De rol van energiebesparing in het energiesysteem

Kwantificering van de multiple benefits van energiebesparing

TNO Publiek ⟩ TNO 2025 R11063
Mei 2025

Energy & Materials Transition
www.tno.nl
+31 88 866 23 45
info@tno.nl

TNO 2025 R11063 – Mei 2025

De rol van energiebesparing in het energiesysteem

Kwantificering van de multiple benefits van energiebesparing

Auteurs	Marijke Menkveld, Floris Taminiau, Joost Gerdes en Joost van Stralen
Rubricering rapport	TNO Publiek
Aantal pagina's	53 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	0
Programma	Dit onderzoek is gefinancierd met subsidie van het Ministerie van Klimaat en Groene Groei

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.

© 2025 TNO

Samenvatting

Aanleiding en onderzoeksvragen

Het Ministerie van Klimaat en Groene Groei wil inzicht in de rol van energiebesparing in het energiesysteem op de lange termijn. Het is duidelijk dat energiebesparing kan bijdragen aan een reductie van broeikasgasemissies, een betaalbare energierekening en strategische onafhankelijkheid, maar een kwantificering ontbreekt. Dit onderzoek richt zich op twee deelvragen:

1. Wat zijn de mogelijkheden om het energieverbruik in Nederland te verminderen na 2030?
2. Welke rol speelt energiebesparing in het realiseren van een betaalbaar, betrouwbaar en duurzaam energiesysteem? Met andere woorden: wat zijn de *multiple benefits* van energiebesparing?

In dit onderzoek verstaan we onder energiebesparing alles wat het energieverbruik vermindert, omdat dit past bij de EED doelen. De Europese Energy Efficiency Directive (EED) verplicht de EU-lidstaten hun gezamenlijke finaal en primair energieverbruik te verminderen met 11,7 procent ten opzichte van de prognoses voor het energieverbruik in 2030 in het EU-referentiescenario 2020. Finaal energieverbruik is het energieverbruik bij eindverbruikers en primair energieverbruik is het totale energieverbruik inclusief omzettingsverliezen aan de aanbodzijde van het energiesysteem. Voor Nederland betekent de EED een finaal energieverbruik van maximaal 1.609 petajoule (PJ) en een primair energieverbruik van maximaal 1.935 PJ in 2030. Deze getallen geven context aan de orde van grootte van energiebesparing die in dit rapport besproken wordt. Er zijn in Europa voor de periode na 2030 nog geen doelen vastgesteld met betrekking tot energiebesparing.

Aanpak

Dit onderzoek kwantificeert de rol van energiebesparing op de lange termijn door te berekenen hoe veel energiebesparing in de toekomst wordt toegepast in scenario's voor het Nederlandse energiesysteem in 2040. Als basis gebruiken we de scenario's ADAPT- en TRANSFORM van TNO die in 2024 geactualiseerd zijn. Meer informatie en data over de scenario's is te vinden op de website van energy.nl: https://energy.nl/publications/scenariostudie-energiesysteem/.

Het scenario ADAPT is een toekomstbeeld dat uit gaat van behoud van huidige industriële activiteit en consumptie, relatief veel CO_2-afvang en -opslag (Carbon Capture and Storage; CCS) en gebruik van fossiele brandstoffen, oftewel: *blijven doen wat we doen maar technologisch aanpassen*. Het scenario TRANSFORM is een toekomstbeeld dat uit gaat van meer grootschalige transformatie naar duurzame energiebronnen, minder industriële productie, een groeiende dienstensector en minder voertuigkilometers in mobiliteit door leefstijlverandering, weinig CCS en vergaande eisen aan hergebruik van grondstoffen en verduurzaming van bunkerbrandstoffen, oftewel: *samen transformeren naar een nieuw duurzaam energiesysteem*. Beide toekomstbeelden bereiken klimaatneutraliteit in 2050 en 80% broeikasgasemissiereductie in 2040 ten opzichte van 1990, maar via verschillende routes.

Om antwoord te geven op de vraag wat de mogelijkheden zijn om de nationale energievraag op de lange termijn te verminderen voeren we een analyse uit die bestaat uit drie stappen.

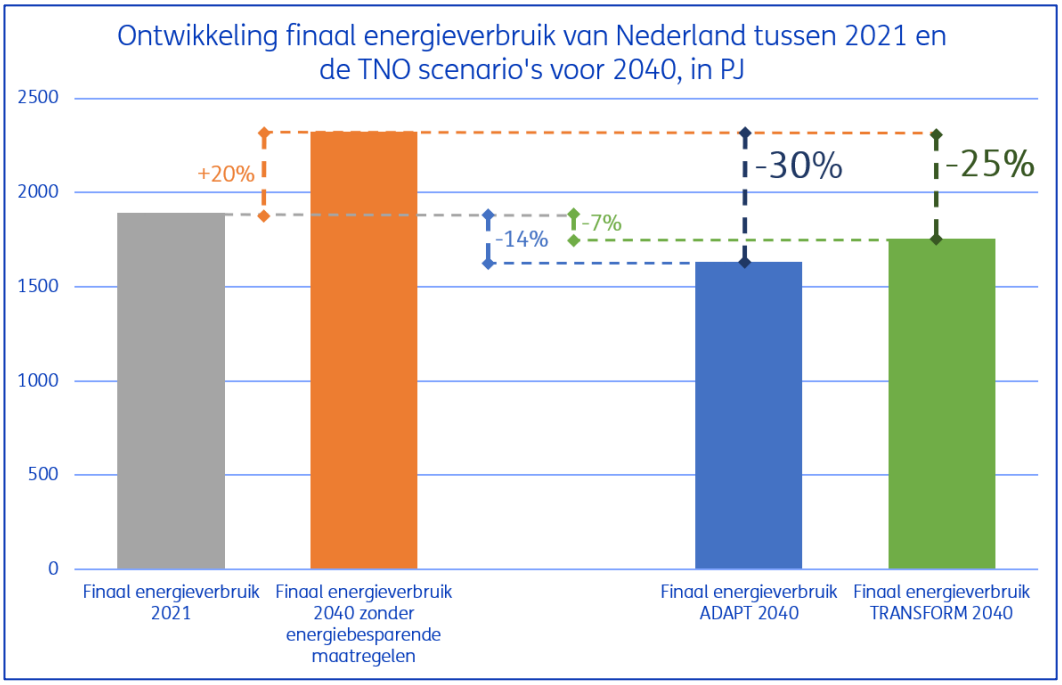
Ten eerste kwantificeren we het volume van energiebesparing in beide scenario's. Hiermee krijgen we inzicht in de bijdrage van energiebesparing aan de ontwikkeling van het energieverbruik in deze uiteenlopende toekomstbeelden. Ten tweede kan er, naast de energiebesparing die in de scenario's wordt toegepast, meer potentieel zijn. Zo zien we bijvoorbeeld dat in de scenario's in 2040 nog niet alle huizen geïsoleerd of alle voertuigen geëlektrificeerd zijn. In dit onderzoek kwantificeren we ook dit onbenutte energiebesparingspotentieel. Dit geeft inzicht in het maximale potentieel dat te behalen is met technologische aanpassingen. Ten derde is er besparingspotentieel door leefstijlverandering, zoals minder vaak en/of minder ver vliegen, in kleine(re) auto's rijden en meer openbaar vervoer en de fiets gebruiken. Om ook dit potentieel, waar mogelijk, te kwantificeren leunen we op een ander TNO onderzoek: *Het potentieel van leefstijlverandering*.

In het Nationaal Plan Energiesysteem (NPE) zijn acht publieke belangen vastgesteld voor het energiesysteem van nu en in de toekomst. Om antwoord te geven op de vraag van de multiple benefits van energiebesparing analyseren we in dit onderzoek hoe energiebesparing bijdraagt aan deze publieke belangen. Energiebesparing kan bijvoorbeeld de afhankelijkheid van import van energiedragers verminderen. Ook kan energiebesparing bijdragen aan het verhogen van de leveringszekerheid, een betaalbare energierekening voor huishoudens, reductie van broeikasgasemissies, het verbeteren van de kwaliteit van de leefomgeving, de importafhankelijkheid van materialen en een rol spelen bij participatie, rechtvaardigheid en economische kracht. Deze bijdragen kwantificeren we waar mogelijk met gebruik van het volume van de energiebesparing in de toekomstbeelden ADAPT en TRANSFORM.

Resultaten besparingspotentieel 2040

In dit onderzoek komen we tot de conclusie dat er een aanzienlijk potentieel is om het finaal energieverbruik in Nederland richting 2040 te verminderen. Alle sectoren kunnen bijdragen aan het verminderen van het finaal energieverbruik waardoor deze in 2040 lager kan zijn dan nu. Deze conclusie is gebaseerd op de volgende bevindingen.

Energiebesparing zorgt in de scenario's ADAPT en TRANSFORM voor 25 tot 30% minder **finaal energieverbruik in 2040.** Door een groei van het aantal woningen en vervoerskilometers en de groei van (industriële) activiteiten of diensten kan het energieverbruik richting 2040 bij gelijkblijvende efficiëntie met ruim 20% stijgen. Energiebesparing – bijvoorbeeld in de vorm van elektrische auto's, het isoleren van woningen en efficiëntieverbeteringen in de industrie en glastuinbouw – zorgt ervoor dat de energievraag niet stijgt met ruim 20% maar juist daalt met 14% in ADAPT en 7% in TRANSFORM ten opzichte van 2021. Ten opzichte van een scenario zonder energiebesparende maatregelen daalt het energieverbruik in de scenario's ADAPT en TRANSFORM met 30% in ADAPT en 25% in TRANSFORM, zie Figuur s.1. In totaal gaat het om een besparing door technologische maatregelen van 690 PJ in ADAPT en 546 PJ in TRANSFORM. De leefstijlveranderingen die in het toekomstbeeld TRANSFORM aangenomen worden leiden ook tot een lagere energievraag, namelijk door minder industriële productie, minder wegverkeer en minder vliegverkeer. Deze leefstijlveranderingen verminderen de energievraag met 175 PJ, waardoor de totale energiebesparing in TRANSFORM vergelijkbaar is met die in ADAPT.



Figuur S.1: De ontwikkeling van het finaal energieverbruik van Nederland tussen 2021 en de TNO scenario's voor 2040.

Naast efficiëntieverbetering zorgt elektrificatie voor een aanzienlijke besparing op het finaal energieverbruik. In de scenario's ADAPT en TRANSFORM wordt ongeveer 270 PJ aan besparing op finaal energieverbruik behaald door efficiëntieverbetering. Dit komt vooral door het isoleren van woningen en gebouwen. Verder zorgen energiezuinige apparaten en energie-efficiënte processen in de industrie en landbouw voor energiebesparing. De rest van de besparing op finaal energieverbruik wordt bereikt door elektrificatie, ongeveer 419 PJ in ADAPT en 234 PJ in TRANSFORM. Elektrificatie wordt primair ingezet voor emissiereductie en verhoogt het elektriciteitsverbruik. Omdat sommige belangrijke elektrische processen veel efficiënter zijn dan processen gebaseerd op (fossiele) brandstoffen levert dit ook een reductie van het finale energieverbruik. De energiebesparing door elektrificatie komt vooral door elektrificatie van personen- en goederenvervoer waarbij en door het installeren van elektrische warmtepompen in huishoudens. Daarnaast draagt elektrificatie van processen in de industrie bij aan energiebesparing. In TRANSFORM moet 100% van de bunkerbrandstoffen voor lucht- en scheepvaart in 2050 zonder broeikasgasemissies zijn tegenover 50% in ADAPT. Hierdoor is er in het TRANSFORM-scenario meer elektriciteit nodig is om met groene waterstof duurzame brandstoffen te produceren. Dit heeft als effect dat er in het TRANSFORM-scenario minder elektrificatie plaats vindt dan in het ADAPT-scenario.

Bovenop de besparing die in de scenario's ADAPT en TRANSFORM wordt toegepast is een **extra vermindering van het energieverbruik mogelijk van meer dan 10%.** Deze additionele besparing komt ten eerste door energiebesparingsopties die wel in de scenario's zijn opgenomen, maar in de scenario's niet volledig worden benut. Het gaat daarbij bijvoorbeeld om verder isoleren van alle woningen naar label A, toepassing van meer warmtepompen in de gebouwde omgeving en glastuinbouw, verdere elektrificatie, meer toepassing van efficiëntere processen in de industrie en complete elektrificatie van het personen- en goederenvervoer. Verder is er leefstijl-gerelateerde besparing mogelijk die niet in de scenario's wordt meegenomen, zoals kleinere en lichtere auto's, minder vaak en/of minder ver vliegen, anders reizen, kleiner wonen en het inregelen van installaties in gebouwen.

Samen telt dit ongerealiseerde besparingspotentieel op tot ongeveer 250 PJ, dat is meer dan 10% van het finaal energieverbruik in 2040 in ADAPT en TRANSFORM.

Twee onzekerheden voor het behalen van het EED-doel voor de vermindering van finaal energieverbruik zijn de toewijzingsmethode van het energieverbruik voor de productie van biobrandstoffen en de groei in het elektriciteitsverbruik van datacenters voor artificiële intelligentie (AI). Beide scenario's hebben in 2040 een hoger energieverbruik dan het EED-doel voor finaal energieverbruik in 2030 (1609 PJ). Als we het energieverbruik voor de productie van biobrandstoffen niet meetellen bij het finaal energieverbruik komt het finaal energieverbruik in 2040 wel onder de 1609 PJ uit. De scenario's gaan ervan uit dat de productie van biobrandstoffen in Nederland plaats vindt met bijbehorend energieverbruik. Volgens Eurostat en de IEA is het logisch om dit te laten tellen als eigen verbruik in de energiesector en niet als finaal energieverbruik. Deze manier van toewijzing wordt ook gebruikt bij de productie van olieproducten in raffinaderijen. Deze wijziging vereist een aanpassing van de internationale afspraken over energiestatistiek. Ook zou Nederland de biobrandstoffen kunnen importeren waardoor het energieverbruik voor de productie van die briobrandstoffen niet mee telt voor de Nederlandse doelstelling. Een tweede onzekerheid over het energieverbruik na 2030 is de groei van het elektriciteitsverbruik van datacenters voor AI. Een groeiend gebruik van AI kan leiden tot een forse groei van het elektriciteitsverbruik, tenzij daarbij ook efficiëntieverbetering van dataverwerking mogelijk is. In dit onderzoek gaan we uit van een trendmatige groei van het elektriciteitsverbruik van datacenters uit de TNO scenario's.

Resultaten rol energiebesparing in energiesysteem en multiple benefits

In dit onderzoek komen we tot de conclusie dat energiebesparing cruciaal is voor de ontwikkeling van een betaalbare, betrouwbare en duurzame energievoorziening op lange termijn. Die conclusie is gebaseerd op de volgende bevindingen over de multiple benefits van energiebesparing.

Energiebesparing is essentieel om de energierekening van huishoudens betaalbaar te houden. De energierekening van huishoudens kan richting 2040 aanzienlijk stijgen door hogere netwerktarieven voor elektriciteit en aardgas en door hogere gasprijzen als gevolg van het EU ETS-2 en de bijmengverplichting groen gas. In totaal kan de gemiddelde energierekening van huishoudens die betaald wordt aan energieleveranciers hierdoor stijgen met ruim 800 euro per jaar. Voor een huishouden dat energiebesparende maatregelen toepast – zoals isoleren, een elektrische warmtepomp en energiezuinige apparaten – kan de energierekening juist dalen met 400 euro per jaar, een besparing van ruim 1200 euro per jaar. We gebruiken hiervoor de energieprijzen in 2040 uit de raming van de Klimaat- en Energieverkenning 2024. De daadwerkelijke besparing op de energierekening in euro's is afhankelijk van de hoogte van de energieprijzen en -belastingen, waarbij hogere energieprijzen en -belastingen betekenen dat energiebesparing meer geld bespaart. Zo draagt energiebesparing bij aan een betaalbaar energiesysteem. Voor de energiebesparende maatregelen zijn investeringen nodig. Deze zijn niet verrekend in bovenstaande besparing.

Energiebesparing draagt bij aan een betrouwbaar energiesysteem door de strategische onafhankelijkheid te vergroten: in de scenario's vermindert energiebesparing de import **van aardgas en aardolie met 600 tot 800 PJ per jaar. Daarvan komt 65 tot 70% uit landen buiten de Europese Unie, Noorwegen of het VK.** De vraag naar aardgas daalt voornamelijk door energiebesparing in de gebouwde omgeving als gevolg van na-isolatie, goed geïsoleerde nieuwbouw en inzet van warmtepompen. Elektrificatie en efficiëntieverbetering in de industrie en glastuinbouw zorgen ook voor een aanzienlijk gereduceerde aardgasvraag. Omdat Nederland een groot deel van haar aardgas importeert

zorgt de gereduceerde vraag voor een verminderde importbehoefte van 412 PJ aardgas in ADAPT en 260 PJ in TRANSFORM. Dit is van dezelfde orde als de hoeveelheid aardgas die de Nederlandse gebouwde omgeving gebruikte in 2024 (300 PJ). Bijna 65% van de aardgasimport komt uit landen buiten de EU, Noorwegen of het VK. De vraag naar aardolie daalt voornamelijk door de elektrificatie van personen- en goederenvervoer. Omdat Nederland vrijwel al haar aardolie importeert zorgt de gereduceerde vraag voor een verminderde importbehoefte van 432 en 337 PJ aardolie in ADAPT en TRANSFORM respectievelijk. Dit is ongeveer gelijk aan de jaarlijkse Nederlandse aardolievraag voor het wegverkeer (410 PJ). Meer dan 70% van de geïmporteerde ruwe aardolie komt uit landen buiten de EU, Noorwegen of het VK. Zo draagt energiebesparing bij aan een betrouwbaar energiesysteem.

Energiebesparing is goed voor een kwart tot een derde van de emissiereductieopgave tot 2040 in de scenario's ADAPT en TRANSFORM. Door de groei van activiteiten zou de CO_2-uitstoot in de scenario's ADAPT en TRANSFORM – bij gelijkblijvende efficiëntie en zonder emissiereductiemaatregelen – toenemen naar 175 megaton in 2040. Echter, de daadwerkelijke CO_2-uitstoot in 2040 ligt in de scenario's rond de 30 megaton. Dit betekent dat er 145 megaton emissiereductie wordt behaald door een combinatie van energiebesparing (inclusief elektrificatie), de verduurzaming van elektriciteitsopwekking, de verduurzaming van brand- en grondstoffen en door CO_2-afvang en -opslag ten opzichte van de prognose met gelijkblijvende efficiëntie. Van deze 145 megaton emissiereductie is 42 megaton emissiereductie in ADAPT en 32 megaton emissiereductie in TRANSFORM het gevolg van energiebesparing. Zo draagt energiebesparing bij aan een duurzaam energiesysteem.

Energiebesparing verbetert de leefomgevingskwaliteit door minder ruimtegebruik voor energieproductie, minder stikstofuitstoot en minder emissies van luchtverontreinigende stoffen. Efficiëntieverbetering leidt tot minder vraag naar hernieuwbare elektriciteitsproductie, die veel ruimte in beslag neemt. Besparing op elektriciteitsverbruik in de vorm van efficiëntieverbetering zorgt in 2040 voor 64 PJ besparing in ADAPT en voor 67 PJ in TRANSFORM ten opzichte van 2021. Uitgedrukt in zonneweides met een jaarlijkse opbrengst van 0,9 GWh per hectare komt dat neer op ongeveer 200 km^2. Dat is iets minder dan de oppervlakte van de gemeente Amsterdam. Uitgedrukt in windmolens is deze elektriciteitsbesparing goed voor enkele honderden windmolens op zee minder of enkele duizenden windmolens op land.

Efficiëntieverbetering leidt tot minder stikstofuitstoot. Van de Nederlandse uitstoot naar de lucht bestaat ongeveer 65% uit ammoniak (NH_3) en 35% uit stikstofoxiden (NO_x). Stikstofoxide komt vrij bij de verbranding van fossiele brandstoffen, waarbij mobiliteit verantwoordelijk is voor ongeveer twee-derde van de totale uitstoot. Minder fossiel brandstofverbruik leidt dus direct tot minder NO_x-emissies. Zo draagt elektrificatie van auto's bij aan de vermindering van uitstoot van stikstofoxiden. Energiebesparing heeft geen effect op de uitstoot van ammoniak, omdat die voornamelijk afkomstig is uit dierlijke mest in de landbouw. Energiebesparing door elektrificatie van auto's, elektrificatie in industrie en energiezuinige woningen zonder houtkachel helpen ook emissies van andere luchtverontreinigende stoffen te verminderen, zoals fijn stof en zwaveldioxide.

Energiebesparing leidt tot minder investeringen in het energiesysteem. Energiebesparing in de vorm van efficiëntieverbetering leidt tot minder productie van energie. Efficiëntieverbetering leidt tot 64 PJ minder elektriciteitsvraag in ADAPT en 67 PJ in TRANSFORM. Uitgedrukt in bijvoorbeeld zon-op-land met een kostprijs van ongeveer 80€/MWh staat dit gelijk aan 1,4 tot 1,5 miljard euro minder aan investeringen. Efficiëntieverbetering die leidt tot minder aardgas- of aardolievraag leidt niet zozeer tot

minder productie in Nederland, maar wel tot minder vraag naar import van aardgas en aardolie. Daarbij zullen er minder investeringen nodig zijn in de infrastructuur voor deze import van fossiele energiedragers. Verder kan energiebesparing leiden tot minder investeringen in elektriciteitsnetten en energieopslag. Hier tegenover staan de extra benodigde investeringen in energiebesparende maatregelen. Het netto-effect is in dit onderzoek niet berekend.

Energiebesparing kan de kans op netcongestie verminderen wanneer het de piekvraag verlaagt of de elektriciteitsvraag in de tijd verschuift. Elektrificatie, in eerste instantie gedreven vanuit het doel om emissies te reduceren, verhoogt de kans op netcongestie. De grotere kans op netcongestie door bijvoorbeeld elektrificatie van het wagenpark kan deels verholpen worden door oplossingen zoals bi-directioneel- en uitgesteld laden. Ook kunnen kleinere en lichtere elektrische auto's zorgen voor minder piekvraag bij het opladen. Verder kan energiebesparing in de vorm van efficiëntieverbetering, zoals na-isolatie van woningen, bijdragen aan het verlagen van de piekvraag wanneer die woningen met een warmtepomp worden verwarmd. Op dezelfde manier kan ook efficiencyverbetering in de industrie en landbouw de kans op netcongestie beperken.

