

TNO PUBLIEKRadarweg 60
1043 NT Amsterdamwww.tno.nl

T +31 88 866 50 10

TNO-rapport**TNO P2022 10655****Effecten van verschillende reductiepaden voor
broeikasgassen op het Nederlandse
energiesysteem**

Datum	April 2022
Auteur(s)	Martin Scheepers, Gaby Janssen, Joost van Stralen
Aantal pagina's	32
Opdrachtgever	Ministerie van Economische Zaken en Klimaat
Projectnaam	KVE Systeemeffecten 55% maatregelen
Projectnummer	060.52019/01.05

Alle rechten voorbehouden.

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

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2022 TNO

TNO PUBLIEK

Samenvatting en conclusies

Door TNO is onderzoek gedaan naar de effecten voor het energiesysteem van een aparte broeikasgasreductiedoel voor de ESR-sector. Daarnaast is voor enkele varianten een analyse uitgevoerd naar een niet-lineair reductiepad voor de emissiereductie van de ESR-sector in de periode 2035-2045. Deze analyses zijn uitgevoerd voor twee scenario's die een toekomstbeeld geven van het toekomstige Nederlandse energiesysteem. In beide scenario's worden de broeikasgasreducties gerealiseerd, maar de wijze waarop dat gebeurt, verschilt. In het ADAPT-scenario blijven fossiele brandstoffen een rol spelen en wordt in ruime mate gebruik gemaakt van CO₂-opslag; in het TRANSFORM-scenario is de energievraag en de industriële productie lager dan in ADAPT, wordt minder CO₂ opgeslagen en worden duurzame grondstoffen gebruikt voor de productie van chemicaliën en kunststoffen. De analyses zijn uitgevoerd met een energiesysteemmodel dat een energiesysteem berekent waarmee de toekomstige energievraag kan worden gedekt en de broeikasgasreductiedoelen kunnen worden gerealiseerd tegen de laagste maatschappelijke kosten.

Apart reductiedoel voor de ESR-sector

Bij toepassing van een 48%-reductiedoel voor ESR-sector in 2030 (het reductiedoel voor ESR- en ETS-sectoren gezamenlijk is 55% en de reductiepaden voor beide sectoren na 2030 lineair) vindt meer BKG-reductie plaats in de ESR-sector en minder in de ETS-sector. Deze verschuiving is groter in het ADAPT-scenario (tot 17 Mton) dan in TRANSFORM. Dit is het gevolg van verschuivingen in finaal energiegebruik in de verschillende sectoren die ook in ADAPT groter zijn dan in TRANSFORM. Deze verschuivingen liggen in de orde van 100 PJ en zijn kleiner dan de verschillen in finaal energiegebruik tussen de twee scenario's. De verschuivingen vinden vooral plaats bij het binnenlands transport, de gebouwde omgeving, de industrie en de elektriciteitsproductie. Toepassing van een apart reductiedoel voor de ESR-sector leidt tot beperkte veranderingen in de totale jaarlijkse systeemkosten: deze kosten nemen bij het ADAPT-scenario iets toe; voor het TRANSFORM zijn de effecten op de systeemkosten gering.

Niet-lineaire reductiepaden

Er zijn twee varianten onderzocht waarbij de BKG-emissies van de ESR-sector in de periode 2035-2045 een hoger reductiepad volgen dan in de baseline met een apart reductiedoel voor de ESR-sector. In een derde variant is het reductiepad voor deze ESR-sector lager. In één van de varianten met een hoger reductiepad voor de ESR-sector worden de hogere emissies gecompenseerd door lagere emissies in de ETS-sector. De verschuivingen in BKG-emissies bij niet-lineaire reductiepaden vinden met name plaats in 2035 en 2040 en hebben in beide scenario's een omvang van ongeveer 10 Mton; dat komt overeen met zo'n 15-20% van de totale broeikasgasemissies. De grootste verschuivingen vinden plaats bij het binnenlands transport, het minst bij de agrarische sector.

De veranderingen van de BKG-emissies zijn het gevolg van veranderingen in het finale energiegebruik en bij de elektriciteitsproductie. Bij hogere BKG-emissies in de ESR-sector wordt minder snel overgeschakeld naar duurzame opties. Bij lagere BKG-emissies in de ESR-sector vindt omgekeerde plaats. Dit effect treedt in beide scenario's op, al gaat het bij de scenario's soms om andere duurzame opties. In

geval van compensatie van hogere BKG-emissies in de ESR-sector wordt in de industrie en bij de elektriciteitsproductie meer duurzame opties ingezet in plaats van fossiel energie. De veranderingen ten aanzien van de duurzame opties zijn per scenario verschillend. Bij de varianten waarbij geen compensatie van BKG-emissies hoeft plaats te vinden bij de ETS-sector, is toch sprake van verschuivingen in het energiegebruik in de industrie en bij de elektriciteitsproductie. Dat is het gevolg van veranderingen in de elektriciteitsvraag bij de ESR-sectoren, waardoor er veranderingen bij de elektriciteitsproductie plaatsvinden. De veranderingen in de BKG-emissies bij de elektriciteitsproductie biedt meer of minder emissieruimte voor de industrie.

De veranderingen die bij de varianten plaatsvinden beïnvloeden de totale jaarlijkse systeemkosten, met name in 2035 en 2040. In de varianten met hogere emissies voor de ESR-sector dalen systeemkosten in het ADAPT-scenario ten opzichte van de baseline en bij lagere emissies stijgen deze kosten. Dat is ook het geval bij het TRANSFORM-scenario, behalve in het geval hogere emissies in de ESR-sector worden gecompenseerd met lager emissies in de ETS-sector. Dan zijn de kosten in 2035 hoger in vergelijking met de baseline. De resultaten zijn sterk afhankelijk van de veronderstelde energieprijzen voor fossiele brandstoffen. Wijziging van de fossiele brandstofprijzen leidt niet alleen tot andere verschillen in de systeemkosten, maar ook tot verschuivingen in het energiegebruik in de verschillende eindgebruikerssectoren en bij de elektriciteitsproductie.

Conclusies

Op basis van modelanalyses van twee scenario's waarbij een energiesysteem voor Nederland is berekend met de laagste maatschappelijke kosten, kan het volgende worden geconcludeerd:

- Er zal meer emissiereductie in de ESR-sector moeten plaatsvinden als voor die sector in 2030 een 48%-reductiedoel voor broeikassen gaat gelden in vergelijking met een reductiedoel voor alle sectoren van 55%. Deze extra reductie kan in de periode na 2030 oplopen tot 17 Mton. De emissiereductie in de ETS-sector zal minder groot hoeven te zijn.
- Als wordt gekozen voor een niet-lineair reductiepad voor de emissies van de ESR-sector na 2030, zal dit ten opzichte van een lineaire reductie, leiden tot verschuivingen in het finale energiegebruik, waarbij de grootste verschuivingen plaatsvinden in de transportsector en die van de agrarische sector het geringst zijn.
- Zowel bij een apart reductiedoel voor ESR-sector als bij niet-lineaire reductiepaden liggen de verschuivingen van het finaal energiegebruik in de verschillende sectoren in de orde van 100 PJ. Deze verschuivingen zijn kleiner dan de verschillen in finaal energiegebruik tussen de twee scenario's.
- Als het reductiepad voor ESR-sectoren wordt aangepast, kunnen er ook verschuivingen in het energiegebruik van de ETS-sector plaatsvinden zonder dat de reductiedoelstelling voor de ETS-sector is gewijzigd. Dit komt doordat verandering van de elektriciteitsvraag bij de ESR-sectoren tot wijzigingen in de elektriciteitsproductie (onderdeel ETS-sector) en de daaraan gerelateerde emissies.
- Het toepassen van zowel een aparte doelstelling voor de ESR-sectoren als een niet-lineair reductiepad heeft gevolgen voor de kosten van het energiesysteem. De omvang van de wijziging in de kosten is echter sterk afhankelijk van de energieprijzen voor fossiele brandstoffen.

Inhoudsopgave

	Samenvatting en conclusies	2
1	Inleiding	5
2	Aanpak	7
2.1	ADAPT en TRANSFORM scenario's.....	7
2.2	Doorrekening met het OPERA model.....	8
2.3	Baseline en varianten	9
3	Resultaten	14
3.1	Splitsing tussen ESR+LULUCF en ETS	14
3.2	Niet-lineaire reductiepaden.....	21

1 Inleiding

De EU-landen hebben afgesproken de reductiedoelstelling voor broeikasgassen (BKG) in 2030 te verhogen naar 55% en te streven naar netto geen BKG-emissies in 2050 (Europese Commissie, 2020). Hoe deze doelstelling over de EU-landen wordt verdeeld, is nog niet bekend. In 2021 heeft de Europese Commissie voorstellen gedaan voor aanpassingen van Europese regelgeving met betrekking tot sectoren die onder het emissiehandelssysteem vallen (ETS), voor sectoren die niet onder het emissiehandelssysteem vallen (ESR-sectoren: gebouwde omgeving, mobiliteit, landbouw en kleine industrie) en voor emissies van landgebruik, veranderingen in landgebruik en bosbouw (LULUCF) (Europese Commissie, 2021). Ten opzichte van de Nederlandse doelstelling voor 2030 in het Klimaatakkoord – 49% BKG-reductie ten opzichte van 1990 – is een aanscherping nodig. In het Regeerakkoord van Rutte IV is hierover afgesproken de doelstelling voor 2030 te verhogen naar ten minste 55% (waarbij het beleid zal streven naar 60%), 80% voor 2040 en in 2050 zal Nederland netto geen BKG-emissies meer uitstoten (Regeerakkoord, 2021).

In 2019/2020 heeft TNO verkend hoe een duurzaam Nederlands energiesysteem zich kan ontwikkelen in de periode 2030-2050. Hierbij zijn twee scenario's opgesteld (ADAPT en TRANSFORM) die beide uitgaan van 49% BKG-reductie in 2030 en 95% in 2050 (Scheepers, et al., 2020). De scenario's verschillen in de manier waarop de doelen gehaald worden, met name door het verschil in intrinsieke motivatie van burgers en bedrijven. Het energiesysteem is kwantitatief doorgerekend met een energiesysteemmodel dat het energiesysteem optimaliseert (OPERA) voor de laagste maatschappelijke kosten. De uitkomsten laten zien hoe een toekomstig duurzaam energiesysteem zich kan ontwikkelen als vanuit een maatschappelijk oogpunt wordt gestreefd naar de laagste kosten. Bij de energietransitie streeft de overheid naar een hoge mate van kosteneffectiviteit. Hoewel beide scenario's geen werkelijkheid hoeven te worden, vormen ze een goede referentie om te onderzoeken wat de mogelijke impact is van veranderingen in onder meer de kostenontwikkeling van technologie-opties, de maatschappelijke acceptatie of andere beperkingen ten aanzien van technologie-opties, maar ook naar de (sectorale) aanpassingen in de BKG-reductiedoelstellingen.

Nieuwe beleidsuitgangspunten en voortschrijdende kennis over het toekomstige energiesysteem en de daarin toe te passen technieken, maken het noodzakelijk scenariostudies regelmatig opnieuw uit te voeren. In 2021 zijn voor de scenario's nieuwe analyses uitgevoerd (Scheepers, et al., 2022), waarbij de volgende aanpassingen zijn doorgevoerd:

- Aanpassingen van de reductiedoelen: 55% reductie in 2030 en netto geen BKG-emissies in 2050.
- Actualisatie van techno-economische parameters en aanpassing van potentiëlen.
- Actualisatie van projecties voor energievraag- en industriële productie.
- Aanpassingen in het model ten aanzien van industriële sectoren en processen en een extra doelstelling voor duurzame koolstof bij productie van chemicaliën en kunststoffen.

