk van het scenario (zie ook tekstbox).

Het opgestelde vermogen neemt in ADAPT met een factor 3,5 toe tot 187 GW in 2050. In TRANSFORM is deze toename met een factor 4,5 nog groter, zie Figuur 5. De toename van het opgestelde vermogen is groter dan het elektriciteitsaanbod, aangezien windturbines en zonnepanelen niet alle uren van het jaar elektriciteit kunnen produceren. Inzet van flexibiliteitsopties zorgen voor een balans tussen de fluctuerende elektriciteitsvraag en het variabele elektriciteitsaanbod uit wind en zon. Tekorten en overschotten worden opgevangen door uitwisseling van elektriciteit met de omliggende landen (in TRANSFORM is sprake van een netto elektriciteitsexport van 124 TWh oftewel 22%), vraagresponse bij waterstofproductie met elektrolyzers en industriële processen, elektriciteitsopslag in batterijen en piekcentrales op basis van aardgas en waterstof (in TRANSFORM in 2050 respectievelijk 133 en 176 vollasturen).



Figuur 5 Opgesteld vermogen elektriciteitsproductie

<sup>8</sup> In 2022 is sprake van een netto-import van 14%. In ADAPT, TRANSFORM en de industrievarianten is de import vanaf 2030 nihil of zeer gering. Dan is het aanbod gelijk aan de binnenlandse productie.

# De rol van kernenergie

## Nucleair vermogen

Verondersteld is dat de huidige kerncentrale Borssele, met een vermogen van 0,5 GW, tot 2043 in bedrijf blijft. In de scenario's kunnen door het OPERA-model nieuwe kerncentrales worden ingezet (2 GW grootschalige kerncentrales vanaf 2035, 2 GW SMR's vanaf 2040, en een 0,2 GW generatie IV kerncentrale in 2050). Voor de SMR's is verondersteld dat ze worden toegepast nabij industriecusters waarbij ook warmte wordt geleverd aan de industrie in de vorm van stoom. De uitkomsten laten zien dat het kosteneffectief is deze kerncentrales in te zetten, waarbij in TRANSFORM in 2050 het volledige potentieel wordt ingezet en in ADAPT het volledige potentieel aan grootschalige kerncentrales en 80% van het SMR-potentieel. De kerncentrales voorzien in de basislast voor elektriciteit, waarbij de SMR's het grootste deel van de tijd warmte en elektriciteit leveren en in een beperkt aantal uren alleen elektriciteit.

## Industrievarianten

In de industrievarianten is het geïnstalleerde vermogen voor de SMR's kleiner dan in TRANSFORM. Dit heeft te maken met de geringere warmtevraag, waardoor de toepassing van SMR's in de industrie minder aantrekkelijk wordt. Ten opzichte van TRANSFORM loopt de elektriciteitslevering door kerncentrales in de industrievarianten iets verder terug dan elektriciteitsproductie uit wind en zon. Dit komt omdat er minder vraag naar basislast is. De capaciteit voor grootschalige kerncentrales in de industrievarianten blijft gelijk aan die in TRANSFORM. Ook het geïnstalleerd vermogen voor duurzame elektriciteitsproductie is in de industrievarianten kleiner dan in TRANSFORM. Dit geeft een duidelijke indicatie dat de omvang van de nucleaire productiecapaciteit samenhangt met de elektriciteitsvraag. Als de elektriciteitsvraag lager is, zoals bij ADAPT en de industrievarianten vergeleken met TRANSFORM, dan is de behoefte aan elektriciteitsproductiecapaciteit logischerwijs kleiner, maar dit heeft meer effect op de nucleaire dan de hernieuwbare elektriciteitsproductie.

## Geen nieuwe kerncentrales

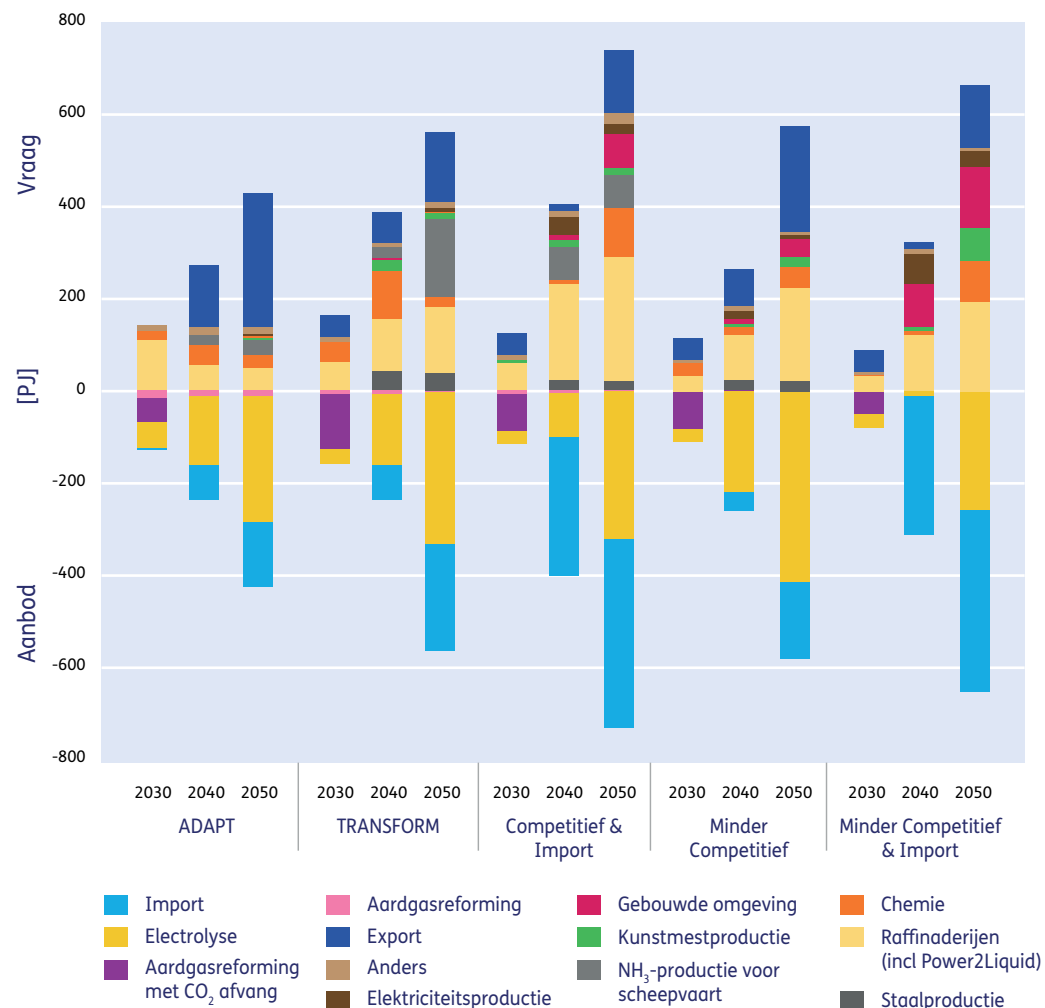
Het is voorstelbaar dat geen nieuwe kerncentrales worden gerealiseerd. Hiervoor is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. In beide scenario's verandert de productiecapaciteit voor wind- en zonne-energie niet. Zonder nieuwe kerncentrales is de elektriciteitsvraag lager vergeleken met de scenario's met kernenergie. Minder elektriciteitsaanbod leidt ook tot minder waterstofproductie. In ADAPT worden minder synthetische brandstoffen geproduceerd en meer biobrandstoffen. In TRANSFORM is de waterstofvraag lager, vooral in de chemische sector. In een energiesysteem zonder nieuwe kerncentrales vallen de totale systeemkosten in 2050 1% tot 2,5% hoger uit dan in een systeem met kernenergie. Kerncentrales zijn duurder dan windturbines en zonnepanelen, maar zonder basislastaanbod door kerncentrales is meer inzet van flexibiliteitsopties nodig met relatief hoge kosten (zoals energieopslag).