Energiebesparing vermindert de importafhankelijkheid van kritieke materialen en technologie. Elektrificatie vraagt de inzet van batterijen, elektrolysers, zonnepanelen, windmolens en elektrische auto's. Dit zorgt voor een verhoogde importafhankelijkheid van kritieke materialen en technologieën. Door efficiëntieverbetering kunnen dezelfde goederen en diensten geleverd worden met minder materialen en minder technologie. Met efficiëntere apparaten en installaties is ook minder elektriciteitsproductie nodig. Door leefstijlverandering kan ook de vraag naar batterijen, elektrische auto's en elektrolysers afnemen.

Energiebesparing vraagt om participatie van burgers en bedrijven en kan bijdragen aan het verdienvermogen van Nederland. Energiebesparing vraagt om betrokkenheid van burgers, bedrijven en instellingen die de keuze maken hun eigen energievraag te verminderen of anders in te vullen. De verduurzaming van de aanbodzijde van het energiesysteem is reeds in gang gezet en laat resultaten zien. In 2024 kwam meer dan de helft van de elektriciteitsopwekking in Nederland uit duurzame bronnen. Het verduurzamen van de vraagzijde van de energievoorziening, door energie efficiënter te gebruiken of door de vraag naar energie te verminderen, is een volgende stap. Daarbij zijn veel meer actoren betrokken dan bij de aanbodzijde. Het is belangrijk dat iedereen mee kan doen, wat beleid vereist dat aandacht heeft voor verschillende doelgroepen. Zo is het bijvoorbeeld belangrijk dat niet alleen huishoudens in een koopwoning hun huis kunnen na-isoleren, maar dat ook huurwoningen na-isolatie krijgen. Om ook het besparingspotentieel in sectoren als de glastuinbouw en industrie te benutten zijn acties van bedrijven nodig. Op de korte termijn is er een roep om bedrijven te compenseren voor hoge energieprijzen, maar op lange termijn kan een productieproces met een lager energieverbruik structureel bijdragen aan de concurrentiekracht van Nederland in een situatie met hoge energie- en CO_2-prijzen.

Inhoudsopgave

Samenvatting 4
1 Inleiding 11
2 Besparingspotentieel 14
2.1 Sector gebouwde omgeving 14
2.2 Sector industrie 20
2.3 Sector mobiliteit 24
2.4 Sector landbouw 28
2.5 Totaal finaal energieverbruik 31
2.6 Totaal primair energieverbruik 37
3 Multiple benefits van energiebesparing 39
3.1 Energieonafhankelijkheid 39
3.2 Leveringszekerheid, netcongestie en vraag naar flexibiliteit 42
3.3 Energierekening huishoudens 43
3.4 Reductie van broeikasgasemissies 46
3.5 Leefomgevingskwaliteit 48
3.6 Importafhankelijkheid materialen en technologieën 50
3.7 Participatie, rechtvaardige verdeling en economische kracht 50
3.8 Investeringen in het energiesysteem 51
Referenties 53

1 Inleiding

Aanleiding
Het Ministerie van Klimaat en Groene Groei wil inzicht in de rol van energiebesparing in het energiesysteem op de lange termijn. Duidelijk is dat energiebesparing kan bijdragen aan reductie van broeikasgasemissies, een betaalbare energierekening en importafhankelijkheid, maar een kwantificering ontbreekt. Die kwantificering helpt om duidelijk te krijgen wat het energiebesparingspotentieel op de lange termijn is, en welke bijdrage energiebesparing heeft in de energietransitie na 2030. Daarbij wordt energiebesparing breed gedefinieerd als alles wat leidt tot minder energieverbruik in Nederland, zoals energie-efficiëntie, *modal shifts* in mobiliteit en besparing door gedragsverandering.

Onderzoeksvragen
Dit onderzoek gaat over de rol van energiebesparing in het energiesysteem op lange termijn en richt zich op twee deelvragen:
1. Wat zijn de mogelijkheden om het energieverbruik in Nederland te verminderen op lange termijn, na 2030?
2. Welke rol speelt energiebesparing in het realiseren van een betaalbaar, betrouwbaar en duurzaam energiesysteem? Wat zijn de "multiple benefits" van energiebesparing?

Methode onderzoeksvraag 1: besparingspotentieel 2040
De scenariostudie van TNO die in 2024 is gepubliceerd (TNO, 2024) vormt het startpunt voor dit onderzoek. Deze studie betreft een update van eerder gepubliceerde scenario's ADAPT- en TRANSFORM. In die scenariostudie wordt maar beperkt aandacht besteed aan de resultaten voor het finaal en primair energieverbruik in 2040. Zo wordt niet in detail aangegeven welke besparingsopties in de scenario's worden toegepast. In dit onderzoek hebben we dat wel in beeld gebracht met een decompositie-analyse van de ontwikkeling van het finaal energieverbruik per sector en voor Nederland als totaal.

We maken per sector een decompositieanalyse voor de reeds gepubliceerde scenario's ADAPT en TRANSFORM die aangeeft hoe het finaal energieverbruik zich in de scenario's ontwikkelt tussen 2021 en 2040. De decompositie bestaat uit meerdere delen. Welk deel van de verandering in energieverbruik wordt veroorzaakt door groei van activiteiten (volume-effecten)? Welk deel komt door structuurveranderingen (bijvoorbeeld een verschillende groei van subsectoren die in energie-intensiteit verschillen of door minder warmtevraag als gevolg van warmere winters door klimaatverandering)? Welk deel komt door inzet van energiebesparing en emissiereductieopties met een grove verdeling naar verschillende opties? Dit vereist een nadere analyse van de resultaten van de OPERA-berekeningen[1] die voor de scenariostudie zijn gedaan.

Door een decompositieanalyse te maken krijgen we zicht op het energiebesparingspotentieel dat in de scenario's op de lange termijn benut wordt (in 2040). Het kan echter zijn dat in de scenario's niet het volledige besparingspotentieel wordt benut. Bijvoorbeeld: in 2040 zijn in het model nog niet alle woningen volledig geïsoleerd. Er is dus nog meer potentiële energiebesparing in de vorm van isolatie mogelijk. We brengen daarom ook in kaart in welke sector en bij welke opties er besparingspotentieel onbenut blijft. Tot slot

[1] Zie voor uitleg van OPERA en de energiesysteemscenario's: Scenario's voor klimaatneutraal energiesysteem | TNO

maken we een inventarisatie van besparingsopties die niet in de scenariostudie zijn meegenomen. Voorbeelden hiervan zijn aan leefstijl gerelateerde veranderingen zoals kleiner wonen, zuinig stoken en in kleinere auto's rijden.

Een beperking aan het onderzoek is dat we alleen de ontwikkeling van het energieverbruik tot 2040 hebben bekeken en niet tot 2050. De uitgevoerde decompositieanalyse is zeer tijdrovend. Binnen de tijd en het budget voor dit onderzoek bleken de extra analyses voor 2050 niet mogelijk. In 2050 zullen meer energiebesparende maatregelen toegepast zijn dan in 2040, omdat deze maatregelen vaak ook voor emissiereductie zorgen.

Een tweede beperking is dat er in dit onderzoek alleen naar de TNO-scenario's is gekeken. Er is geen vergelijking gemaakt met andere scenario's van andere organisaties, zoals bijvoorbeeld de Trajectverkenning Klimaatneutraal 2050 van PBL of de Netbeheer Nederland scenario's voor 2050 van netwerkbedrijven (PBL, 2024a; Netbeheer Nederland, 2025). Als in andere scenario's bijvoorbeeld meer wordt ingezet op elektrificatie dan zal het energieverbruik lager zijn dan in de TNO scenario's. Wordt in de anders scenario's meer ingezet op groen gas, biobrandstoffen en CCS dan zal het energieverbruik hoger zijn dan in de TNO scenario's.

Methode onderzoeksvraag 2: Welke rol speelt energiebesparing in het realiseren van een betaalbaar, betrouwbaar en duurzaam energiesysteem? Wat zijn de *multiple benefits* van energiebesparing?

In het Nationaal Plan Energiesysteem (NPE) zijn de publieke belangen bij het energiesysteem uiteengezet (Rijksoverheid, 2023). Deze zijn in Bollen et al (2025) in het kader van brede welvaart vertaald naar ontwerpprincipes. Naast deze ontwerpprincipes hebben we in dit onderzoek de rol van energiebesparing gezet, zie tabel 1.1. We gebruiken de TNO-scenario's om die rol ook te kwantificeren. We kijken naar:

- De bijdrage van energiebesparing op vermindering van energie-afhankelijkheid door minder import
- De bijdrage van energiebesparing aan leveringszekerheid, netcongestie en behoefte aan flexibele vraag
- Het effect van energiebesparing op de energierekening van eindverbruikers
- De bijdrage van energiebesparing aan de reductie van broeikasgasemissies
- Het effect van energiebesparing op leefomgevingskwaliteit, waaronder ruimtegebruik, stikstof en emissies naar lucht
- Het effect van energiebesparing op materiaalgebruik
- Het effect van energiebesparing op participatie, rechtvaardige verdeling en economische kracht
- Het effect op investeringen in het energiesysteem.

Leeswijzer

In hoofdstuk 2 beschrijven we de decompositieanalyse en het energiebesparingspotentieel op lange termijn. In hoofdstuk 3 beschrijven we de rol van energiebesparing in het energie-systeem en kwantificeren we de *multiple benefits* van energiebesparing aan de hand van de scenario's.

Tabel 1.1: Publieke belangen uit het NPE, de daaruit voortkomende ontwerpprincipes en de rol van energiebesparing daarin

Publiek belang energiesysteem	Ontwerpprincipes NPE	De rol van energiebesparing
Betrouwbaar	Leveringszekerheid (voorkomen stroomstoringen) Voorzieningszekerheid Robuustheid: diversificatie van bronnen, flexibiliteit, uitwisselbaarheid	Verminderen energie-import Piekvraag elektriciteit verlagen
Betaalbaar	Kosten voor gebruikers Maatschappelijke kosten Stabiliteit van energieprijzen	Verlaging energierekening gebruikers, inclusief kosten vervoer (zoals tanken en ticketprijzen) Minder investeringen in energiesysteem Vermindering energiearmoede Meer zelfvoorzienend zijn draagt bij aan stabiliteit van energieprijzen
Duurzaam	Klimaatdoelstelling Planetaire grenzen Bescherming natuurlijk en economisch kapitaal Bescherming biodiversiteit Circulair grondstoffengebruik	Broeikasgasemissiereductie Minder ruimtegebruik energiesysteem Minder verbruik fossiele energiedragers Minder stikstofuitstoot Minder uitstoot van fijn stof Minder materiaalgebruik energiesysteem
Veilig	Beperken menselijke veiligheidsrisico's Digitale veiligheid Statelijke en niet statelijke dreigingen Bescherming van het energiesysteem als kritieke infrastructuur en vitale functie voor de maatschappij	Minder energie-import
Leefomgevingskwaliteit	Ruimtebeslag Kwaliteit van milieu en directe leefomgeving: luchtkwaliteit, bodemkwaliteit, waterkwaliteit, geluidshinder, landschapskwaliteit i.r.t. gezonde leefstijl, en gezondheid	Minder ruimte nodig voor hernieuwbare energie, energieconversie en energieopslag Minder luchtverontreiniging
Participatie	Directe betrokkenheid van belanghebbenden bij beslissingen in de energietransitie: actieve rol burgers, bedrijven en organisaties Rechtvaardige procedures Directe en actieve rol als medeproducent van energie	Energiebesparing is iets wat burgers en bedrijven en organisaties zelf moeten doen, vraagt betrokkenheid bij energietransitie.
Rechtvaardigheid	Verdelingsvraagstukken: nationaal en nationaal/internationaal 'Just transition' Europese Commissie Eerlijke verdeling van lusten en lasten; de vervuiler betaalt Werken vanuit solidariteit: grootste maatschappelijk nut; extra oog voor groepen die moeilijk mee kunnen komen; bijdrage en profijt	Vindt energiebesparing bij alle doelgroepen plaats in verhouding tot hun energieverbruik?
Economische kracht	Toekomstig verdienvermogen: 'toekomstbestendige economische activiteiten'; competitief in mondiale context; ontwikkeling strategische sectoren Arbeidsaanbod: absoluut aanbod, inzet op capaciteiten, kennis en vaardigheden Hoogwaardige werkgelegenheid Goede inkomens Open Strategische Autonomie	Draagt energiebesparing bij aan concurrentiekracht en verdienvermogen van Nederland? Draagt energiebesparing bij aan hoogwaardige werkgelegenheid?

2 Besparingspotentieel

In dit hoofdstuk schetsen we de energiebesparing in de scenario's ADAPT en TRANSFORM van TNO tussen 2021 en 2040, laten we zien welk deel van het in het scenariomodel beschikbare besparingspotentieel onbenut blijft in de scenario's en schetsen we het besparingspotentieel van besparingsopties die niet in de scenario's zijn meegenomen. We presenteren de resultaten eerst per sector en aan het einde van dit hoofdstuk voor Nederland als geheel. We richten ons in dit hoofdstuk op het finaal energieverbruik bij eindgebruikers.

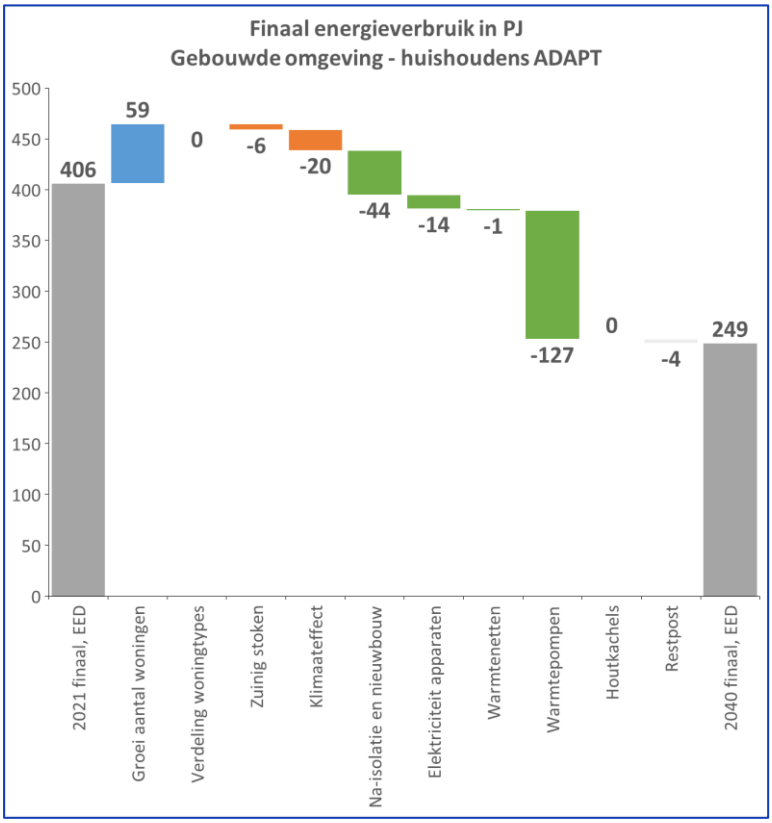
2.1 Sector gebouwde omgeving

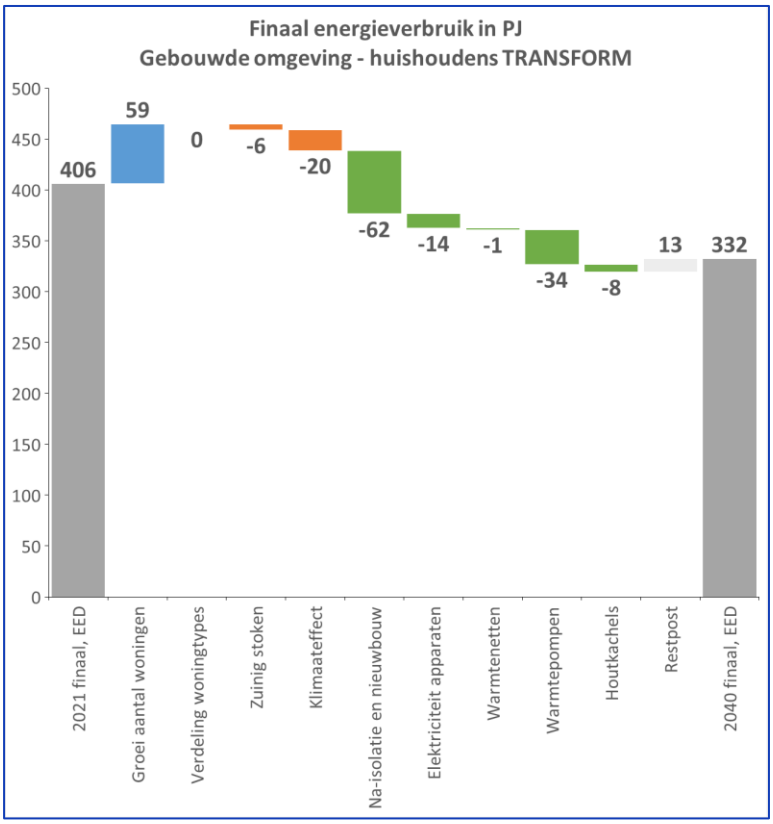
Energiebesparing in de scenario's ADAPT en TRANSFORM

In Figuur 2.1 schetsen we de ontwikkeling van het finaal energieverbruik van huishoudens in de periode 2021-2040 in een watervalgrafiek voor de scenario's ADAPT en TRANSFORM. Daarin kwantificeren we effecten op het energieverbruik van huishoudens door de toename van het aantal woningen, het effect van klimaatverandering (warmere winters), zuinig stoken, na-isolatie, elektriciteitsverbruik apparaten en verlichting, warmtenetten, warmtepompen en houtkachels.

In beide scenario's neemt het aantal woningen toe, waardoor het energieverbruik van huishoudens als er verder niets verandert zou stijgen. In de modellering is geen sprake van een verschuiven in het type woningen, bijvoorbeeld dat er relatief meer nieuwe appartementen worden gebouwd dan vrijstaande huizen. Omdat de scenario's uit gaan van de prognoses van de warmtevraag uit de KEV 2022 zit er al een kleine reductiecomponent in die toe te wijzen is aan zuinig stoken (PBL, 2022). Vervolgens is er een lagere warmtevraag door het klimaateffect, waardoor de winters warmer worden. De energiebesparing in de sector huishoudens komt door na-isolatie van bestaande woningen en de bouw van goed geïsoleerde nieuwbouwwoningen. Verder is er een besparingseffect door efficiëntere apparaten en verlichting binnenshuis en een besparingseffect van warmtepompen. Er is in de modellering geen verschil in het (geringe) aantal houtkachels dat gebruikt wordt ten opzichte van 2021.

In ADAPT worden meer warmtepompen ingezet dan in TRANSFORM. Uiteindelijk is het finaal energieverbruik in ADAPT in 2040 daardoor lager dan in TRANSFORM. In TRANSFORM is meegenomen dat het uitgeven van emissierechten in het emissiehandelssysteem van de EU in 2040 eindigt. Om 80% emissiereductie in 2040 te realiseren zien we in TRANSFORM daarom meer emissiereductie in sectoren die vallen onder het eerste Europese Emissiehandelssyteem (EU ETS-1; dit bevat de elektriciteitsproductie en grootschalige industriële installaties) en minder emissiereductie in sectoren buiten het EU ETS-1 zoals de gebouwde omgeving. Daarnaast is er in TRANSFORM meer elektriciteit nodig voor de productie van groene waterstof voor de productie van groene bunkerbrandstoffen, en is er daarom minder ruimte voor elektrificatie in eindgebruikssectoren.





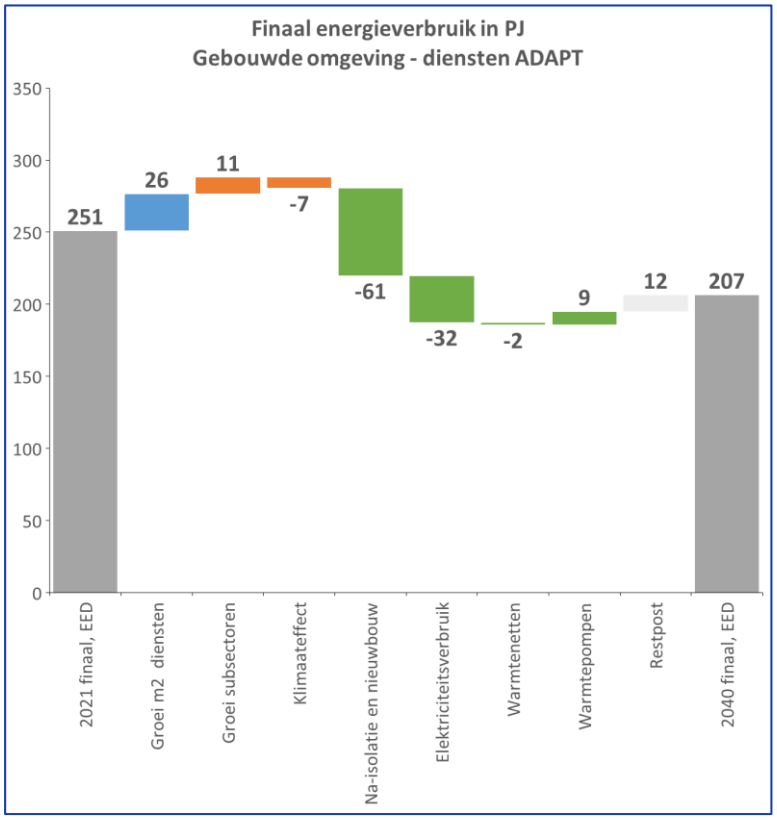
Figuur 2.1: Ontwikkeling finaal energieverbruik huishoudens 2021-2040

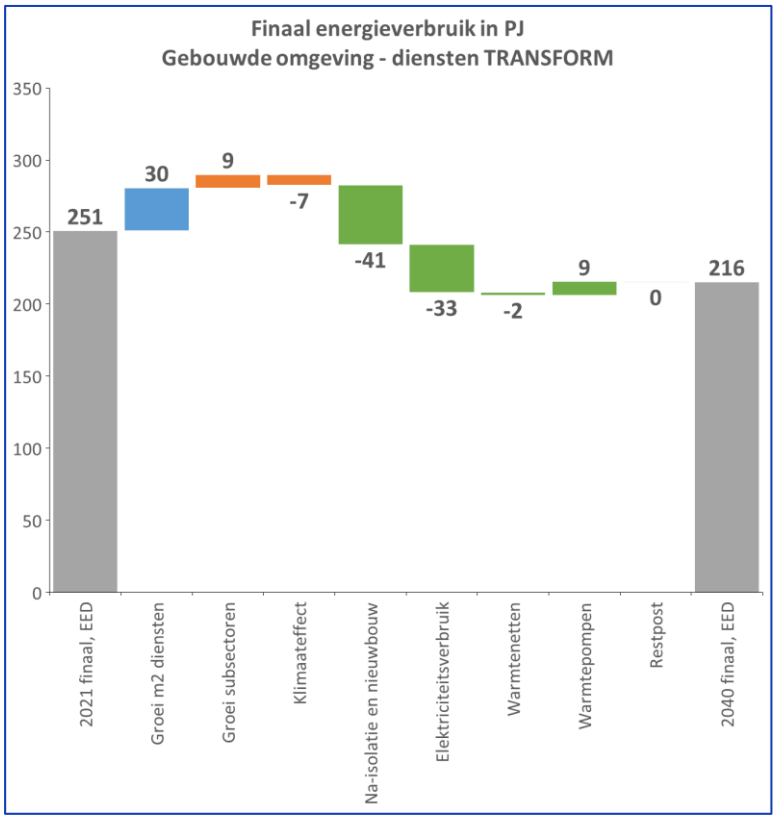
In Figuur 2.2 schetsen we de ontwikkeling van het finaal energieverbruik van de dienstensector in de periode 2021-2040 in een watervalgrafiek voor de scenario's ADAPT en TRANSFORM. Daarin kwantificeren we het effect op het energieverbruik van de dienstensector van de groei van het totaal aantal vierkante meter gebouwoppervlak, de groei van subsectoren die meer of minder energie-intensief zijn dan gemiddeld, het effect van klimaatverandering (warmere winters), na-isolatie, elektriciteitsverbruik van apparaten en verlichting, warmtenetten, warmtepompen en houtkachels.

