

Macro-economische effecten klimaatbeleid 2040

TNO PUBLIEK TNO 2025 R11794 – s september 2025

Macro-economische effecten klimaatbeleid 2040

Auteurs	Johannes Bollen Sebastiaan Hers Rebeka Béres Leonard Eblé Roel Nagy Joost van Stralen
Rubricering rapport	TNO Publiek
Titel	TNO Publiek Macro-economische effecten klimaatbeleid 2040
Aantal pagina's	75 (excl. voor- en achterblad)
Programmanummer	KVE2024 Ad hoc
Projectnummer	Project / 060.59381

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

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave	3
Management Samenvatting	4
Leeswijzer	8
1 Inleiding	9
2 Methodologische aanpak	10
3 Klimaatplan-scenario	15
4 Versnellingsscenario	21
5 Gevoeligheidsanalyse: Meer en snellere uitrol 'duurzame' technologie.....	28
Referenties	34
Bijlage A: Indicatoren	36
Bijlage B: OPERA	38
Bijlage C: WorldScan	40
Bijlage D: Aannames basispad en scenario's	44
Bijlage E Klimaatplan	48
Bijlage F: Samenvatting EU Impact studie vergeleken met effecten Klimaatplan scenario	56
Bijlage G Soft-link.....	63
Bijlage H Sectorale MACCs 2040 (Versnelling)	70
Bijlage I Soft-link aan het werk	75

Management Samenvatting

Kernconclusies

De modelsimulaties laten het volgende zien:

- nationale versnelling ten opzichte van het Klimaatplan in 2040 leidt tot een structureel extra effect op het bruto binnenlands product (bbp) van circa -0,4 procentpunt, overeenkomend met een daling van het bbp van ongeveer € 5 miljard per jaar. Deze uitkomst is doorerekend onder een snellere uitrol van schone technologie dan het tempo uit de Klimaat- en Energieverkenning (KEV), gebaseerd op TNO-nulemissiestudies richting 2050.
- de onzekerheden (model & prijzen): uitkomsten zijn gevoeliger voor uitrolsnelheid en energiesysteemkosten dan voor het niveau van de CO₂-prijs. Prijsniveaus richting 2040 zijn dan onzeker (er zijn dan nog relatief weinig emissies), maar de macro-economische effecten blijven relatief stabiel omdat restemissies dan klein zijn. In gevoeligheden kunnen veranderingen in de jaarlijkse systeemkosten zomaar verdubbelen, met navenante extra bbp-druk.
- Realiteitscheck: huidige uitrol (o.a. wind op zee) loopt achter op de modelaannames. Als het KEV-tempo aanhoudt, komen Klimaatplan-doelen in gevaar of moeten systeemkosten fors omhoog door beleidsintensivering, wat de macro-economische impact en de concurrentiepositie van de industrie verzwakt. Aan de andere kant kan EU-brede versnelling van de uitrol de kosten/CO₂-prijzen van het Europese Emissiehandelssysteem (EU-ETS) dempen en daarmee het bbp-verlies.

Kernvraag en aanpak in twee stappen

De centrale vraag is wat de macro-economische gevolgen in 2040 zijn als Nederland versnelt naar klimaatneutraliteit (netto nul emissies) in 2040.

De aanpak bestaat uit twee vergelijkingen: eerst het effect van het EU-doel (-90% in 2040) ten opzichte van het door het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) naar 2040 doorgetrokken KEV-basispad, en vervolgens het aanvullende effect van Versnelling ten opzichte van het Klimaatplan.

Modellen en uitgangspunten van de berekeningen

De studie gebruikt het Nederlandse energiesysteemmodel OPERA (Option Portfolio for Emissions Reduction Assessment) en het wereldwijd dekkende algemeen-evenwichtsmodel WorldScan. OPERA bepaalt, gegeven beleidsdoelen, de kostenefficiënte technologiemix en de energiesysteemkosten (som van kapitaal-, operationele en onderhoudskosten, importkosten van energiedragers, inkomsten uit energie-export en brandstofkosten van binnenlandse brandstoffen). WorldScan vertaalt deze systeemuitkomsten naar prijzen, lonen, handel en productie per sector en koppelt iteratief terug naar OPERA. De beprijzingskaders omvatten EU-ETS 1 (industrie en elektriciteit) en EU-ETS 2 (gebouwde omgeving, wegverkeer, en landbouw); richting 2040 worden CO₂-opbrengsten grotendeels als lumpsum teruggestuurd naar huishoudens.

Technologische pijlers en uitrol

De berekeningen gaan uit van de volgende vier technologische pijlers:

1. mogelijk grootschalige CO₂-afvang en -opslag (waaronder Carbon Capture and Storage, CCS; bio-energie met CO₂-afvang en -opslag, Bioenergy with Carbon Capture and Storage, BECCS) toe te passen: het gaat om meer dan 35 Mt per jaar in 2040 (ongeveer 1,5× Porthos + Aramis), inclusief circa 25 Mt aan negatieve emissies via BECCS.
2. Wind op zee (rond 34 GW in 2040) en kernenergie (Borssele) vormen de motor voor een waterstofketen die grondstof, opslag en flexibiliteit voor het elektriciteitssysteem levert.
3. Tijdige versterking van netten (elektriciteit, waterstof-backbone en CO₂-transport/opslag) is cruciaal om de geplande opwek, elektrificatie en CO₂-afvang daadwerkelijk te kunnen realiseren.
4. Direct Air Carbon Capture and Storage, DACCS) kan negatieve emissies aanvullen; deze techniek is flexibel inzetbaar maar duurder per ton (indicatief tot € 400/t).

Resultaten 2040 onder huidige randvoorwaarden

Tabel.1: Structurele effecten in 2040 op (verschillen t.o.v. KEV; bedragen in € mrd./jaar)

Indicator	Versnelling –Klimaatplan	Versnelling	Klimaatplan
ETS-1 prijs = ETS2-prijs (€ / tCO ₂)	≈200	≈ 700	≈ 500
BBP (% t.o.v. KEV)	–0,4 procentpunt	–2,5 %	–2,1 %
BBP (€ mrd/jaar)	–5	–30	–25
Systeemkosten (% bbp)	+0,8 procentpunt	1,5 %	0,7 %
Systeemkosten (€ mrd/jaar)	+11	18	8
Netto-export (%)	–4	–8	–4
Werkgelegenheid ETS1 (duizenden)	-10	-16	-6
Werkgelegenheid ETS2 (duizenden)	+10	+16	6
Productie chemie (%)	-3	–18	–16
Productie basismetaleel/staal (%)	-13	–25	–12
Productie papier (%)	0	+4	+4
Productie bouwmaterialen (%)	-2	+3	+5
Primaire energie (PJ)	+70	3130	3060
Waterstof (TWh)	+16	46	30
CCS-opslag (Mt/jaar)	-3	32	35
Negatieve emissies (Mt/jaar)	-2	24	21
CO ₂ eq. Emissies (Mt CO ₂ eq.)	-23	0	23

Economisch mechanisme: van CO₂-beprijzing naar macro-effecten

De kostprijs van productie stijgt door het EU-ETS; bij extra unilaterale nationale beprijzing in het Versnellingsscenario verslechtert de concurrentiepositie. Een deel van de hogere kosten wordt doorberekend in prijzen, wat de ruilvoet (exportprijs gedeeld door de importprijs) verbetert, maar tegelijkertijd nemen de exportafzet en de binnenlandse vraag af. Hierdoor daalt het productievolume en verschromen of verplaatsen waardeketens; per saldo neemt de netto-export af en de importafhankelijkheid toe. Arbeid en kapitaal schuiven naar minder

CO₂-intensieve sectoren, waar extra investeringen en banen gemiddeld een lager rendement opleveren.