Naast de vraag wat de meeste wenselijke BKG-reductiedoelstelling is voor 2030, speelt ook de vraag wat het reductietempo na 2030 zou moeten zijn. Een versnelde reductie heeft een gunstig effect op de totale uitstoot aan broeikasgassen in de periode 2030-2050. Een tussendoel kan ook helpen bij het vasthouden van het reductietempo. In overleg met het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK) en het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) heeft TNO in het najaar van 2021 hier onderzoek naar gedaan. Dit onderzoek is uitgevoerd voordat het Regeerakkoord en de daarin afgesproken BKG-reductiedoelen bekend waren.

Met de in 2021 geactualiseerde ADAPT- en TRANSFORM-scenario's als referentie, zijn in enkele varianten, met verschillende BKG-reductiedoelstellingen voor 2030 en 2040, de effecten op het Nederlandse energiesysteem onderzocht op onder meer de elektriciteitsproductie, het finale energiegebruik, de systeemkosten de marginale CO₂-kosten.

De resultaten van deze studie bieden inzicht in hoe het Nederlandse energiesysteem eruit komt te zien bij verschillende broeikasgasreductiepaden in geval gestreefd wordt naar de meest kosteneffectieve oplossing. Er ontstaat inzicht in de effecten (o.m. ten aanzien van technologie-opties en kosten) bij verandering van reductiedoelstelling. Beleidsinstrumenten worden in de doorrekening buiten beschouwing gelaten en alleen beleidskeuzes worden meegenomen die technologieopties beperken of uitsluiten (zoals geen kolencentrales na 2030, maximale hoeveelheid CO₂-opslag, etc.). De analyses van deze studie vormen ook input voor een door PBL in 2022 te publiceren studie naar de ontwikkeling van het Nederlandse energiesysteem op de lange termijn. De toekomstverkenningen voor het Nederlandse energiesysteem worden daarbij gebaseerd op verwachtingen die er voor verschillende sectoren zijn en kunnen afwijken van een energiesysteem met de laagste maatschappelijke kosten. Deze ontwikkelingen zullen worden doorgerekend met het OPERA-model waarbij de doorrekening van de ADAPT- en TRANSFORM-scenario's als referentie kan dienen.

In Hoofdstuk 2 worden de gebruikte scenario's en het gebruikte energiesysteemmodel OPERA beknopt beschreven. In dit hoofdstuk wordt ook de aanpak van de analyse toegelicht. De resultaten van de analyses worden gepresenteerd in Hoofdstuk 3. De conclusies zijn opgenomen in de samenvatting.

2 Aanpak

2.1 ADAPT en TRANSFORM scenario's

De scenario's zijn gebaseerd op storylines die twee verschillende plausibele toekomstbeelden voor de periode 2030-2050 beschrijven (Scheepers, et al., 2020). 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. De kenmerken van de scenario's zijn in onderstaande tabel samengevat. Zie voor meer details (Scheepers, et al., 2022).

Tabel 2.1 Onderscheidende invoerparameters in de ADAPT- en TRANSFORM-scenario's. ↑ betekent groei, extra groei ↑↑ en ↓ krimp; +++ betekent ruime, ++ matige en + beperkte beschikbaarheid

	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)	100% ^a	100% ^a
Aandeel niet-fossiele koolstof in chemische 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	+++	++
Import van bio- en synthetische brandstoffen t.o.v. de vraag ^a	50%	50%
Gebruik CO ₂ -opslag	+++	+
Gebruik kolencentrales	Nee	Nee

^a In afwijking met (Scheepers, et al., 2022) waarin broeikasgassen voor internationale lucht- en scheepvaart in 2050 voor ADAPT 50% bedraagt en voor TRANSFORM 95% en geen import van biobrandstoffen zijn verondersteld.

2.2 Doorrekening met het OPERA model

Voor beide scenario's zijn met behulp van het energiesysteemmodel OPERA kwantitatieve projecties gemaakt voor het Nederlandse energiesysteem. 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 fluctuaties in vraag en aanbod van energie en wordt rekening gehouden met beperkingen in energietransport tussen verschillende regio's in Nederland en vanaf de Noordzee. Bij bepalen van investeringen wordt rekening gehouden met investeringen die gedaan zijn in voorgaande jaren. Figuur 2.1 toont een schematische weergave van het OPERA-model. Een uitgebreidere beschrijving is te vinden in (Stralen, Dalla Longa, Daniëls, Smekens, & Zwaan, 2021).

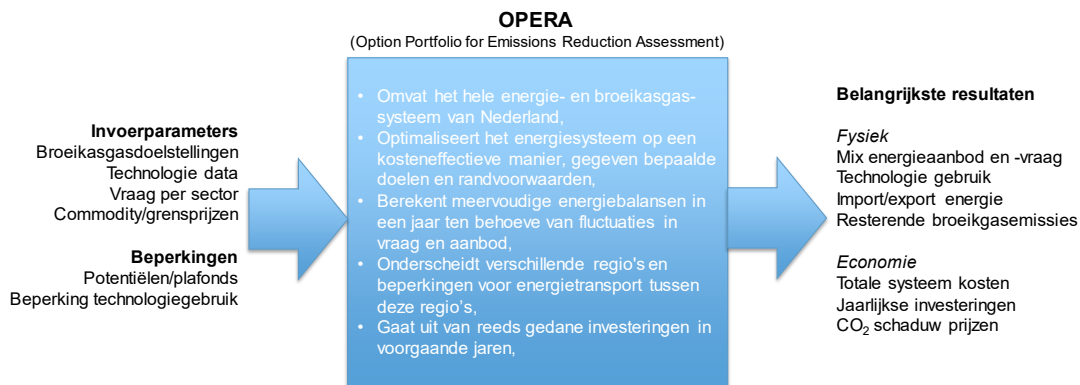
Techno-economische optimalisatie

Het OPERA-model is een optimalisatiemodel: het model rekent het energiesysteem en de bijbehorende emissies uit, gegeven bepaalde doelen (bijv. broeikasgasreductiedoel) en randvoorwaarden, tegen de laagste maatschappelijke kosten (nationale kosten). Voor de berekening van de kosten van het energiesysteem (systeemkosten) hanteert OPERA een landelijke kosten-batenbenadering met een disconteringsvoet van 2,25% (Werkgroep Disconteringsvoet, 2020). Er wordt geen rekening gehouden met belastingen, heffingen (o.a. CO₂-prijs) en subsidies. De totale systeemkosten zijn de som van de kapitaalskosten op jaarbasis, jaarlijkse exploitatie- en onderhoudskosten, kosten voor energietransport en kosten voor geïmporteerde energie minus opbrengsten uit geëxporteerde energie. 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 in TRANSFORM) en fysieke limitering (bijv. transport van warmte of elektriciteit) of beleidsmatige technologie uitsluiting (bijv. geen kolencentrales na 2030). Voor een aantal opties wordt een maximaal potentieel gehanteerd dat bij de optimalisatie niet kan worden overschreden. Deze potentiëlen hebben te maken met fysieke of beleidsmatige beperkingen. Maximale potentiëlen gelden onder meer voor: wind-op-land, wind-op-zee, zon-PV, geothermie, kernenergie, CO₂-opslag en biomassa uit binnen- en buitenland. Voor deze studie zijn techno-economische optimalisaties uitgevoerd voor elk van de volgende zichtjaren: 2030, 2035, 2040, 2045 en 2050.

Invoerparameters

Voor de techno-economische optimalisatie gebruikt het model de doelstelling van laagste maatschappelijke kosten, maar hierbij wordt een plafond voor broeikasemissies gehanteerd. Andere inputparameters 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. Het model bepaalt de

kostendaling niet zelf, maar gebruikt een invoerparameter waarbij een wereldwijde toepassing van de technologie wordt verondersteld. Verder bevat het model prijzen van energie die worden geïmporteerd (olie, gas, kolen, biomassa, etc.) en de vraag naar energie (warmte, elektriciteit) van de verschillende eindverbruikerssectoren, productievolumes in de industrie (staal, ammoniak, chemicaliën) en vervoerskilometers in de transportsector.



Figuur 2.1 Schematische weergave van het OPERA-model

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 energiebronnen en energiedragers, capaciteit van energieproductie, import/export van energie, resterende broeikasgasemissies) en economische resultaten (bijv. systeemkosten, investeringskosten).

2.3 Baseline en varianten

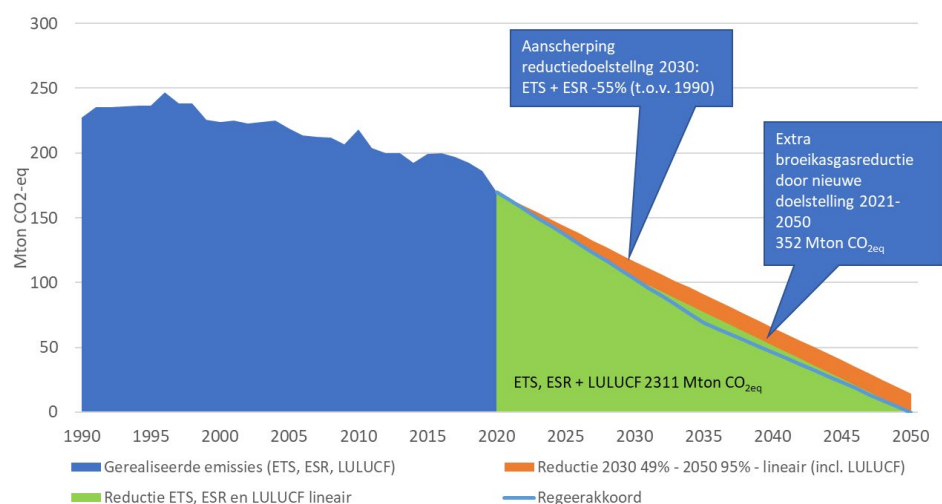
Voor deze studie zijn twee baselines berekend voor de ADAPT en TRANSFORM scenario's, één met een enkele, integrale reductiedoelstelling en één met een integraal reductiedoel + een reductiedoel voor ESR- en LULUCF-sectoren. Daarnaast zijn enkele varianten doorgerekend waarbij de emissiereducties van enkele sectoren een niet-lineair reductiepad volgen. De resultaten van de baselines met een integraal en dubbel reductiedoel worden onderling vergeleken en de resultaten van de varianten met een niet-lineair reductiepad worden vergeleken met de baseline met het dubbele reductiedoel.

Integraal BKG-reductiedoel

Voor de baselinescenario's met een integraal reductiedoel (BaseIntegral) is aangenomen dat de BKG-emissies van de ETS-sectoren (grote industrie¹ en elektriciteitsproductie) en ESR-sectoren (huishoudens, dienstensector, transport sector, landbouw en kleine industrie) in 2030 gezamenlijk met 55% worden verlaagd ten opzichte van het emissieniveau in 1990. Voor de LULUCF-emissies

¹ Het OPERA-model maakt onderscheid tussen sectoren waarbij een deel van de industrie-emissies (kleine industrie en AVI's) niet onder ETS valt en een klein deel van de landbouwsector (grote glastuinders) we). Om een betere benadering van ETS- en ESR-emissies te krijgen is voor deze studie een deel van de industrie-emissies en emissies van AVI's onder de ESR-sector gebracht.