In beide scenario's neemt het aantal vierkante meters gebouwoppervlakte in de dienstensector toe, waardoor het energieverbruik van de dienstensector zou stijgen als er verder niets zou veranderen. De groei van het vloeroppervlak in ADAPT is kleiner dan in TRANSFORM. Het energieverbruik stijgt harder dan op basis van het aantal vierkante meters verwacht mag worden omdat de groei met name plaats vindt in energie-intensieve sectoren zoals datacenters. Die stijging staat in Figuur 2.2 als "groei subsectoren". Deze stijging wordt gecompenseerd door een lagere warmtevraag door het klimaateffect (het effect van warmere winters door klimaatverandering). Door energiebesparing ten gevolge van na-isolatie van bestaande gebouwen en door de bouw van goed geïsoleerde nieuwe gebouwen daalt de warmtevraag nog verder. Daarnaast is er een besparingseffect van een lager elektriciteitsverbruik voor apparaten en verlichting. Een extra koudevraag als gevolg van warmere zomers door klimaatverandering mist in de scenario's niet meegenomen.

In het ADAPT-scenario zien we meer besparing door na-isolatie dan bij TRANSFORM (61 PJ bij ADAPT, 41 PJ bij TRANSFORM). In het TRANSFORM-scenario is het doel meegenomen om in de sectoren onder het EU ETS-1 de broeikasgasemissies tot nul te reduceren. Daardoor vindt meer emissiereductie plaats in die sectoren en minder in de andere sectoren zoals de dienstensector.

De scenario's laten in de dienstensector geen besparing zien door warmtepompen maar een ontsparing. Er worden minder warmtepompen ingezet in 2040 dan in 2021, in het scenario gebeurd verwarming van gebouwen in de dienstensector in 2040 nog met aardgasgestookte ketels. Dit effect komt doordat het model op systeemniveau kosten optimaliseert en dat er alleen voldaan hoeft te worden aan klimaatdoelen. Het model vindt dus een kostenoptimale oplossing waarbij warmtepompen in de dienstensector niet nodig zijn Dit is een modelresultaat in het scenario, in werkelijkheid worden steeds meer warmtepompen toegepast in de dienstensector.





Figuur 2.2: Ontwikkeling finaal energieverbruik diensten 2021-2040

Besparingspotentieel dat in scenario's nog onbenut blijft

We zien in het ADAPT-scenario circa 44 PJ besparing op de warmtevraag voor alle huishoudens samen door na-isolatie van bestaande woningen, sloop en nieuwbouw van woningen. Naast de besparing door na-isolatie van bestaande woningen zit in de 44 PJ besparing dus ook de besparing van nieuwbouwwoningen die door betere isolatie een lagere warmtevraag hebben dan de gemiddelde woning in 2021. In het ADAPT-scenario krijgen 2,5 miljoen woningen na-isolatie in de periode 2021-2040 waardoor ze in 2040 zijn verbeterd naar een label B. Door die na-isolatie zijn er in het ADAPT-scenario geen woningen meer met een label G, F of E in 2040 en halveert het aantal woningen met een label D of C. Meer energiebesparing is nog mogelijk door verbetering van deze 1,2 miljoen woningen D/C-label woningen naar een hoger label. In het TRANSFORM-scenario wordt nog meer bespaard door na-isolatie.

In beide scenario's zien we circa 14 PJ besparing op elektriciteitsverbruik door energiezuinige verlichting en energiezuinige apparaten als gevolg van efficiency eisen uit de Ecodesign-richtlijn en de reguliere vervanging van oude verlichting en oude apparaten door nieuwe. Dit is overgenomen uit de raming van de KEV 2022 (PBL, 2022).

In het ADAPT-scenario zien we een grote besparing (ongeveer 127 PJ) door de toename van het gebruik van warmtepompen tussen 2021-2040. In het ADAPT-scenario in 2040 wordt 119 PJ omgevingswarmte gebruikt door warmtepompen in woningen. In 2023 was dat 15,6 PJ. Dit betekent dat in het ADAPT-scenario het gebruik van warmtepompen in 2040 bijna acht keer groter is. In 2023 zijn er circa 560 duizend woningen met een warmtepomp. Bij de groei van het gebruik van omgevingswarmte in het ADAPT-scenario hoort dus ongeveer een aantal van circa 4 miljoen warmtepompen in woningen in 2040, bijna de helft van alle woningen in 2040. Wanneer alle ketels aan het einde van de levensduur vervangen zouden worden door een warmtepomp, dan zouden de aantallen nog hoger kunnen liggen.

In het TRANSFORM-scenario is de besparing door warmtepompen een stuk kleiner dan in ADAPT. In 2040 wordt ongeveer 38 PJ omgevingswarmte door warmtepompen in woningen gebruikt. Dit komt neer op ongeveer 1,4 miljoen warmtepompen. Dit effect komt deels doordat er in het TRANSFORM-scenario meer vraag is naar elektriciteit in andere sectoren. In de scenario's is het dus niet kostenoptimaal om in TRANSFORM bij alle huishoudens warmtepompen neer te zetten om nationale klimaatdoelen te behalen. Dat betekent wel dat er nog veel onbenut potentieel is. Voor de dienstensector zien we ook dat het besparingspotentieel van warmtepompen onbenut blijft. Er is in de scenario's geen actief beleid voor warmtepompen meegenomen, ook niet de eisen uit de EPBD IV richtlijn.

In 2040 is het finaal energieverbruik in het ADAPT-scenario 207 PJ, daarvan is 126 PJ elektriciteitsverbruik voor verlichting, apparaten en datacenters. Circa 80 PJ energieverbruik in de dienstensector is voor verwarming. Door die warmtevraag te produceren met een warmtepomp (rendement meer dan 300% in plaats van een CV-ketel met een rendement van 90% rendement kan circa twee derde van het energieverbruik voor verwarming worden bespaard (circa 50 PJ).

In de scenario's blijft het potentieel van zuinig stoken deels onbenut. In het TNO-onderzoek naar de potentie van leefstijlverandering (TNO, 2025) is het besparingspotentieel van de thermostaat een graadje lager zetten geschat op 8 PJ. In de scenario's is de schatting overgenomen uit de raming van de KEV 2022 die uitgaat van 6 PJ minder stoken bij huishoudens door de hoge aardgasprijzen op basis van de CBS-statistieken over de daling van het aardgasverbruik van huishoudens in 2022 en 2023 in vergelijking met 2021.

De warmtelevering via warmtenetten neemt in de scenario's ook toe, van 20 PJ in 2021 naar ruim 50 PJ in 2040. De groei van warmtenetten draagt nauwelijks bij een energiebesparing op finaal energieverbruik. Weliswaar is iets minder warmtelevering nodig dan aardgaslevering door het rendement van de ketel. Het verschil is echter klein en daarom hebben we dat niet meegenomen in de decompositieanalyse.

Besparingspotentieel dat niet in de scenario's wordt meegenomen
In de dienstensector kan ook bespaard worden door onbenutte ruimtes in de utiliteitsbouw niet te verwarmen, koelen, verlichten en ventileren. Besparingen van meer dan 20% blijken in de praktijk niet ongebruikelijk. (zie bijvoorbeeld RVO, 2017) Ook in de dienstensector is het mogelijk zuiniger te stoken, door optimalisatie en temperatuur instelling.

In de scenario's wordt dus wel elektriciteitsbesparing verondersteld doordat aan nieuwe apparaten en verlichting efficiencyeisen worden gesteld door de Ecodesign-richtlijn. Daarbij is een regulier vervangingstempo verondersteld. In de scenario's wordt niet meegenomen dat extra energiebesparing zou kunnen worden bereikt door snellere vervanging van oude apparaten en lampen.

Ook wordt in de scenario's geen rekening gehouden met kleiner wonen, bijvoorbeeld door in de nieuwbouw meer appartementen te bouwen en in de bestaande bouw woningen te splitsen. In het leefstijlonderzoek van TNO wordt geschat dat passend wonen bij de levensfase op gemiddeld 40 m^2 per persoon zou leiden tot een energiebesparing van 11 PJ (TNO, 2025).

Ook in de dienstensector zou de bezettingsgraad van gebouwen verhoogd kunnen worden waardoor mogelijk minder groei van het gebouwoppervlak nodig is. Denk hierbij aan meervoudig gebruik van gebouwen waarin een ruimte afwisselend door verschillende gebruikers en voor verschillende functies gebruikt wordt. Bijvoorbeeld: een sportzaal in een school die lokale sportverenigingen op weekavonden gebruiken en tijdens de schooluren voor de gymles gebruikt wordt.

In de scenario's wordt voor het elektriciteitsverbruik van datacenters de raming uit de KEV 2022 gebruikt. Inmiddels wordt een veel grotere groei van datacenters verwacht door onder andere AI, maar zijn er ook innovaties waardoor efficiencyverbetering in datacenters mogelijk is. Het is op dit moment niet duidelijk in hoeverre de groei van het elektriciteitsverbruik van datacentersdoor AI kan worden gecompenseerd door efficiencyverbetering door de inzet van innovatieve technologie.

Tabel 2.1 geeft een samenvatting van de besparingsopties in de gebouwde omgeving met besparingspotentieel dat in beide scenario's deels onbenut blijft of in beide scenario's geheel niet wordt meegenomen.

Tabel 2.1: Besparingspotentieel dat in beide scenario's deels onbenut blijft of niet wordt meegenomen in de sector gebouwde omgeving

Besparingspotentieel dat in de scenario's deels onbenut blijft	Besparingspotentieel dat in de scenario's niet wordt meegenomen
Nog meer na-isolatie	Onbenutte ruimtes niet verlichten, verwarmen, en ventileren, inregelen klimaatinstallaties en zuinig stoken in gebouwen in de dienstensector
Zuinig stoken huishoudens	Versneld vervangen elektrische apparaten
Warmtepompen	Kleiner wonen: nieuwbouw meer appartementen, bestaande woningen splitsen Meervoudig gebruik utiliteitsbouw
	Efficiencyverbetering bij datacenters

2.2 Sector industrie

Energiebesparing in de scenario's ADAPT en TRANSFORM

In Figuur 2.3 schetsen we de ontwikkeling van het finaal energieverbruik van de industrie in de periode 2021 – 2040 in een watervalgrafiek voor de scenario's ADAPT en TRANSFORM. Daarin kwantificeren we het effect van de totale groei van de productie van de industrie op het energieverbruik van de industrie, de verschillende groei van subsectoren in de industrie met verschillende energie-intensiteit, nieuwe productieprocessen zoals Direct Reduction of Iron (DRI) in de staalindustrie, de productie van biobrandstoffen in de chemie, CCS, elektrische boilers, ovens en warmtepompen (elektrificatie) en overige efficiencyverbetering of besparing op de warmte- en elektriciteitsvraag.

Het finaal energieverbruik in de industrie stijgt in het ADAPT-scenario door de groei van de totale productie, maar daalt in het TRANSFORM-scenario. Het TRANSFORM-scenario gaat uit van verminderde industriële activiteit door vraagvermindering als gevolg van leefstijlverandering. Er is dus minder productie van industriële producten, zoals staal, plastics en kunstmest. In Figuur 2.3 is dat vermeld onder "groei/krimp totale productie". De groei van de productie in de industrie in ADAPT is 15% in de periode 2021-2040, de daling in TRANSFORM is 12%. Deze daling van het energieverbruik in TRANSFORM als gevolg van verminderde industriële activiteit kan ook gezien worden als energiebesparing, maar dan dus door leefstijlverandering, het energieverbruik in TRANSFORM is daardoor 148 PJ lager dan in ADAPT.

De verschillende groei van subsectoren heeft in het TRANSFORM scenario een verhogend effect op het energieverbruik, de voedingsmiddelenindustrie groeit in dat scenario namelijk wel. Daarbij is ook meegenomen dat in beide scenario's de aluminiumproductie in Nederland vanaf 2022 is gestopt, wat een besparing oplevert van circa 3 PJ.
In beide scenario's wordt in de staalproductie gekozen voor een nieuwe productieproces via DRI (om emissies te reduceren), wat leidt tot 13 PJ extra finaal energieverbruik in ADAPT en 71 PJ in TRANSFORM. In het DRI-proces wordt weliswaar bespaard op energieverbruik in

hoogovens, maar dat bespaarde energieverbruik wordt niet tot het finaal energieverbruik van de industrie gerekend[2].

Tevens is er in beide scenario's extra energieverbruik voor de productie van ammoniak, methanol en bio-aromaten[3] uit biomassa en waterstof in de chemiesector. In de watervalgrafiek wordt dit *biobrand- en grondstoffen* genoemd. In TRANSFORM is die post het grootst omdat in dit scenario ook alle bunkerbandstoffen voor lucht- en scheepvaart vrij van broeikasgasemissies moeten zijn in 2050. De scenario's gaan ervan uit dat de productie van biobrand- en grondstoffen in Nederland plaats vindt met bijbehorend energieverbruik. In werkelijkheid zou Nederland die biobrand- en grondstoffen ook voor een deel kunnen importeren. Dit leidt tot grote inzet van biobrand- en grondstoffen wat niet energie-efficiënt is maar wel leidt tot forse emissiereductie. Volgens Eurostat en IEA zou het echter logisch zijn om dit te gaan meetellen bij de energiesector als eigen verbruik en niet als finaal energieverbruik, zoals we doen bij de productie van olieproducten in raffinaderijen. Zolang er echter nog geen duidelijke afspraken in Europa zijn over hoe met dit energieverbruik voor de productie van biobrandstoffen moet worden omgegaan, rekent CBS dit tot finaal energieverbruik. In de scenario's is verondersteld dat de groene waterstofproductie met elektrolyse buiten de chemie plaatsvindt en geen onderdeel is van het finaal energieverbruik van de industrie.

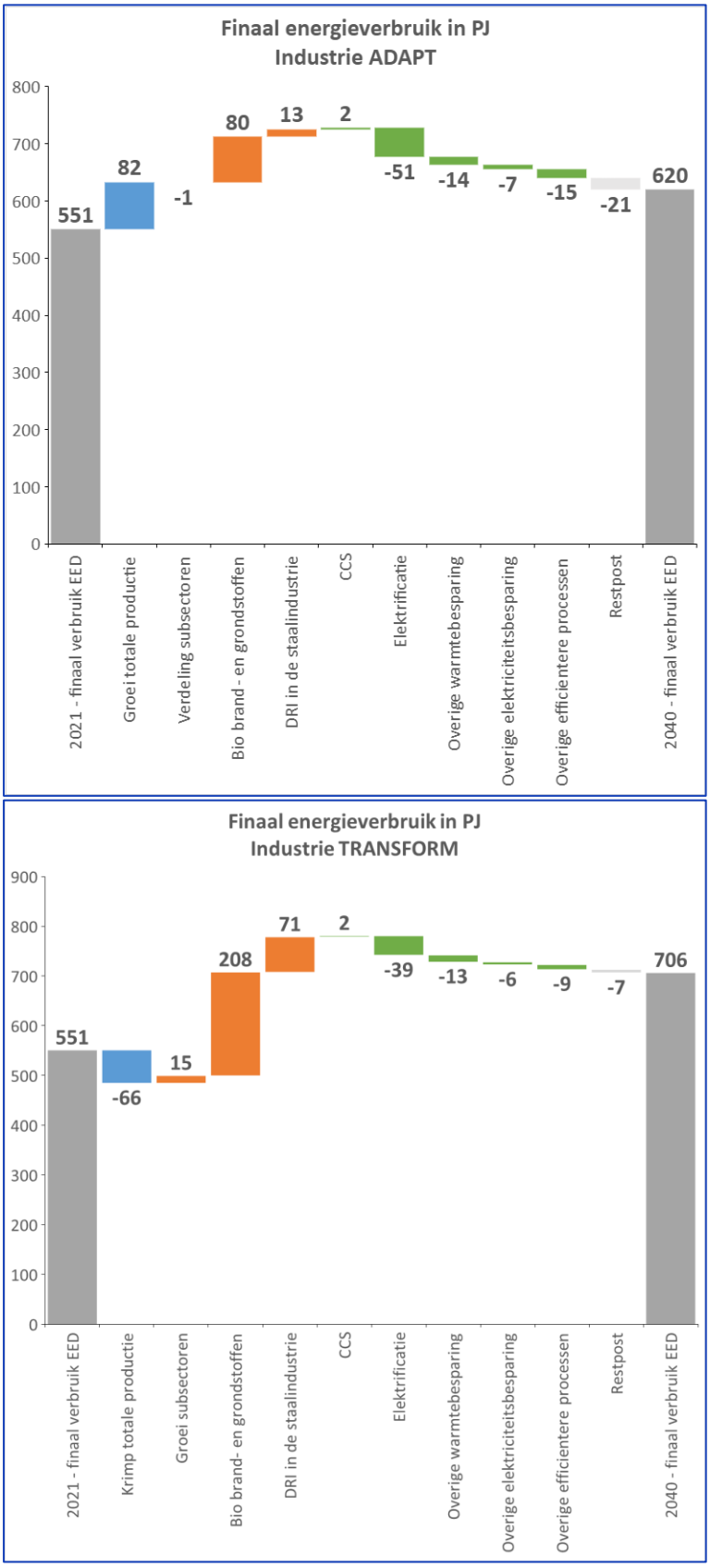
Het effect van CCS op het finaal energieverbruik is in beide scenario's beperkt. In de scenario's wordt veel CCS toegepast bij afvalverbrandingsinstallaties en raffinaderijen waarvan het energieverbruik niet meetelt bij finaal energieverbruik.

In beide scenario's is er energiebesparing in de vorm van elektrificatie. Dit zijn bijvoorbeeld elektrische boilers, elektrische ovens en warmtepompen om interne restwarmte uit processen op te waarderen. Verder is er energiebesparing op de warmtevraag en elektriciteitsvraag door procesoptimalisatie en efficiëntere processen voor de productie van chloor, glas, zout, ammoniak en olefinen[4]. Bij olefinen gaat het om de overstap van stoomkrakers naar een productieproces uit methanol en om de chemische of mechanische recycling van plastics. Bij ammoniak gaat het om de import van ammoniak in plaats van binnenlandse ammoniakproductie. Bij de productie van glas worden er efficiëntere ovens ingezet. Bij de productie van chloor worden andere membranen toegepast.

[2] CBS geeft aan dat van het extra energieverbruik in het DRI-proces in de staalindustrie het energieverbruik voor de reductie van ijzererts niet als finaal energieverbruik wordt gezien, maar als niet-energetisch verbruik dat in de EED doelstelling buiten beschouwing blijft. Dat onderscheid kon in dit onderzoek niet worden gemaakt.

[3] Aromaten zijn belangrijke bouwstenen voor de chemische industrie. Maar liefst 40% van alle chemicaliën zijn aromatisch van aard. Aromatische moleculen voegen essentiële functionaliteit toe aan producten zoals kunststoffen, harsen en coatings. Denk aan thermische stabiliteit en UV-bestendigheid. Op dit moment maakt de chemische industrie nog gebruik van aromaten op basis van fossiele grondstoffen.

[4] Olefinen worden veel gebruikt als grondstoffen bij de productie van chemische en polymeerproducten zoals plastic, wasmiddel, lijm, rubber en voedselverpakkingen. Ze bestaan uit een groep chemicaliën: ethyleen, propyleen en butadieen.



Figuur 2.3: Ontwikkeling finaal energieverbruik industrie 2021-2040

Besparingspotentieel dat in de scenario's deels onbenut blijft
Andere materiaal- of productkeuzen verderop in de keten, zoals bijvoorbeeld houtskeletbouw in plaats van beton of biologische landbouw, wordt in het ADAPT-scenario niet meegenomen, maar in het TRANSFORM-scenario wel. Het TRANSFORM-scenario gaat uit van gedragsveranderingen in de maatschappij waardoor er minder vraag is naar producten, zoals staal, plastics en kunstmest. Aangenomen wordt dat deze verandering in de hele EU plaatsvindt, zodat ook exporterende sectoren hiermee te maken krijgen. In Figuur 2.3 is dat vermeld onder "groei of krimp totale productie".