De structurele verschuivingen in de economie drukken het bruto binnenlands product (bbp) ten opzichte van het pad uit de Klimaat- en Energieverkenning (KEV). Sectoraal is het beeld ongelijk: de chemische industrie mist bescherming via het Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) en laat daardoor al in het Klimaatplan relatief grotere volumeverliezen zien, terwijl de basismetaalindustrie juist vooral in het versnellingsscenario productie verliest omdat de extra kostprijsimpuls niet onder CBAM valt.

Resultaten:

Productie en macro-economie

Het bruto binnenlands product (bbp) daalt in het Klimaatplan met 2,1% (ongeveer € 25 mrd per jaar). Dit is significant en wijst op een serieuze beleidsintensivering; het gaat om een structureel effect met doorwerking naar meerdere sectoren en handelsstromen. Een nationale versnelling voegt daar circa 0,4 procentpunt aan toe (ongeveer € 5 mrd per jaar).

De productie in sectoren die onder het EU-ETS valt laten duidelijke verschillen zien. De chemie krimpt met 18% en de sector basismetaal met 25%, omdat de laatste reducties relatief duur zijn; bovendien mist de chemie bescherming via CBAM, waardoor zij al in het Klimaatplan circa 16% productieverlies laat zien. De metaalsector verliest vooral in het Versnellingscenario, omdat CBAM uitsluitend beschermt voor Europese CO₂-beprijzing. Relatief energie-extensieve EU-ETS-subsectoren groeien juist: bouwmaterialen met ongeveer 4% en papier met circa 5%.

De netto-export daalt bij nationale versnelling met circa 1% extra, wat wijst op verschraling van waardeketens en een grotere importafhankelijkheid.

Wat werkgelegenheid betreft verdwijnen er bij nationale versnelling ongeveer 8.000 extra banen in EU-ETS-sectoren, waarvan bijna de helft in de chemie. Deze daling wordt grotendeels elders in de economie gecompenseerd via herallocatie en verduurzaming buiten EU-ETS.

Energie en emissies

Benodigd prijsniveau onzeker, maar macro-economische effecten variëren veel minder: in 2040 zijn restemissies klein, waardoor hogere of lagere CO₂-prijzen relatief beperkt doorwerken in het bbp.

De systeemkosten bedragen in 2040 in de KEV naar schatting circa € 85 miljard per jaar, ongeveer € 92 miljard per jaar in het Klimaatplan en rond € 103 miljard per jaar in het Versnellingsscenario.

Ondanks een afname van het fossiele energiegebruik met ongeveer 375 petajoule (PJ) neemt de totale primaire energievraag in het Versnellingsscenario toe. Dit komt doordat hernieuwbare elektriciteit in de energiestatistiek als primaire input wordt geteld, waardoor de gemeten primaire energiestromen stijgen wanneer de elektriciteitsproductie uit zon en wind sterk toeneemt.

Wat negatieve emissies betreft ligt het volume in het Versnellingsscenario grofweg 1 megaton (Mt) lager dan in het Klimaatplan, terwijl binnen CCS de samenstelling verschuift naar DACCS. De inzet van DACCS neemt met circa 6 Mt toe; deze optie biedt meer flexibiliteit maar is kostbaarder per vermeden ton CO₂ en vraagt extra elektriciteit.

CO₂-prijs

Het benodigde CO₂-prijsniveau in 2040 is onzeker, maar de macro-economische effecten variëren veel minder met die prijs. Omdat de restemissies in 2040 klein zijn, werken hogere of lagere CO₂-prijzen relatief beperkt door in het bruto binnenlands product (bbp).

Gevoeligheden en aannames

Hieronder een lijst met alternatieve aannames die gemaakt kunnen worden:

- Uitrolsnelheid (vergunningen, net, uitvoering, EU-coördinatie) kan sneller, waardoor lagere systeemkosten/kleiner bbp-verlies; Dit is weliswaar niet gesimuleerd, maar het is goed om te weten dat bij een lagere uitrolsnelheid trager, het omgekeerde zal gebeuren.
- Wanneer er een EU-brede doorbraak komt in technologie-uitrol, dan zal dit de ETS-prijzen drukken, en kan het bbp-effect van nationale versnelling ongeveer halveren.
- Uitgangspunt in de berekeningen is geen extra werkloosheid; dit zou het bbp-verlies vergroten (uitkeringen/belastingen). Ook zijn korte-termijncosten van frictiewerkloosheid op de arbeidsmarkt niet meegenomen.
- Bij hogere (lagere) handelsselasticiteiten vergroten (verkleinen) productieveverschuivingen, maar zal bbp-verlies drukken (vergroten), omdat herallocatie inputs naar andere sectoren makkelijker (moeilijker) wordt, want er zijn dan lagere (hogere) CO₂-prijzen nodig om gelijke emissiedoelen te kunnen halen.
- Ook kunnen we andere dynamiek/innovatie veronderstellingen maken: het meenemen van sectorale (internationale) spillovers op de productiviteit in de berekeningen kan de bbp-effecten zo maar verdubbelen t.o.v. een statische inschatting.

Aanbevelingen

Hieronder een lijst met alternatieve aannames die gemaakt kunnen worden:

1. Versnel vergunningen en netuitbouw; prioriteer aanlanding wind op zee (WOZ) en back-bone-infrastructuur voor waterstof en CO₂-transport/opslag.
2. Coördineer EU-breed de versnelling van WOZ, CCS en DAC om systeemkosten EU-breed én in Nederland te drukken en macro-economische effecten te dempen.
3. Herijk de balans tussen CO₂-beprijzing (ETS 1/ETS 2) en doelmatige subsidies voor emissiereductie; voorkom financieringsknelpunten die tempo remmen.
4. Schaal de Nederlandse CO₂-opslaghub op om industriële afvang op volume mogelijk te maken en de ETS-blootstelling industrie te beperken.
5. Gebruik geïntegreerde modellering (bijv. OPERA ↔ WorldScan) voor samenhangende afweging systeemkosten, handel en concurrentiekracht.

Leeswijzer

Dit rapport analyseert de economische gevolgen van twee beleidsvarianten: het Klimaatplan-scenario, dat uitgaat van een reductie van 90% van de broeikasgasemissies binnen de Europese Unie in 2040, en het Versnellingsscenario, waarin Nederland zelfstandig streeft naar volledige klimaatneutraliteit in datzelfde jaar. Het rapport is opgesteld door TNO in opdracht van het Ministerie van Klimaat en Groene Groei (KGG), en heeft tot doel beleidsmakers, onderzoekers en andere belangstellenden inzicht te geven in de macro-economische impact van verschillende beleidskeuzes.

De belangrijkste conclusies en aanbevelingen worden kort en kernachtig gepresenteerd in de managementsamenvatting.

Hoofdstuk 1 geeft een inleiding waarin de aanleiding van het onderzoek, de centrale onderzoeksvraag en de beleidscontext worden toegelicht. Dit hoofdstuk plaatst het onderzoek binnen de bredere discussie over Europees en nationaal klimaatbeleid en licht toe waarom deze scenarioanalyse relevant is voor de beleidsvoorbereiding richting 2040.

Hoofdstuk 2 beschrijft de methodologische aanpak van de studie. Hierin worden de gebruikte modellen (WorldScan en OPERA), de wijze van koppeling tussen beide, en de voornaamste aannames en beperkingen uiteengezet.