### Waterstof

Waterstof wordt momenteel vooral gebruikt voor de productie van kunstmest en chemicaliën en bij olieraffinage. Deze waterstof wordt nog voornamelijk geproduceerd uit fossiele brandstoffen of ontstaat als bijproduct in de chloorproductie; de totale geschatte productie van waterstof is 180 PJ per jaar. Figuur 6 toont uitkomsten voor waterstofaanbod en -vraag voor de scenario's en industrievarianten. Het gaat hierbij om verhandelbare waterstof, dat wil zeggen waterstof dat extern geleverd wordt en niet om waterstof dat binnen industriële productieprocessen geproduceerd en verbruikt wordt (zoals bij ammoniakproductie uit aardgas in kunstmestfabrieken). In ADAPT en TRANSFORM komt de waterstofvraag vrijwel geheel voor rekening van de energie-intensieve industrie (raffinage – inclusief bio- en synthetische brandstoffen – en chemicaliën-, staal- en kunstmestproductie) en ammoniak als scheepsvaart-brandstof. Een kleine hoeveelheid waterstof wordt ingezet als brandstof voor verwarming in de gebouwde omgeving en voor elektriciteitsproductie. Waterstof wordt niet gebruikt als brandstof voor vrachtverkeer.

In ADAPT groeit de waterstofvraag naar ruim 130 PJ<sup>9</sup> in 2050. In dit scenario is de binnenlandse vraag bescheiden, maar de productie concurrerend met die in de ons omringende landen hetgeen leidt tot een netto export dat in 2050 groeit naar 150 PJ. In TRANSFORM groeit de vraag in 2050 naar ongeveer 400 PJ en wordt de binnenlandse productie – beperkt door de beschikbaarheid van elektriciteit – aangevuld met een netto-import die in 2050 75 PJ bedraagt.

In 2030 wordt in ADAPT en TRANSFORM een deel van de waterstof nog geproduceerd uit aardgas (met CO<sub>2</sub>-afvang en -opslag, CCS). Vanaf 2040 wordt alle waterstof geproduceerd met elektrolyzers. Elektrolyzers hebben niet alleen een functie in het produceren van waterstof, maar leveren ook een flexibiliteitsdienst bij het balanceren van het elektriciteitssysteem. De waterstofproductie vindt voornamelijk plaats op momenten van veel aanbod van wind- en zonne-energie. Een groot deel van de electrolyser staat opgesteld op platforms op de Noordzee in de nabijheid van de offshore windparken. Het transport van waterstof is namelijk goedkoper dan transport van elektriciteit.



Figuur 6 Waterstofvraag en -aanbod (verhandelbare waterstof)

9 1 PJ is gelijk aan 8.333 ton waterstof

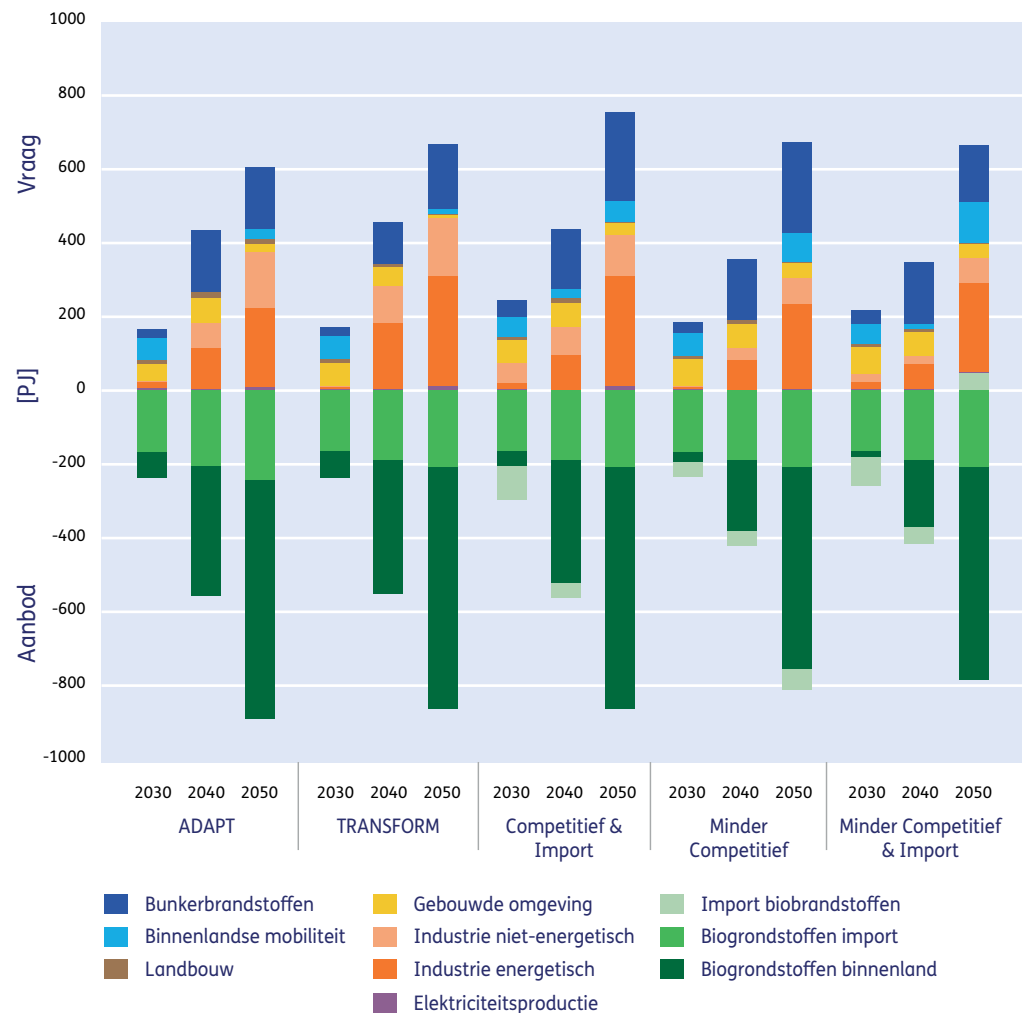
De waterstof wordt getransporteerd naar waterstofopslag in lege zoutcavernes op land. In ADAPT en TRANSFORM is de elektrolysercapaciteit in 2030 2 GW. In 2050 zal deze capaciteit zijn toegenomen tot 15 GW voor ADAPT en 21 GW voor TRANSFORM.

In de industrievarianten daalt de waterstofvraag bij staal- en ammoniakproductie omdat de productie krimpt of dat half-fabricaten worden geïmporteerd (zoals ammoniak voor de kunstmestproductie). Bij de Competitief & Import-variant neemt de waterstofvraag voor synthetische brandstofproductie toe, maar in de andere twee varianten worden juist synthetische brandstoffen geïmporteerd en daalt de waterstofvraag. Een daling van de waterstofvraag in deze industrie sectoren leidt niet vanzelf tot een algehele daling van de vraag naar waterstof. In de industrievarianten met import is verondersteld dat de buitenlandse waterstofvraag iets goedkoper is dan de Nederlandse productie, waardoor de netto-import verder toeneemt naar zo'n 270 PJ. In variant Minder Competitief & Import resulteert dit in 2050 in een vergelijkbare vraag als in TRANSFORM en in Competitief & Import zelfs in een toename van de vraag.