In de scenario's wordt het besparingspotentieel van elektrificatie en warmtepompen niet volledig benut. Er wordt in ADAPT nog circa 30 PJ en in TRANSFORM nog circa 40 PJ aardgas dan wel groen gas gebruikt. Wanneer in de processen waar dat gasverbruik plaats vindt ook elektrificatie wordt gerealiseerd dan leidt dat enkele tientallen PJ's extra besparing.

In de scenario's wordt niet het volledig potentieel van efficiëntere processen voor de productie van chloor, glas, zout, ammoniak en olefinen benut, maar wordt ook nog gebruik gemaakt van conventionele processen. Zo wordt in beide scenario's nog de helft van het glas en chloor op conventionele wijze geproduceerd. In ADAPT wordt al het zout op conventionele manier geproduceerd, in TRANSFORM 31%. In ADAPT wordt 85% van de ammoniak in de kunstmestindustrie zelf geproduceerd, in TRANSFORM is dat 62%.

Besparingspotentieel dat in de scenario's niet wordt meegenomen
Kennis over de totale potentie voor warmteterugwinning bij industriële installaties is fragmentarisch. Dit komt deels door de grote verscheidenheid aan processen die warmte op verschillende temperatuurniveaus nodig hebben en deels door de nog relatief beperkte noodzaak om warmte terug te winnen. Op basis van onze expertise en gesprekken met andere TNO-experts is onze indruk dat procesoptimalisatie en warmteterugwinning meer besparing kan opleveren dan nu in de scenario's is meegenomen. Een aansprekend voorbeeld is de fabriek van Phillip Morris in Bergen op Zoom die met warmteterugwinning met behulp van een warmtepomp 80% energiebesparing en emissiereductie kon bereiken[5]. Ook andere innovaties zoals nieuwe scheidingstechnieken of katalysatoren kunnen het energieverbruik verminderen. Tabel 2.2 geeft een overzicht.

Tabel 2.2: Besparingspotentieel dat in de scenario's deels onbenut blijft of niet wordt meegenomen in de sector industrie

Besparingspotentieel dat in de scenario's deels onbenut blijft	Besparingspotentieel dat in de scenario's niet wordt meegenomen
Elektrificatie (e-boilers, e-ovens)	Procesoptimalisatie en warmteterugwinning
Warmtepompen (opwaardering van restwarmte uit processen)	Innovaties zoals anders scheidingstechnieken (membranen) en katalysatoren
Andere materiaal- of productkeuze verderop in de keten (bijvoorbeeld houtskeletbouw i.p.v. beton, biologische landbouw zonder kunstmest)	

[5] Zie: Philip Morris wil CO_2-uitstoot decimeren met warmtepomp | Energeia

2.3 Sector mobiliteit

Energiebesparing in de scenario's ADAPT en TRANSFORM
In Figuur 2.4 schetsen we de ontwikkeling van het finaal energieverbruik van personenvervoer in de mobiliteit in de periode 2021-2040 in een watervalgrafiek voor de scenario's ADAPT en TRANSFORM. In de figuur kwantificeren we achtereenvolgens het effect op het energieverbruik van personenvervoer van de groei van reizigerskilometers, *modal shift* (meer gebruik van OV en fiets en minder autogebruik), een hogere bezettingsgraad en elektrificatie.

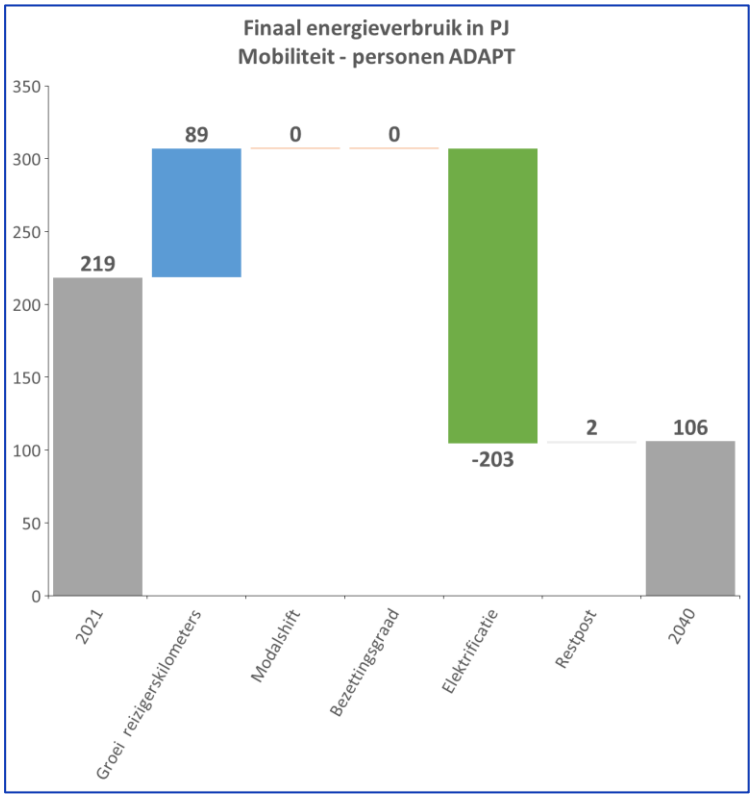
In beide scenario's wordt aangesloten bij de groei van het aantal reizigerskilometers uit de KEV 2022. Het TRANSFORM-scenario veronderstelt leefstijlverandering en daardoor 11% minder autokilometers, meer gebruik van OV en fiets en een hogere bezettingsgraad door carpoolen. Daardoor stijgt de energievraag van personenmobiliteit in het ADAPT-scenario harder dan in TRANSFORM. Omdat in het ADAPT-scenario meer elektrificatie plaats vindt dan in TRANSFORM is het energieverbruik in 2040 toch maar circa 10 PJ hoger.

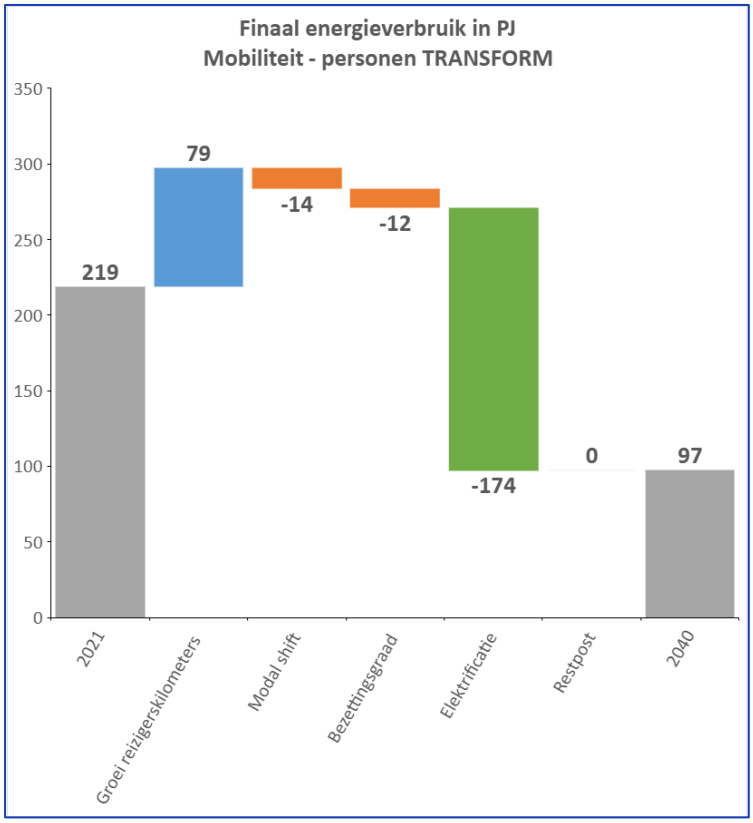
In Figuur 2.5 schetsen we de ontwikkeling van het finaal energieverbruik van goederenvervoer in de mobiliteit in de periode 2021-2040 in een watervalgrafiek voor de scenario's ADAPT en TRANSFORM. In de figuur kwantificeren we het effect op het energieverbruik van goederenvervoer van de groei van tonkilometers, modal shift, een betere benutting van laadcapaciteit (meer ton goederen vervoeren per kilometer), elektrificatie, efficiëntere dieselvrachtwagens en efficiëntere binnenvaartschepen (bijvoorbeeld door efficiëntere verbrandingsmotoren).

In beide scenario's wordt aangesloten bij de verwachte groei van de tonkilometers uit de KEV 2022 (PBL, 2022). In het ADAPT-scenario zien we een groei van energieverbruik door modal shift, doordat een groter deel van de groei van het goederenvervoer over de weg plaats vindt in plaats van via rail en binnenvaart. In het TRANSFORM-scenario is dat effect kleiner. Dat zijn veronderstellingen die als input bij de scenario's zijn gemaakt. In beide scenario's zien we slechts een zeer beperkte daling van het energieverbruik door betere benutting van de laadcapaciteit. In beide scenario's zien we energiebesparing door elektrificatie (vooral bij wegverkeer en maar zeer beperkt bij binnenvaart) en door efficiency verbetering van dieselvrachtwagens.

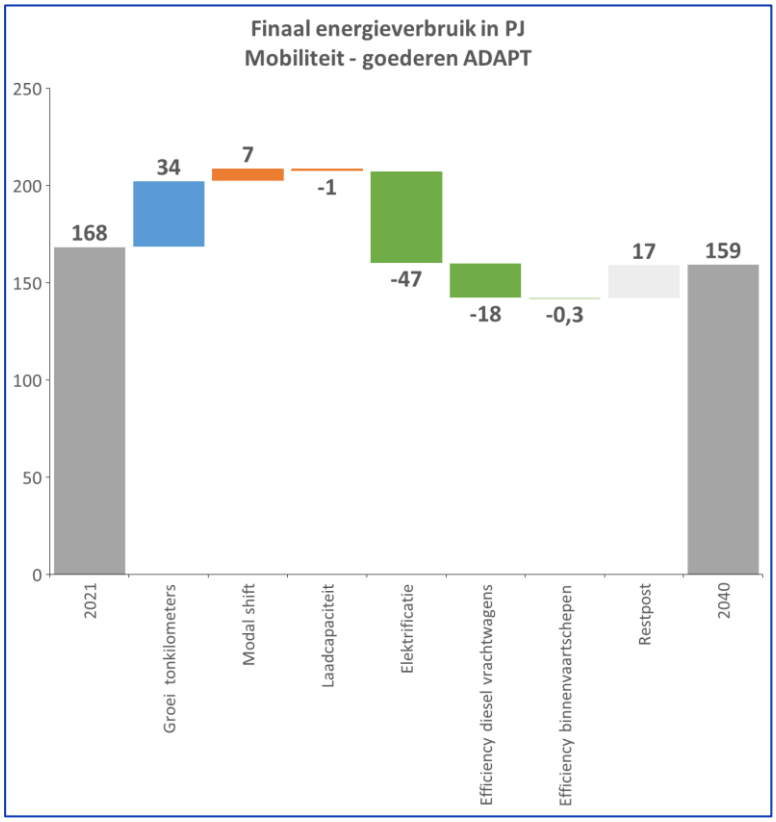
Naast personenmobiliteit en goederenvervoer is er energieverbruik in de luchtvaart en in mobiele werktuigen. Het energieverbruik in de luchtvaart stijgt in de scenario's van 102 PJ in 2021 naar 178 PJ in 2040 in het ADAPT scenario en naar 153 PJ in 2040 in het TRANSFORM-scenario. De stijging van het energieverbruik in de luchtvaart is het gevolg van de groei van het aantal vluchten die slechts zeer beperkt wordt gecompenseerd door efficiëntere vliegtuigen. De groei van het aantal vluchten is in TRANSFORM iets lager dan in ADAPT, vanwege de veronderstelling dat door leefstijlverandering mensen anders minder vliegreizen gaan maken

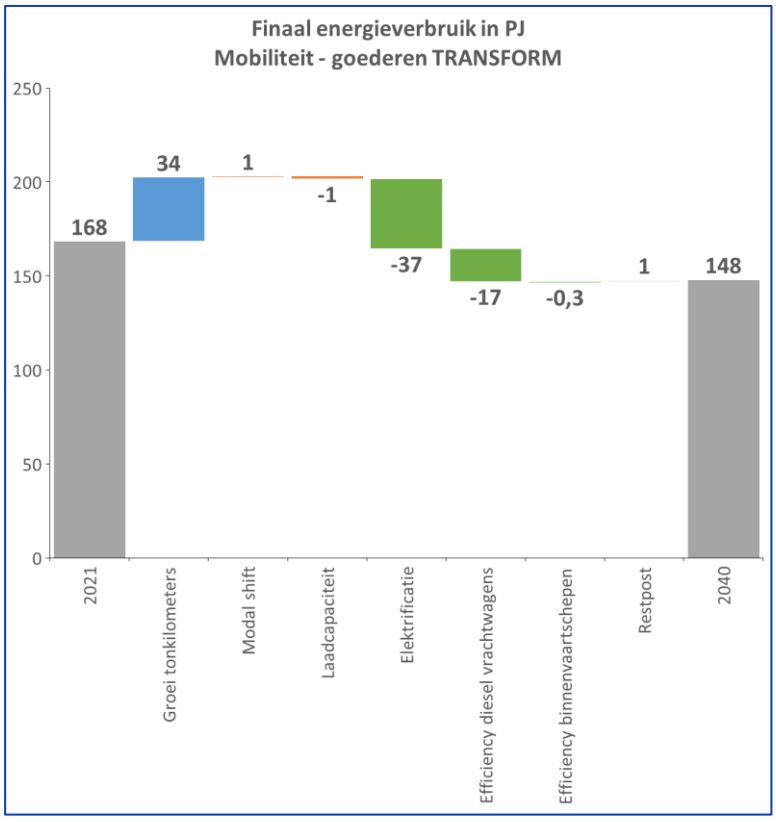
Het energieverbruik voor mobiele werktuigen daalt van 51 PJ in 2021 naar 27 PJ in 2040 in het TRANSFORM-scenario en 34 PJ in 2040 in het ADAPT scenario. De daling is het gevolg van elektrificatie.





Figuur 2.4: Ontwikkeling energieverbruik mobiliteit personen 2021-2040





Figuur 2.5: Ontwikkeling energieverbruik mobiliteit goederen 2021-2040

Besparingspotentieel dat in de scenario's nog deels onbenut blijft
In de scenario's ADAPT en TRANSFORM van TNO wordt in 2040 de elektrificatieoptie in personenauto's en goederenvervoer nog niet volledig benut. Dat hangt samen met de emissiereductie van 80% in 2040 en de kostenoptimalisatie in de scenario's naar de goedkoopste reductie opties.

In beide scenario's zien we in 2040 nog steeds 23 PJ brandstofverbruik van personenauto's (in 2021 was dat 195 PJ). Wanneer alle personenauto's in 2040 elektrisch zouden rijden, zou het energieverbruik voor personenvervoer nog eens 15 PJ lager zijn.

Daarnaast zien we in ADAPT nog 107 PJ brandstofverbruik van bestel- en vrachtwagens in 2040 en in TRANSFORM nog 85 PJ (in 2021 was dat circa 160 PJ). Wanneer alle bestel- en vrachtwagens in 2040 elektrisch zouden rijden, zou het energieverbruik voor goederenvervoer nog 50 à 60 PJ lager kunnen zijn.

In het scenario TRANSFORM wordt anders reizen zoals reizen met OV en fiets of carpoolen wel meegenomen, maar in het ADAPT scenario niet. In TRANSFORM levert dit een besparing op van 14 PJ. In het TNO onderzoek naar het potentieel van leefstijlverandering wordt geschat dat anders reizen, meer fietsen en lopen en minder autorijden een besparing kan opleveren van 8 PJ (TNO, 2025). Korte autoritten vervangen door fietsen levert circa 4,5 PJ besparing op (TNO, 2025).

In het scenario TRANSFORM is het brandstofverbruik in de luchtvaart in 2040 14 PJ lager dan in ADAPT door leefstijlverandering en de veronderstelling dat mensen minder gaan vliegen. De 15% verste vluchten die vertrekken vanaf Schiphol zijn verantwoordelijk voor 75% van de CO_2-emissie die hoort bij het brandstofverbruik dat op Schiphol wordt getankt. Het NLR stelt dat het aantal lange vluchten reduceren een enorme bijdrage levert aan emissiereductie (NLR, 2024). In TNO (2025) is het besparingspotentieel van lange vakantievluchten vervangen door korte vakantievluchten geschat op 33 PJ. Ter vergelijking: in 2021 was het brandstofverbruik voor de luchtvaart dat op Nederlandse vliegvelden wordt getankt 102 PJ. Voor het vervangen van vakantievluchten door een treinreis (voor bestemmingen waarvoor dat mogelijk is) berekent TNO (2025) een besparing van 5 PJ. Voor minder vaak vliegen, maar langer blijven berekent TNO (2025) een besparing van 11,6 PJ.

Besparingspotentieel dat in de scenario's niet wordt meegenomen
Veel besparingsopties worden in de scenario's niet meegenomen, zoals te zien in Tabel 2.3. Voor personenvervoer gaat het om minder reizen door thuiswerken of dichterbij het werk wonen. Voor goederenvervoer is er besparingspotentieel door meer vracht te vervoeren per schip en rail in plaats van over de weg of het gebruik van een elektrische bakfiets of kleinere bestelauto's bij pakketbezorging aan huis. Tot slot zou lokale producten consumeren kunnen bijdragen aan minder vraag naar goederenvervoer. Het energieverbruik in de luchtvaart zou kunnen verminderen door leefstijlverandering: lange vakantievluchten vervangen door kortere, een kortere vlucht vervangen door andere vervoerswijzen, minder vaak vliegen maar langer blijven.

In een onderzoek naar leefstijlverandering van TNO (2025) wordt het besparingspotentieel van een kleinere auto kopen geschat op 8,7 PJ.

Goederenvervoer over water en per spoor is veel zuiniger dan over de weg. Wegtransport heeft een energieverbruik per tonkilometer van circa 2,5 MJ, terwijl het energieverbruik van goederenvervoer per trein 0,35 MJ per tonkilometer is, en per schip 0,31 MJ per tonkilometer (Odyssee, 2025)

Tabel 2.3: Besparingspotentieel dat in de scenario's deels onbenut blijft of niet wordt meegenomen in de sector mobiliteit

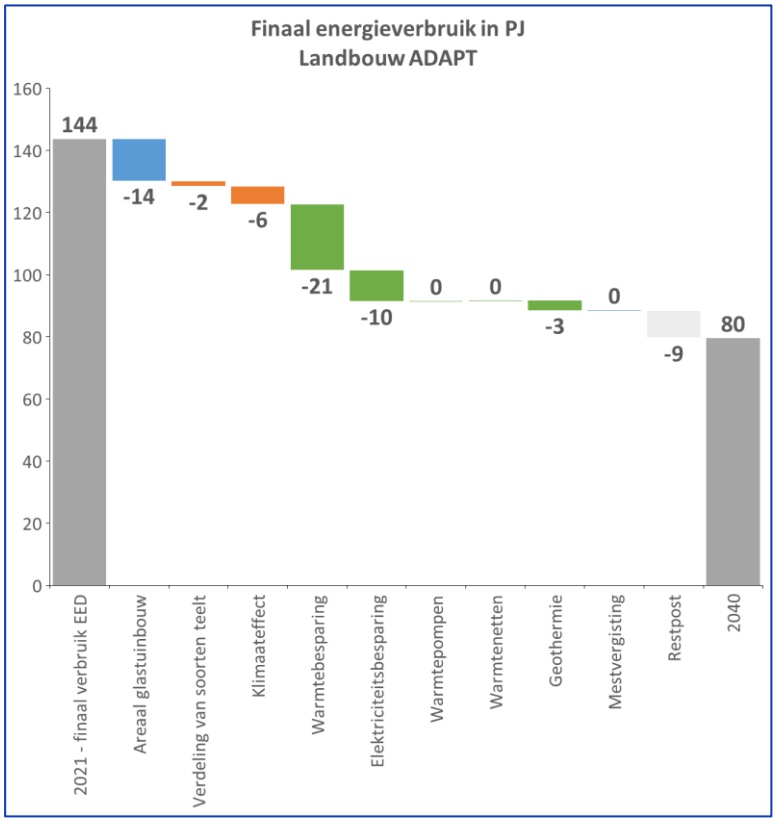
Besparingspotentieel dat in de scenario's deels onbenut blijft	Besparingspotentieel dat in de scenario's niet wordt meegenomen
Elektrificatie personen- , bestel- en vrachtauto's	Kleinere auto die lichter en zuiniger is
Anders reizen bijvoorbeeld met OV, fiets of lopen, carpoolen	Minder reizen door thuiswerken, staycation, dichter bij het werk wonen en steden anders inrichten, waardoor de vraag naar mobiliteit minder is ("desuburbanisatie")
Lange vakantievluchten vervangen door kortere, een kortere vlucht vervangen door andere vervoerswijzen, minder vaak vliegen maar langer blijven.	Meer vrachtvervoer per schip en rail in plaats van over de weg.
	Elektrische bakfiets/kleine elektrische bestelauto's voor pakketbezorging
	Locatie productie en verkoop van goederen dicht bij elkaar/lokale producten consumeren

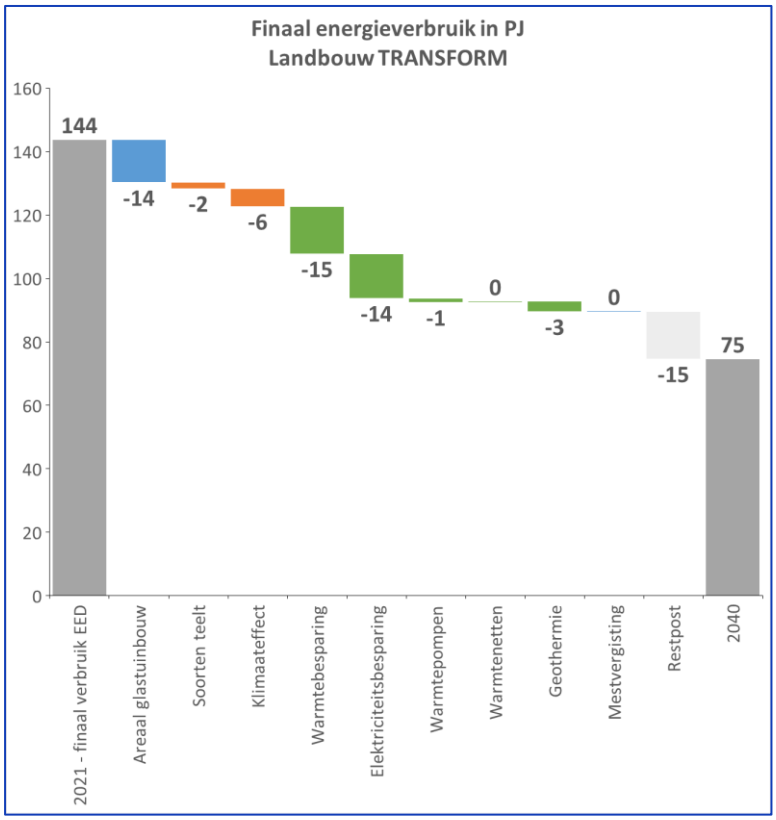
2.4 Sector landbouw

Energiebesparing in de scenario's ADAPT en TRANSFORM

In Figuur 2.6 schetsen we de ontwikkeling van het finaal energieverbruik van landbouw in de periode 2021-2040 in een watervalgrafiek voor de scenario's ADAPT en TRANSFORM. In het figuur kwantificeren we achtereenvolgens het effect op het finaal energieverbruik van de totale landbouw van verschillende factoren, zoals het effect van krimp van het areaal glastuinbouw, verschuiving naar soorten teelt die extensiever zijn, het klimaateffect (warmere winters door klimaatverandering), warmtebesparing, elektriciteitsbesparing en efficiency verbetering door geothermie.