In hoofdstukken 3 en 4 worden vervolgens de twee hoofdscenario's uitgewerkt. Hoofdstuk 3 behandelt het Klimaatplan-scenario en schetst de verwachte emissiereducties, economische effecten, systeemkosten en sectorale verschuivingen. Hoofdstuk 4 presenteert het Versnellingsscenario, waarin Nederland versneld toewerkt naar volledige klimaatneutraliteit in 2040.

Hoofdstuk 5 bevat een onzekerheidsanalyse. Deze analyse maakt duidelijk welke economische consequenties samenhangen met het verschil in tempo en ambitie, en bevat tevens gevoeligheidsanalyses die laten zien hoe uitkomsten veranderen onder alternatieve aannames, zoals een snellere uitrol en benutting van technologieën.

Tot slot bevat het rapport een reeks bijlagen (A t/m I) waarin verdiepende technische informatie wordt verstrekt. Deze bijlagen bevatten onder meer details over gebruikte indicatoren, de werking van de modellen OPERA en WorldScan, onderliggende aannames bij de scenario's, en sectorale of modeltechnische toelichtingen. Deze delen zijn met name relevant voor lezers die de onderbouwing van de analyse nader willen bestuderen.

1 Inleiding

De Nederlandse overheid heeft besloten om de EU-doelstelling voor 2030, namelijk een reductie van broeikasgasemissies met 55% ten opzichte van 1990, ook nationaal te hanteren. Deze doelstelling is vertaald naar indicatieve sectoropgaven, wat ertoe leidt dat bepaalde sectoren in Nederland sneller moeten reduceren dan vergelijkbare sectoren in andere EU-lidstaten.

Tegelijkertijd neemt de verwevenheid tussen nationaal en Europees beleid toe. In het Klimaatplan is daarom voorgesteld om voor de periode na 2030 het reductietempo af te stemmen op het Europese traject zoals vastgelegd in de EU-Klimaatwet. Met het oog op de aankomende besluitvorming rond het Europese klimaatpakket richting 2040 is het van belang om beter zicht te krijgen op de macro-economische effecten van een afwijkend emissiereductietempo in Nederland ten opzichte van het EU-gemiddelde.

Om deze beleidsafweging te ondersteunen, heeft het Ministerie van KGG aan TNO gevraagd om de macro-economische gevolgen van verschillende reductiescenario's in kaart te brengen. De te analyseren varianten zijn in overleg met het ministerie vastgesteld.

Onderzoeksvraag

Wat zijn de macro-economische gevolgen voor Nederland bij versnelling van broeikasgasreducties naar klimaatneutraliteit in 2040?

De analyse richt zich op de periode tot 2040 en verkent hoe afwijkingen in tempo of ambitie invloed kunnen hebben op de concurrentiepositie, investeringskosten en bredere economische dynamiek.

2 Methodologische aanpak

Doel en Afbakening

Dit rapport verkent de macro-economische effecten van een versnelde route naar klimaatneutraliteit voor Nederland in 2040. Daarbij wordt aangenomen dat de ETS-prijzen (ETS1 en ETS2) exogeen en leidend zijn voor sectorale invulling van emissiereducties: Nederland heeft een kleine invloed op deze Europese prijsmechanismen. Dit impliceert dat het nationale reductiepad endogeen tot stand komt, gegeven een vast prijsniveau. Op Europees niveau wordt uitgegaan van een netto-emissiereductie van 90%, waarbij het aandeel negatieve emissies in lijn is met dat van Nederland. Ook hier blijven de ETS-prijzen constant en extern bepaald.

Scenario-opzet

1. Klimaatplan-scenario veronderstelt bestaand en aangekondigd beleid, waarbij in 2040 in Europa de netto CO₂ eq. emissies met 90% gereduceerd worden met een passende verhoging van de ETS-1 en ETS-2 prijzen (zie Hoofdstuk 3).
2. Versnellingsscenario veronderstelt ditzelfde principe, maar in dit scenario wordt ook netto-nul emissies in Nederland bereikt in 2040 door een uniforme CO₂ prijs boven op de ETS-prijzen, dus via snellere elektrificatie, CCS en (groene) waterstof, aanvullende infrastructuur en scherper nationaal beleid (zie Hoofdstuk 4).

State of the art en modelkeuze

Voor het beantwoorden van deze vragen is gebruikgemaakt van het TNO WorldScan-model (zie bijlage A voor een samenvatting van het model). WorldScan is een algemeen evenwichtsmodel dat eerder is toegepast voor macro-economische analyses van klimaatbeleid in opdracht van onder andere de Nederlandse overheid, de Europese Commissie, het IMF en de Wereldbank. Recente toepassingen betreffen onder meer de verplaatsingseffecten van de Nederlandse CO₂-heffing (Bollen et al., 2020) en de economische effecten van een verhoogde CO₂-minimumprijs voor elektriciteit en industrie.

Eerdere WorldScan-analyses zijn vaak gebaseerd op oudere datasets uit modellen zoals OPERA en COMPETES (zoals beschreven in Bollen et al., 2020). Recente scenario's, zoals ADAPT en TRANSFORM (door TNO) en TVKN2050 (door PBL), richten zich op systeemkostenoptimale reductiepaden, met nadruk op technologieën zoals CO₂-afvang en -opslag. Systeemkostenoptimaliteit betekent in dit verband dat de energietransitie wordt vormgegeven tegen zo laag mogelijke totale maatschappelijke en economische kosten.

In deze eerdere studies worden cruciale macro-economische factoren, zoals de concurrentiepositie, internationale handel en het bruto binnenlands product, als exogeen beschouwd. Daardoor blijven bredere macro-economische effecten, zoals veranderingen in handelsverwevenheid of internationale concurrentiekracht, slechts beperkt gekwantificeerd.

In dit rapport worden deze macro-economische factoren wel endogeen gemodelleerd, waardoor duidelijk wordt dat beleidskeuzes in de energietransitie significante economische gevolgen kunnen hebben. Dit is van bijzonder belang voor een open economie als Nederland, die sterk afhankelijk is van internationale handel en investeringsstromen.

Modellen en koppeling

Voor deze studie wordt gebruik gemaakt van OPERA en WorldScan.

1. OPERA (zie Bijlage B)

OPERA (Option Portfolio for Emissions Reduction Assessment) (van Stralen, 2021) is een lineair optimalisatiemodel, ontwikkeld door PBL en TNO, dat inzicht biedt in kostenefficiënte technologische combinaties om nationale klimaat- en energiedoelen te realiseren. Het model rekent per jaar en bepaalt, gegeven beleidsdoelen zoals een emissieplafond of een hernieuwbare-energie doelstelling, welke mix van technologieën tegen de laagste maatschappelijke kosten vereist is.

Het model dekt het gehele Nederlandse energiesysteem, inclusief industrie, gebouwde omgeving, transport, landbouw en elektriciteitsvoorziening. OPERA berekent vanuit de productie van verschillende sectoren de energiegerelateerde én niet-energiegerelateerde broeikasgasemissies, en kan desgewenst ook luchtverontreinigende emissies modelleren. Daarnaast kunnen ETS 1 en ETS 2-emissies afzonderlijk worden geanalyseerd.

Een onderscheidend kenmerk van OPERA is de expliciete systeemintegratie: energievraag en -aanbod moeten in elk tijdsblok in balans zijn. Dit is cruciaal bij hoge inzet van variabele hernieuwbare bronnen zoals zon en wind. OPERA werkt met een hoge temporele resolutie (tot honderden tijdsblokken per jaar) en bevat meer dan 500 technologieopties. Dit maakt het model bijzonder geschikt voor het verkennen van kosteneffectieve routes naar klimaatneutraliteit.

De output van OPERA biedt detailinformatie over technologie-inzet, energiedragers en emissies in specifieke jaren (zoals 2030 of 2050). Voor deze studie berekent OPERA zogeheten marginale reductiekosten per sector (Marginal Abatement Cost Curves, MACC's) ten opzichte van het basispad.