De waterstofvraag verschuift daarbij naar andere delen van de chemie en naar de gebouwde omgeving (waterstof als brandstof voor verwarming). Ook wordt in deze scenario-variant de ammoniakproductie voor scheepsvaartbrandstof voor een groot deel vervangen door ammoniakimport.

### Biograndstoffen

De herkomst en het gebruik van biograndstoffen wordt aan de hand van Figuur 7 toegelicht. Het binnenlandse aanbod bestaat uit verschillende biogene reststromen, waaronder mest en afvalhout. Maar deze hoeveelheid volstaat niet om in de totale vraag naar biograndstoffen te voorzien. Vandaar dat ook duurzame biograndstoffen worden geïmporteerd, voornamelijk in de vorm van houtchips en -pellets. Het biograndstoffengebruik is in ADAPT en TRANSFORM in 2050 ruim 5 keer groter dan nu. De biograndstoffen worden gebruikt in de industrie, zowel energetisch als niet-energetisch (grondstof) en voor de productie van biobrandstoffen. In de gebouwde omgeving en landbouw worden biograndstoffen gebruikt in de vorm van groen gas en biogas. Vergeleken met TRANSFORM verandert in de industrievarianten het aanbod van biograndstoffen niet substantieel. In de



Figuur 7 Vraag en aanbod biograndstoffen (vraag is lager dan aanbod in verband met conversieverliezen)

importvarianten worden biobrandstoffen geïmporteerd en in Minder Competitief om de reductie van de binnenlandse biobrandstofproductie op te vangen. In de varianten waarbij de industrie krimpt (Minder Competitief en Minder Competitief & Import) wordt biograndstoffen die niet gebruikt worden voor productie van chemicaliën ingezet voor productie van biobrandstoffen en energetische toepassingen in de industrie. Ook wordt hiervan groen gas gemaakt voor de gebouwde omgeving.

### Koolstof

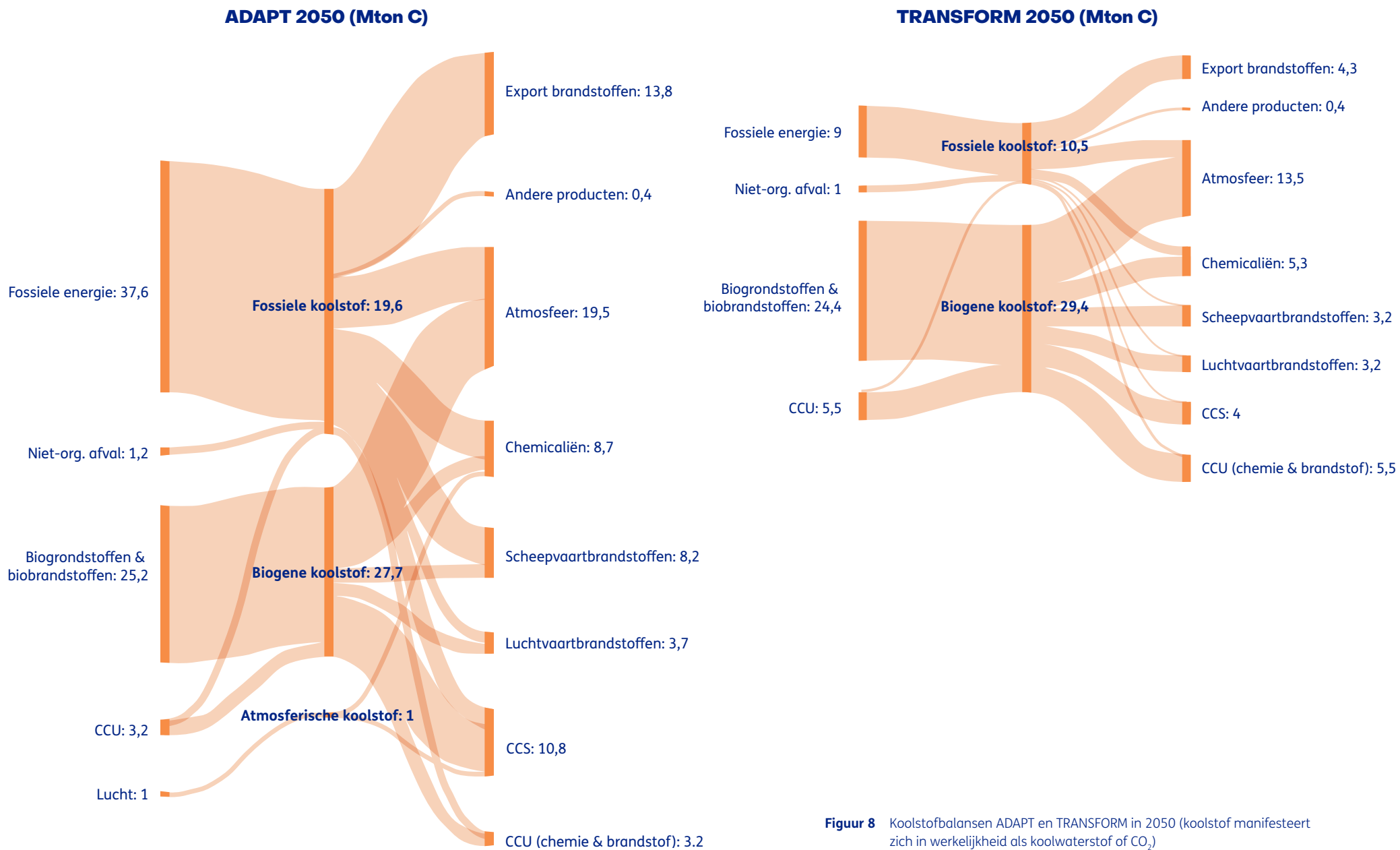
De energietransitie heeft reductie van broeikasgasemissies tot doel, met name CO<sub>2</sub>. Daarom wordt ook wel gesproken over decarbonisatie. Maar dat is niet helemaal juist. Het gaat enkel om het vermijden van fossiele CO<sub>2</sub>-emissies. In een klimaatneutraal energiesysteem blijft koolstof een rol spelen bij productie van duurzame brandstoffen en grondstoffen. Er moet een recarbonisatie plaatsvinden. Figuur 8 illustreert dit aan de hand van koolstofbalansen voor ADAPT en TRANSFORM in 2050. Terwijl in ADAPT de energievraag, vergeleken met nu, toeneemt, is de hoeveelheid koolstof in het energiesysteem in 2050 vergelijkbaar (de koolstofintensiteit neemt wel af).