(emissies van landgebruik, verandering van landgebruik en bosbouw) is uitgegaan van een emissieniveau in 2030 van 3,5 Mton CO₂-eq (KEV, 2021)². Na 2030 dalen de totale BKG-emissies voor de ETS- en ESR-sectoren en de LULUCF-emissies lineair tot nul emissies in 2050. Figuur 2.2 laat zien dat het gaat om in totaal 2311 Mton CO₂-eq. Dit is 352 Mton CO₂-eq lager dan de bij de vorige BKG-reductiedoelstellingen (49% in 2030 en 95% in 2050, excl. LULUCF-emissies). Het figuur laat ook het reductiepad zien dat in het Regeerakkoord is afgesproken. Daarmee worden de BKG-emissies in de periode tot 2050 met nog eens 152 Mton verlaagd. De gerealiseerde emissies³ vertonen in 2020 een relatief sterke daling die wordt veroorzaakt door de lockdown in verband met Covid-19 en geven voor emissiereducties daarna een relatief gunstig startpunt (zie Figuur 2.2).



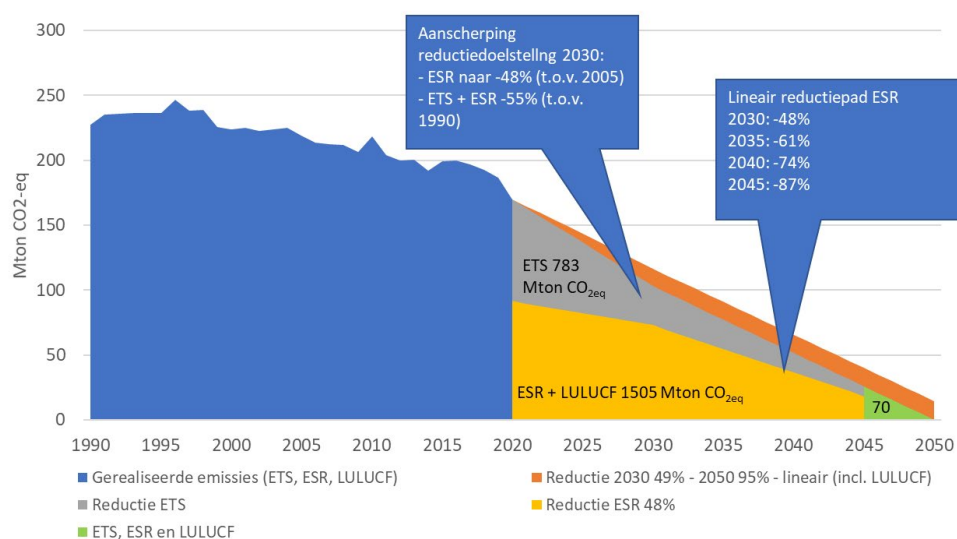
Figuur 2.2 Baseline: 55% reductie in 2030 ETS en ESR gezamenlijk - daarna lineair reductiepad, incl. LULUCF

Splitsing tussen ESR+LULUCF en ETS

In de tweede baseline (BaseSplit) wordt, naast het integrale reductiedoel, een apart reductiedoel voor ESR-sectoren toegepast in 2030 van 48% ten opzichte van het emissieniveau in 2005 (Europese Commissie, 2021). De ESR- en de LULUCF-emissies worden daarna lineair verlaagd tot 2045. Vanaf 2045 geldt een lineair reductiepad met een gezamenlijke doelstelling voor ETS, ESR en LULUCF (zie Figuur 2.3). Hierdoor kunnen in de laatste vijf jaar niet-CO₂ emissies (met name methaan) worden gecompenseerd met negatieve emissies (bijv. opslaan van CO₂ afkomstig uit biomassaprocessen) bij de ETS-sector. De resultaten van deze baseline (BaseSplit) worden vergeleken voor beide scenario's met de baseline met één integraal reductiedoel (BaseIntegral).

² In 2030 valt LULUCF nog niet onder de BKG-reductiedoelstelling.

³ <http://www.emissieregistratie.nl>



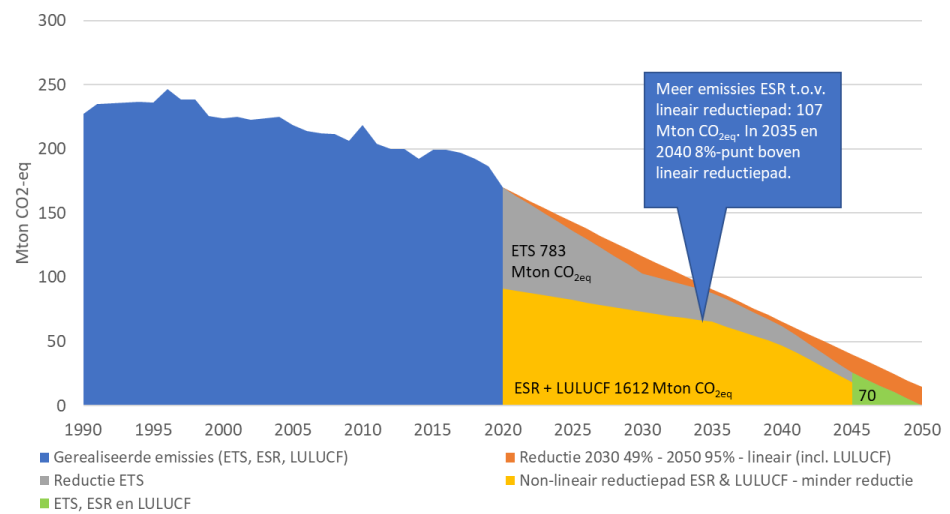
Figuur 2.3 BaseSplit: 55% reductie in 2030 voor ETS+ESR met apart reductiedoel voor ESR. Daarna lineair reductiepad voor ESR en LULUCF tot 2045.

Niet-lineaire reductiepaden

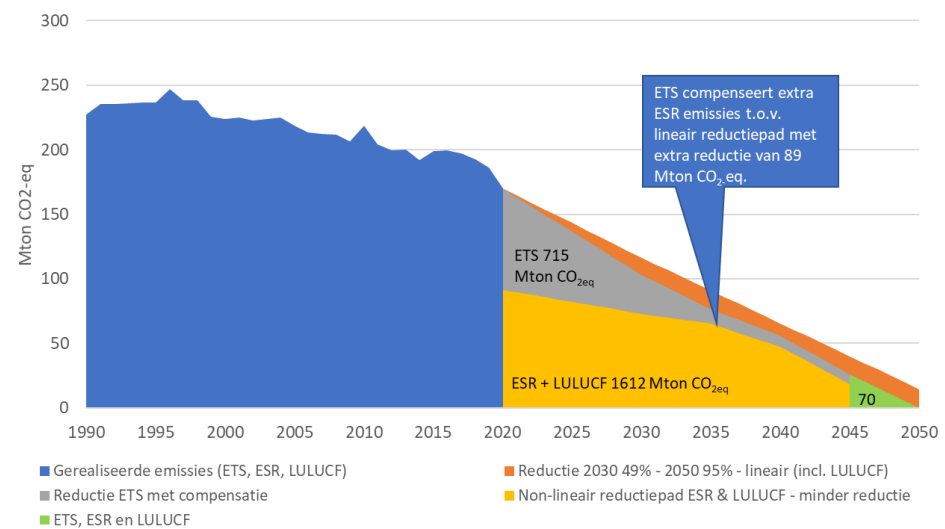
Vervolgens zijn drie varianten doorgerekend waarbij het BKG-reductiepad tussen 2030 en 2050 niet lineair verloopt⁴:

- In variant 1a (zie Figuur 2.4) zijn, door de emissiereductie in 2035 en 2040 met 8%-punt te verlagen ten opzichte van het lineaire reductiepad, de emissies voor ESR+LULUCF in de periode 2030-2045 107 Mton groter dan in BaseSplit. Ten opzichte van de baseline nemen de totale BKG-emissies toe.
- In variant 1b (zie Figuur 2.5) zijn de emissies voor ESR+LULUCF in de periode 2030-2045 de 89 Mton groter dan in BaseSplit. Deze extra emissies worden gecompenseerd met minder BKG-emissies door ETS-sector. Ten opzichte van de baseline blijven de totale BKG-emissies gelijk.
- In variant 2a (zie Figuur 2.6) zijn, door de emissiereductie in 2035 en 2040 met 8%-punt te verhogen ten opzichte van het lineaire reductiepad, de emissies voor ESR+LULUCF in de periode 2030-2045 107 Mton kleiner dan in Basesplit. Ten opzichte van de baseline nemen de totale BKG-emissies af.

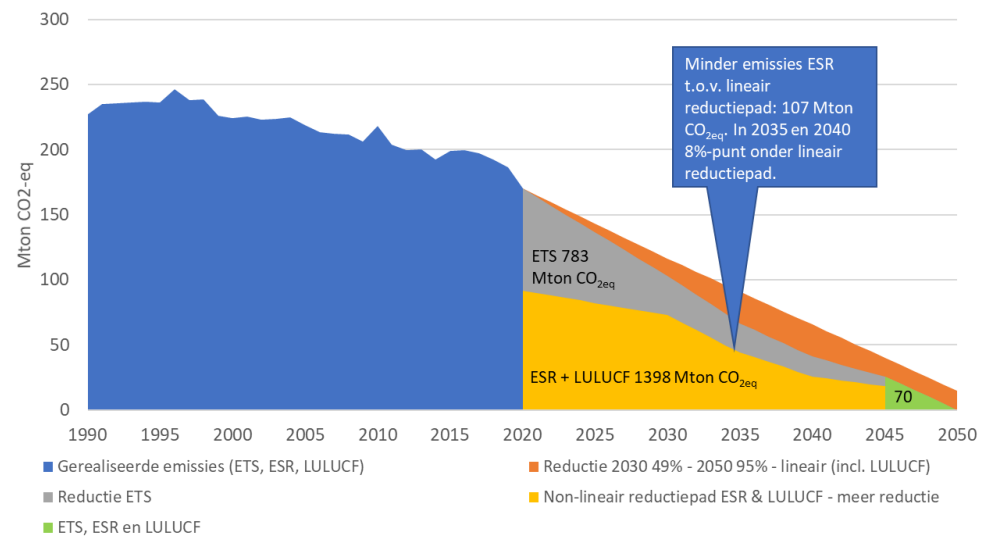
⁴ Om de effecten op het energiesysteem goed te kunnen analyseren zijn de veranderingen in de BKG-emissies in varianten 1a en 2a zo groot mogelijk gemaakt. De verandering in de BKG-emissies in variant 1b is echter iets kleiner zodat in 2035 en 2040 nog een beperkte emissie in de ETS-sectoren kan plaatsvinden.