2. WorldScan (zie Bijlage C).

WorldScan is een recursief-dynamisch algemeen-evenwichtsmodel (CGE) voor langetermijnanalyses van de wereldeconomie. Het model simuleert economische groei, internationale handel, emissies en energieverbruik onder verschillende beleidsopties. In deze studie gebruiken we WorldScan om de macro-economische effecten van klimaatbeleid te analyseren, inclusief sectorale verschuivingen, aanpassingskosten en koolstoflekkage. Het model representeert de wereld als een verzameling landen/regio's die interacteren via handel, kapitaalstromen en milieubeleid; binnen landen worden sectoren en huishoudens afzonderlijk gemodelleerd met expliciete inputs van arbeid, kapitaal, energie en grondstoffen. Beleidsscenario's, technologische ontwikkelingen en demografie worden exogeen ingevoerd.

De kwantitatieve analyse is uitgevoerd via een iteratieve soft-link (Bijlage G) tussen OPERA en WorldScan. OPERA beschrijft het Nederlandse energiesysteem, stelt energie- en emissiebalansen op en berekent per sector marginale reductiekosten (MACC's) ten opzichte van het basispad; de aannames voor dit basispad in OPERA en WorldScan staan in Bijlage D. Deze MACC's worden per sector geparametriseerd tot functie-vormen die WorldScan als reductiekosten opgelegd krijgt. WorldScan simuleert vervolgens de macro-economische doorwerking en levert relatieve prijs- en vraagmutaties (onder meer voor energiedragers en productiefactoren, gegeven het exogene ETS-prijspad) en sectorale productieniveaus terug, waarmee OPERA de technologische keuzes herijkt. De cyclus wordt herhaald totdat de emissie-uitkomsten tussen beide modellen voldoende convergeren. Zo ontstaat een

consistent beeld van de wisselwerking tussen het nationale energiesysteem en de internationale marktdynamiek.

Beperkingen en interpretatie van de onderzoeksaanpak

Hoewel dit onderzoek inzichten biedt in de macro-economische gevolgen van een versneld reductiepad, is de analyse gebaseerd op een aantal structurele vereenvoudigingen. De resultaten uit modellen zijn gebaseerd op scenarioverkenningen onder aannames. De modellen zijn niet ontworpen om te voorspellen, maar vooral om mechanismen van beleidskeuzes in kaart te brengen. Bij de interpretatie van de resultaten moeten deze beperkingen in acht worden genomen.

De economische effecten die we rapporteren vormen een ondergrens: de oplossingsrichting is het kostenefficiënte pad binnen het Klimaatplan of het Versnellingscenario, waarin Nederland op een proportionele manier bijdraagt aan het Europese klimaatdoel van 90% reductie. Deze ondergrens veronderstelt een volledige en tijdige realisatie van de energiesysteemvoorwaarden zoals negatieve emissies, elektrificatie en beprijzing. In het versnellingscenario bouwen we daarop voort, wat resulteert in aanvullende kosten en structurele verschuivingen in sectoren. Hoewel de effecten modelmatig voorstelbaar zijn, is de realiteit aanzienlijk weerbarstiger. De benodigde versnelling leidt tot een grotere uitvoeringsinspanning: voldoende technisch personeel, snelle vergunningprocedures, ruimte op land en zee, stikstofruimte, netverzwaring en stabiele beleidsinstrumenten. Vertraging of uitval op één van deze punten - zoals nu al zichtbaar bij netcongestie en CCS-infrastructuur - bedreigt de samenhang van het beleid en maakt het risico op kostenstijging of doelverzuim reëel.¹ Het is de energievoorzieningszekerheid die serieus onder druk zal komen te staan als investeringen in infrastructuur, flexibiliteit of opwekkingscapaciteit onvoldoende tijdig gerealiseerd worden.

Deze risico's raken direct aan de drie pijlers waarop het versnellingspad steunt: negatieve emissies (zoals CCS/BECCS), versnelde elektrificatie via schone energie, en effectieve CO₂-beprijzing. Als één pijler stokt, renderen de andere ook minder. Daarmee is realiseerbaarheid niet alleen een kwestie van techniek of kosten, maar van uitvoeringscapaciteit en bestuurlijke coördinatie.

Een tweede beperking betreft de aard van het gebruikte economische model. WorldScan is recursief-dynamisch met vergelijkend-statische stappen en werkt met geaggregeerde meso-sectoren. Hierdoor blijven dynamische processen zoals technologische leereffecten, innovatiespiralen en investeringsgedrag onderbelicht. Sectorale herstructurering wordt slechts in hoofdlijnen zichtbaar. Meer detail hierop (kleinere meso-sectoren) kan de realiteitswaarde van de berekeningen verhogen. De richting van het effect op het bbp is vooraf niet duidelijk. Maar ook kunnen onderliggende verschuivingen, zoals het ontstaan van nieuwe verdienmodellen of het verdwijnen van niches, buiten de scope vallen van het model.

Daarnaast bestaat het risico van ongewenste neveneffecten van beleidsgestuurde technologische verandering. Wanneer beleid sterk inzet op decarbonisatie binnen bepaalde sectoren, kunnen andere sectoren zoals digitalisering, gezondheidstechnologie of industriële automatisering minder ruimte krijgen voor innovatie. Dit verdringingseffect (directed

¹ Daarnaast worden de effecten van schaarste aan specialistische materialen en goederen gekoppeld duurzame energie technologie (alle windmolens zijn even duur) wordt niet meegenomen, maar de arbeid nodig om duurzame energietechnologie te installeren en te bedienen is wel meegenomen in WorldScan.

technological change, Acemoglu et al., 2012; 2020) kan op termijn negatieve gevolgen hebben voor de brede productiviteitsgroei.

Een derde beperking betreft de manier waarop de internationale handelsverwevenheid van Nederland kan uitwerken op het bbp. In het versnellingscenario daalt de export structureel, met name in energie-intensieve sectoren. Dit heeft niet alleen directe gevolgen voor het verdienvermogen, maar beperkt ook de mogelijkheden om via handel toegang te houden tot internationale kennis en innovatie. Juist voor een kleine, open economie als Nederland is dit relevant, omdat een aanzienlijk deel van de productiviteitsgroei historisch is voortgekomen uit participatie in wereldwijde waardeketens. Uit de literatuur blijkt bovendien dat handelsparticipatie fungeert als katalysator voor technologische diffusie, bijvoorbeeld via import van kapitaalgoederen en ingebedde kennis (Coe & Helpman, 1995; Bloom et al., 2016). Deze langetermijneffecten worden slechts beperkt zichtbaar in de huidige analyse, wat betekent dat de economische impact van versneld beleid mogelijk wordt onderschat. Daarbij geldt dat de set van gebruikte handelselasticiteiten bepalend is voor de mate waarin handelsstromen reageren op prijsveranderingen: hogere elasticiteiten leiden tot grotere productieveverschuivingen, maar drukken het bbp-verlies omdat inputs makkelijker naar andere sectoren kunnen worden geheralloceerd, terwijl lagere elasticiteiten dit verlies juist vergroten doordat hogere CO₂-prijzen nodig zijn om dezelfde emissiereducties te realiseren (Bollen et al., 2020). Verder impliceert de aanname van competitieve markten een conservatieve inschatting van de bbp-effecten van klimaatbeleid, aangezien een marktvorm met monopolistische concurrentie bij dezelfde CO₂-prijsveranderingen de bbp-verliezen kan verdubbelen (Bollen & Romajosa, 2018). Ten slotte laat IMF (2025) zien dat investeringsonzekerheid de economische groei verder kan drukken; omdat klimaatbeleid onvermijdelijk tot een reallocatie van investeringen leidt, kan dit onzekerheid vergroten, waardoor het verdienvermogen extra onder druk komt te staan.