In TRANSFORM daalt de hoeveelheid koolstof evenwel met ongeveer 40%. Dit verschil wordt vooral veroorzaakt door een groter aandeel fossiele energie in ADAPT in vergelijking tot TRANSFORM (linkerzijde van het diagram). Koolstof uit biograndstoffen is ongeveer vergelijkbaar. Door minder ambitieuze doelstellingen voor verduurzaming van chemicaliën en bunkerbrandstoffen is het aandeel fossiele koolstof in deze vraagsectoren in ADAPT groter dan in TRANSFORM (rechterzijde van het diagram). Een deel van de fossiele koolstof wordt als CO<sub>2</sub> afgevangen en opgeslagen (CCS) in lege gasvelden onder de Noordzee. In beide scenario's wordt ook CO<sub>2</sub> uit bioprocessen afgevangen. Omdat bij deze processen CO<sub>2</sub> in relatief hoge concentratie vrijkomt, zijn de kosten voor afvang (waaronder energiekosten) lager dan CO<sub>2</sub>-afvang uit verbrandingsgassen van installaties die nog fossiele brandstoffen gebruiken. De fossiele CO<sub>2</sub> die in de atmosfeer verdwijnt wordt geneutraliseerd door biogene CO<sub>2</sub> die wordt afgevangen en opgeslagen (ook wel negatieve emissies genoemd). Biogene CO<sub>2</sub>-emissies die in de atmosfeer verdwijnen – ook bij gebruik van biobrandstoffen in lucht- en scheepvaart – zijn al neutraal,

aangezien deze CO<sub>2</sub> uit de lucht door biomassa is vastgelegd. Een deel van de koolstof wordt ook hergebruikt (CCU). Het grootste deel voor synthetische brandstoffen voor lucht- en scheepvaart, maar ook voor productie van chemicaliën. Hoewel de olieraffinage sterk is gereduceerd is die in 2050 nog niet geheel verdwenen. De olieraffinage voorziet in oliebrandstoffen voor de export, brandstoffen voor lucht- en scheepvaart (in ADAPT) en koolwaterstoffen voor productie van chemicaliën.

In de Competitief & Import-variant is de totale hoeveelheid koolstof vergelijkbaar met die in TRANSFORM. In de twee andere varianten daalt de hoeveelheid koolstof tot, vergeleken met nu, iets meer dan 50%. In deze varianten daalt, vergeleken met TRANSFORM, zowel de hoeveelheid fossiele als biogene koolstof. In alle drie varianten worden synthetische brandstoffen geïmporteerd. In de importvarianten is dat het gevolg van de aannames over import. In variant Minder Competitief, waarbij geen expliciete veronderstellingen zijn gemaakt voor import, is dat nodig om in de vraag naar duurzame brandstoffen en chemicaliën te voorzien omdat door de krimpende industrie minder in Nederland wordt geproduceerd.

Synthetische brandstoffen worden geproduceerd met waterstof en afgevangen CO<sub>2</sub>. Bij de in Nederland geproduceerde synthetische brandstoffen is het aandeel biogene koolstof meer dan 97%. Voor geïmporteerde koolstof is dat echter niet bekend (vandaar de categorie 'onbekende koolstof'). Bij de productie van chemicaliën wordt ook koolstof uit gerecyclede plastics gebruikt. In TRANSFORM zijn dat alleen de gerecyclede plastics uit Nederland. In de importvarianten wordt ook import van gerecyclede plastics verondersteld. In de varianten Minder Competitief en Minder Competitief & Import daalt het koolstofgebruik voor chemicaliënproductie als gevolg van een krimpende industrie, maar blijft de vraag naar brandstoffen voor lucht- en scheepvaart gelijk.



**Figuur 8** Koolstofbalansen ADAPT en TRANSFORM in 2050 (koolstof manifesteert zich in werkelijkheid als koolwaterstof of CO<sub>2</sub>)



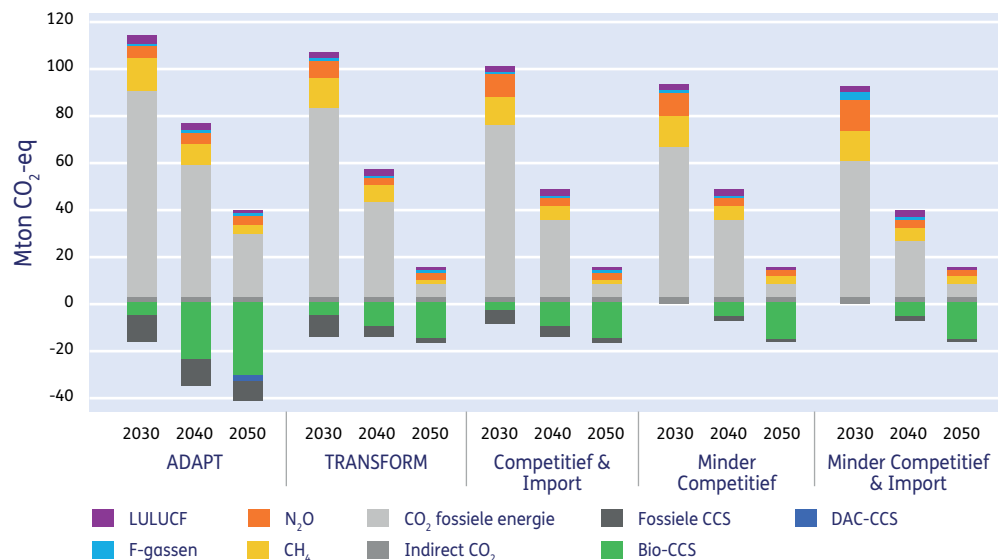
### Broeikasgasemissies

Het totale volume aan broeikasgasemissies van het energiesysteem dat voor de scenario's en industrievarianten is bepaald voldoet aan de reductiedoelstelling. Dat is het saldo van broeikasgasemissies en koolstofvastlegging (negatieve CO<sub>2</sub> emissies). Figuur 9 laat dit zien.

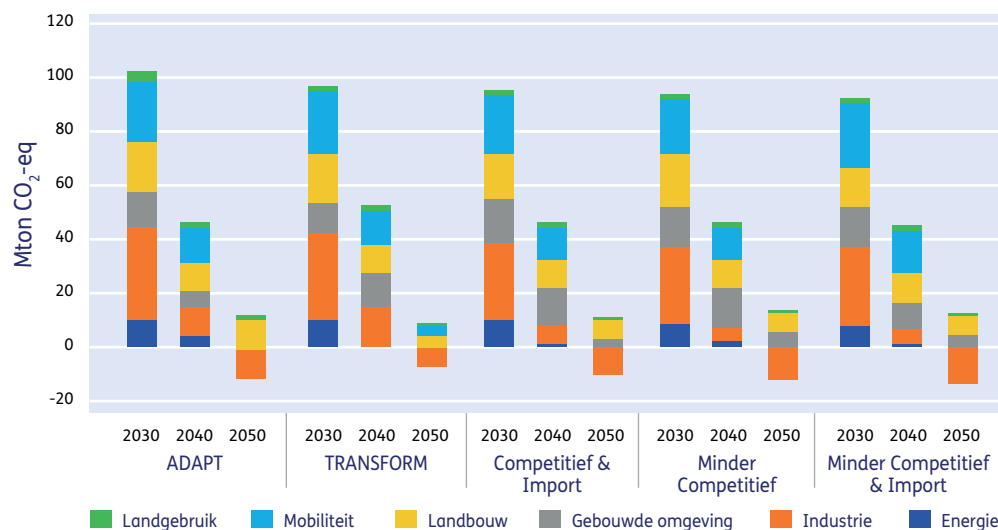
De emissies bestaan uit CO<sub>2</sub>-emissies (door gebruik van fossiele brandstoffen en indirecte emissies van de industrie), emissies overige broeikasgassen (N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> en F-gassen) en emissies die vrijkomen bij landgebruik (LULUCF: land use, land use change and forestry). Negatieve emissies ontstaan door vastlegging van CO<sub>2</sub> uit biogrondstoffen en, in geval van ADAPT in 2050, ook uit de lucht. Naast de negatieve emissies laat Figuur 9 zien hoeveel fossiele CO<sub>2</sub> er wordt opgeslagen. In zowel ADAPT als TRANSFORM wordt de volledige opslagcapaciteit benut. In 2030 liggen de netto broeikasemissies onder de emissiedoelstelling, aangezien de doelstelling voor finaal energiegebruik dan bepalend is. Daarnaast is opvallend dat in beide scenario's vanaf 2040 meer biogene CO<sub>2</sub> wordt opgeslagen dan fossiele CO<sub>2</sub>. De CO<sub>2</sub> die bij bioprocessen voor productie van biobrandstoffen en -chemicaliën vrijkomen kan kosteneffectiever worden afgevangen vanwege de relatief hoge CO<sub>2</sub>-concentraties (waardoor afvanginstallaties