Figuur 2.4 Variant 1a: Meer emissies ESR, geen compensatie ETS



Figuur 2.5 Variant 1b: Meer emissies ESR, compensatie door ETS



Figuur 2.6 Variant 2a: Minder emissies ESR, geen compensatie ETS

3 Resultaten

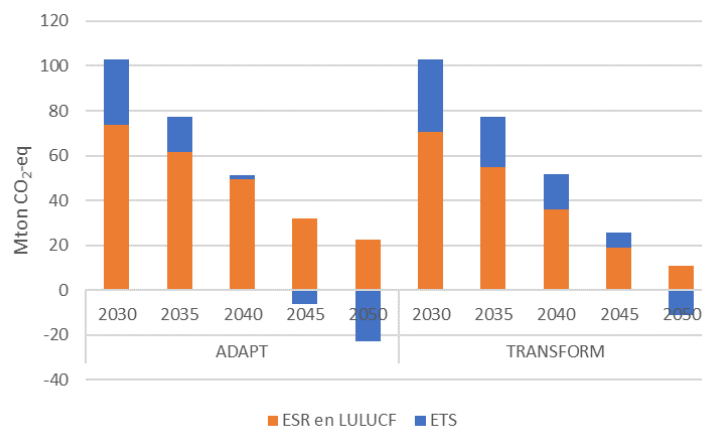
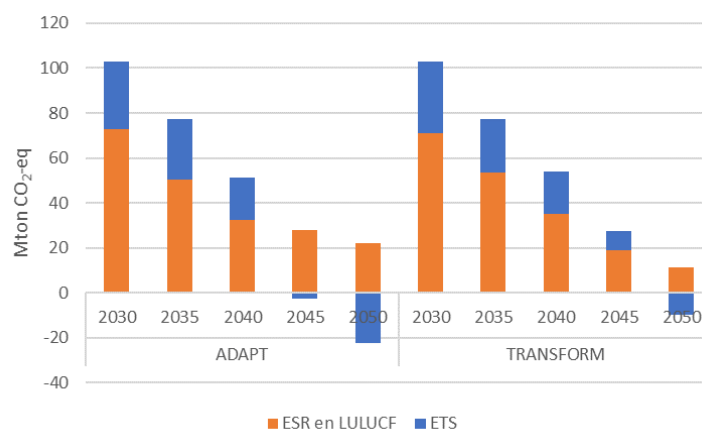
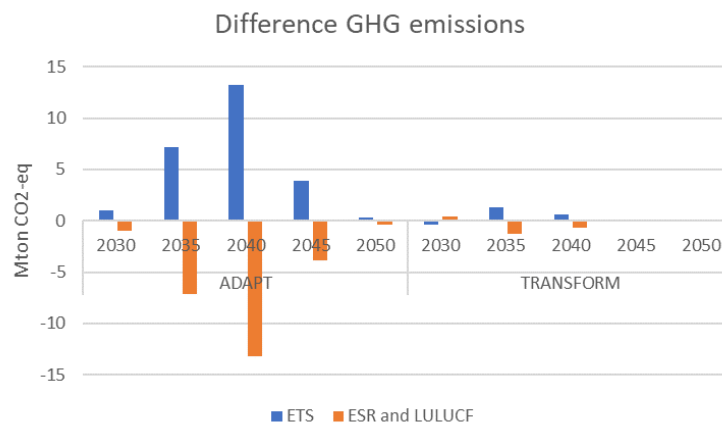
3.1 Splitsing tussen ESR+LULUCF en ETS

3.1.1 *Verschuiving BKG-reducties van ETS naar ESR*

Figuur 3.1 toont de BKG-emissies voor ETS en ESR+LULUCF in geval van één integraal reductiedoel voor 2030 (BaseIntegral) en bij een apart doel voor ESR-sectoren voor 2030, naast het integrale reductiedoel (BaseSplit). De reductiedoelen voor de ADAPT- en TRANSFORM-scenario's zijn daarbij gelijk en de emissiereductie na 2030 verloopt lineair. De onderste staafdiagram geeft de verschillen weer voor ETS en ESR+LULUCF voor beide scenario's. Deze grafiek laat zien dat de verschuiving van de BKG-reducties van ETS- naar ESR-sectoren groter zijn bij het ADAPT-scenario (tot 17 Mton) dan bij TRANSFORM, met name in de jaren 2035, 2040 en 2045. Bij het integrale reductiedoel vindt in het ADAPT-scenario emissiereductie plaats door CO₂-afvang bij industriële processen en CO₂-opslag in combinatie met het gebruik van biomassa. In geval van de dubbele doelstelling (BaseSplit) wordt in 2030, 2035 en 2040 minder CO₂ opgeslagen (resp. -5,3 Mton, -10 Mton en -4,5 Mton). Voor het TRANSFORM-scenario is de maximale hoeveelheid CO₂-opslag veel kleiner (scenario-aanname) dan in ADAPT.

3.1.2 *Verschuivingen bij finaal energiegebruik*

Figuur 3.2 t/m Figuur 3.4 toont de verschuivingen die plaatsvinden in het finale energiegebruik bij de verschillende eindgebruikerssectoren. Verschuivingen in finaal energiegebruik in de verschillende sectoren zijn in ADAPT groter dan in TRANSFORM. Verschuivingen liggen in de orde van 100 PJ (totaal finaal energiegebruik 2900-3400 PJ). Deze verschuivingen zijn echter kleiner dan de verschillen in finaal energiegebruik tussen de twee scenario's: verschil voor finaal energiegebruik industrie is in 2050 bijvoorbeeld meer dan 500 PJ. Hieronder volgt een toelichting voor de sectoren binnenlands transport, gebouwde omgeving en industrie. Omdat de verschuivingen bij de agrarische sector minder dan 5 PJ zijn, wordt die sector niet verder besproken.

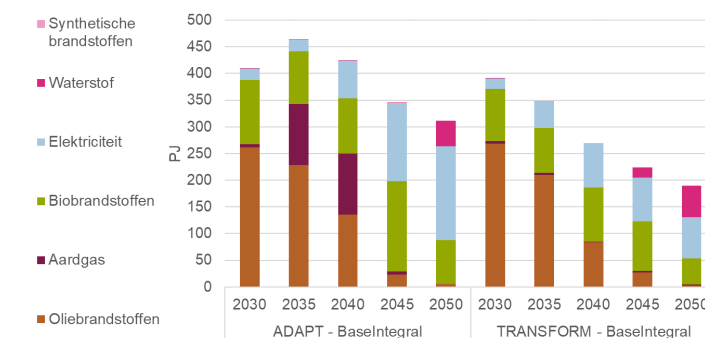
BaseIntegral**BaseSplit****Verskil tussen BaseIntegral en BaseSplit**

Figuur 3.1 BKG-emissies voor ETS en ESR+LULUCF

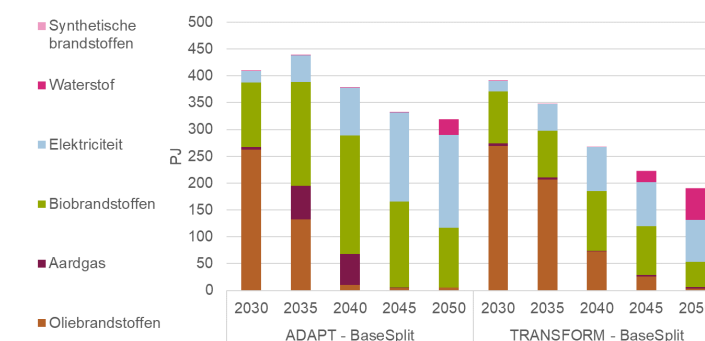
Binnenlands transport

Uit de gepresenteerde resultaten voor binnenlands transport in Figuur 3.2 kan worden opgemaakt dat bij het dubbele reductiedoel (BaseSplit) in het ADAPT-scenario een versnelling plaatsvindt van de verduurzaming van het energiegebruik ten opzichte van het integrale reductiedoel (BaseIntegral). In deze sector dalen de BKG-emissies, door minder gebruik van fossiele brandstoffen en vooral een grotere inzet van biobrandstoffen. Dit vindt met name plaats in 2035 en 2040. Voor het TRANSFORM-scenario leidt de verandering in reductiedoelstellingen nauwelijks tot verschuivingen in het finaal energiegebruik bij de sector binnenlands transport.

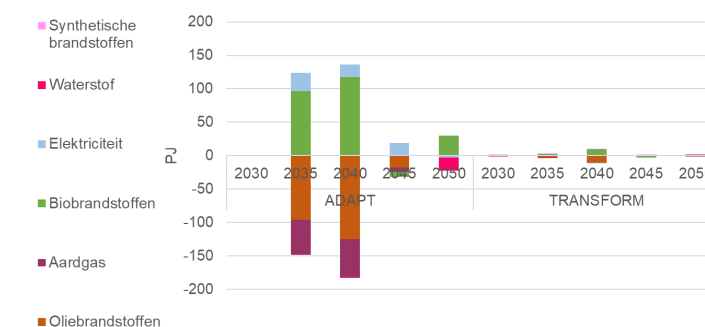
BaseIntegral



BaseSplit



Verschuif tussen BaseIntegral en BaseSplit

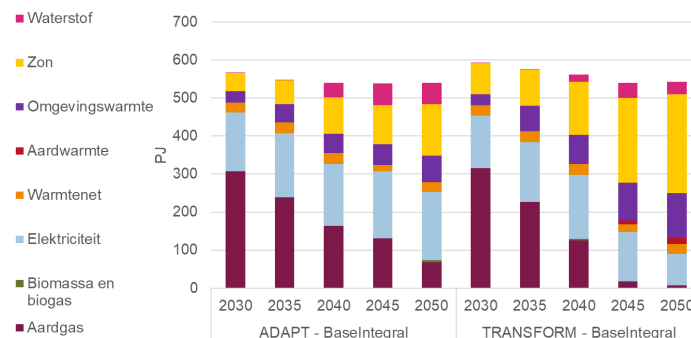


Figuur 3.2 Finale energievraag binnenlands transport

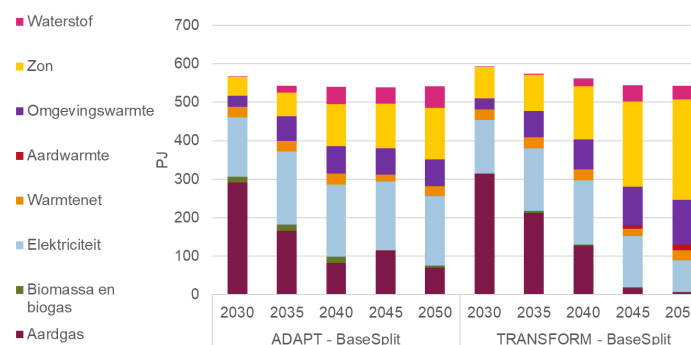
Gebouwde omgeving

Figuur 3.3 laat zien dat in het ADAPT-scenario, ten opzichte van BaseIntegral, bij BaseSplit extra emissiereductie in de gebouwde omgeving plaatsvindt door een versnelde omschakeling van aardgas naar duurzame warmteopties, zoals toepassing van elektrische warmtepompen en inzet van biomassa/biogas en waterstof. Dit gebeurt met name in 2035 en 2040. In het TRANSFORM-scenario vinden vergelijkbare verschuivingen ook plaats in 2035, maar die zijn minder groot dan in ADAPT.