Een andere beperking betreft de beleidsmatige en temporele horizon van de studie. De focus ligt op 2040, terwijl het pad naar netto-nul emissies in 2050 en de bijbehorende economische consequenties buiten beschouwing blijven. In werkelijkheid beïnvloeden investeringen in infrastructuur, technologie en gedrag tussen 2030 en 2050 elkaar sterk. In het Klimaatplan-scenario – waarin in 2040 nog geen netto-nul wordt bereikt – geldt dat keuzes die in 2040 worden gemaakt, directe gevolgen hebben voor de haalbaarheid, kosten en efficiëntie van latere emissiereducties, en omgekeerd. In het Versnellingscenario wordt netto-nul al in 2040 behaald, maar de economische consequenties hiervan na 2040 zijn buiten beschouwing gelaten. Een intertemporele benadering is wenselijk om deze dynamische interacties beter in beeld te krijgen. Een dynamische variant van het OPERA-model zou dit kunnen ondersteunen, omdat het expliciet rekening houdt met langetermijninvesteringen en -beslissingen. Het combineren van WorldScan en OPERA, in combinatie met de middellange tijdshorizon, maakte het in deze studie echter niet mogelijk om deze aanpak te volgen.

Een belangrijke beperking is ook dat de mondiale energietransitie buiten de EU niet afzonderlijk is gevarieerd. In WorldScan worden de huidige internationale pledges meegenomen (UNFCCC, 2023), maar er wordt niet met alternatieve beleidsintensiteiten gerekend. Dit is een beperking, omdat afwijkende transitiepaden in landen als China, India en de VS substantiële effecten kunnen hebben op concurrentievermogen, koolstoflekage en handelsstromen. Tegelijkertijd geldt dat er buiten de bestaande pledges nog weinig concrete beleidsinformatie beschikbaar is.

WorldScan gaat uit van constante werkgelegenheid op macroniveau: de totale werkgelegenheid verandert niet substantieel door beleidschokken; de aanpassing verloopt via lonen en prijzen (CPB & PBL, 2019). Daarmee blijven tijdelijke werkloosheid, omscholings- en mismatchingkosten en budgettaire feedbacks (uitkeringen, automatische stabilisatoren, eventuele lastenmix-aanpassingen) grotendeels buiten beeld. Omdat niet uit te sluiten is dat de energietransitie een omvangrijkere en langduriger beleidsoperatie is dan eerdere vergroeningsimpulsen, kan deze aanname in de praktijk onder druk komen te staan. Als fricties materialiseren, kunnen bbp-verliezen en budgettaire effecten in werkelijkheid groter uitvallen dan in onze modeluitkomsten.

Tot slot, deze analyse veronderstelt dat er in Europa twee koolstofprijzen (ETS-1 en ETS-2) snel naar elkaar toe convergeren en leidend zijn voor mitigatie van emissies in Europa, maar in de realiteit is het de vraag of dat reëel is om dat te veronderstellen. Het is realistischer te veronderstellen dat de EU zelf of lidstaten naast deze beprijzing allerlei stimulansen inbouwen om voorzieningszekerheid en strategische autonomie te stimuleren – waardoor de EU als geheel meer kosten gaat maken inzake de energietransitie. Anderzijds wordt er ook extra stimulans gegeven om leereffecten (opschaling) in het gebruik van duurzame energie technologie te genereren. Dat betekent dat daardoor ook de mitigatiekosten hoger kunnen uitvallen dan wanneer uitsluitend met uniforme koolstofprijzen gewerkt zou worden, en dat de kostenefficiëntie van het Europees klimaatbeleid onder druk komt te staan.

Conclusie en aanbevelingen voor vervolgonderzoek

Samenvattend biedt deze studie richtinggevende inzichten in de economische gevolgen van een afwijkend Nederlands emissiereductietempo richting 2040. De uiteindelijke impact hangt sterk af van effectieve, voorspelbare en tijdige beleidsuitvoering. Belangrijke vervolgstappen zijn daarom verdere verkenning van infrastructuurplanning voor CO₂-opslag, betaalbare schone energievoorziening en consistente nationale CO₂-beprijzing. Daarnaast is het noodzakelijk om het analysekader zelf te versterken. Dit betreft enerzijds een betere integratie van dynamische processen zoals technologische innovatie, investeringsgedrag en effecten op bredere productiviteitsgroei. Anderzijds verdient ook de impact op internationale handelsverwevenheid en technologische spillovers nadrukkelijker aandacht in vervolgonderzoek. Tevens wordt aanbevolen om het analysekader uit te breiden met fijnmaziger regionale modellering en een intertemporele benadering van investeringen en beleidskeuzes richting netto-nul emissies in 2050. Zo ontstaat een scherper beeld van de economische houdbaarheid en toekomstbestendigheid van versnelde klimaatneutraliteit.

3 Klimaatplan-scenario²

In het Klimaatplan-scenario wordt aangenomen dat op EU-niveau een netto-emissiereductie van 90% in 2040 wordt gerealiseerd. Voor Nederland dient ruwweg het Klimaatplan als uitgangspunt, binnen de kaders van vier emissiereductiepaden die hierin zijn geschetst.³

Aangenomen wordt dat Nederland uitvoering geeft aan de Europese reductiedoelstelling van 90%, waarbij maatregelen in lijn zijn met het emissiehandelssysteem (ETS). Hierdoor wordt het speelveld voor de Nederlandse industrie zoveel als mogelijk gelijk gehouden aan dat van andere Europese landen.

Tabel 3.1 toont de relatie tussen verschillende CO₂-prijsniveaus in 2040 en de bijbehorende emissiereducties in de EU. Bij een prijs van €115/ton (cf. het Energy Package) halveert de uitstoot: zowel de EU als Nederland komt uit op circa -50% ten opzichte van 1990. Een verhoging naar €175/ton (cf. het Fit for 55-pakket) leidt tot een reductie van circa -78%. De overstap naar het Klimaatplan-scenario levert extra reductie op richting -90% in de EU.

Tabel 3.1: Klimaatemissies en beprijzing in 2040 in Klimaatplan scenario.

	Emissieprijs	Emissies EU (vergeleken met 1990)
	euro/tCO ₂	CO ₂ eq.
Energy Package	115	-50%
Fit for 55	175	-78%
Klimaatplan		-90%
ETS1=ETS2	≈500	ETS1=-120%, ETS2=-60%

Binnen het Klimaatplan-scenario is het emissiehandelssysteem opgesplitst. Op EU-niveau wordt netto 90% emissiereductie gehaald bij een gelijke prijs in ETS 1 en ETS 2 van ongeveer € 500/tCO₂, bij een restuitstoot van bijna 1000 Mt CO₂ in de EU. De ETS-2 sectoren blijken ondanks het hoge prijssignaal moeilijker te decarboniseren, en zijn goed voor meer dan de helft van de uitstoot. Er wordt in de EU in 2040 zo'n 250 Mt aan CO₂ opgeslagen, en 350 Mt vastgelegd door middel van land/bosbeheer.⁴