compacter zijn met lagere energiekosten) in vergelijking met installaties voor afvang van CO<sub>2</sub> uit verbrandingsgassen van fossiele installaties. In de industrievarianten zijn de broeikasgasemissies in 2030 en 2040 lager dan in TRANSFORM. Deze uitkomst kan verklaard worden door de lagere industriële productie en/of import van half-fabricaten waardoor minder elektriciteit, waterstof en biogrondstoffen nodig zijn. Het is kosteneffectief een deel hiervan in te zetten in andere sectoren in plaats van meer fossiele brandstoffen te gebruiken die leiden tot hogere CO<sub>2</sub>-emissies.

De broeikasgasemissies worden in Figuur 10 weergegeven per sector. Omdat voor 2030 sectorale streefwaarden zijn toegepast zijn de verschillen tussen scenario's en varianten gering. De totale broeikasgasemissies liggen voor ADAPT, TRANSFORM en industrievarianten onder de doelstelling, omdat voor dat jaar het doel voor finaal energieverbruik bepalend is. In ADAPT zijn er in 2050 nog resterende broeikasgasemissies in de landbouw en bij landgebruik. In TRANSFORM en industrievarianten zijn er nog resterende emissies in de landbouw, bij landgebruik en in de mobiliteitssector. In beide scenario's en in de industrievarianten worden ze gecompenseerd door negatieve emissies bij de industrie.



Figuur 9 Broeikasgasemissies



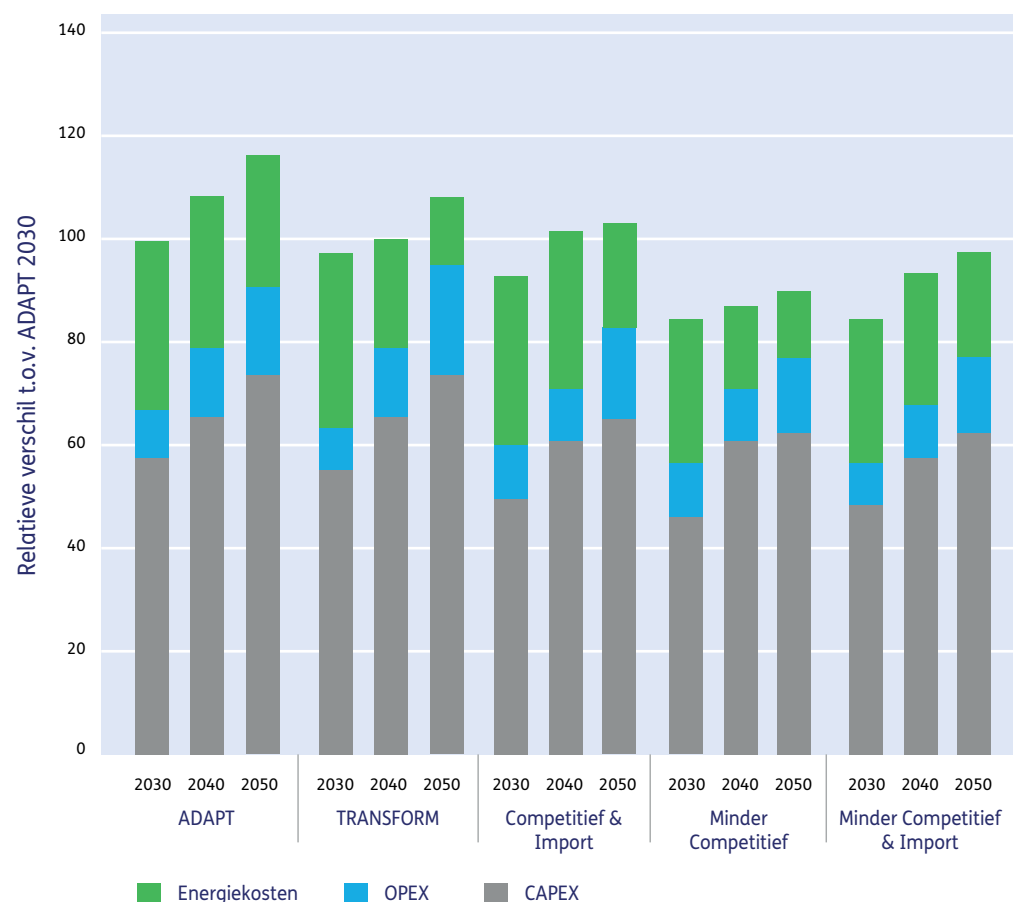
Figuur 10 Broeikasgasemissies per sector

## Systeemkosten

Het OPERA-model waarmee ADAPT, TRANSFORM en de industrievarianten zijn doorgerekend, bepaalt een energiesysteem met de laagste maatschappelijke kosten. Hiervoor berekent het model de jaarlijkse totale systeemkosten. De totale systeemkosten zijn de som van de jaarlijkse kapitaalkosten, de jaarlijkse exploitatie- en onderhoudskosten, kosten voor de energie-infrastructuur en kosten voor geïmporteerde energie minus de opbrengsten uit geëxporteerde energie. Voor de kosten van innovatieve technologieën wordt daarbij rekening gehouden met leereffecten, dat wil zeggen kostendaling als gevolg van innovatie en implementatie. De door het model berekende absolute waarde van de systeemkosten heeft alleen betekenis binnen het analysekader. Daarom kunnen de systeemkosten van de scenario's en industrievarianten voor de verschillende jaren het beste relatief met elkaar worden vergeleken. Figuur 11 toont de verandering van de totale systeemkosten ten opzichte van ADAPT in 2030. Voor ADAPT komen de kosten in 2050 15% hoger uit dan in 2030. TRANSFORM vertoont tussen 2030 en 2050 een vrijwel zelfde stijging, maar de kosten zijn lager dan die van ADAPT. Dat heeft te maken met de lagere vraag naar energie, mobiliteit en producten

die voor dit scenario zijn verondersteld als gevolg van gedragsverandering bij consumenten. De totale systeemkosten voor de industrievarianten liggen aanzienlijk lager ten opzichte van ADAPT en TRANSFORM, waarbij de kostenstijging voor de variant Minder Competitief het minst groot is. In vergelijking met het TRANSFORM-scenario kan het energiesysteem in alle industrievarianten tegen lagere kosten klimaatneutraal worden door een lagere productieniveau in energie-intensieve industrie of import van halffabrikaten waardoor minder investeringen in verduurzaming nodig zijn. Maar importkosten van met name biobrandstoffen zorgen in Minder Competitief & Import tot een stijging van de systeemkosten ten opzichte van variant Minder Competitief.