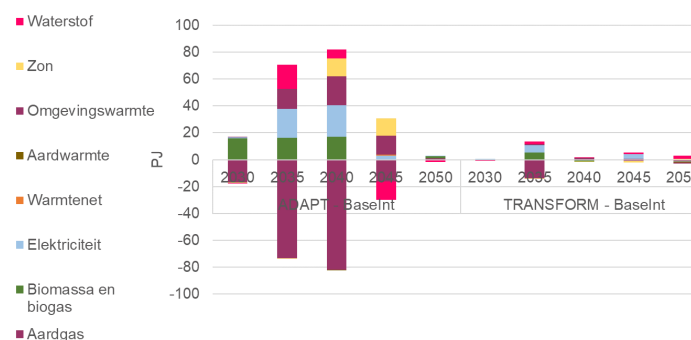
BaseIntegral



BaseSplit



Verskil tussen BaseIntegral en BaseSplit

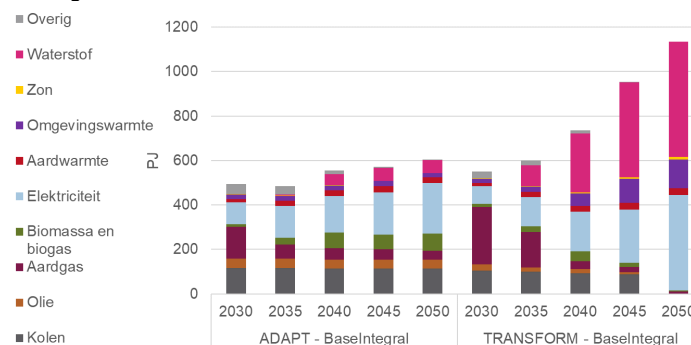


Figuur 3.3 Finale energievraag gebouwde omgeving

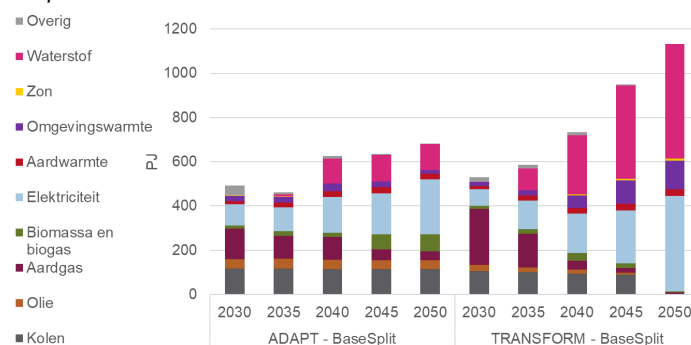
Industrie

De BKG-emissies voor de industriesector nemen relatief toe. Figuur 3.4 laat zien dat in het ADAPT-scenario meer aardgas wordt gebruikt. Hiermee wordt meer blauwe waterstof gemaakt (met CO₂-afvang en -opslag). Bij de chemie daalt de CO₂-afvang en -opslag. Per saldo wordt in dit scenario in de industrie minder CO₂ afgevangen en opgeslagen (zie ook 3.1.1). In het TRANSFORM-scenario zijn de verschuivingen in het finale energiegebruik gering.

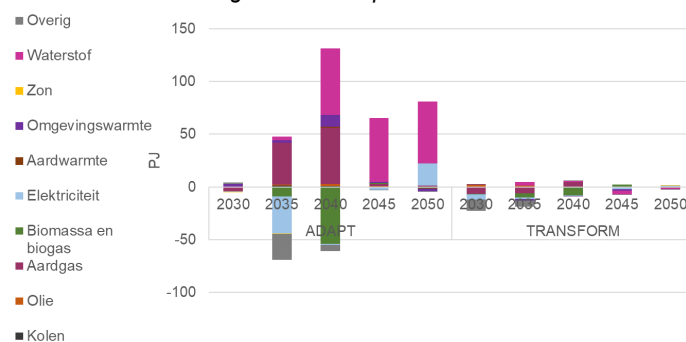
BaseIntegral



BaseSplit



Verskil tussen BaseIntegral en BaseSplit

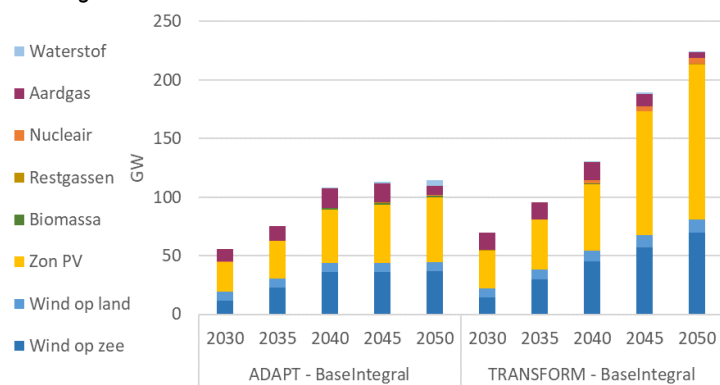
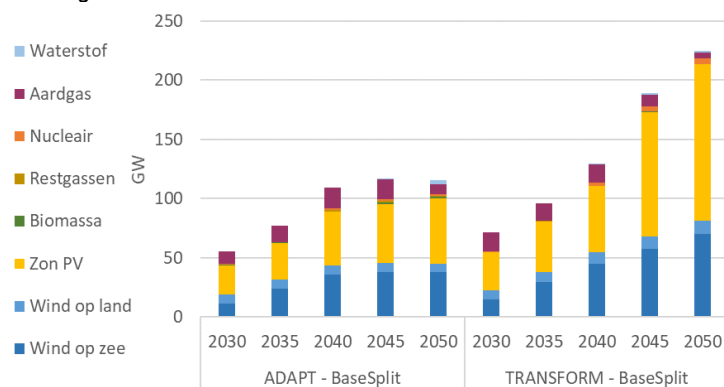
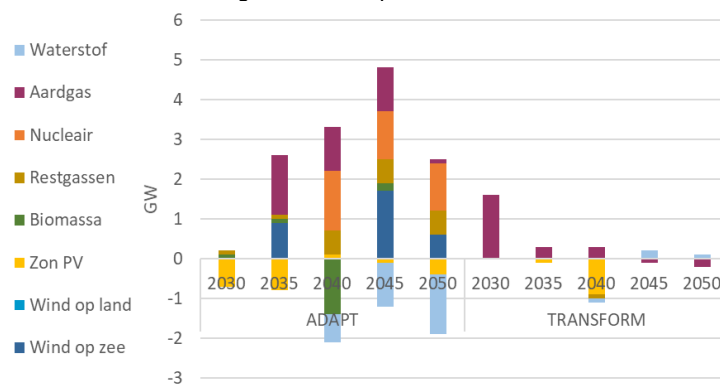


Figuur 3.4 Finale energievraag industrie

Elektriciteitsproductie

De elektriciteitsproductie in BaseIntegral groeit in het ADAPT-scenario van 136 TWh in 2030 naar 327 TWh in 2050. Voor het TRANSFORM-scenario cijfers zijn deze productievolumes resp. 169 TWh en 617 TWh. In BaseSplit neemt de elektriciteitsproductie met 4% (2035, 2040, 2050) en 6% (2045) toe in ADAPT. De veranderingen in TRANSFORM zijn gering, minder dan 1%.

De verschuivingen voor de verschillende typen elektriciteitsproductie zijn goed te zien bij de veranderingen in het opgestelde vermogen, zie Figuur 3.5. Verschuivingen in het productievermogen zijn niet alleen het gevolg van meer of minder elektriciteitsproductie, maar ook veranderingen in piekvermogen, bijvoorbeeld aardgas- of waterstofcentrales. In het ADAPT-scenario neemt de capaciteit van aardgascentrales toe en die van waterstof af. Daarnaast is er uitbreiding van het nucleair productievermogen (van 0,3 naar 1,5 GW) en groei bij offshore windvermogen en een afname voor biomassa. Voor het TRANSFORM-scenario zijn de veranderingen geringer: de capaciteit van gascentrales neemt iets toe en die van zon-PV enigszins af. De veranderingen zijn ten opzichte van het totale productievermogen relatief klein – enkele procenten voor beide scenario's –, maar voor verschillende typen elektriciteitsproductie wel groot. Zo verdwijnt het vermogen voor elektriciteitsproductie uit waterstof en biomassa in het ADAPT-scenario, maar neemt die voor kernenergie met een factor 5 toe.

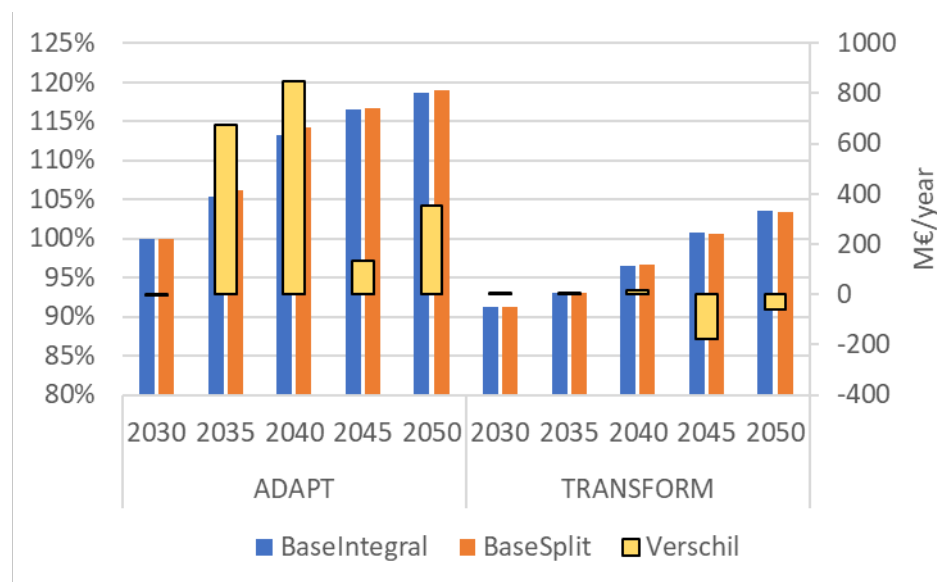
BaseIntegral**BaseIntegral****Vershil tussen BaseIntegral en BaseSplit**

Figuur 3.5 Elektriciteitsproductiecapaciteit

Totale systeemkosten

Het energiesysteem is voor beide scenario's bepaald op basis van de laagste maatschappelijke kosten (zie paragraaf 2.2). Aanpassingen in de wijze waarop de reductiedoelstellingen worden opgelegd leiden tot verschuivingen in het energiegebruik, maar ook tot veranderingen in de totale systeemkosten. Figuur 3.6 toont de totale systeemkosten bij de integrale reductiedoelstelling (BaseIntegral) en voor het dubbele reductiedoel (BaseSplit) relatief ten opzichte van de totale systeemkosten in ADAPT 2030 BaseIntegral. Voor beide scenario's geldt dat de totale systeemkosten toenemen naarmate de BKG-emissies afnemen. Dit is het gevolg van het op steeds grotere schaal toepassen van nieuwe innovatie technieken die (aanvankelijk) duurder zijn dan conventionele technieken. Hierbij wordt overigens wel rekening gehouden met leereffecten (lagere kosten als gevolg van innovatie en op steeds grotere schaal toepassen van een technologie). De totale systeemkosten zijn voor het TRANSFORM-scenario lager dan die voor ADAPT. Dit komt door een lagere energiegebruik en minder omvangrijke industriële productie die voor TRANSFORM zijn aangenomen. Wel worden in TRANSFORM meer innovatie technieken toegepast, maar dat leidt niet tot hogere systeemkosten dan voor het ADAPT-scenario.

Toepassing van een dubbele reductiedoelstelling leidt tot beperkte veranderingen in de totale systeemkosten (0,2 tot 0,9%-punt voor ADAPT en 0 tot -0,2%-punt voor TRANSFORM). Figuur 3.6 toont ook de verandering in de totale systeemkosten in miljoenen euro's per jaar. Als een dubbele reductiedoelstelling wordt toegepast nemen de totale systeemkosten voor het ADAPT-scenario iets toe, met name in 2035 en 2040. Voor het TRANSFORM-scenario is sprake van geringe kostendalingen vanaf 2040. Dit komt door een (geringe) verschuiving van investering naar eerdere jaren.