In het energieverbruik van de landbouw heeft de glastuinbouw een aandeel van circa 80%. Daarom zijn voor het energieverbruik van de landbouw de ontwikkelingen in de glastuinbouw belangrijk. Het areaal glastuinbouw krimpt in de scenario's naar verwachting in de periode 2021 – 2040 met circa 10%. Deze verwachting is gebaseerd op de raming in de KEV 2022. De areaalontwikkeling op lange termijn is onzeker; de financiële draagkracht om te investeren in nieuwe kassen of om uit te breiden wordt bepaald door de uitgaven voor energie en arbeid en door de marktprijzen voor producten. Aangezien de Nederlandse glastuinbouw voornamelijk een exportgerichte sector is, spelen internationale marktontwikkelingen een grote rol (PBL, 2022). Daarnaast is er een kleine verschuiving naar extensievere teelten. In de scenario's wordt bespaard op warmtevraag in de glastuinbouw door de bouw van nieuwe kassen, Het Nieuwe Telen, isolatie, schermen, lage temperatuurverwarming en selectief ventileren. In de scenario's wordt bespaard op elektriciteitsverbruik in de glastuinbouw door LED-verlichting, selectief koelen, meet- en regeltechniek, efficiënte bevochtiging en distributiesystemen. In ADAPT vindt meer warmtebesparing plaats en in TRANSFORM meer elektriciteitsbesparing. Deze maatregelen besparen op het energieverbruik van de glastuinbouw. In de scenario's wordt gekeken naar het totale energieverbruik van de landbouw, inclusief de overige landbouw, zoals veeteelt en akkerbouw.





Figuur 2.6: Ontwikkeling energieverbruik landbouw 2021-2040

Besparingspotentieel dat in de scenario's deels onbenut blijft
In beide scenario's blijft een deel van het energiebesparingspotentieel onbenut. We zien bijvoorbeeld dat warmtepompen in de scenario's in de glastuinbouw niet worden toegepast. Dit effect komt doordat het model op systeemniveau kosten optimaliseert en dat er alleen voldaan hoeft te worden aan nationale klimaatdoelen. Het model vindt dus een kostenoptimale oplossing waarbij warmtepompen in de glastuinbouw niet nodig zijn. Dat neemt niet weg dat warmtepompen natuurlijk wel voor energiebesparing kunnen zorgen in de sector. In het ADAPT-scenario wordt vooral ingezet op geothermie en biogas. Wanneer meer warmtepompen worden gebruikt zou het finaal energieverbruik van de landbouw lager geweest zijn, omdat warmtepompen met een COP van 4 een besparing van 75% op de aardgasvraag mogelijk maken.

Ook wordt in de scenario's maar een beperkt potentieel van verschuiving naar energie-extensievere teelt meegenomen. Uit de trendmatige verdeling over de teelten blijkt dat vooral de kasoppervlakte voor groenten toeneemt, terwijl het areaal voor (snij)bloemen krimpt. Voor vaste planten blijft het areaal vrijwel constant.

Besparingspotentieel dat in de scenario's niet wordt meegenomen
Er is besparingspotentieel dat niet in de scenario's wordt meegenomen, zoals seizoensgroenten eten of importeren van producten die elders niet in een kas geteeld worden. Tabel 2.4 geeft een samenvatting van besparingsopties die in beide scenario's in de landbouw onbenut blijft of niet wordt meegenomen.

Tabel 2.4: Besparingspotentieel dat in beide scenario's onbenut blijft of niet wordt meegenomen in de sector landbouw

Besparingspotentieel dat in de scenario's deels onbenut blijft	Besparingspotentieel dat in de scenario's niet **wordt meegenomen**
LED-verlichting	Eten met het seizoen (producten die niet in kassen geteeld worden)
Isolatieschermen	Importeren van producten die elders niet in kassen geteeld worden
Het Nieuwe Telen	
Selectieve ventilatie en selectief koelen	
Lagetemperatuurverwarming en warmtepompen	
Verschuiving van energie-intensieve naar energie-extensieve teelt	

2.5 Totaal finaal energieverbruik

Energiebesparing in de scenario's ADAPT en TRANSFORM
Wanneer we de decompositieanalyses voor de verschillende sectoren bij elkaar optellen krijgen we een beeld van de ontwikkeling van het totaal finaal energieverbruik (zie Figuur 2.7).

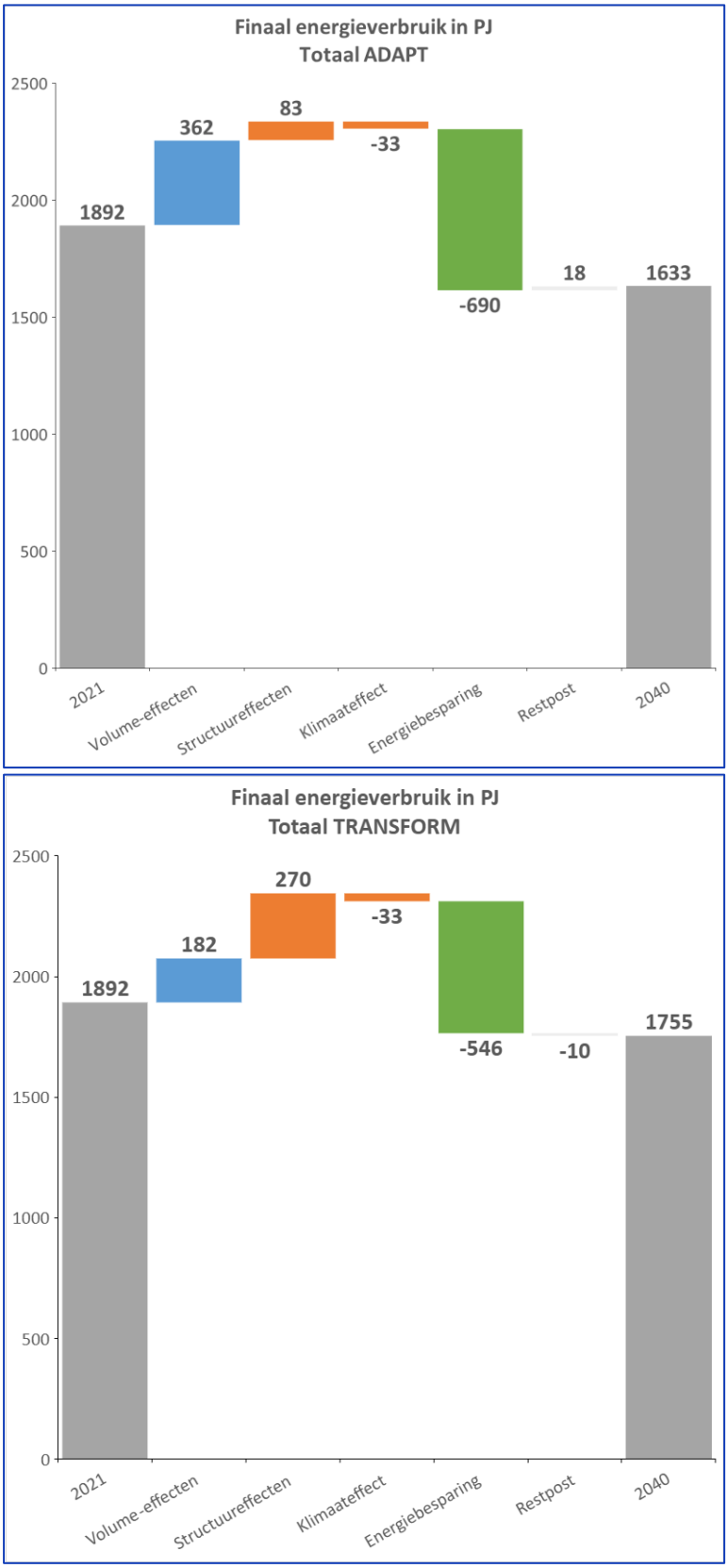
In beide scenario's zou het energieverbruik door groei van activiteiten stijgen, hoewel die groei in TRANSFORM kleiner is dan in ADAPT, vooral doordat in het TRANSFORM-scenario de productie in de industrie daalt door leefstijlverandering, terwijl deze in het ADAPT-scenario stijgt.

Door structuureffecten stijgt het energieverbruik nog meer, dit betreft met name een verschuiving naar energie-intensieve activiteiten die bij het finaal energieverbruik van de industrie worden gerekend, zoals biobrandstoffenproductie en DRI[6]. In het TRANSFORM-scenario zijn die structuureffecten veel groter dan in ADAPT omdat in TRANSFORM veel meer biobrandstoffen worden geproduceerd. In het TRANSFORM-scenario is de ambitie dat ook internationaal transport via luchtvaart en scheepvaart volledig emissievrij moet zijn in 2050.

In het TRANSFORM-scenario is verondersteld dat leefstijlverandering leidt tot minder vraag naar industriële producten zoals staal, plastics en kunstmest. In ADAPT groeit de productie in de industrie met 15% in de periode 2021-2040, in TRANSFORM daalt de productie in de industrie met 12%. Daardoor is het energieverbruik van de industrie in TRANSFORM 148 PJ lager dan in ADAPT. Daarnaast wordt in TRANSFORM door leefstijlverandering minder groei van mobiliteit verwacht dan in ADAPT, maar dat verschil is kleiner. Daardoor is het energieverbruik van de mobiliteit in TRANSFORM 10 PJ lager dan in ADAPT.

In beide scenario's leidt de productie van biobrandstoffen tot extra finaal energieverbruik. In TRANSFORM is die post het grootst omdat in dit scenario ook de eis is opgelegd dat alle bunkerbandstoffen voor lucht- en scheepvaart in 2050 vrij van broeikasgasemissies moeten zijn. Dat is conform de huidige rekenregels, maar verwacht wordt dat in de komende jaren door de statistische bureaus zal worden afgesproken dit energieverbruik niet mee te tellen als finaal energieverbruik bij eindgebruikers maar als eigen verbruik van de energiesector.

[6] Bij staalproductie met DRI op basis van aardgas en/of waterstof telt de energie die wordt gebruikt voor het reduceren van ijzererts als niet-energetisch energieverbruik, de overige energie als finaal energieverbruik. Dit staat in de openbare instructies voor de waterstof vragenlijst: (Hydrogen+-+Reporting+instructions.pdf) : "*The hydrogen used in the steel production process shall be split between non-energy use (i.e. hydrogen used as reducing agent, for the removal of the oxygen in the steel) and energy use (i.e. production of iron ore during which the hydrogen is combusted for the generation of high-temperature heat).*"



Figuur 2.7: Ontwikkeling totaal finaal energieverbruik 2021-2040

Door energiebesparing daalt het energieverbruik in het ADAPT-scenario met 30% in de periode 2021 - 2040 en in het TRANSFORM-scenario met 22%. In het TRANSFORM-scenario zit minder totale energiebesparing dan in ADAPT doordat er minder elektrificatie plaats vindt. De energiebesparing uit efficiëntieverbetering is in beide scenario's nagenoeg gelijk, zoals te zien in Figuur 2.8. In TRANSFORM is minder elektrificatie mogelijk en nodig om twee redenen. Ten eerste heeft TRANSFORM, in tegenstelling tot ADAPT, het doel om in 2040 geen uitstoot van broeikasgassen meer te hebben in de sectoren onder het EU ETS-1. Voor een nationale emissiereductie van 80% in 2040 vindt daarom in TRANSFORM meer emissiereductie plaats in de sectoren die onder het EU ETS-1 vallen en minder in de sectoren daar buiten. Hierdoor is er aanzienlijke emissiereductie in de sectoren industrie en elektriciteitsopwekking en is minder emissiereductie nodig in andere sectoren om de doelstelling voor 2040 te halen. Ten tweede is er in TRANSFORM een strengere eis voor het verduurzamen van bunkerbrandstoffen. Deze verduurzaming vindt voor een deel plaats via synthetische brandstoffen die gemaakt worden uit waterstof. De elektriciteitsbehoefte voor het produceren van deze waterstof leidt er toe dat er minder elektriciteit beschikbaar is voor elektrificatie van sectoren zoals de mobiliteit en huishoudens. De productiecapaciteit voor wind- en zonne-energie bereikt in het TRANSFORM-scenario het maximaal potentieel, er kan dus ook niet meer zon of wind geïnstalleerd worden.

In dit onderzoek is energiebesparing in twee categorieën opgedeeld. Ten eerste is er *efficiëntieverbetering*, waarbij besparing wordt behaald door bijvoorbeeld te isoleren of processen te optimaliseren. Ten tweede is er de categorie *elektrificatie*. Elektrificatie bespaart finaal verbruik van energie doordat elektrische processen efficiënter zijn dan verbranding van (fossiele) brandstoffen. Zo is een e-boiler bijvoorbeeld 99,9% efficiënt tegenover ~95% van een gasboiler, zet een elektrische auto ongeveer 80% van de energie om in voortstuwing tegenover ~30% bij een auto met een verbrandingsmotor en kan een warmtepomp door gebruik van omgevingswarmte zelfs een efficiëntie behalen van 400%[7]. Hoewel elektrificatie dus leidt tot energiebesparing wordt het vooral ingezet met als doel om uitstoot van broeikasgassen te verminderen.

In beide scenario's wordt ongeveer 270 PJ aan energiebesparing behaald door efficiëntieverbetering. Dit speelt voornamelijk in de sector gebouwde omgeving door de isolatie van woningen en gebouwen voor diensten. Daarnaast is er in beide scenario's aanzienlijke energiebesparing door elektrificatie, ongeveer 419 PJ in ADAPT en 234 PJ in TRANSFORM. In het ADAPT-scenario is elektrificatie dus goed voor 62% van de besparing op finaal verbruik, in het TRANSFORM-scenario voor 48% van de besparing. De meeste besparing wordt verwacht in de sectoren mobiliteit en gebouwde omgeving, zie Figuur 2.8.

Verschillende vormen van energiebesparing hebben effect op verschillende energiedragers, zie Figuur 2.9. De meeste energiebesparing in de scenario's betreft besparing op aardolie. Het finaal verbruik van aardolie daalt door energiebesparing met 432 PJ in ADAPT en 337 PJ in TRANSFORM. Dit komt voornamelijk door de elektrificatie van personenvervoer en goederenvervoer. De vraag naar aardgas daalt met 412 PJ in ADAPT en 260 PJ in TRANSFORM. Dit komt voornamelijk door het isoleren van woningen en gebouwen voor diensten en door het installeren van warmtepompen. In ADAPT stijgt het elektriciteitsverbruik met 218 PJ door elektrificatie en daalt het elektriciteitsverbruik met 64 PJ door efficiëntieverbetering voor een netto verhoging van het finale elektriciteitsverbruik van 154 PJ. In TRANSFORM stijgt het elektriciteitsverbruik met 155 PJ door elektrificatie en

[7] Bij warmtepompen wordt dit de COP (coefficient of performance) genoemd. Per kWh elektriciteit die de warmtepomp gebruikt komt er 4 kWh warmte uit.

daalt het elektriciteitsverbruik met 67 PJ door efficiëntieverbetering voor een netto verhoging van het finale elektriciteitsverbruik van 88 PJ.

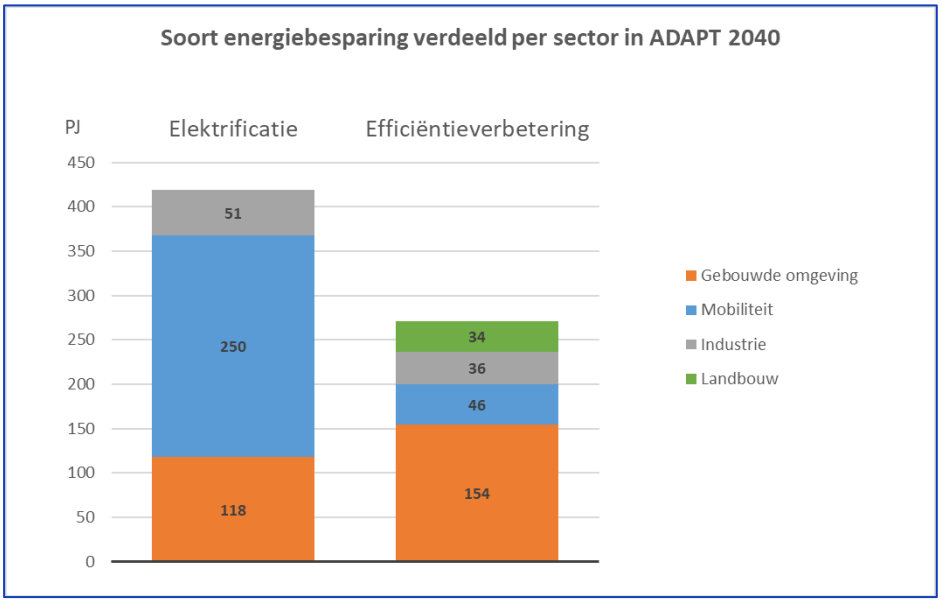
Het totaal finaal energieverbruik in Nederland daalt van 1892 PJ in 2021[8] naar 1755 PJ in 2040 in het TRANSFORM-scenario (een daling met 7%) en 1633 PJ in 2040 in het ADAPT-scenario (een daling met 14%). De stijging van het energieverbruik door groei van activiteiten en intensivering van energieverbruik compenseren de energiebesparing deels weer. Beide scenario's hebben in 2040 een hoger energieverbruik dan het EED-doel voor vermindering van het finaal energieverbruik in 2030 van 1609 PJ, maar wanneer we de verhoging van het energieverbruik voor de productie van biobrandstoffen niet meetellen bij het finaal energieverbruik dan zou het finaal energieverbruik in 2040 wel onder de 1609 PJ uitkomen.

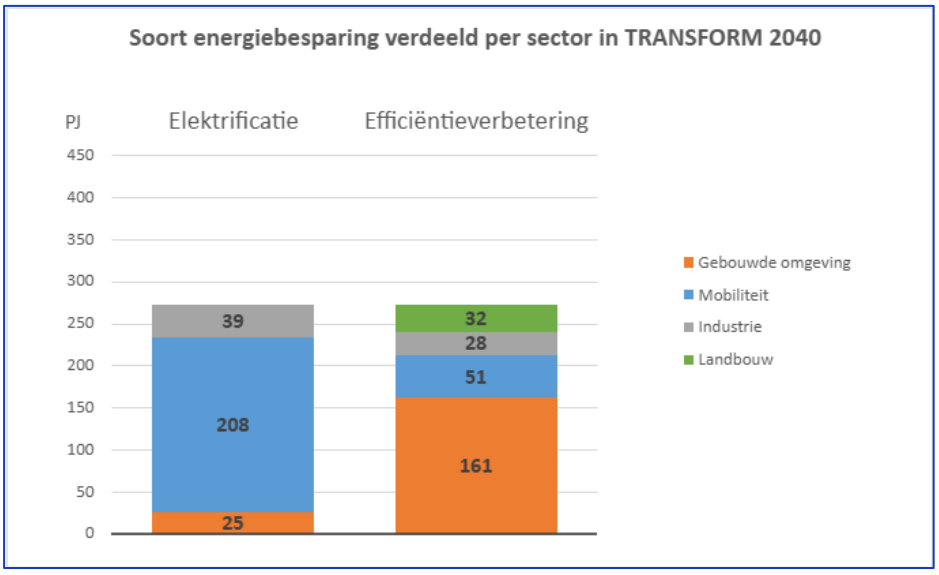
Besparingspotentieel dat in de TNO-scenario's deels onbenut blijft of niet wordt meegenomen

Niet alle besparingspotentieel van besparingsopties wordt in de scenario's volledig benut en ook niet alle besparingsopties zijn in de scenario's meegenomen. We verwachten dat additioneel circa 250 PJ besparingspotentieel mogelijk is.