Figuur 11 toont ook de verdeling van de systeemkosten over vier kostencategorieën. In alle scenario's en varianten nemen de CAPEX-kosten toe en de energiekosten af. Dit wordt vooral veroorzaakt door veranderingen bij de energieopwekking. Windturbines, zonnepanelen, maar ook kerncentrales, hebben relatief hoge CAPEX-kosten en geen of relatief lage energiekosten. Omdat in ADAPT het aandeel fossiele brandstoffen in 2050 minder daalt dan

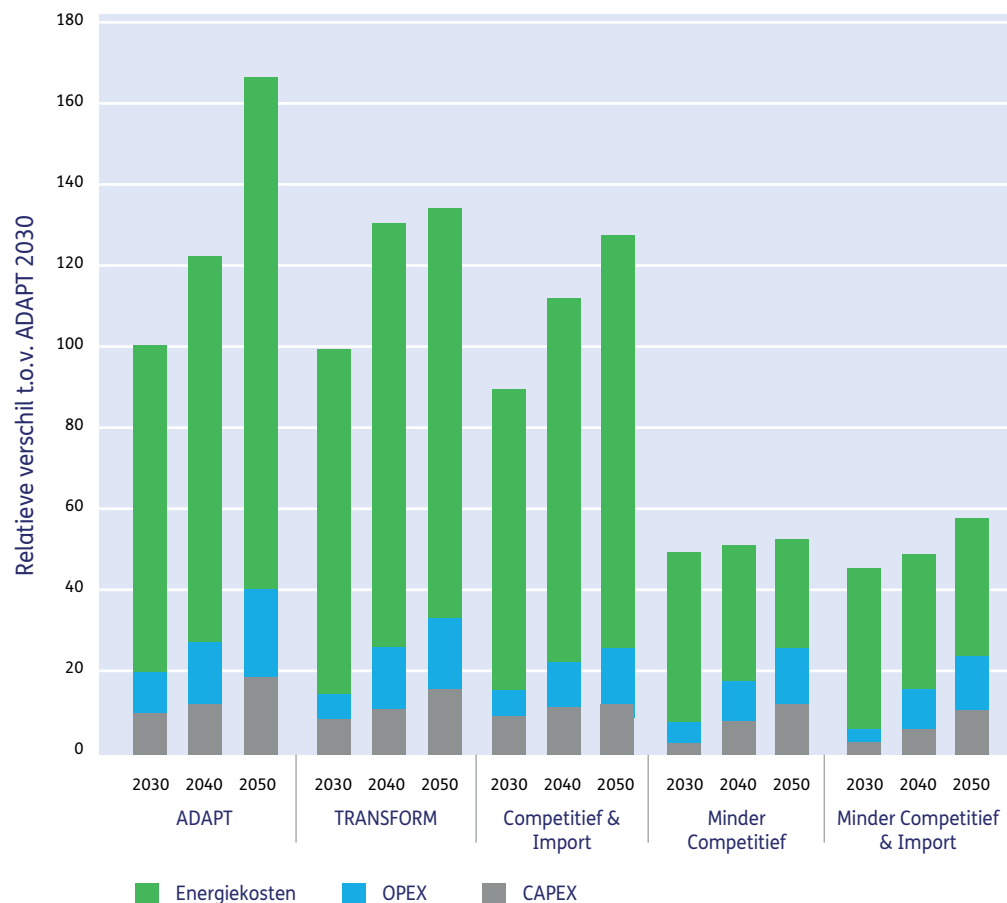


**Figuur 11** Totale systeemkosten: relatieve veranderingen ten opzichte van ADAPT 2030 (=100) en verdeling naar kostencategorie

in TRANSFORM, is dat scenario meer gevoelig voor verandering van fossiele energieprijzen. Ook bij de industrievarianten Competitief & Import en Minder Competitief & Import worden meer energiedragers geïmporteerd waardoor deze scenariovarianten gevoeliger zijn voor verandering van importprijzen. Alle scenario's en varianten zijn in ongeveer gelijke mate afhankelijk van de import van biograndstoffen waardoor verandering in de importprijs van biograndstoffen in de zelfde mate doorwerkt.

Figuur 12 geeft de ontwikkeling van de systeemkosten voor de industriële sector weer. Dit figuur laat zien dat energiekosten ook in de toekomst de grootste kostencategorie blijft voor de industrie. De energiekosten stijgen in ADAPT ruim 50% in 2050 ten opzichte van 2030, terwijl deze stijging in TRANSFORM beperkt blijft tot ca. 20%. Dat heeft te maken met de veronderstelde volumegroei in de industriële productie die in ADAPT groter is dan in TRANSFORM en met een groter aandeel fossiele brandstoffen waarvan de prijzen toenemen.

Bij de industrievarianten zijn de energiekosten bij Competitief & Import in 2050 ongeveer 40% hoger dan in 2030. In de twee minder competitieve varianten dalen de energiekosten als gevolg van de veronderstelde krimp in het productievolume. Als gevolg van de energietransitie verdubbelen de kapitaalskosten tussen 2030 en 2050 in zowel ADAPT als TRANSFORM en neemt het aandeel kapitaalskosten in de systeemkosten iets toe. Door minder productie uit primaire grondstoffen in Nederland en/of krimpende productievolume bij de energie-intensieve industrie zijn de kapitaalslasten voor de industrie in de industrievarianten lager dan in TRANSFORM.



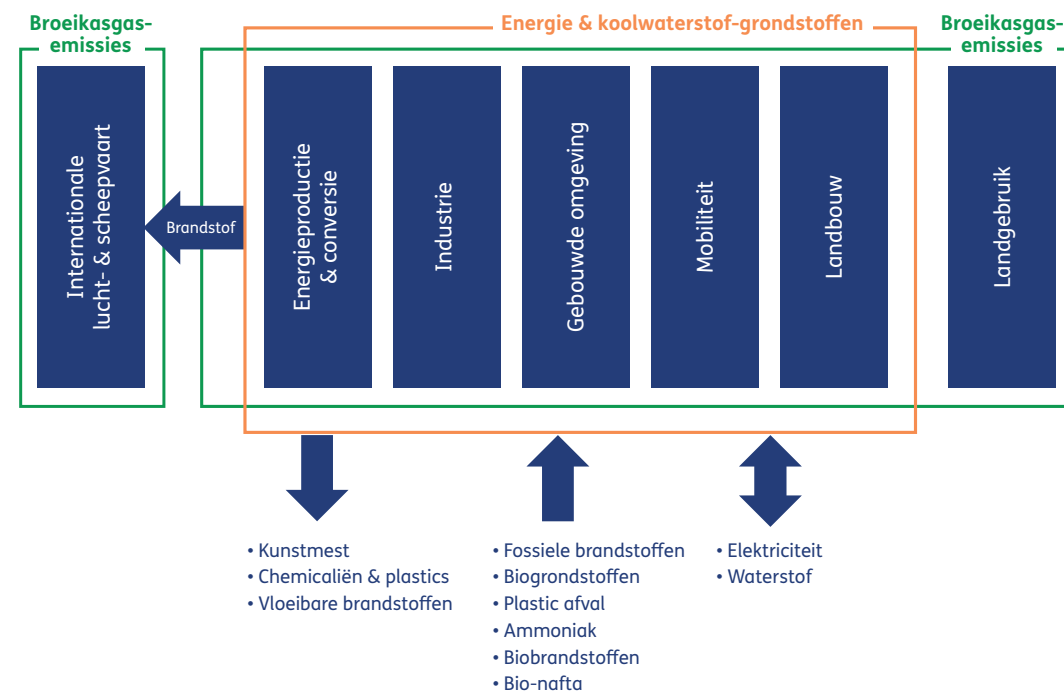
Figuur 12 Relatieve ontwikkeling kostencategorieën voor de industriële sector ten opzichte van ADAPT 2030 (=100)