Figuur 3.6 Totale jaarlijkse systeemkosten (ADAPT BaseIntegral 2030 = 100%)

3.2 Niet-lineaire reductiepaden

De uitkomsten voor de niet-lineaire reductiepaden worden vergeleken met de resultaten van BaseSplit. In varianten 1a en 1b zijn de BKG-emissies van de ESR-

sector hoger dan in BaseSplit en in variant 2a zijn de BKG-emissies van deze sector lager. In variant 1b worden de hogere BKG-emissies van de ESR-sector gecompenseerd door lagere emissies in de ETS-sector. Omdat de veranderingen in 2045 en 2050 zeer gering zijn, worden de resultaten voor die jaren niet verder besproken en worden alleen de resultaten getoond voor 2035 en 2040. Ook worden resultaten voor de agrarische sector niet besproken omdat de veranderingen in BKG-emissies en energiegebruik relatief gering zijn.

3.2.1 *Verschuivingen BKG-emissies*

De BKG-emissies voor BaseSplit en varianten 1a, 1b en 2a voor 2035 en 2040 worden getoond in de twee bovenste grafieken van Figuur 3.7. De twee onderste grafieken laten de verschillen zien voor de varianten ten opzichte van BaseSplit. De verschuivingen in BKG-emissies bij niet-lineaire reductiepaden variëren tussen -9,4 tot +10,3 Mton (zo'n 15-20% van de totale broeikasgasemissies). De grootste verschuivingen vinden plaats in transportsector (-7,8 Mton / +7,3 Mton), de minste in de agrarische sector (-2 Mton / +0,2 Mton). De figuren laten zien dat in varianten 1a en 1b, zowel in 2035 als in 2040 en in beide scenario's, de emissies in gebouwde omgeving en het binnenlands transport toenemen en in variant 1b worden gecompenseerd door de industriector en de energieproductiesector. In variant 2b zijn in ADAPT er in 2035 minder BKG-emissies bij de gebouwde omgeving, binnenlands transport en industrie en in 2040 ook bij de landbouwsector. De emissies in de energieproductiesector zijn hoger. In TRANSFORM vinden in variant 2b bij alle sectoren emissiereducties plaats; in 2035 vooral bij de gebouwde omgeving en in 2040 met name bij het binnenlands transport. Hoewel in variant 1a het emissiereductiedoel voor de ETS-sector niet wijzigt, vinden er toch veranderingen plaats. Dit komt doordat veranderingen in de ESR-sector gevolgen hebben voor de energieproductie en de daaraan gerelateerde emissies. Als deze emissies dalen, ontstaat er ruimte voor meer industrie-emissies en vice versa.

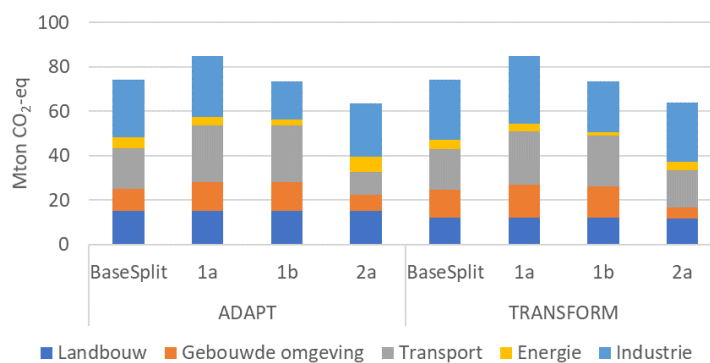
3.2.2 *Veranderingen in finaal energiegebruik*

Verschuivingen in finaal energiegebruik liggen in 2035 en 2040 in de orde van 100 PJ (totaal finaal energiegebruik bedraagt 2900-3400 PJ). De verschillen tussen scenario's zijn groter dan verschillen tussen de varianten en BaseSplit. De veranderingen in het energiegebruik zijn voor de binnenlandse transportsector het grootste in vergelijking met veranderingen in andere sectoren. Deze sector is relatief flexibel, doordat het meerdere energiedragers tot zijn beschikking heeft en de technische levensduur van voertuigen korter is dan die van energiegebruikende installaties in andere sectoren.

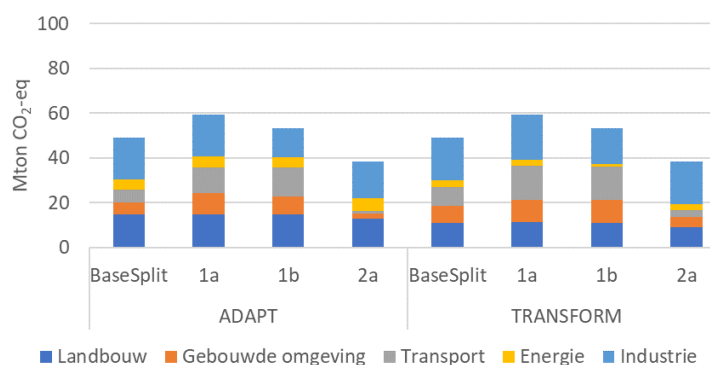
3.2.3 *Binnenlands transport*

Figuur 3.8 toont de resultaten voor binnenlands transport. In zowel ADAPT als TRANSFORM worden meer aardgas en oliebrandstoffen gebruikt, terwijl minder biobrandstoffen en elektriciteit worden ingezet. De effecten zijn bij TRANSFORM groter dan bij ADAPT. In variant 2a zijn de ESR-emissies lager dan in BaseSplit. In het ADAPT-scenario worden meer biobrandstoffen en elektriciteit ingezet ten koste van aardgas en oliebrandstoffen. Bij het TRANSFORM-scenario wordt in 2035 meer biobrandstoffen gebruikt in plaats van oliebrandstoffen en in 2040 verschuift dit naar meer waterstofinzet en minder bio- en oliebrandstoffen.

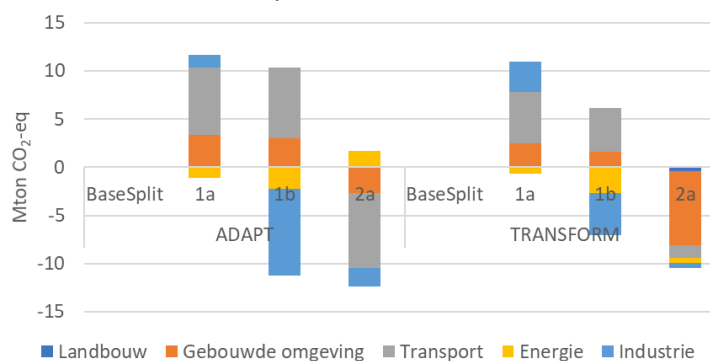
2035



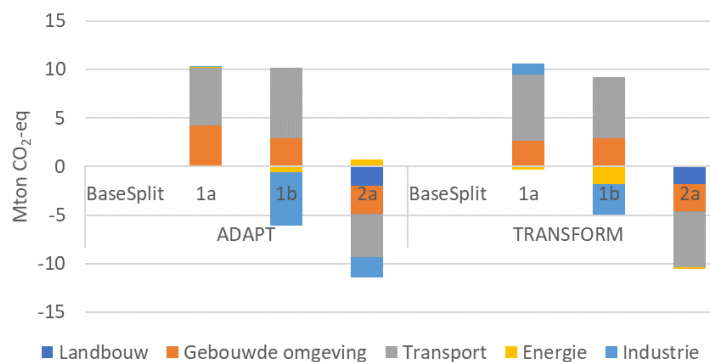
2040



2035 verschillen t.o.v. BaseSplit

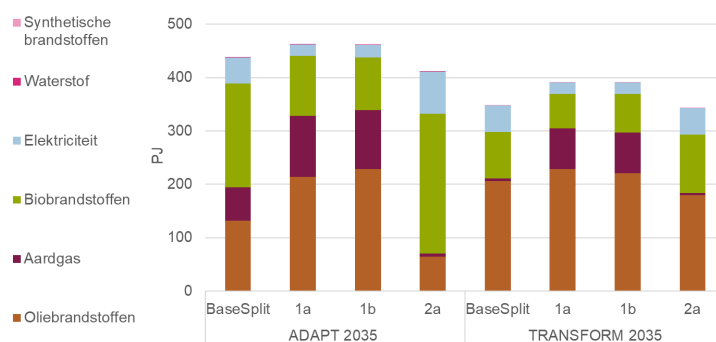


2040 verschillen t.o.v. BaseSplit

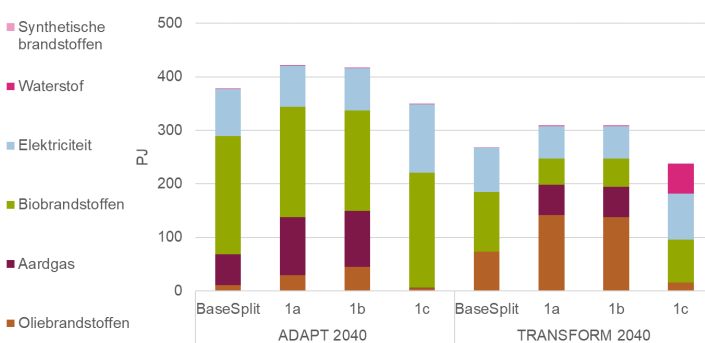


Figuur 3.7 BKG-emissies in 2035 en 2040

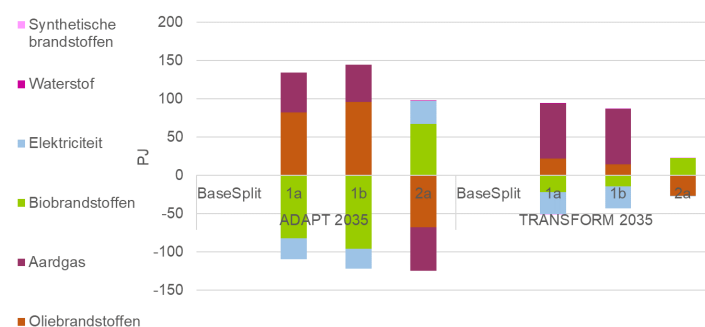
2035



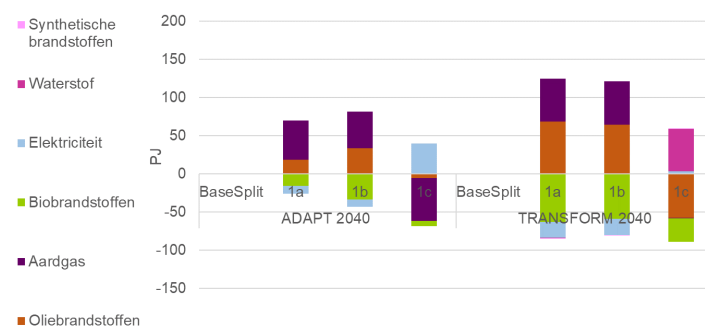
2040



2035 verschillen t.o.v. BaseSplit



2040 verschillen t.o.v. BaseSplit



Figuur 3.8 Finaal energiegebruik binnenlands transport in 2035 en 2040

3.2.4 *Gebouwde omgeving*

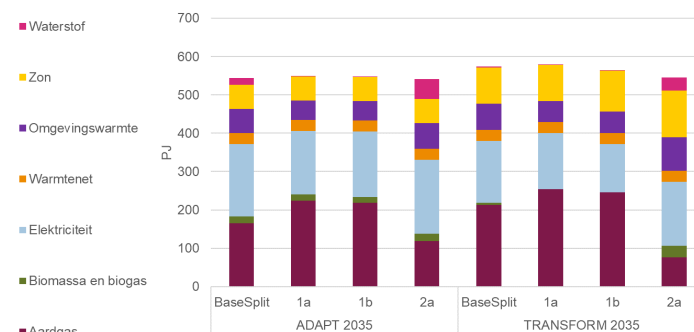
Figuur 3.9 toont de resultaten voor de gebouwde omgeving. In het ADAPT-scenario wordt in de varianten 1a en 1b (hogere emissies), zowel in 2035 als 2040, meer aardgas ingezet en minder elektrische warmtepompen (minder omgevingswarmte en elektriciteit) en minder waterstof. In variant 2a (lagere emissies) wordt voor dit scenario in beide jaren minder aardgas inzet en in 2035 meer waterstof en in 2040 meer biomassa/biogas. In het TRANSFORM-scenario wordt in beide jaren eveneens meer aardgas gebruikt in de varianten 1a en 1b. Er worden minder warmtepompen ingezet en in 2040 ook minder zonne-energie. In variant 2b wordt in 2035 minder aardgas gebruikt maar meer biomassa, zonne-energie, warmtepompen en waterstof. In 2040 vindt er meer elektriciteit met zonnepanelen opgewekt en daalt het elektriciteitsgebruik uit het net.