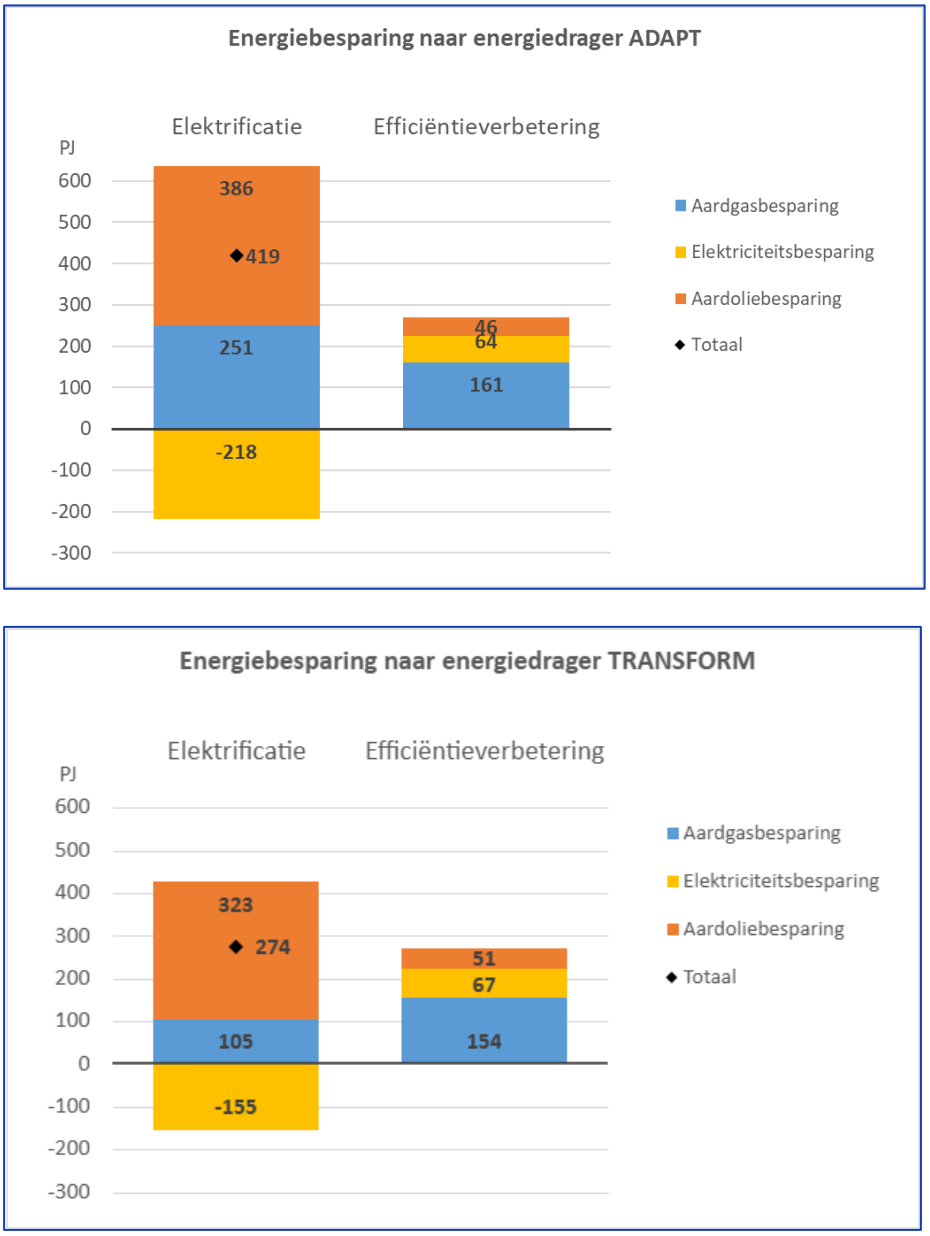
Zo blijkt uit de verschillen tussen de twee scenario's een onbenut potentieel van na-isolatie van woningen en gebouwen van circa 20 PJ en van de toepassing van warmtepompen in gebouwen van circa 50 PJ. Ook zuinig stoken zou additioneel nog eens 8 PJ besparing kunnen opleveren. In de scenario's worden veranderingen als kleiner wonen en inregelen van installaties ook niet meegenomen. Beide zouden ongeveer 10 PJ besparing kunnen opleveren. In de industrie blijft het potentieel van elektrificatie, een keuze voor efficiëntere processen en optimalisatie van het productieproces onbenut dat zeker nog 35 PJ additioneel besparingspotentieel kent. Ook in de glastuinbouw zou meer elektrificatie mogelijk zijn (enkele PJ). In de scenario's blijft ook een deel van het potentieel van elektrificatie van mobiliteit onbenut waarmee additioneel 70 PJ mogelijk is. Niet meegenomen in de scenario's zijn het rijden van een kleinere auto (17 PJ), anders reizen (5 PJ) en minder vliegen (13 PJ).

[8] Door statistische verschillen en de aanpassing van de EED definities in 2023 staat in de KEV 2024 dat het finale energieverbruik in Nederland voor 2021 1898 PJ is. Er is dus een verschil van 6 PJ.





Figuur 2.8: Verdeling van besparing naar sector en type



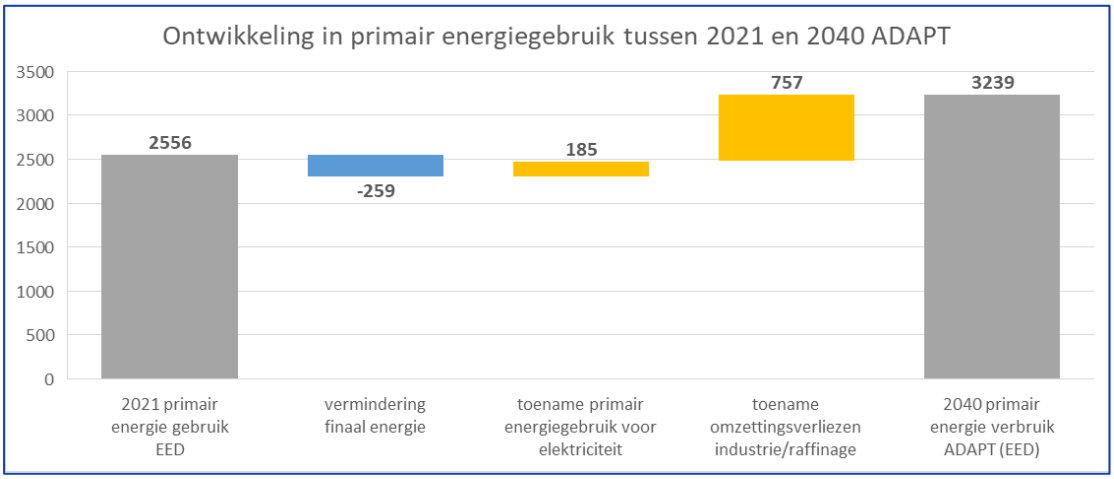
Figuur 2.9: Verdeling van besparing naar type en naar energiedrager

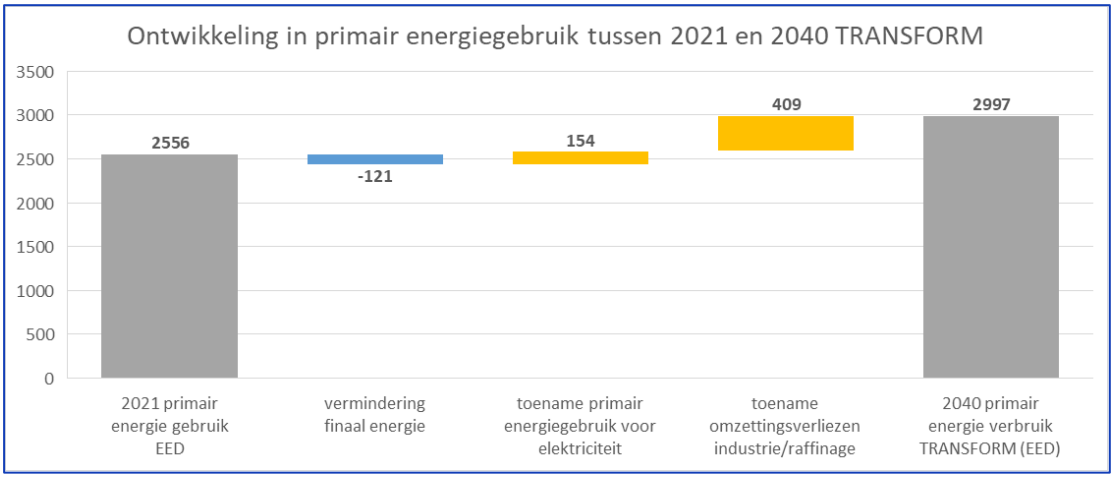
2.6 Totaal primair energieverbruik

In de voorgaande decompositieanalyse kijken we naar de effecten van energiebesparing op het *finaal* energieverbruik in Nederland, het energieverbruik bij eindgebruikers. Paragraaf 2.5 laat zien dat het *finaal* energieverbruik in 2040 kan dalen ten opzichte van 2021 door onder andere elektrificatie en efficiëntieverbetering. Het totale *primair* energieverbruik stijgt richting 2040 echter in beide scenario's.

In het primair energieverbruik worden naast het finaal energieverbruik ook de conversieverliezen in de energiesector meegenomen. De energiesector bestaat uit de elektriciteitsproductie, raffinaderijen, afvalverbrandingsinstallaties, warmteproductie voor stadsverwarming en olie- en gaswinning. We laten in deze paragraaf ook de ontwikkelingen in het primair energieverbruik zien omdat de Energy Efficiency Directive (EED) ook doelen stelt voor vermindering van het primair energieverbruik. Daarnaast bespreken we in het volgende hoofdstuk de *multiple benefits* van energiebesparing en is het bij importafhankelijkheid bijvoorbeeld logischer te kijken naar het totale primair energieverbruik.

Figuur 2.10 laat de stijging van het primair energieverbruik in de scenario's ADAPT en TRANSFORM zien. Dit komt ten eerste door een sterke groei van de elektriciteitsproductie waardoor er meer primair energieverbruik is in die sector. In ADAPT en TRANSFORM zorgt dit voor een groei van respectievelijk 185 en 154 PJ. Ten tweede is er een aanzienlijke groei van de omzettingsverliezen in de industrie en raffinage door een groeiend gebruik van duurzame brand- en grondstoffen. Bij het maken van synthetische brandstoffen via blauwe waterstof zijn veel conversiestappen gemoeid die verliezen met zich meebrengen. In ADAPT zorgt dit voor een groei van het primair energieverbruik van 757 PJ. In TRANSFORM is de groei aanzienlijk kleiner met 409 PJ, voornamelijk doordat de industrie en de raffinagesector krimpen in dit scenario.





Figuur 2.10: De effecten op de verandering van primair energieverbruik tussen 2021 en 2040 in de scenario's ADAPT en TRANSFORM. Het energieverbruik is telkens volgens de EED-definitie uit 2023. Energie voor grondstoffen (feedstocks) zit er dus niet bij en voor bunkers wel luchtvaart maar niet scheepvaart

3 Multiple benefits van energiebesparing

In dit hoofdstuk beschrijven we de rol van energiebesparing bij het streven naar een betrouwbaar, betaalbaar en duurzaam energiesysteem. In opeenvolgende paragrafen komt het effect van energiebesparing aan de orde op:

- energieonafhankelijkheid,
- leveringszekerheid,
- energierekening van huishoudens,
- reductie van broeikasgasemissies,
- leefomgevingskwaliteit,
- materiaalgebruik,
- participatie, rechtvaardige verdeling en economische kracht
- investeringen in het energiesysteem.

3.1 Energieonafhankelijkheid

Minder import energiedragers door besparing op finaal energiegebruik

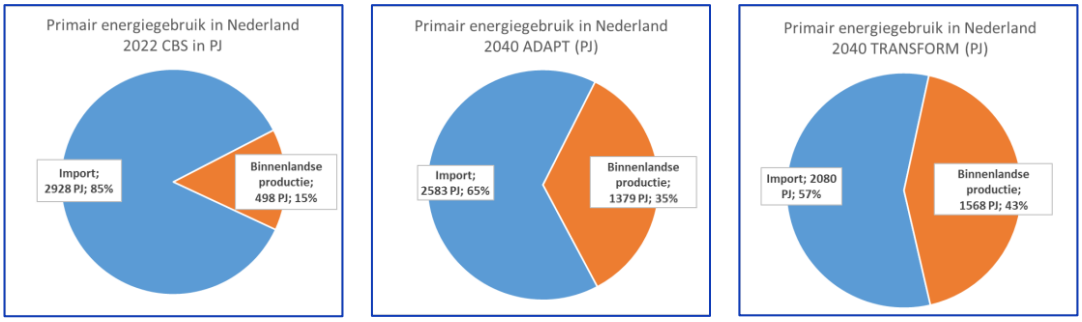
In het ADAPT-scenario zit 690 PJ energiebesparing in de periode 2021-2040. Verdeeld naar energiedragers gaat het om 412 PJ minder aardgasverbruik en 432 PJ minder aardolieverbruik. Omdat deze besparing gedeeltelijk komt door elektrificatie neemt het elektriciteitsverbruik toe met 154 PJ. In het TRANSFORM-scenario zit 509 PJ energiebesparing in de periode 2021-2040. Verdeeld naar energiedragers gaat het om 260 PJ minder aardgasverbruik en 337 PJ minder aardolieverbruik. Daarentegen stijgt het elektriciteitsverbruik met 88 PJ.

De afname in verbruik van aardolie en aardgas verkleint de importafhankelijkheid van Nederland van het buitenland en vergroot dus de energieonafhankelijkheid. Het extra elektriciteitsverbruik wordt lokaal opgewekt met duurzame bronnen zoals zon en wind.

De 412 PJ aardgasbesparing uit ADAPT (260 PJ in TRANSFORM) staat gelijk aan 13 miljard m^3 aardgas (8,2 miljard m^3 in TRANSFORM). De Nederlandse gebouwde omgeving gebruikte in 2024 ongeveer 9,4 miljard m^3 aardgas. Nederland produceert zelf steeds minder aardgas en importeert dus een steeds groter aandeel, ook in de vorm van LNG. De vermindering van aardgasverbruik door inzet van energiebesparing verlaagt de importafhankelijkheid van Nederland dus aanzienlijk.

De 432 PJ aardoliebesparing uit ADAPT (337 PJ in TRANSFORM) staat gelijk aan 74 miljoen vaten olie (58 miljoen vaten in TRANSFORM). Het wegverkeer in Nederland gebruikt ongeveer 70 miljoen vaten olie per jaar. Nederland produceert zelf nauwelijks aardolie en importeert dus vrijwel alles. De vermindering van aardolieverbruik door inzet van energiebesparing verlaagt de importafhankelijkheid van Nederland dus aanzienlijk.

Importafhankelijkheid primair energieverbruik daalt door besparing
Figuur 3.1 laat het primair energieverbruik zien van Nederland in 2022 (CBS 2024a) en in de scenario's ADAPT en TRANSFORM in 2040. In 2022 was de primaire energievraag voor ongeveer 85% afkomstig uit het buitenland. In de scenario's ADAPT en TRANSFORM daalt de importafhankelijkheid in 2040 naar respectievelijk 65% en 57%. De vermindering van de import komt deels door de bovengenoemde aardgas- en aardoliebesparing en deels door meer binnenlandse productie van elektriciteit uit zon en wind.



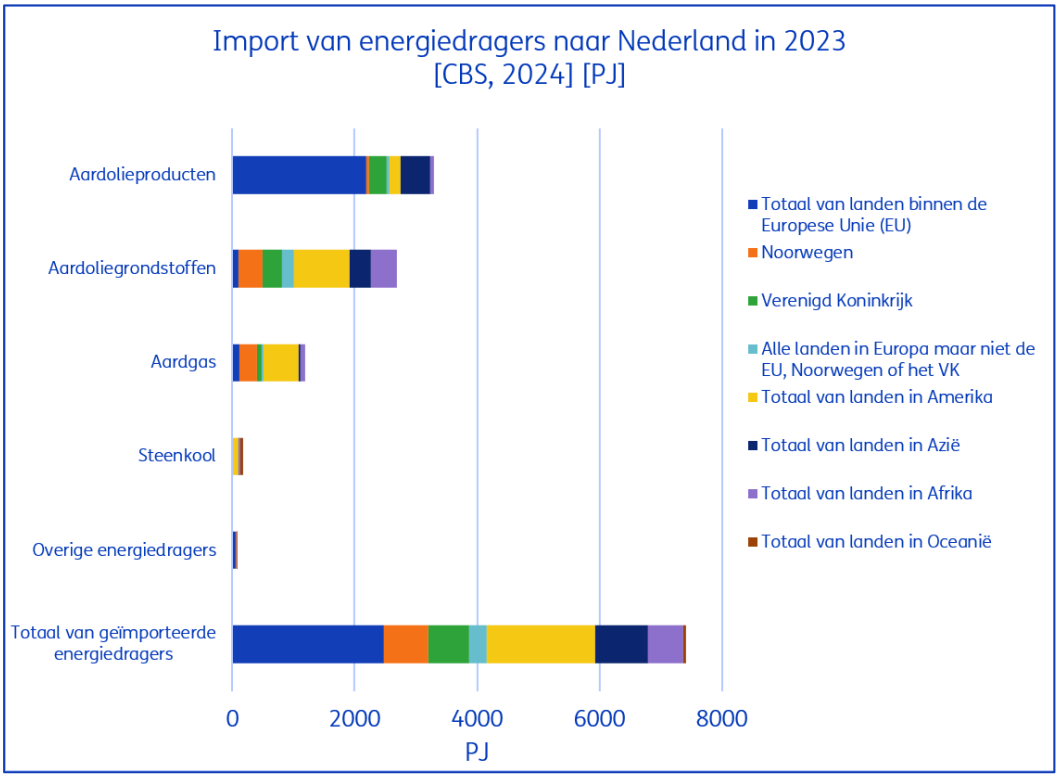
Figuur 3.1: Ontwikkeling importafhankelijkheid in ADAPT en TRANSFORM t/m 2040. De energievraag in deze figuren betreft het totaal primair energieverbruik. Dit bevat dus ook de energie voor feedstocks en bunkerbrandstoffen voor lucht- en scheepvaart

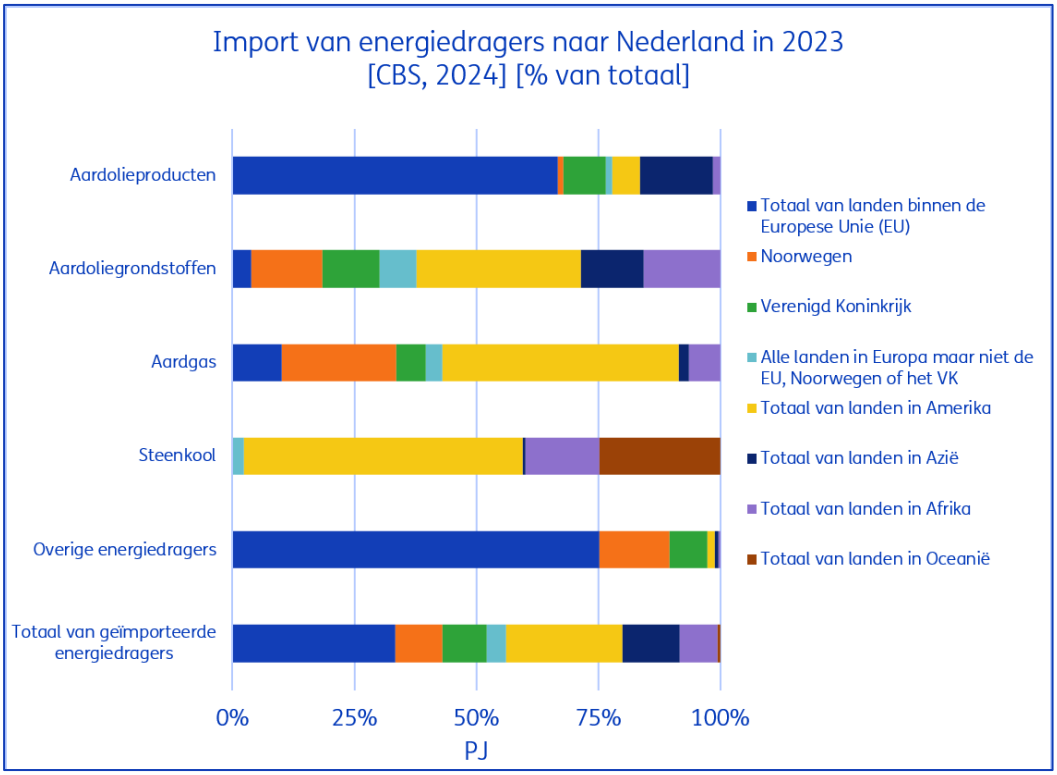
De regio waarvan Nederland energieafhankelijk is verschilt per energiedrager.
Figuur 3.2 laat zien vanuit welke landen Nederland energiedragers importeert. De eerste grafiek laat het absolute aantal PJ aan import zien en de tweede grafiek laat de verdeling zien in procenten van het totaal. Nederland verwerkt en exporteert ook weer een groot deel van deze energiedragers waardoor de totale importhoeveelheid niet het primaire energiegebruik van Nederland bepaalt. We tonen hier voorlopige cijfers van CBS voor het jaar 2023 omdat hier de effecten van Europees energie importbeleid na de invasie van Rusland in Oekraïne al deels in te zien zijn. Vóór 2023 kwam een groter deel van de energie import van Nederland uit Rusland.

Nederland importeert ongeveer 1200 PJ aan aardgas. Aardgas wordt voor ruim 35% geïmporteerd uit de EU, Noorwegen of het VK. De overige 65% komt uit landen daar buiten. Bijna 50% van het geïmporteerde aardgas komt vanuit landen in Amerika, met name de VS.

Nederland importeert ongeveer 2700 PJ aan aardoliegrondstoffen en ongeveer 3300 PJ aan aardolieproducten. De aardoliegrondstoffen, dus ruwe aardolie die nog geraffineerd moet worden, komen voor 30% uit de EU, Noorwegen of het VK. 70% wordt geïmporteerd vanuit landen daar buiten. De aardolieproducten, zoals diesel en benzine, komen voor ongeveer 75% uit de EU, Noorwegen of het VK. Hierbij moet bedacht worden dat de aardolieproducten de wij bijvoorbeeld importeren vanuit Duitsland gemaakt worden uit ruwe aardolie die Duitsland hoogstwaarschijnlijk weer importeert vanuit landen buiten de EU, Noorwegen of het VK. Het bronproduct, de aardoliegrondstoffen, komt voor 70% vanuit landen buiten de EU, Noorwegen of het VK.

Zoals hier boven beschreven zorgt energiebesparing voor een verminderde vraag naar aardgas van 260 tot 412 PJ. Hier van komt bijna 65% vanuit landen buiten de EU, Noorwegen of het VK. Daarnaast zorgt energiebesparing voor een verminderde vraag naar aardolie van 337 tot 432 PJ. Aardoliegrondstoffen worden voor ongeveer 70% geïmporteerd uit landen buiten de EU, Noorwegen of het VK.





Figuur 3.2: De import van energiedragers naar Nederland in 2023, zowel absoluut als procentueel (CBS, 2024a).