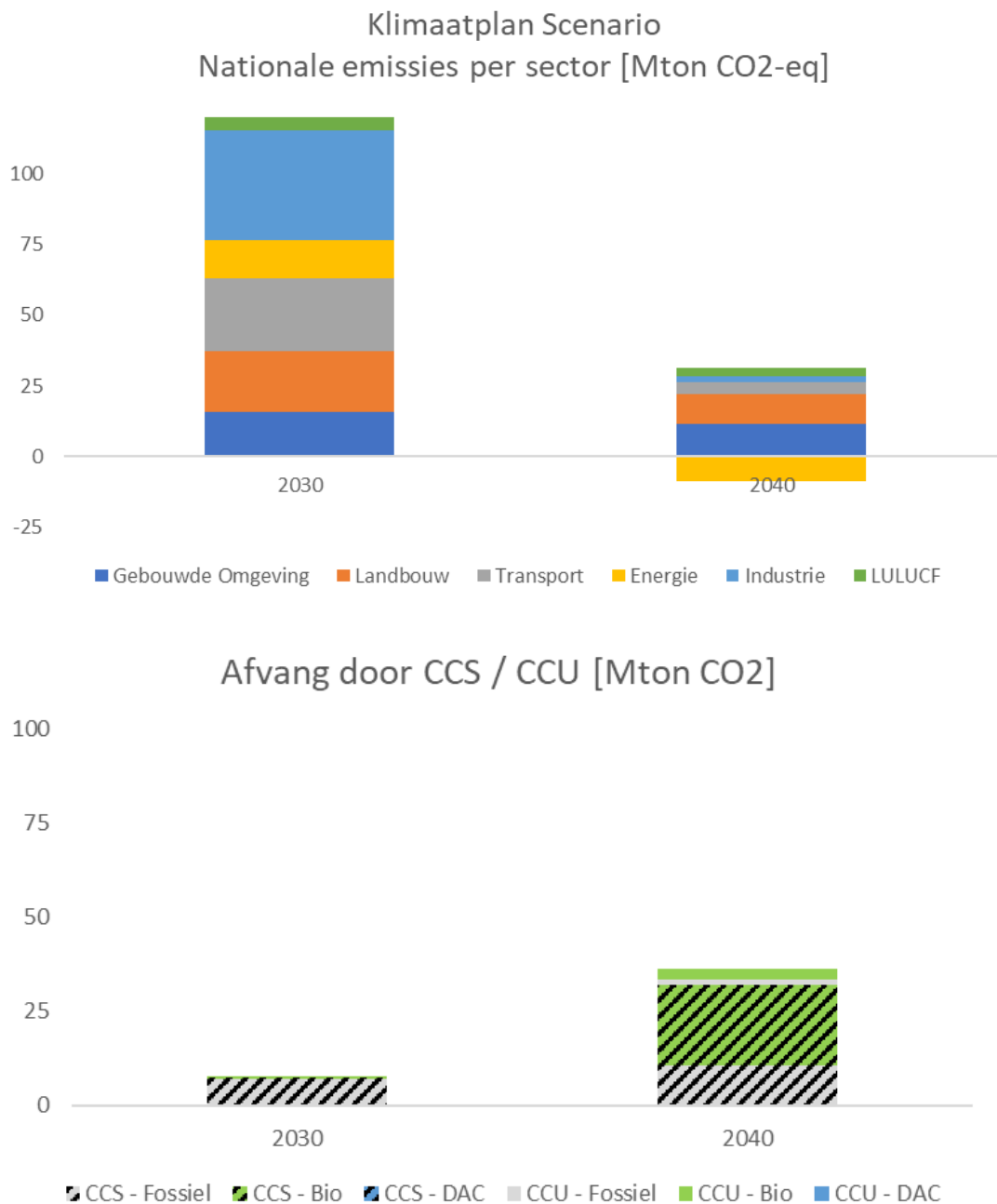
Het bovenste paneel van Figuur 3.1 maakt duidelijk hoe het nationale broeikasgassaldo in tien jaar tijd krimpt. In 2030 bedraagt de resterende netto-uitstoot nog ongeveer 120 Mt CO₂-eq per jaar: 5 Mt in LULUCF, 52 Mt uit Energie en Industrie en 63 Mt uit gebouwde omgeving, transport en landbouw. In 2040 is het saldo geslonken tot

² Bijlage E vat de belangrijkste inzichten samen van het Klimaatplan. Het gaat hier ook om 20-25Mton koolstofverwijdering voor 2040-2050, zie Routekaart koolstofverwijdering.

³ Wij gaan echter uit van een wat grotere inzet van negatieve emissies tot 35 Mt/jaar, inclusief 10 Mt/jaar zoals verondersteld in de KEV, om de marginale kosten van emissiereductie in 2040 niet te ver te laten oplopen. We komen hier nog op terug bij de bespreking van de resultaten.

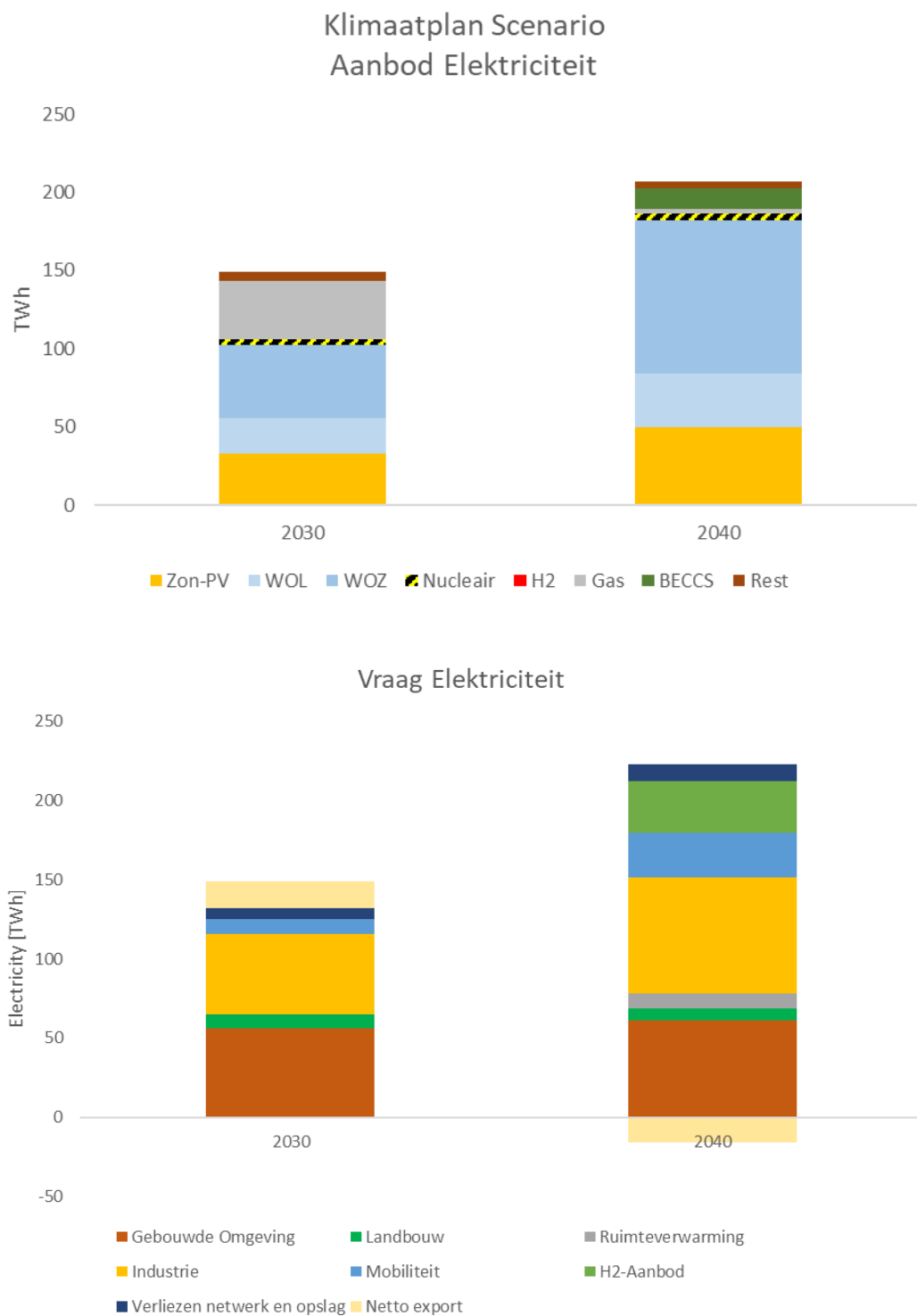
⁴ Bijlage F vat de belangrijkste inzichten samen van impact Assessment van de EU inzake 90% emissiereductie, en plaatst dit ook in de context van het Klimaatplan scenario.

rond 23 Mt CO₂-eq per jaar; LULUCF daalt naar 3 Mt, terwijl Energie en Industrie terugvalt naar -7 Mt en gebouwde omgeving, transport en landbouw naar 26 Mt.