3.2.5 *Industrie*

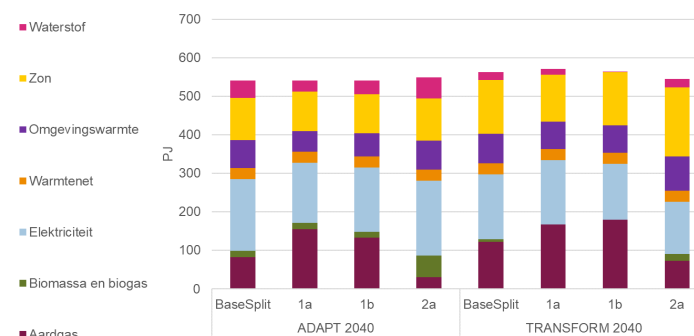
Figuur 3.10 toont de resultaten voor de industrie. In variant 1b compenseert de industriesector met lagere BKG-emissies de hogere BKG-emissies van de ESR-sector. Hierdoor wordt in 2035 in ADAPT minder aardgas gebruikt en vooral meer elektriciteit; in 2040 eveneens minder aardgas, maar dan meer biomassa. Bij TRANSFORM vindt in variant 1b in 2035 minder aardgasgebruik plaats, maar worden meer warmtepompen (omgevingswarmte), biomassa en olie ingezet. In 2040 worden in dit scenario minder warmtepompen ingezet, maar meer waterstof gebruikt.

In varianten 1a en 2b vindt geen compensatie plaats door de ETS-sector. Toch treden verschuivingen op in het finaal energiegebruik van de industrie. Die hebben te maken met verschuivingen binnen de ETS-sector, dat wil zeggen tussen industrie en energieproductie. Deze verschuivingen zijn in de zelfde orde van grootte (variant 1a) of zelfs groter (variant 2b, TRANSFORM, 2035) dan wanneer er wel compensatie plaatsvindt.

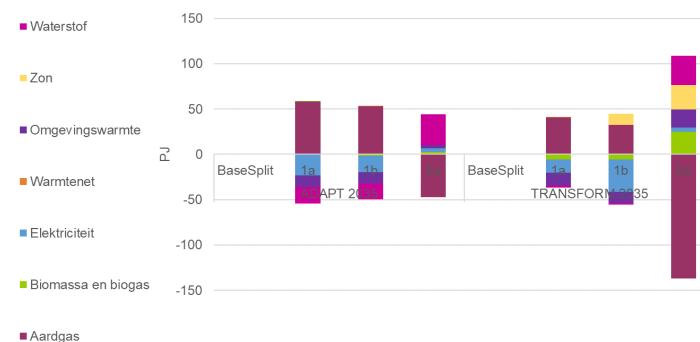
2035



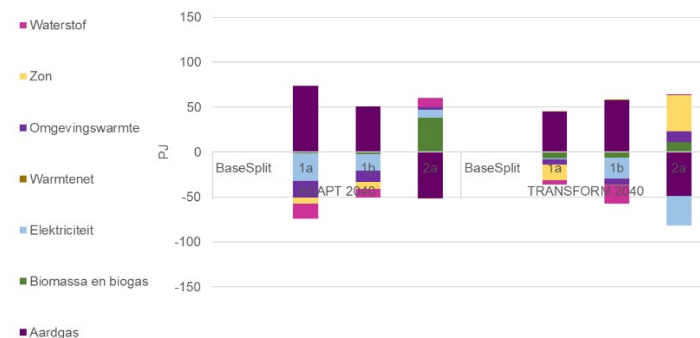
2040



2035 verschillen t.o.v. BaseSplit

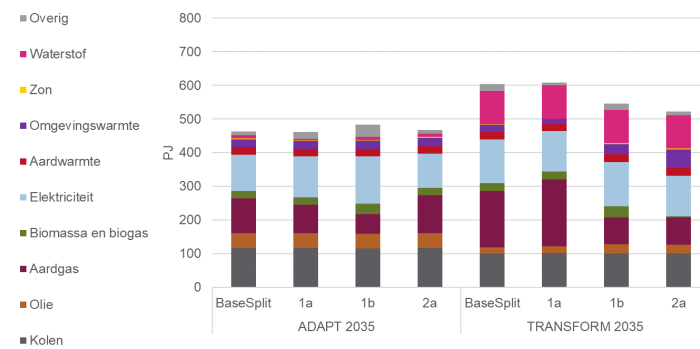


2040 verschillen t.o.v. BaseSplit

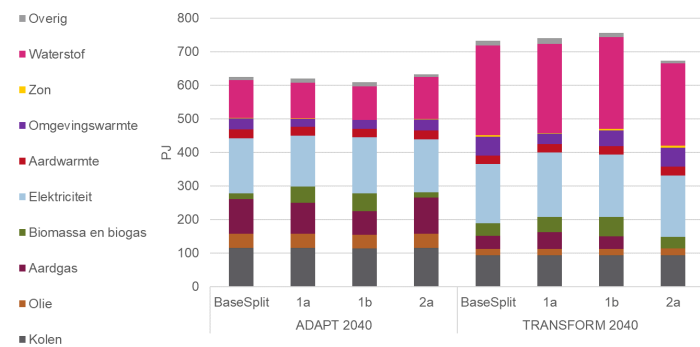


Figuur 3.9 Finaal energiegebruik gebouwde omgeving in 2035 en 2040

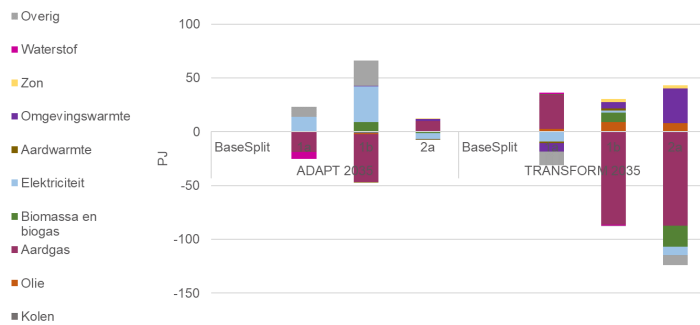
2035



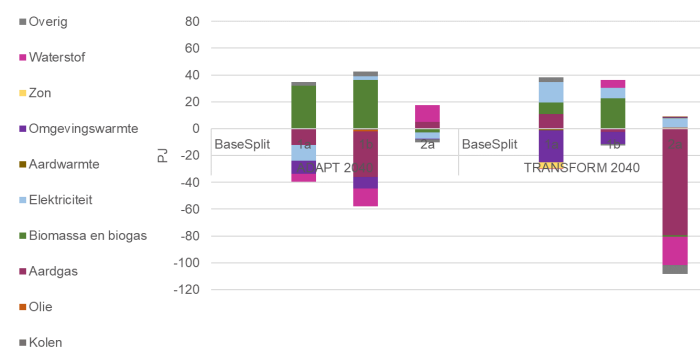
2040



2035 verschillen t.o.v. BaseSplit



2040 verschillen t.o.v. BaseSplit



Figuur 3.10 Finaal energiegebruik industrie in 2035 en 2040

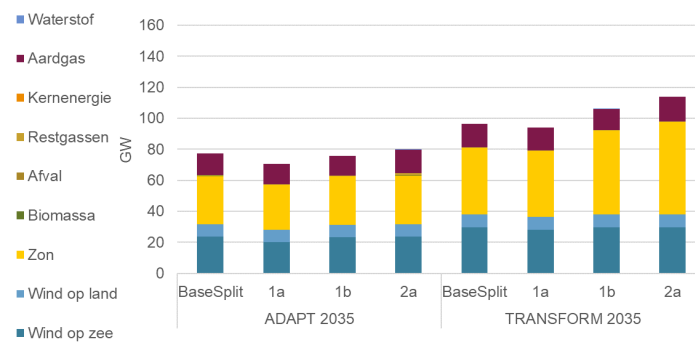
3.2.6 *Elektriciteitsproductie*

In BaseSplit is de totale elektriciteitsproductie in ADAPT in 2035 217 TWh en in 2040 267 TWh. Voor TRANSFORM is dat respectievelijk 316 TWh en 392 TWh. In de varianten neemt de elektriciteitsproductie toe of af. Deze veranderingen blijven voor ADAPT in 2035 binnen de 10% (-10% in variant 1a, -3% in variant 1b en +4% in variant 2a) en in 2040 is dit niet meer dan 4% (+4% in variant 1a, 0% in variant 1b en +1% in variant 2a). Voor TRANSFORM blijven de veranderingen beperkt tot 7% in 2035 (-5% in variant 1a, +3% in variant 1b en +7% in variant 2a) en 5% in 2040 (-2% in variant 1a, 0% in variant 1b en +5% in variant 2a).

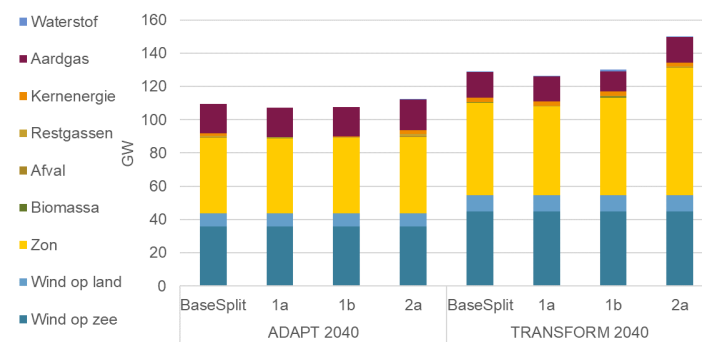
Figuur 3.11 toont de elektriciteitsproductiecapaciteit in BaseSplit en de verandering daarin voor de verschillende varianten. De capaciteitsveranderingen zijn over het algemeen beperkt tot enkele GW, behalve voor TRANSFORM waarbij de capaciteit van zon-PV significant toeneemt in variant 2b in zowel 2035 als 2040.

De veranderingen in de elektriciteitsproductie en -productiecapaciteit zijn het gevolg van meer of minder elektriciteitsvraag door meer of minder emissiereductie in de ESR-sector (varianten 1a en 2a). In variant 1b vindt compensatie plaats in de ETS-sector voor meer BKG-emissies in de ESR-sector. Dat betreft ook de elektriciteitsproductie, bijvoorbeeld door gebruik van minder aardgas en meer hernieuwbare energie. In 2040 is in zowel ADAPT als TRANSFORM nieuwe kernenergiecapaciteit aanwezig. Bij de varianten in het ADAPT-scenario neemt deze capaciteit (en productie) toe (variant 2a) of af (varianten 1a en 1b); dat gebeurt niet bij TRANSFORM.