# Bijlage 1: Nederlandse energiesysteem en OPERA-model

## Het Nederlandse energiesysteem

De scenariostudie verkent de toekomst van het Nederlandse energiesysteem, inclusief energieproductie en CO<sub>2</sub>-opslag op het Nederlandse deel van de Noordzee. Het beschouwde energiesysteem wordt in het schema hiernaast weergegeven. Dit energiesysteem omvat de energieproductie (bijvoorbeeld elektriciteits- en waterstofproductie), maar niet de winning van fossiele brandstoffen. Fossiele brandstoffen worden betrokken uit binnen- en buitenlandse bronnen. Binnen het energiesysteem worden verschillende eindgebruikssectoren onderscheiden: industrie, gebouwde omgeving, mobiliteit en landbouw. Het energiesysteem omvat ook de vraag naar koolwaterstofgrondstoffen voor de industrie en de vraag naar bunkerbrandstoffen voor de internationale lucht- en scheepvaart. Alle technieken voor productie, conversie, transport en opslag, en energieverbruik maken deel uit van het energiesysteem, ook industriële productie-installaties, verwarmingsinstallaties in de gebouwde omgeving en voertuigen in de mobiliteit. Ook worden energie-

besparende technologie en CO<sub>2</sub>-transportleidingen meegenomen. Nederland kan via zeehavens diverse koolwaterstofgrondstoffen importeren, zoals fossiele brandstoffen, biograndstoffen, plastic afval, biobrandstoffen en bionafta. Import en export is ook mogelijk van en naar buurlanden via pijpleidingen en interconnectoren van het elektriciteitsnetwerk. Het Nederlandse energiesysteem produceert vloeibare brandstoffen voor de internationale lucht- en scheepvaart die in Nederland worden getankt (bunkerbrandstoffen) en voor export naar andere landen binnen en buiten Europa. Ten slotte worden koolwaterstoffen afkomstig uit fossiele brandstoffen en biograndstoffen gebruikt als grondstof voor de productie van kunstmest, chemicaliën en plastics. Op basis van internationale afspraken is Nederland verantwoordelijk voor de emissies van broeikasgassen (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O en F-gassen) uit de deelsectoren binnen het energiesysteem en die uit landgebruik, maar niet voor broeikasgassen uit de internationale lucht- en scheepvaart van en naar Nederland.



### OPERA-model

De scenario's en industrievarianten zijn gekwantificeerd met behulp van het integrale energiesysteemmodel OPERA. Met het OPERA-model kunnen analyses worden uitgevoerd voor het geïntegreerde energiesysteem van Nederland zoals in de vorige paragraaf is beschreven. Het model houdt rekening met pieken en dalen in vraag en aanbod van energie en er wordt rekening gehouden met beperkingen in energietransport tussen verschillende regio's in Nederland. Bij bepalen van de benodigde investeringen wordt rekening gehouden met investeringen die gedaan zijn in voorgaande jaren.

Het OPERA-model is een optimalisatie-model: het model rekent het energiesysteem en de bijbehorende emissies uit, gegeven bepaalde doelen (bijv. reductiedoel broeikasgasemissies, energiebesparingsdoel) en randvoorwaarden (bijv. beschikbaarheid biograndstoffen), 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. beperkte CO<sub>2</sub>-opslag in

#### Invoerparameters:

- Doelstellingen (broeikasgassen, energiebesparing)
- Techno-economische data van technologieën
- Vraag (energie, mobiliteit, producten)
- Prijzen van commodities die geïmporteerd worden

#### Beperkingen:

- Potentiëlen/plafonds
- Restricties in technologiegebruik

#### Kenmerken OPERA-model:

- Omvat het volledige Nederlandse energie- en broeikasgassensysteem
- Bepaalt een energiesysteem met de laagste maatschappelijke kosten, gegeven bepaalde doelen en randvoorwaarden.
- Berekent meervoudige energiebalansen ten behoeve van fluctuaties in vraag en aanbod.
- Onderscheidt verschillende regio's en houdt rekening met transportbeperkingen tussen deze regio's
- Gaat uit van investeringen in eerdere jaren.

#### Resultaten:

##### FYSIEK

- Energieaanbod- en -vraagmix
- Technologiegebruik
- Import/export van energie
- Resterende broeikasgasemissies

##### ECONOMISCH

- Totale jaarlijkse systeemkosten
- Jaarlijkse investeringen
- CO<sub>2</sub> schaduwprijs

TRANSFORM), 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, kern-energie, CO<sub>2</sub>-opslag en biograndstoffen uit binnen- en buitenland.

Andere inputvariabelen zijn: technische en economische data van technologie-opties (er zijn meer dan 650 technologieën waaruit het model kan kiezen, waaronder ook energiebesparingsopties). 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, biograndstoffen, etc.) en de vraag naar energie (warmte, elektriciteit) van de verschillende eindverbruikerssectoren, productievolumes in de industrie (staal,

ammoniak, chemicaliën) en voertuigkilometers in de mobiliteitssector.

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).

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 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.



## Bijlage 2: Vergelijking met andere scenariostudies

Een aantal uitkomsten van deze scenario-studie kunnen worden vergeleken met uitkomsten van andere scenariostudies voor het Nederlandse energiesysteem die recentelijk gepubliceerd zijn door de Nederlandse netbeheerders (II3050)<sup>10</sup> en het Planbureau voor de Leefomgeving (TVKN 2050)<sup>11</sup>. De resultaten verschillen omdat er verschillende toekomstbeelden worden gebruikt en daardoor zijn er ook andere scenario-aannames (zie de tabel hiernaast). In TVKN 2050 worden tussen de scenario's de beschikbaarheid van energiebronnen en grondstoffen enerzijds en beleidsdoelstellingen anderzijds gevarieerd. De TVKN 2050-resultaten geven tevens een bandbreedte aan voor de geselecteerde resultaten die wordt bepaald door variërende scenario-aannames binnen een bepaalde bandbreedte. In de II3050-scenario's worden de aannames over de ontwikkeling van de industrie, het technologiegebruik, de beschikbaarheid van energie- en grondstoffenbronnen en de import gevarieerd.

II3050, 2023	TVKN 2050, 2024
<p><b>Nationaal leiderschap</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Beperkte krimp industrie</li> <li>• Nieuwe industrie synthetische moleculen op basis van gerecyclede koolstof en DAC</li> <li>• Sterk elektrificatie</li> <li>• Zeer veel hernieuwbare opwek; beperkt kernenergie</li> <li>• Meeste warmtenetten</li> </ul>	<p><b>Pragmatisch, ruim</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ruime beschikbaarheid van biograndstoffen en waterstof</li> <li>• Geen aanvullende doelen voor energiegebruik</li> <li>• Geen uitfasering fossiel</li> </ul>
<p><b>Decentrale initiatieven</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sterke krimp energie-intensieve industrie</li> <li>• Vertrek van bepaalde industrie</li> <li>• Sterke elektrificatie, maar ook waterstof in de industrie</li> <li>• Zeer veel hernieuwbare opwek</li> <li>• Energy-hubs</li> </ul>	<p><b>Pragmatisch, beperkt</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Beperkte beschikbaarheid biograndstoffen en waterstof</li> <li>• Geen aanvullende doelen voor energiegebruik</li> <li>• Geen uitfasering fossiel</li> </ul>
<p><b>Europese integratie</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Geen tot zeer geringe krimp industrie</li> <li>• Nieuwe industrie synthetische moleculen op basis van CCU en biokoolstof</li> <li>• Groen gas, ook uit import, naast elektrificatie en waterstof</li> <li>• CCS blijft en blauwe waterstof</li> <li>• Deels waterstof in gebouwde omgeving</li> <li>• Basislast kernenergie</li> </ul>	<p><b>Specifiek, ruim</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ruime beschikbaarheid van biograndstoffen en waterstof</li> <li>• Uitfasering fossiel</li> <li>• Plafond op primair energieverbruik</li> </ul>