Figuur 3.1: CO₂-eq emissies in Klimaatplan in 2030 en 2040

Voor de elektriciteits-, warmte- en zware-industriesectoren betekent dit een daling met circa 60 Mt. De uitstoot van elektriciteits- en warmteproductie zakt door elektrificeren en grootschalige CCS-projecten. Raffinaderijen reduceren dankzij de afnemende fossiele brandstofvraag, terwijl overige zware industrie van 40 Mt naar ongeveer 2 Mt terugloopt; wat dan nog rest, kan grotendeels gecompenseerd via BECCS en DACCS.



Figuur 3.2: Elektriciteitsaanbod-en vraag in 2040

De CO₂ eq. uitstoot door de gebouwde omgeving en mobiliteit blijft hardnekkiger. In 2030 veroorzaken woningen en utiliteit ruwweg 16 Mt CO₂-eq en wegverkeer 26 Mt; samen ruim 40 Mt. Ondanks warmtepompen, isolatie, warmtenetten en een snelgroeiende elektrische vloot dalen deze waarden in 2040 slechts tot ongeveer 12 Mt respectievelijk 4 Mt. Daarmee

vormt ETS 2 na tien jaar de grootste component van de restuitstoot, juist omdat het gaat om miljoenen kleine, consument-gerelateerde bronnen bij een prijssignaal van rond de 500 euro/tCO₂eq.

Het onderste paneel laat zien hoe CCS en CCU deze reductie ondersteunen. Tussen 2030 en 2040 groeit de inzet van CCS/BECCS van circa 7 Mt naar ongeveer 32 Mt CO₂-eq per jaar. Fossiele CCS is in 2040 gelijk aan 11 Mt, en niet-fossiele CCS 22 Mt. Projecten als Porthos (start 2029, ≈ 2,5 Mt / jaar) en Aramis (vanaf 2030, 5–7 Mt / jaar, oplopend) zijn hierin cruciaal. Zij maken het mogelijk om veel van de resterende ETS-1-emissies onder de Noordzee op te slaan. CCU blijft in 2040 beperkt tot ongeveer 4 Mt CO₂-eq per jaar; het biedt oplossingen voor synthetische brandstoffen en chemische bouwstenen, maar zorgt nog niet voor een grootschaliger aandeel in de permanente verwijdering.

De versnelde vergroening van de elektriciteitsvoorziening vormt de motor achter de scherpe ETS-1-daling uit Figuur 3.1. Figuur 3.2 schetst het evenwicht tussen vraag en aanbod. In 2030 stijgt de volumevraag naar circa 150 TWh/jaar, doordat industrie, gebouwde omgeving en mobiliteit versneld elektrificeren. Ruim 75% van deze behoefte wordt dan al geleverd door wind op zee, zon-PV en wind op land (weergegeven in respectievelijk donkerblauw, geel en lichtblauw). Flexibele gas- en waterstofcentrales (oranje) leveren 15% van de totale mix – om perioden met weinig zon en wind te overbruggen, aangevuld met kortdurende opslag in batterijen.

Onder het ‘elektrificatie-plus’-pad groeit de vraag in 2040 verder naar ongeveer 220 TWh/jaar: een brede uitrol van groene-waterstofproductie, een vrijwel volledig elektrisch wagenpark en diepgaande proceselektrificatie in de industrie zijn hier de belangrijkste drijfveren. Het aanbod houdt gelijke tred. Wind op zee verdrievoudigt tot circa 120 TWh/jaar en vormt de ruggengraat; zon-PV groeit naar ongeveer 50 TWh/jaar, terwijl aanvullende wind op land, importen (paars) en bio-energie (groen). Dankzij de opschaling van batterijen, conversie naar waterstof, seizoensopslag en vraagrespons slinkt het fossiele inzet tot 3 TWh/jaar (capaciteit 5GW), slechts een paar procent van het totaal.

Deze balans illustreert dat het afbouwen van fossiele back-up niet alleen afhangt van hernieuwbare capaciteit, maar ook van voldoende flexibiliteitsopties. Zonder grootschalige opslag en vraagrespons zou de toename in piekbelasting immers een veel groter beroep op gascentrales vergen. Figuur 3.2 laat daarmee zien dat de elektrificatieagenda hand in hand moet gaan met investeringen in flexibiliteit, infrastructuur en systeemintegratie om de ETS-1-afname uit Figuur 3.1 daadwerkelijk te realiseren (door flexibele vraag, batterij opslag, en back up centrales). Deze ontwikkeling verklaart waarom in Figuur 3.1 de kolom voor de elektriciteitssector – traditioneel de grootste uitstoter binnen ETS-1 – vanaf 2030 snel wegvalt. De resterende nationale emissies verschuiven daarmee naar GO en landbouw.

Tabel 3.2 geeft een overzicht van de verwachte structurele verschuivingen in productie en werkgelegenheid in de Nederlandse economie in 2040 onder het Klimaatplan-scenario, vergeleken met het basispad (dat overeenkomt met het nationale klimaatbeleid zoals vastgelegd in de KEV 2024 (PBL, 2024)). De cijfers illustreren hoe een beleidspad dat gericht is op 90% emissiereductie in Europa (en iets meer dan de ongeveer 80% emissiereductie in Nederland) leidt tot een herstructurering van met name de energie-intensieve sectoren, met implicaties voor zowel toegevoegde waarde als arbeidsmarkt.

Voor de arbeidsmarkt wordt verondersteld dat er geen extra werkloosheid zal optreden (zie ook CPB en PBL, 2018), en worden er geen kosten in kaart gebracht van de arbeidstransitie.⁵

⁵ Effecten op de vennootschapsbelasting zijn ook buiten de scope van deze analyse.

De productie in ETS-sectoren – waaronder industrie en elektriciteitsopwekking – daalt in totaal met circa 7 procent.⁶ Binnen deze categorie vallen duidelijke verschillen op: zo neemt de productie in de chemie met 16 procent af, evenals in basismetaal met 12%). Deze afname wordt verklaard door hogere energie- en koolstofkosten, gecombineerd met scherpe internationale concurrentie en beperkte bescherming via instrumenten als CBAM (Carbon Border Adjustment Mechanism), dat wel metalen dekt, maar de chemie vooralsnog grotendeels buiten beschouwing laat. Tegelijkertijd zijn er subsectoren die juist profiteren van de transitie: de papierindustrie en bouwmaterialenindustrie zien hun productie toenemen met respectievelijk 4 en 5 procent, mede door binnenlandse vraag naar emissiearme producten, circulaire bouwmaterialen en verpakkingssubstitutie.