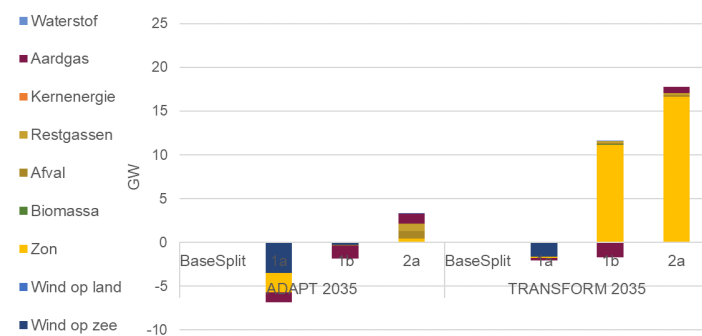
2035



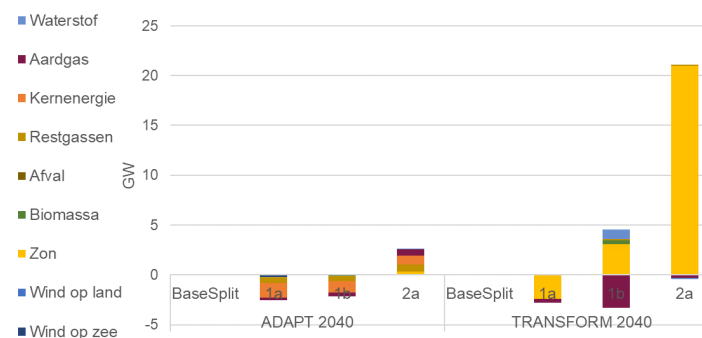
2040



2035 verschillen t.o.v. BaseSplit



2040 verschillen t.o.v. BaseSplit



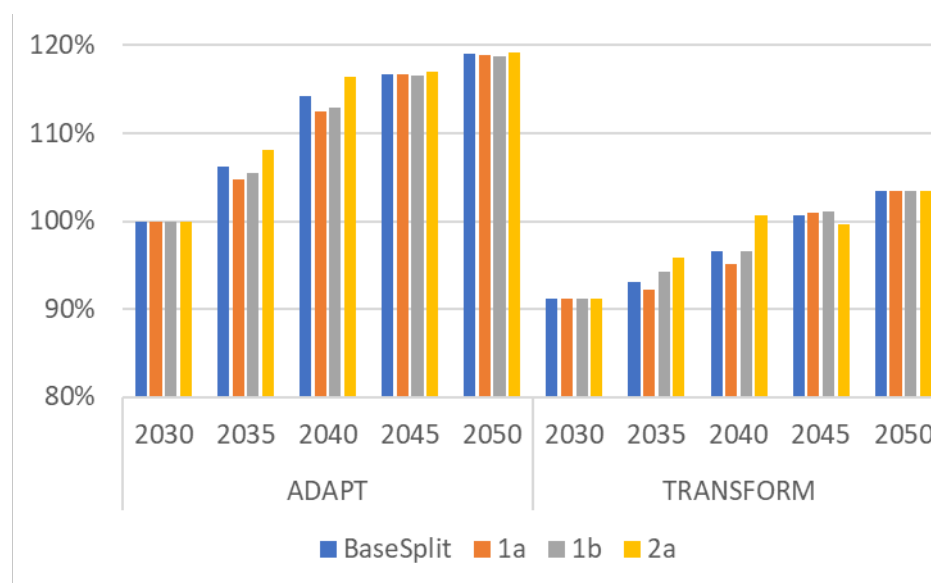
Figuur 3.11 Elektriciteitsproductiecapaciteit in 2035 en 2040

3.2.7 Totale systeemkosten

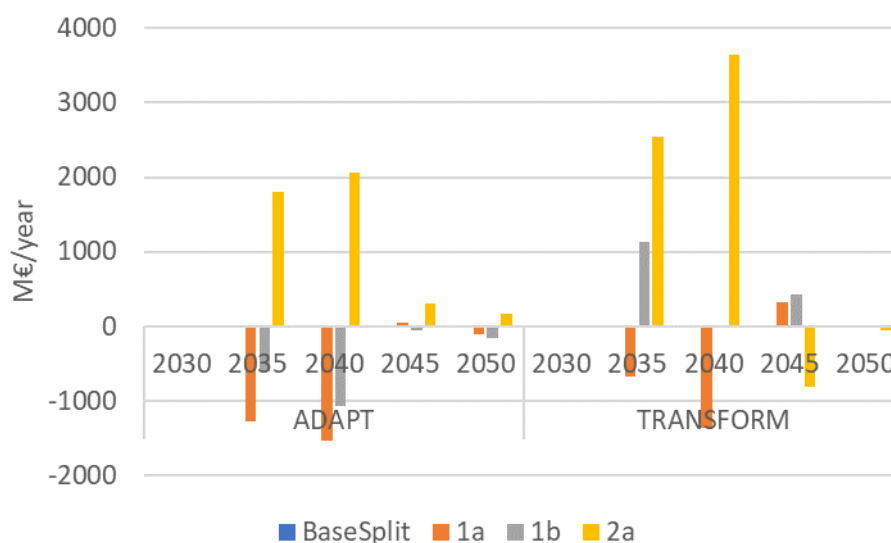
Figuur 3.12 toont de totale jaarlijkse systeemkosten voor BaseSplit (baseline) en voor de drie varianten. De scenarioaannname van een lagere energievraag in TRANSFORM in vergelijking met ADAPT leidt tot lagere systeemkosten voor TRANSFORM. De verschillen van de systeemkosten ten opzichte van baseline zijn zichtbaar gemaakt in Figuur 3.13. Bij de varianten veranderen de systeemkosten met name in 2035 en 2040; die veranderingen in 2045 en 2050 zijn veel geringer. Dat is consistent met de veranderingen in de BKG-emissies (paragraaf 3.2.1) en het energiegebruik (paragraaf 3.2.2).

Doordat in variant 1a de BKG-emissies van de ESR-sector hoger zijn dan die in de baseline worden meer fossiele brandstoffen gebruikt en minder hernieuwbare energiebronnen. Bij de veronderstelde prijzen voor fossiele brandstoffen leidt dat in beide scenario's tot lagere systeemkosten. In variant 1b worden de hogere BKG-emissies van de ESR-sector gecompenseerd met lagere emissies in de ETS-sector. Dat leidt bij het ADAPT-scenario per saldo tot lagere systeemkosten, maar bij TRANSFORM in 2035 tot hogere systeemkosten en in 2040 is het verschil met de baseline nagenoeg nihil. De totale jaarlijkse systeemkosten zijn voor variant 2b, waarbij de BKG-emissies van de ESR-sector lager zijn dan bij de baseline en geen compensatie plaatsvindt, hoger voor beide scenario's in 2035 en 2040.

De resultaten zijn sterk afhankelijk van de veronderstelde energieprijzen voor fossiele brandstoffen. In de berekeningen is uitgegaan van projecties voor fossiele brandstofprijzen uit de KEV 2020 voor 2030 en worden deze prijzen na 2030 constant verondersteld. Door geopolitieke ontwikkelingen zijn fossiele brandstofprijzen in 2022 fors gestegen. Het is onzeker wat dit betekent voor de prijzen in 2030 en daarna. Worden hogere fossiele brandstoffen verondersteld dan zal dit de resultaten sterk kunnen beïnvloeden. Zo zal het kostenverschil van variant 1a met de baseline veel kleiner kunnen worden. De verschuiving van hernieuwbaar naar fossiele energiebronnen zal dan ook kleiner zijn of nauwelijks plaatsvinden.



Figuur 3.12 Totale jaarlijkse systeemkosten (ADAPT BaseSplit 2030 = 100%)



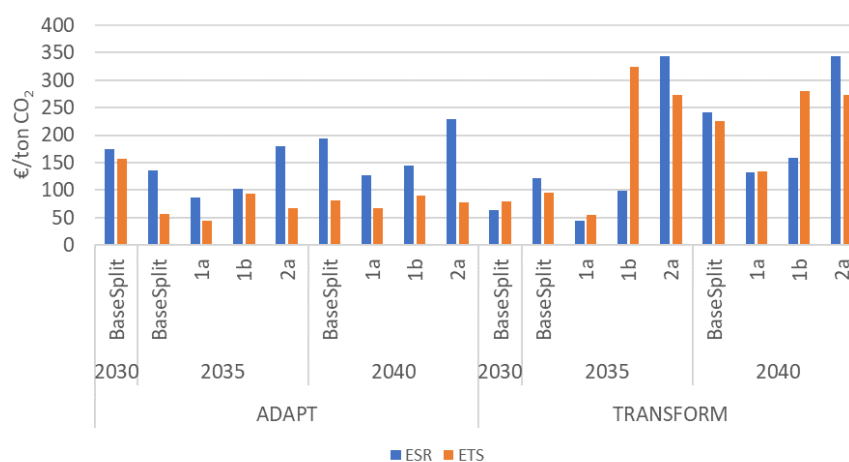
Figuur 3.13 Verschil totale jaarlijkse systeemkosten ten opzichte van BaseSplit

3.2.8

CO₂-schaduwprijs

De CO₂-schaduwprijs geeft de kosten weer per Mton CO₂ van de reductieoptie met de hoogste kosten die wordt ingezet om broeikasgassen te reduceren (marginale reductieoptie).

Figuur 3.14 toont de CO₂-schaduwprijs voor de ESR- en de ETS-sectoren. De CO₂-schaduwprijs is in het ADAPT-scenario voor de ESR-sector hoger dan de ETS-sector, zowel voor BaseSplit (baseline) als de varianten. Voor het TRANSFORM-scenario is dit beeld anders. Dit heeft vooral te maken met de hogere ambities van dit scenario ten aanzien van verduurzaming van grondstoffen en het beperktere gebruik van CO₂-opslag in vergelijking tot ADAPT. In de baseline is in 2030 de CO₂-schaduwprijs voor de ETS-sector iets hoger dan die voor de ESR-sector; in 2035 en 2040 is het omgekeerde het geval. In variant 1b, waarbij de ETS-sector de hogere emissies in de ESR-sector compenseert, worden in TRANSFORM meer innovatieve technologieën toegepast. Dit heeft een hogere CO₂-schaduwprijs tot gevolg in 2035 en 2040.



Figuur 3.14 CO₂-schaduwprijs voor ESR- en ETS-sectoren

Referenties

- Europese Commissie. (2020). Stepping up Europe's 2020 climate ambition. EU COM(2020) 562 Final.
- Europese Commissie (2021). Amending Regulations (EU) 2018/841. EU COM(2021) 554.
- KEV. (2021). *Klimaat en Energieverkenning 2021*. PBL.
- Regeerakkoord (2021). Omzien naar elkaar, vooruitkijken naar de toekomst - Coalitieakkoord 2021-2025. VVD, D66, CDA en ChristenUnie.
- Scheepers, M., Gamboa Palacios, S., Janssen, G., Moncada Botero, J., Stralen, J. v., Oliveira Machado dos Santos, C., & Uslu, A. W. (2022). *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.
- Scheepers, M., Palacio, S., Jegu, E., Nogueira, L., Rutten, L., Stralen, J. v., & K., W. (2020). *Towards a sustainable energy system for the Netherlands in 2050*. TNO 2020 P 10338.
- Stralen, J., Dalla Longa, F., Daniëls, B., Smekens, K., & Zwaan, B. v. (2021). OPERA: a New High-Resolution Energy System Model for Sector Integration Research. *Environmental Modelling & Assessment*, 873-889.
- Werkgroep Disconteringsvoet (2020).