Scenario's van twee andere studies

<sup>10</sup> Integrale Infrastructuurverkenning 2030-2050 (II3050), Netbeheer Nederland, 2023

<sup>11</sup> Trajectverkenning Klimaatneutraal 2050 - Trajecten naar een klimaatneutrale samenleving voor Nederland in 2050 (TVKN 2050), PBL, 2024

De scenariostudies verschillen ook in de manier waarop de uitkomsten tot stand komen. In de II3050-studie wordt gebruik gemaakt van een simulatiemodel. Naast aannames over de energievraag worden er aannames gedaan voor de energievraag- en aanbodmix. TNO en PBL gebruiken voor het berekenen van de scenario's het OPERA-model dat is gebaseerd op kostenoptimalisatie en waarbij de energievraag en -aanbodmix door het model worden bepaald. Daarnaast is voor de TNO-scenario's met een marktmodel de omvang van de import en export van elektriciteit en waterstof van en naar omliggende landen bepaald. PBL heeft dit ook gedaan, maar alleen voor elektriciteit.

Hoewel er dus verschillen zijn in aannames en de manier waarop het Nederlandse energiesysteem voor de verschillende scenario's is bepaald, is het toch interessant de resultaten van de verschillende studies naast elkaar te zetten. Dat is gebeurd in onderstaande tabel voor de scenario-uitkomsten voor 2050.

De tabel laat voor TRANSFORM een iets hogere elektriciteitsproductie zien dan voor de II3050- en TVKN 2050-scenario's. Dit komt doordat in TRANSFORM meer elektriciteit wordt geëxporteerd dan in de andere scenario's. ADAPT bevindt zich aan de onderkant van de bandbreedte, vergelijkbaar met twee van de II3050-scenario's. In alle scenario's komt het grootste deel van de elektriciteitsproductie uit wind- en zonne-energie. Kernenergie wordt gebruikt in twee II3050-scenario's en twee TVKN 2050-scenario's.

Vergeleken met ADAPT en TRANSFORM laten alle II3050-scenario's en één TVKN 2050-scenario een hoger waterstofverbruik zien (inclusief export). De range voor waterstofverbruik in TVKN 2050 is groter dan die van ADAPT en TRANSFORM. In twee van de II3050-scenario's is de import en export van waterstof hoger dan in ADAPT en TRANSFORM. De waterstofimport in twee TVKN 2050 scenario's is vergelijkbaar met ADAPT en TRANSFORM, maar in de TVKN 2050-scenario's wordt geen waterstof geëxporteerd.

TVKN 2050 laat een veel groter biograndstoffengebruik zien dan ADAPT en TRANSFORM (tot 50% meer). Dit komt voort uit verschillen in aannames over de biograndstoffenimport. Het gebruik van biograndstoffen is in het II3050-scenario Europese Integratie vergelijkbaar met ADAPT en TRANSFORM, maar aanzienlijk lager in de andere II3050-scenario's. In 2050 wordt in alle scenario's, behalve in één TVKN 2050-scenario, nog steeds fossiele olie gebruikt, het meest in de II3050-scenario's en in ADAPT. In deze scenario's wordt een (groot) deel van de fossiele olie als olieproduct geëxporteerd. De TVKN 2050-scenario's gaan er van uit dat er geen export van olieproducten plaatsvindt. Het CO<sub>2</sub>-opslagvolume in TVKN 2050 (20-40 Mton) is vergelijkbaar met dat in ADAPT en TRANSFORM (15-40 Mton). Ook in twee II3050-scenario's wordt uitgegaan van een vergelijkbaar CO<sub>2</sub>-opslagvolume, maar in deze scenario's wordt niet alleen CO<sub>2</sub> opgeslagen vanuit het Nederlandse energiesysteem, maar ook vanuit het buitenland.

Vanwege de veronderstelde vermindering van industriële activiteiten hebben de II3050-scenario's Decentrale initiatieven en Internationale handel kenmerken die beter vergelijkbaar zijn met de TRANSFORM-industrievarianten van deze studie. De elektriciteitsproductie in de TRANSFORM-industrievarianten is lager vergeleken met het TRANSFORM-basisscenario. De elektriciteitsproductie is in deze varianten echter nog steeds hoger dan in de II3050-scenario's Decentrale initiatieven en Internationale handel. Ook het gebruik van biograndstoffen is hoger dan in de twee II3050-scenario's. Hoewel het waterstofgebruik in de industrievarianten toeneemt, mede door hogere import, zijn de waarden lager dan die van II3050 Internationale handel.

Cijfers voor 2050	Eenheid	II3050 (2023)				TVKN 2050 (PBL, 2024)				TNO (Deze studie)		
		Decentrale initiatieven	Nationaal leiderschap	Europese integratie	Internationale handel	Specifiek, ruim	Pragmatisch, beperkt	Pragmatisch, ruim	Totale range*	ADAPT	TRANSFORM	TRANSFORM Industrie varianten
Elektriciteitsproductie	TWh	421	557	388	371	453	487	468	391-519	373	570	505-518
w.v. offshore wind	TWh	214	343	181	219	312	323	318	243-326	192	343	314-338
w.v. onshore wind	TWh	48	64	32	43	31	38	34	25-40	37	54	54
w.v. zon-PV	TWh	143	135	110	110	105	95	89	89-123	101	122	72-81
w.v. kernenergie	TWh	0	21	55	0	0	24	22	0-29	34	41	24-30
Elektriciteitsimport	TWh	54	42	61	61	6	6	6	5-8	28	17	10-17
Elektriciteitsexport	TWh	60	69	89	81	40	39	38	27-41	26	141	141-162
Waterstof	PJ	573	808	819	1092	671	467	511	324-806	416	561	654-730
w.v. import	PJ	182	202	407	803	286	0	184	0-308	141	236	161-409
w.v. export	PJ	214	243	403	427	0	0	0	0-0	280	156	130-239
Biogrondstoffen	PJ	308	228	922	307	1053	1288	831	678-1289	890	859	752-809
Aardwarmte	PJ	22	50	31	24	20	58	79	3-197	114	117	59-117
Fossiele brandstoffen	PJ	785	848	1921	1551	1	313	310	1-638	1335	248	126-248
w.v. export	PJ	725	725	1606	1430	0	0	0	0-0	702	216	125-261
CO <sub>2</sub> -opslag	Mton	3	0	35**	19**	20	40	30	20-50	40	15	15

\* Exclusief varianten met hoge capaciteiten voor wind of kernenergie

\*\* Inclusief 16 en 10 Mton CO<sub>2</sub> afkomstig uit andere landen voor respectievelijk Europese integratie en de Internationale handel



### Contact

Martin Scheepers  
Senior consultant energy transition

✉ [martin.scheepers@tno.nl](mailto:martin.scheepers@tno.nl)

#### Alle rechten voorbehouden

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

© 2024 TNO