3.2 Leveringszekerheid, netcongestie en vraag naar flexibiliteit

Onder leveringszekerheid worden meestal alleen de robuustheid en betrouwbaarheid van het elektriciteitssysteem verstaan. Energiebesparing verbetert de leveringszekerheid alleen wanneer het de netcongestie vermindert als het leidt tot minder piekvraag of verschuiving van een deel van de vraag naar andere tijdstippen. Afhankelijk van de specifieke energiebesparingsoptie zal er dus een positief of misschien juist negatief effect zijn op de leveringszekerheid en netcongestie.

In TRANSFORM en ADAPT komt de grootste energiebesparing uit de elektrificatie van personenauto's: 299 PJ aardoliebesparing in ADAPT en 227 PJ in TRANSFORM. Daar tegenover staat 103 PJ extra elektriciteitsverbruik in ADAPT en 92 PJ in TRANSFORM. Het laden van personenauto's gebeurt vaak op dezelfde piekmomenten (doordeweeks 's avonds) en zorgt nu al voor congestieproblematiek. Energiebesparing door elektrificatie van personenvervoer kan dus negatieve effecten hebben op de leveringszekerheid en netcongestie als er geen zorg gedragen wordt om het laden van personenwagens meer 'uit te smeren'[9]. Daarentegen kunnen personenwagens, wanneer zij vehicle-2-grid of vehicle-2-home capaciteiten hebben, ook een flexibiliteitsbehoefte vervullen door bijvoorbeeld overtollige elektriciteit tijdens de zonnepiek op te slaan voor later gebruik. Flexibel of bi-directioneel laden kan dus ook een oplossing vormen voor de problematiek van netcongestie. Deze bijdrage kunnen wij in dit onderzoek niet kwantificeren.

Een andere grote besparingsoptie in beide scenario's is het installeren van warmtepompen bij huishoudens. Dit zorgt voor respectievelijk 165 PJ en 45 PJ aardgasbesparing bij ADAPT en TRANSFORM. Daar tegenover staat een groei in elektriciteitsverbruik van respectievelijk 38 en 11 PJ. De piekbelasting van warmtepompen is minder groot dan die van elektrische auto's, maar zonder slim sturen van bijvoorbeeld de momenten van watervatverhitting (voor onder andere legionellabestrijding) kan dit wel een negatief effect hebben op de leveringszekerheid en netcongestie.

Er is ook energiebesparing in de vorm van efficiëntieverbetering die elektriciteit bespaart, zoals zuinigere apparaten gebruiken in huishoudens of elektriciteitsbesparing in de dienstensector, landbouw of industrie. In ADAPT vormt dit samen een besparing van 64 PJ (67 PJ in TRANSFORM). Deze besparing heeft nooit een negatief effect op de leveringszekerheid of netcongestie. Wanneer het specifieke processen betreft die op piekmomenten plaatsvinden, heeft het ook een positief effect. Voorbeelden hier van zijn apparaten die door mensen over het algemeen op hetzelfde moment gebruikt worden zoals wasmachines, vaatwassers en boilers voor warm water. Dit positieve effect kwantificeren valt buiten de scope van dit onderzoek.

[9] Zie bijvoorbeeld: Netcongestie deels te voorkomen door inzet slimme apparaten - TNO

3.3 Energierekening huishoudens

Zonder energiebesparing zal de energierekening van een gemiddeld huishouden richting 2040 stijgen. Dit komt door de verwachte stijging van netwerkkosten voor elektriciteit en stijgende aardgasprijzen door EU ETS-2[10] en de bijmengverplichting groen gas.

Energiebesparing kan de gemiddelde energierekening van huishoudens in de toekomst laten dalen in plaats van stijgen. Figuur 3.3 toont de inschatting van de toekomstige gemiddelde energierekening voor een huishouden in Nederland. De eerste grafiek laat de besparing zien voor een huishouden met een gemiddeld energieverbruik dat alle energiebesparingopties toepast. Energiebesparing zorgt hier voor een besparing op de jaarlijkse energierekening tot 1200 euro per jaar[11]. De benodigde investeringen voor isoleren of een warmtepomp zijn hierin niet meegenomen.

De twee grafieken daarna laten de resultaten zien voor de gemiddelde energierekening van alle huishoudens in de scenario's ADAPT en TRANSFORM. Energiebesparing zorgt voor een daling van de gemiddelde energierekening van alle huishoudens van 600 tot 900 euro per jaar. De opbrengst van energiebesparing is afhankelijk van de hoogte van de energieprijzen en -belastingen, waarbij een hogere energieprijs/-belasting zorgt voor een groter effect van energiebesparing.

De hoogte van de energierekening in januari 2024 is gebaseerd op de berekening van het CBS (CBS, 2024b) Het CBS bouwt de gemiddelde energierekening op uit de kosten voor transport, levering en energiebelasting voor aardgas en elektriciteit. Het betreft de netto levering van elektriciteit. Er is dus rekening gehouden met eigen verbruik van zonnestroom. De teruggave op de energiebelasting is ook meegenomen. De energierekening voor een gemiddeld huishouden in 2024 is 2363 euro per jaar. De prognoses voor de gas- en elektriciteitsprijzen komen uit de KEV 2024 (PBL, 2024b). Hier uit blijkt dat de invoering van het EU ETS-2 en de bijmengverplichting groen gas naar verwachting zouden kunnen leiden tot een stijging van de aardgasprijzen voor huishoudens van respectievelijk +9,9 en +11,4 €cent/m3.

De prognoses voor gas- en elektriciteits transportkosten (nettarieven) komen uit het FIEN+ eindrapport die ook gebruikt zijn in het recente IBO Bekostiging Elektriciteitsinfrastructuur[12] (PWC, 2025). Een huishouden betaalt in 2024 ca. €390 per jaar netbeheerkosten voor het elektriciteitsnet (incl. btw, excl. kosten voor meters). Dit zal naar verwachting stijgen met gemiddeld 6,7% per jaar tot €1.103 in 2040. Een huishouden betaalt in 2024 ca. €203 per jaar voor netbeheerkosten gas (incl. btw, excl. kosten voor meters). De kosten per aansluiting

[10] Het tweede Europese Emissiehandelssysteem (EU ETS-2) bevat de gebouwde omgeving en de mobiliteit en zal in 2027 in werking treden.

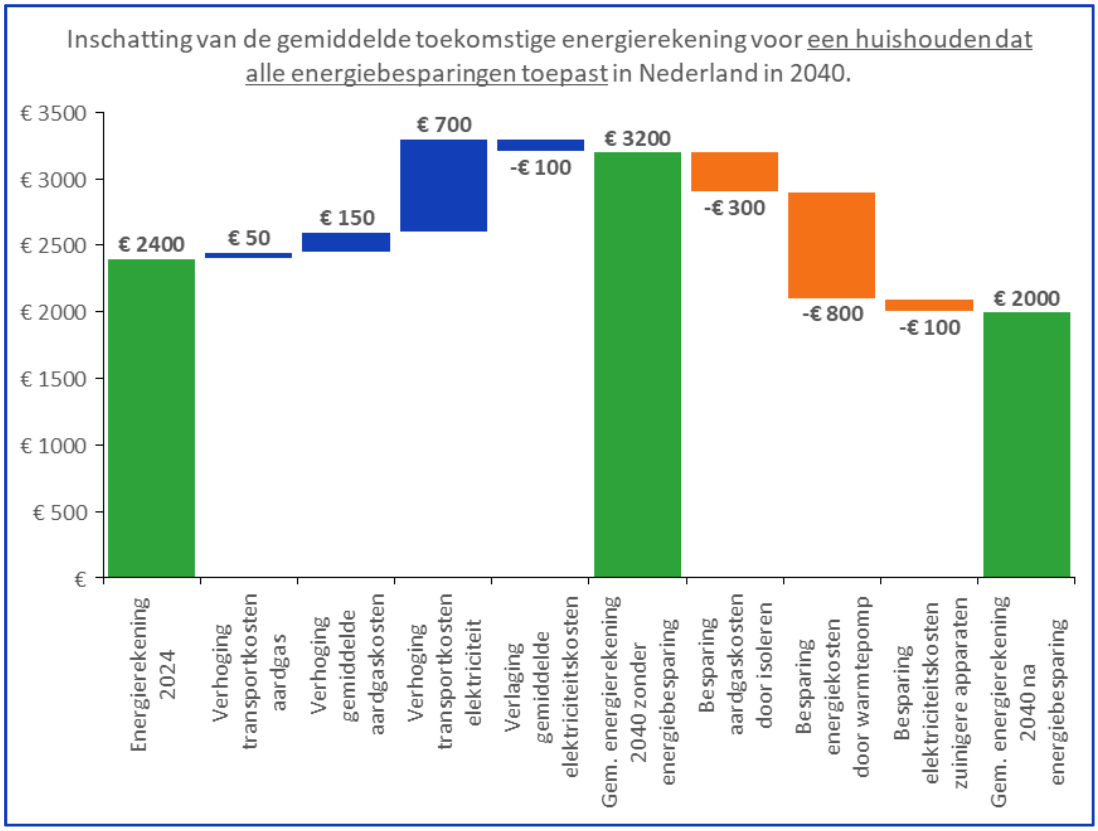
[11] We erkennen dat in deze eerste grafiek een rekenkundige onregelmatigheid zit. We gebruiken namelijk de ontwikkeling van een *gemiddelde* energierekening naar 2040 en passen daar *alle* energiebesparende maatregelen op toe. Echter, een huishouden dat nog geen enkele energiebesparende maatregel heeft genomen zal hoogstwaarschijnlijk een energierekening hebben die hoger ligt dan het gemiddelde. Als we dit betrekken op de eerste grafiek in **Figuur 3.3** zal dit als invloed hebben dat de energierekening in 2024 voor een huishouden dat geen isolatie, warmtepomp of zuinige apparaten heeft hoger zal liggen dan 2400 euro. Daarmee zal de energierekening voor dat huishouden in 2040 ook hoger zal liggen dan 3200 euro. De hoogte van de kostenbesparing door isoleren, een warmtepomp en zuinige apparaten komt wel neer op ongeveer 1200 euro, maar de uiteindelijke energierekening van dit huishouden zal dus hoger zijn dan 2000 euro per jaar. De CBS publicatie geeft indicatieve energierekeningen voor verschillende woningprofielen. Daar uit kunnen we afleiden dat hetzelfde profiel in een oud huis ongeveer 15 tot 20% hogere energielasten heeft dan dat profiel in een nieuw huis. Dit percentage zou dus grofweg bovenop de in **Figuur 3.3** beschreven getallen komen.

[12] Uit het achtergronddocument FIEN+ bij het IBO bekostiging elektriciteitsinfrastructuur. De tariefontwikkeling van het gasnetwerk ligt op 0,8% per jaar en dus ongeveer +14% in 2040. De tariefontwikkeling van elektriciteit ligt in het basispad op 6,7% per jaar en dus in totaal +175% in 2040. FIEN+ Eindrapport | Netbeheer Nederland

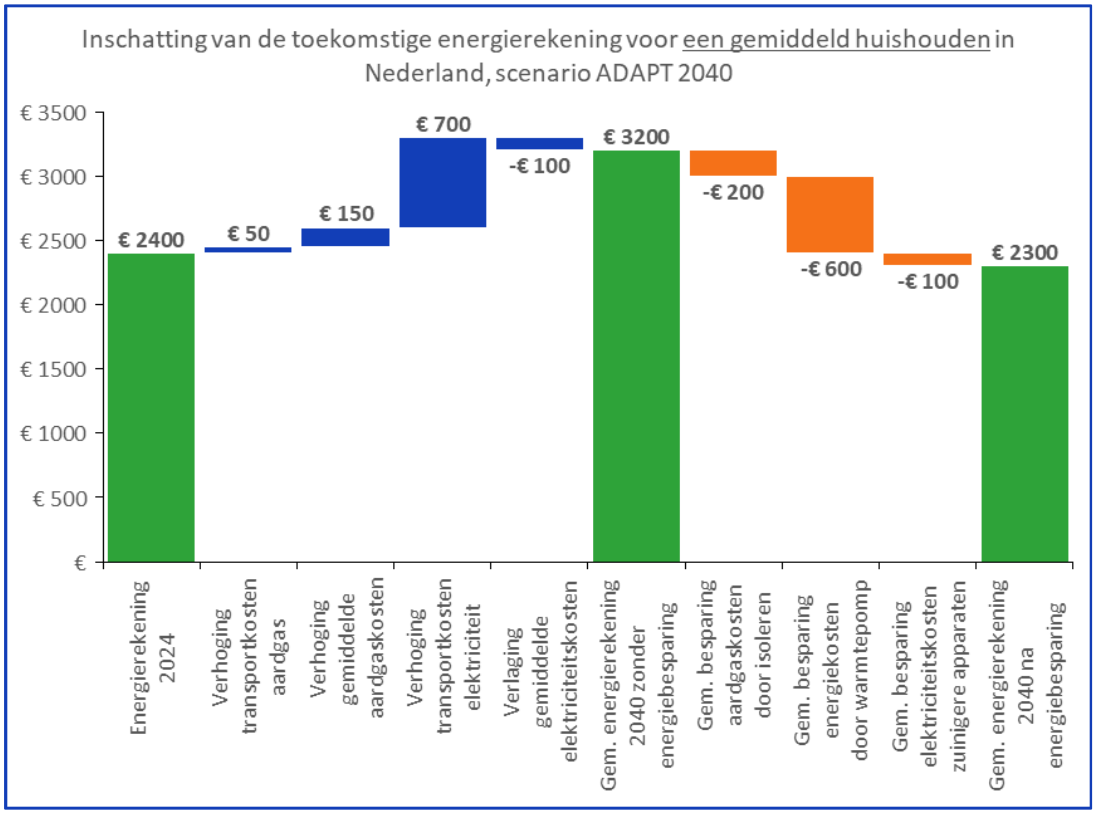
voor netbeheer van aardgas nemen naar verwachting toe met 0,8% per jaar. Dit houdt in dat een huishouden in 2040 ca. €231 per jaar gaat betalen. Een grote onzekerheid op lange termijn betreft het aantal aansluitingen op het gasnetwerk in het kader van de ontwikkeling van stadsverwarming en elektrificatie van warmte middels warmtepompen. In de doorrekening uit het FIEN+ eindrapport is aangenomen dat in 2040 het aantal aansluitingen met 35% daalt ten opzichte van 2024.

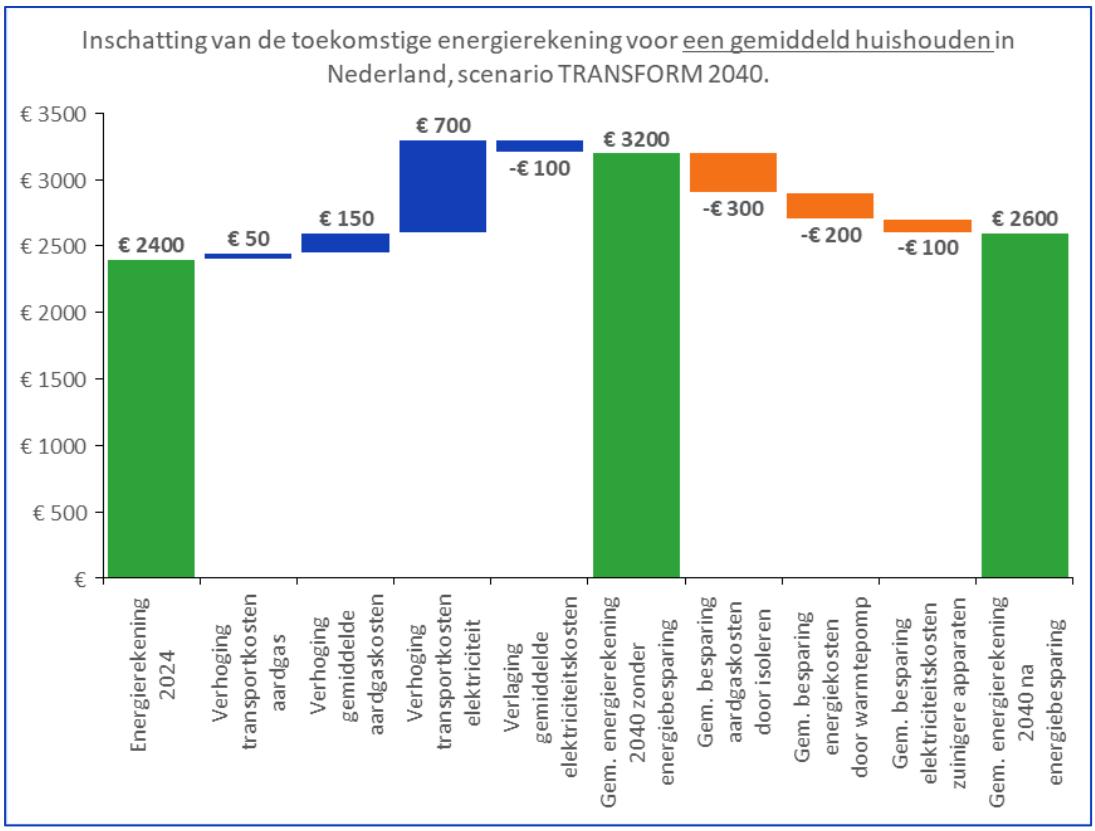
De vermeden kosten door energiebesparing in 2040 zijn berekend door de energetische besparing in 2040 te vermenigvuldigen met de geprognosticeerde gas- en elektriciteitsprijzen in 2040 uit de raming uit de KEV 2024 (PBL, 2024b).

De gebruikte energiesysteemmodellering in dit onderzoek maakt geen onderscheid tussen inkomensgroepen. Er kunnen dus geen specifieke conclusies getrokken worden over verdelingseffecten en de invloed van energiebesparing op energiearmoede. Wel leiden energiebesparende maatregelen zoals isoleren en een warmtepomp over het algemeen tot minder kans op energiearmoede. Energiearmoede bestrijden vraagt echter ook een gerichte aanpak om de huishoudens die zelf geen investeringen in energiebesparende maatregelen kunnen maken te ondersteunen. Deze specifieke aanpak ligt buiten de scope van dit onderzoek, maar TNO schrijft hier wel regelmatig over[13].



[13] Zie bijvoorbeeld de website van TNO over energiearmoede: Energiearmoede voorkomen | TNO





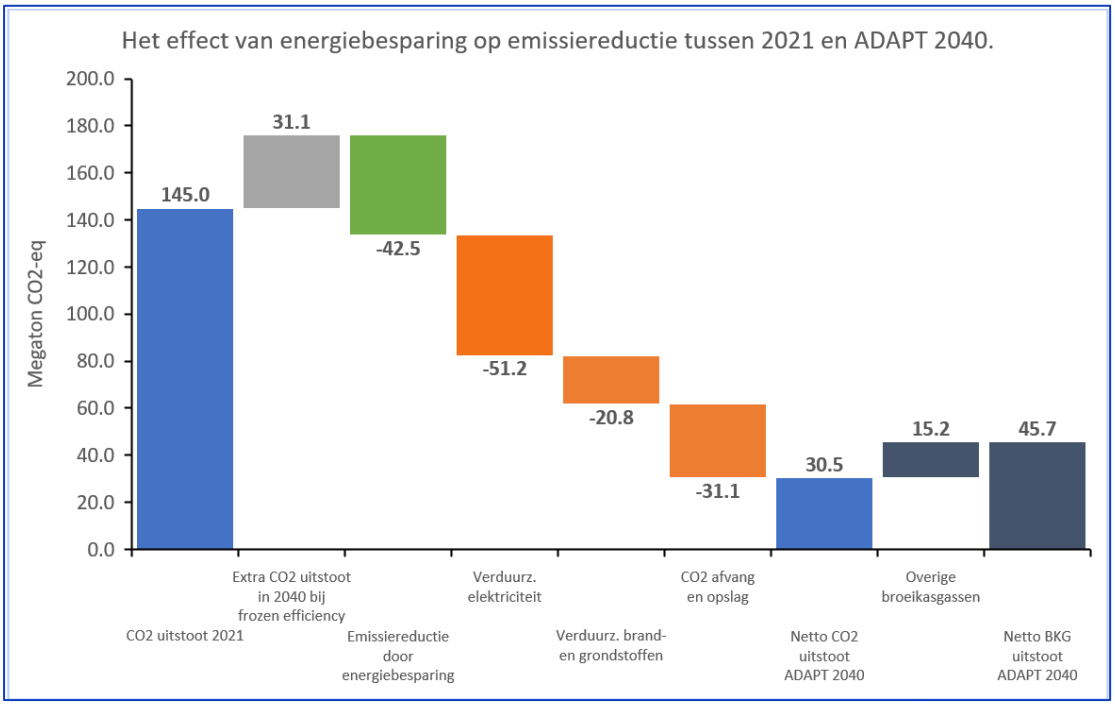
Figuur 3.3: De bijdrage van energiebesparing aan de hoogte van de energierekening van huishoudens.

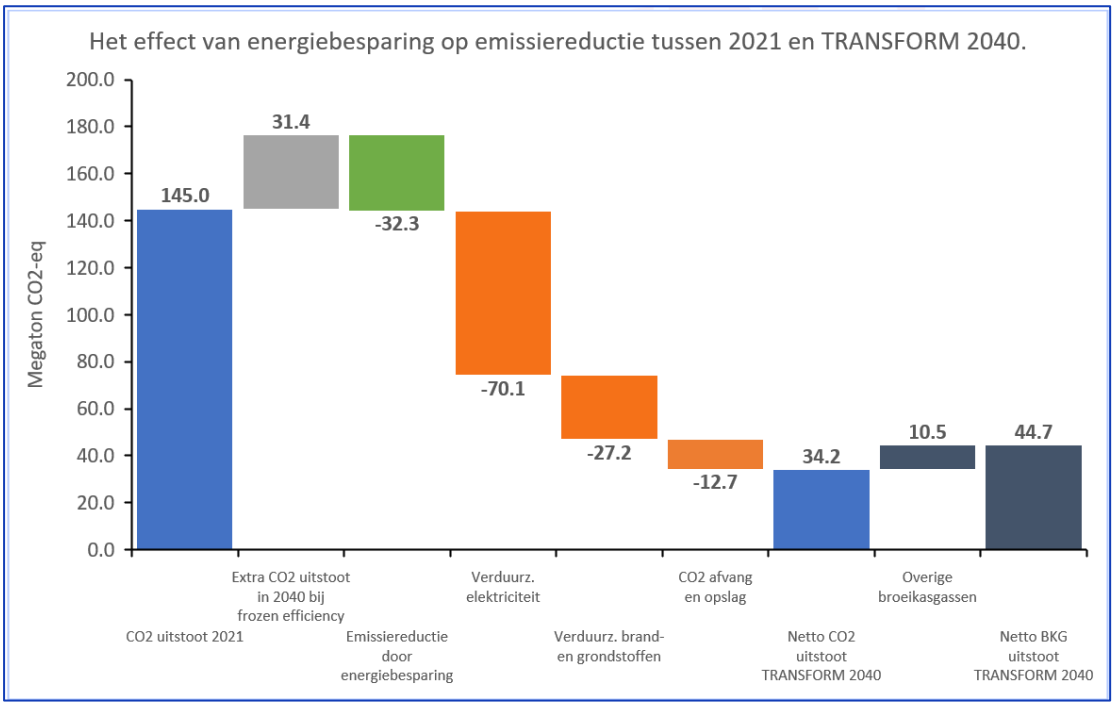
3.4 Reductie van broeikasgasemissies

In 2021 werd in Nederland 145 Mton CO_2 uitgestoten. Om uit te rekenen wat de CO_2-uitstoot in 2040 zou zijn als gevolg van groei aan activiteiten vermenigvuldigen we deze met de volume-, structuur-, en klimaateffecten zoals beschreven in hoofdstuk 2. Daarmee is de CO_2-uitstoot in 2040 met zogeheten *frozen efficiency* gelijk aan 176 Mton CO_2.

In ADAPT wordt in 2040 nog ongeveer 31 Mton CO_2 uitgestoten, wat dus neer komt op een reductie van ongeveer 145 Mton. In TRANSFORM wordt in 2040 nog 34 Mton CO_2 uitgestoten, een reductie van 142 Mton CO_2. Figuur 3.4 laat zien dat energiebesparing zorgt voor ongeveer 43 Mton aan CO_2-reductie in ADAPT en 32 Mton in TRANSFORM. Tabel 3.1 laat zien dat de bijdrage van energiebesparing aan de totale CO_2-emissiereductie neer komt op 23 tot 29%. De overige CO_2-reductie is het gevolg van de inzet van biobrand- en -grondstoffen, hernieuwbare elektriciteitsproductie en CCS.

We beschouwen in deze paragraaf alleen koolstofdioxide (CO_2) en geen andere broeikasgassen. De reden daarvoor is dat we bij het berekenen van de referentie-emissies uitgaan van frozen efficiency om de groei van de CO_2-uitstoot te berekenen ten gevolge van de groei van het energiegebruik, zoals beschreven in paragraaf 2.5. Groeifactoren die zorgen voor een toename van overige broeikasgasemissies zoals methaan – door de omvang van de veestapel in Nederland – zijn buiten beschouwing gebleven van hoofdstuk 2. Als we in deze paragraaf de groeifactor zouden vermenigvuldigen met de uitstoot van alle soorten broeikasgassen in 2021 overschatten we het potentieel van energiebesparing voor emissiereductie.





Figuur 3.4: De bijdrage van energiebesparing aan de emissiereductie in 2040 in het ADAPT- en TRANSFORM-scenario. De CO_2-uitstoot in 2021 komt uit de KEV 2022. De extra uitstoot bij frozen efficiency is berekend door de relatieve groei van het finale energieverbruik zoals beschreven in paragraaf 2.5 te vermenigvuldigen met de CO_2-uitstoot in 2021. De energiebesparing is berekend door de energetische energiebesparing per energiedrager te vermenigvuldigen met de emissiefactoren uit 2021 (RVO, 2021). Het volume van koolstofafvang en -opslag en de overige resultaten komen uit OPERA.

Tabel 3.1: Verdeling van oorzaken die leiden tot emissiereductie tussen $2040_{\text{frozen efficiency}}$ en de scenarioresultaten in 2040. De percentages tussen haakjes geven het aandeel weer van de totale emissiereductie die behaald wordt tussen 2021 en 2040.

	ADAPT 2040	TRANSFORM 2040
Totale CO_2-emissiereductie tussen $2040_{\text{frozen efficiency}}$ en $2040_{\text{TNO-scenarios}}$	-145,6	-142.2
Energiebesparing/efficiency	-42.4 Mton (29%)	-32,3 Mton (23%)
Verduurzaming elektriciteitsvoorziening	-51.2 Mton (35%)	-70.1 Mton (49%)
Verduurzaming brand- en grondstoffen.	-20,8 Mton (14%)	-27,2 Mton (19%)
Koolstofafvang en -opslag	-31,3 Mton (21%)	-12,7 Mton (9%)

3.5 Leefomgevingskwaliteit

3.5.1 Ruimtegebruik

Energiebesparing kan leiden tot minder ruimtegebruik als energiebesparing er voor zorgt dat er minder energieproductie nodig is afkomstig uit hernieuwbare bronnen die veel ruimte gebruiken. Het kan hier gaan om de fysieke ruimte, van bijvoorbeeld zonnepanelen, maar ook om veiligheidsruimte of de ruimte waarin overlast veroorzaakt kan worden. Denk hierbij aan bijvoorbeeld kerncentrales, windmolens of elektriciteitsinfrastructuur.

Zoals besproken in paragraaf 2.5 is de energiebesparing op te delen in twee categorieën: elektrificatie en efficiëntieverbetering. Elektrificatie vindt vooralsnog voornamelijk plaats om emissiereductie te behalen, en niet om energie te besparen. Hoewel het totale energieverbruik van een geëlektrificeerd proces lager is dan dat van een proces gebaseerd op brandstoffen zoals aardgas, aardolie of waterstof is er bij elektrificatie wel sprake van meer elektriciteitsverbruik dan in de beginsituatie. Elektrificatie vraagt dus om meer elektriciteitsproductie en daarmee om meer ruimtegebruik. De besparing op elektriciteit als gevolg van efficiëntieverbetering kan daarentegen bijdragen aan een verminderde behoefte aan hernieuwbare opwek en dus aan een vermindering in het ruimtegebruik. In totaal stijgt de elektriciteitsvraag in de toekomst is alle scenario's, waardoor het ruimtegebruik voor hernieuwbare elektriciteitsproductie ook groeit. Efficiëntieverbetering kan die ruimtevraag echter iets minder laten groeien.

Elektriciteitsbesparing in de vorm van efficiëntieverbetering zorgt in 2040 voor 64 PJ besparing in ADAPT en voor 67 PJ in TRANSFORM vergeleken met 2021. Uitgedrukt in standaard zon-op-land velden met een jaarlijkse opbrengst van 0,9 GWh/hectare[14] komt dat neer op ongeveer 200 km^2. Dat is iets minder dan de oppervlakte van de gemeente Amsterdam ~220 km^2. De grote Haliade-X windmolen op de Maasvlakte met een geïnstalleerd vermogen van 12 MW levert per jaar ongeveer 67 GWh aan elektriciteit. Een besparing van ongeveer 64 PJ door efficiëntieverbetering komt dus neer op de elektriciteitsproductie van ruim 260 van deze windmolens. De Haliade-X is windmolen die vooral ver op zee neergezet zal worden. Een windmolen op land, met een vermogen van ongeveer 3 MW, levert per jaar ongeveer 6,5 GWh aan elektriciteit. 64 PJ komt dan overeen met ruim 2700 windmolens op land.

[14] ZonneEnergie - Rijne Energie

3.5.2 Emissies luchtverontreinigende stoffen

Energiebesparing kan bijdragen aan de leefomgevingskwaliteit door de reductie van emissies van luchtverontreinigende stoffen en stikstof. We kunnen dit alleen kwalitatief beschouwen, omdat de TNO-scenariostudie geen analyse maakt van stikstofemissie en emissies van luchtverontreinigende stoffen.

De emissies van de onderzochte luchtverontreinigende hebben diverse oorzaken en verschillen sterk per stof en sector. De rol die energiebesparing kan spelen is ook divers. De Europese Commissie heeft in 2020 de National Emission Ceilings (NECs) ingevoerd met reductiepercentages voor reductiedoelstellingen van enkele luchtverontreinigende stoffen[15].

Stikstofoxiden (NO_x)
Stikstofoxiden ontstaan voornamelijk bij de verbranding van brandstoffen, waarbij mobiliteit de grootste bron is (twee derde van het totaal). Minder fossiel brandstofverbruik leidt direct tot minder NO_x-emissies. Zo draagt elektrificatie van auto's fors bij aan emissiereductie van stikstofoxiden.

Ammoniak (NH_3)
De uitstoot van ammoniak komt voornamelijk van de landbouw (90%) uit dierlijke mest. Hier heeft energiebesparing geen effect op.

Fijn stof (PM2,5)
Fijn stof wordt vooral uitgestoten door de verbranding van hout en door andere fossiele brandstoffen dan aardgas in de sectoren huishoudens, mobiliteit en industrie. In het verleden hebben met name roetfilters bij auto's en eisen aan houtkachels bij huishoudens tot emissiereductie geleid. In de industrie leidt de verbranding van brandstoffen zoals olie ook tot emissies van PM2,5. Deze kunnen ook op een andere manier ontstaan, bijvoorbeeld bij de overslag van kolen in de ijzer- en staalindustrie. Energiebesparing door elektrificatie van auto's, elektrificatie in industrie en energiezuinige woningen zonder houtkachel helpen emissies van fijn stof te verminderen.

Zwaveldioxide (SO_2)
Zwaveldioxide komt vooral vrij in de industrie. Emissiereductie vindt plaats door sluiting van kolencentrales, ontzwaveling van rookgassen in de industrie en gebruik van schonere brandstoffen in de mobiliteit inclusief scheepvaart (waar de brandstof aan strengere zwavelemissie-eisen moet voldoen). Elektrificatie in de industrie en mobiliteit kan een bijdrage leveren aan verdere emissiereductie.

Niet-methaan vluchtige organische stoffen (NMVOS)
NMVOS wordt uitgestoten door onder andere kuilvoer in de landbouw, industriële processen, benzineverbruik en houtstook. Emissies bij huishoudens komen uit schoonmaak- en desinfectiemiddelen. De NMVOS-emissies van het wegverkeer worden in belangrijke mate door benzineauto's en brom- en motorfietsen veroorzaakt. Door EU eisen aan voertuigen en elektrificatie neemt de emissie af. NMVOS wordt in de industrie uitgestoten in heel verschillende industriële processen, die voor een klein deel samenhangen met de verbranding van brandstoffen. Er is daarom geen effect van energiebesparing op NMVOS emissie te verwachten.

[15] National Emission Ceilings (NEC) | Emissieregistratie

3.6 Importafhankelijkheid materialen en technologieën

Naast importafhankelijkheid van energiedragers is er de afgelopen jaren steeds meer aandacht voor importafhankelijk van producten die Critical Raw Materials (CRM's, kritieke grondstoffen) bevatten. Met name gaat het om de kwetsbaarheden van de EU voor technologieën die nodig zijn voor de energietransitie. De tijdige beschikbaarheid van dergelijke materialen bepaalt daarmee indirect of klimaatdoelen haalbaar zijn.

Momenteel is de EU afhankelijk van het buitenland voor de componenten van veel groene technologieën, meer dan van grondstoffen als zodanig. Voor drie CRM's is de EU momenteel afhankelijk van Rusland voor een aanzienlijk deel van de import: platina, palladium en titanium. Dit zijn onmisbare materialen voor de ontwikkeling van waterstoftechnologie. Verder is de EU sterk afhankelijk van import uit China voor de winning en raffinage van zeldzame aardmetalen voor permanente magneten en voor de productie van batterijen voor elektrische voertuigen en energieopslag (Rietveld et al, 2022).

Efficiëntieverbetering leidt tot minder vraag naar energie en vermindert daardoor de importafhankelijkheid van kritische materialen en componenten die nodig zijn voor energieproductie. Van de totale besparing op het finale energieverbruik in ADAPT (670 PJ) en TRANSFORM (509 PJ) komt in beide scenario's ongeveer 270 PJ uit efficiëntieverbetering, oftewel directe vraagvermindering. Doordat deze energievraag niet ingevuld hoeft te worden kan er een vermindering van de importafhankelijkheid verwacht worden van materialen en technologieën die nodig zijn om de energie te leveren.

Daarnaast zien we dat een deel van de energiebesparing juist afkomstig is uit elektrificatie, 419 PJ in ADAPT en 237 PJ in TRANSFORM. Deze elektrificatie kan alleen plaatsvinden met meer batterijen, elektrolysers, zonnepanelen, windmolen en elektrische auto's. Hoewel elektrificatie dus zorgt voor minder energieverbruik en dus afhankelijkheid van fossiele import zorgt het wel voor een verhoogde importafhankelijkheid van andere materialen en technologieën.

3.7 Participatie, rechtvaardige verdeling en economische kracht

In het Nationaal Plan Energiesysteem schrijft het kabinet dat ze streeft naar een rechtvaardig energiesysteem waaraan iedereen mee kan doen, waar iedereen inspraak in heeft en waarbij aandacht is voor verdelingsvraagstukken (Rijksoverheid, 2023). Al bijna 15 jaar is Nederland bezig met de verduurzaming van het energieaanbod door hernieuwbare energie te installeren. In 2024 kwam meer dan de helft van de elektriciteitsopwekking in Nederland uit duurzame bronnen. Deze opgave kon worden opgepakt in samenwerking met een relatief beperkt aantal actoren. De verduurzaming van de energievraag, onder andere door energiebesparing, is bij uitstek een opgave die van een enorm brede groep actoren inzet vraagt. Energiebesparing vraagt om betrokkenheid van burgers, bedrijven en instellingen, die de keuze kunnen maken hun eigen energievraag te verminderen of anders in te vullen. Daarmee is het van belang dat iedereen mee kan doen en de kosten en baten van verduurzaming rechtvaardig verdeeld worden.

Energiebesparende maatregelen kunnen, mits goed toegepast, een positief effect hebben op de rechtvaardige verdeling van lusten en lasten en kunnen bijdragen aan de economische

kracht van Nederland. We hebben in paragraaf 3.3 laten zien dat het voor de energierekening van huishoudens veel uitmaakt of zij wel of niet in staat zijn energiebesparende maatregelen te nemen. Daarom is het belangrijk dat ook huurwoningen worden verduurzaamd en huishoudens met een laag inkomen worden geholpen om de maatregelen te financieren. Ook de toegang voor alle doelgroepen tot openbaar vervoer, een fiets en (als er geen goed alternatief is) een elektrische auto vereist aandacht van beleid. Op dezelfde manier is in verduurzaming van commercieel en maatschappelijk vastgoed aandacht nodig voor verschillende doelgroepen met hun eigen kenmerken. Ook in sectoren als de glastuinbouw en industrie zullen bedrijven in staat moeten worden gesteld om het energiebesparingspotentieel dat in die sectoren mogelijk is te benutten. Op korte termijn is er een roep om bedrijven te compenseren voor hoge energieprijzen, maar op lange termijn kan een productieproces met een lager energieverbruik juist meer bijdragen aan de concurrentiekracht van Nederland in een situatie met hoge energie- en CO_2 prijzen. In de scenario's ADAPT en TRANSFORM van TNO zien we relatief weinig energiebesparing in de sector industrie. Dat komt mogelijk ook omdat er in het rekenmodel achter de scenario's weinig energiebesparingspotentieel voor de industrie is meegenomen. Praktijkvoorbeelden laten zien dat er wel degelijk veel besparing mogelijk is[16], maar er is geen goed beeld van het totale potentieel in de industrie.

3.8 Investeringen in het energiesysteem

Energiebesparing kan leiden tot minder behoefte aan investeringen in het energiesysteem. Ook hier is het belangrijk om een onderscheid te maken tussen elektrificatie en efficiëntieverbetering. Elektrificatie leidt tot veel energiebesparing, maar wordt vooralsnog voornamelijk toegepast met emissiereductie als doel. Elektrificatie zorgt voor meer elektriciteitsverbruik waardoor investeringen in het elektriciteitssysteem zullen moeten toenemen. In deze paragraaf bespreken we daarom alleen de verminderde investeringen die nodig zijn voor het energiesysteem als gevolg van efficiëntieverbetering. In andere woorden: investeringen in het energiesysteem zullen aanzienlijk moeten toenemen om de klimaatdoelen te halen, maar de toename van benodigde investeringen kan lager uitpakken door energiebesparing in de vorm van efficiëntieverbetering.

Er kan op drie onderdelen een effect zijn: investeringen in productie, in transport en in opslag van energie.

Energiebesparing in de vorm van efficiëntieverbetering leidt tot minder behoefte aan energieopwek- of import. Efficiëntieverbetering leidt tot 64 PJ minder elektriciteitsvraag in ADAPT en 67 PJ in TRANSFORM. Uitgedrukt in bijvoorbeeld zon-op-land met een kostprijs van ongeveer 80€/MWh[17] staat dit gelijk aan 1,4 – 1,5 miljard euro aan investeringen. Efficiëntieverbetering die leidt tot minder aardgas- of aardolievraag leidt niet zozeer tot minder productie in Nederland, maar wel tot minder vraag naar import van aardgas en aardolie. Daarbij zullen er minder investeringen nodig zijn in de infrastructuur voor deze import van fossiele energiedragers.

Energiebesparing in de vorm van efficiëntieverbetering kan ook leiden tot een verminderde vraag naar transport van energie. De enorme investeringen die nodig zijn voor de elektriciteitsinfrastructuur zijn uitvoerig beschreven in het IBO Bekostiging Elektriciteitsinfrastructuur (Rijksoverheid, 2025). De benodigde elektriciteitsinfrastructuur wordt voornamelijk bepaald door de piekvraag. Alleen wanneer energiebesparing leidt tot verminderde piekvraag kan er

[16] Zie bijvoorbeeld Phillip Morris Veel interesse in terugwinnen warmte bij Philip Morris | Energeia
[17] Dit wordt als kostprijs gebruikt in SDE++ berekeningen, zie Rijksoverheid, 2024

een effect verwacht worden op de benodigde investeringen in energietransport. Elektriciteitsbesparing door efficiëntieverbetering is voornamelijk het effect van zuinigere apparaten bij huishoudens en utiliteitsbouw en van procesoptimalisatie bij de industrie en landbouw. Het is niet met zekerheid te zeggen of deze specifieke processen zullen leiden tot een lagere piekvraag en dus ook niet of er een effect te verwachten is op de benodigde investeringen in energietransport. De pijpleidingen voor het transport van fossiele energiedragers worden niet verder uitgebreid maar vereisen wel onderhoud. Energiebesparing heeft waarschijnlijk geen effect op deze kosten. Daarnaast zijn er benodigde investeringen voor het transport van nieuwe duurzame energiedragers zoals bijvoorbeeld waterstof en ammoniak. Deze noodzaak wordt vooral gedreven vanuit emissiereductie en niet vanuit energiebesparing.

Energiebesparing in de vorm van efficiëntieverbetering kan zorgen voor minder vraag naar energieopslag. Minder elektriciteitsvraag kan er toe leiden dat er minder opslagcapaciteit in de vorm van batterijen of electrolysers nodig is om overtollige elektriciteit uit wind en zon op te slaan en op een ander moment te gebruiken. Daarnaast kan minder vraag naar aardgas of aardolie – door bijvoorbeeld het isoleren van gebouwen – er voor zorgen dat er minder investeringen nodig zijn voor het bouwen van winter- of strategische reserves van energiedragers.

Referenties

Bollen et al (2025). Reflectie vanuit brede welvaart op het NPE, nog te publiceren.

CBS (2024a). Energie invoer naar land van oorsprong 2019-2023, https://www.cbs.nl/nl-nl/maatwerk/2024/37/energie-invoer-naar-land-van-oorsprong-2019-2023

CBS (2024b). De energierekening januari 2024, https://www.cbs.nl/nl-nl/longread/diversen/2024/de-energierekening-januari-2024?onepage=true

Netbeheer Nederland (2025). Netbeheer Nederland Scenario's Editie 2025, Netbeheer Nederland Scenario's Editie 2025 | Netbeheer Nederland

NLR (2024). CO2 reduction targets for Amsterdam Airport Schiphol based on remaining IPCC CO2 budgets up to 2050, CO2 and resulting flight restrictions for Amsterdam Airport Schiphol based on remaining IPCC CO2 budgets up to 2050

Odyssee (2025) Energy Efficiency Indicators | Odyssee | Energy efficiency in Europe

PBL (2022). Klimaat en energieverkenning 2022, Klimaat- en energieverkenning 2022 | Planbureau voor de Leefomgeving

PBL (2024a). Trajectverkenning Klimaatneutraal 2050, Trajectverkenning klimaatneutraal 2050 | Planbureau voor de Leefomgeving

PBL (2024b). Klimaat en energieverkenning 2024, https://www.pbl.nl/publicaties/klimaat-en-energieverkenning-2024

PWC (2025). Financiële Impact Energietransitie voor Netbeheerders ("FIEN+") Eindrapport in opdracht van Netbeheer Nederland, https://www.netbeheernederland.nl/fien-eindrapport

Rietveld et al (2022). Strengthening the security of supply of products containing Critical Raw Materials for the green transition and decarbonization, https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2022/740058/IPOL_STU(2022)740058_EN.pdf

Rijksoverheid (2023). Nationaal Plan Energiesysteem, https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2023/12/01/nationaal-plan-energiesysteem

Rijksoverheid (2024). Monitor Zon-PV 2024, https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2024/10/22/monitor-zon-pv-2024

Rijksoverheid (2025). Schakelen naar de toekomst IBO Bekostiging Elektriciteitsinfrastructuur, https://open.overheid.nl/documenten/e914cc94-ffcd-42dd-9989-bf7c3fdd44f9/file

RVO (2017). CV-optimalisatie in utiliteitsgebouwen. https://www.rvo.nl/files/file/bijlagen/CV-optimalisatie_in_utiliteitsgebouwen.pdf

RVO (2021). Nederlandse lijst van energiedragers en standaard CO2 emissiefactoren, versie januari 2021, Nederlandse lijst van energiedragers en standaard CO2 emissiefactoren

TNO (2024). Towards a sustainable energy system for the Netherlands in 2050, https://energy.nl/publications/scenariostudie-energiesysteem/

TNO (2025). Het potentieel van Leefstijlverandering, nog te publiceren.

Energy & Materials Transition

Radarweg 60
1043 NT Amsterdam
www.tno.nl

TNO innovation for life