Tabel 3.2: Structuurveranderingen macro-economische effecten in de Nederlandse economie in 2040 ten opzichte van basispad (KEV)

					Productie (%)			Werkgelegenheid (duizenden)		
ETS-1					-7			-6		
Basismetaal					-12			-6		
Chemie, rubber- en kunststofproducten					-16			-6		
Papierindustrie					4			8		
Bouwmaterialenindustrie					5			3		
Voedings- en genotmiddelenindustrie					2			1		
ETS -2					0			6		
Overige industrie					-1			0		
Landbouw					-17			-18		
Transport					-3			-1		
Overige diensten					1			41		
Macro-Economie (%)										
BBP	-2,1	Export	-4	Import	-2	Ruilvoet	1	Lonen	-3	
Systeemkosten (in mld./jaar)										
Totaal		8	ETS-1		5		ETS-2		3	

De werkgelegenheidseffecten volgen slechts deels hetzelfde patroon. In de ETS-industrie verdwijnen netto 6.000 banen, waarvan het grootste deel in de chemie (-6.000) en basismetaal (-6.000). Tegelijkertijd groeien de werkgelegenheidsaantallen in bouwmaterialen (+3.000) en papier (+8.000), wat wijst op een herallocatie van arbeid binnen de industriële sector. In ETS 2-sectoren blijft de productie gemiddeld gelijk, terwijl de werkgelegenheid daar juist netto toeneemt met circa 6.000 banen, waarbij opgemerkt moet worden dat er een afname is in landbouw (18.000) en transport, maar een toename in diensten (+41.000) – een verschuiving die typerend is voor lange termijntransities waarbij fysieke productiesectoren inkrimpen en ondersteunende diensten groeien. Deze

⁶ Het gaat hier om productievolume in constante prijzen. Als de compositie van onderliggende producten hetzelfde blijft is de verandering in constante prijzen gelijk aan de veranderingen in fysieke productie.

ontwikkeling impliceert ook een toenemende vraag naar her- en bijscholing, zeker in sectoren waar technologische veranderingen gepaard gaan met personeelskrimp.

Op macro-economisch niveau resulteert het Klimaatplan in een daling van het bbp van ongeveer 2,1 procent in 2040, vergeleken met het basispad. De export krimpt met 5 procent, voornamelijk door het verlies aan concurrentievermogen van energie-intensieve exportproducten aan landen waar minder stringent klimaatbeleid wordt gevoerd. De import daalt met 3 procent, wat deels verklaard wordt door een lagere vraag naar fossiele energiedragers. Interessant is de verbetering van de ruilvoet⁷ met 2 procentpunt: doordat geïmporteerde fossiele energie minder zwaar weegt in de Nederlandse importmix, verbetert de relatieve waarde van de uitvoer. Daar staat wel tegenover dat reële lonen met circa 2 procent dalen ten opzichte van het basispad, als gevolg van hogere inputkosten en herverdelingseffecten tussen sectoren.

Tot slot laat de tabel zien dat de totale systeemkosten – dat wil zeggen de meerkosten van het energiesysteem in 2040 – met 8 mld./jaar toenemen ten opzichte van het basispad in de KEV 2024. Deze kosten zijn vooral geconcentreerd in ETS-sectoren (5 mld./jaar), waar investeringen in CCS, elektrificatie en waterstof zwaar drukken op de kapitaalintensieve productieprocessen. De ETS 2-sectoren zien een kleinere kostentoeename, mede dankzij energie efficiëntie en kostenreducties in warmtepompen en hernieuwbare warmte. Deze uitkomsten zijn onder de veronderstelling dat het beleid voorspelbaar wordt uitgerold, internationale samenwerking standhoudt en flankerend arbeidsmarkt- en innovatiebeleid tijdig wordt opgeschaald.

⁷ De ruilvoet is de verhouding tussen de prijzen van de export en de prijzen van import van een land. Dit valt te berekenen door $\frac{\text{Exportprijsindex}}{\text{Importprijsindex}} \cdot 100$. Een hogere ruilvoet is economisch gunstig, omdat een land dan meer kan importeren tegen dezelfde export.

4 Versnellingsscenario

Tabel 4.1 toont de emissieprijs en bijbehorende emissiereductie in Nederland voor het Versnellingsscenario, waarbij Nederland streeft naar een volledige (100%) netto emissiereductie ten opzichte van 1990. Om deze ambitieuze doelstelling te realiseren, wordt in 2040 een nationale CO₂-prijs gehanteerd van rond de €200 per ton CO₂ - bovenop op de Europese ETS-prijzen van ongeveer €500 per ton CO₂ (zie ook het Klimaatplan scenario). Deze hoge beprijzing weerspiegelt de significante kosten van de maatregelen die nodig zijn om de resterende, moeilijk te reduceren emissies in Nederland volledig terug te dringen.

Tabel 4.1: Beprijzing in 2040 in Versnellingsscenario

	Emissieprijs	Emissies Nederland (vergeleken met 1990)
	euro/tCO ₂	CO ₂ -eq.
Versnelling	≈700	-100%

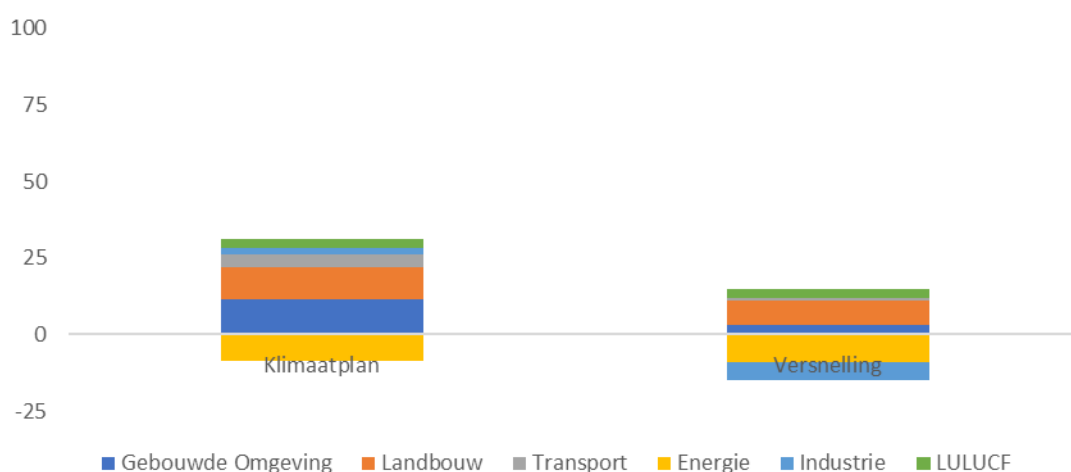
Ondanks deze forse nationale inspanning blijft de invloed op de EU-markt beperkt tot een lichte en insignificante CO₂-prijsdaling. De relatief beperkte impact op EU-niveau kan worden toegeschreven aan het feit dat Nederland slechts een klein deel van de totale Europese emissies voor zijn rekening neemt.

De hoogste kosten in het Versnellingsscenario hebben betrekking op het implementeren van negatieve emissies. Deze maatregelen zijn essentieel om emissies te compenseren in sectoren waar reductie technisch uitdagend of economisch kostbaar is—de zogenoemde hard-to-abate activiteiten. Negatieve emissies worden gerealiseerd door technieken zoals bio-energie met koolstofafvang en -opslag (BECCS) en CO₂-afvang en -opslag uit de lucht (DACCS), wat leidt tot relatief hoge marginale reductiekosten. Dit benadrukt de noodzaak van gerichte beleidsinspanningen en substantiële investeringen in technologische ontwikkeling en infrastructuur om volledige klimaatneutraliteit te bereiken.

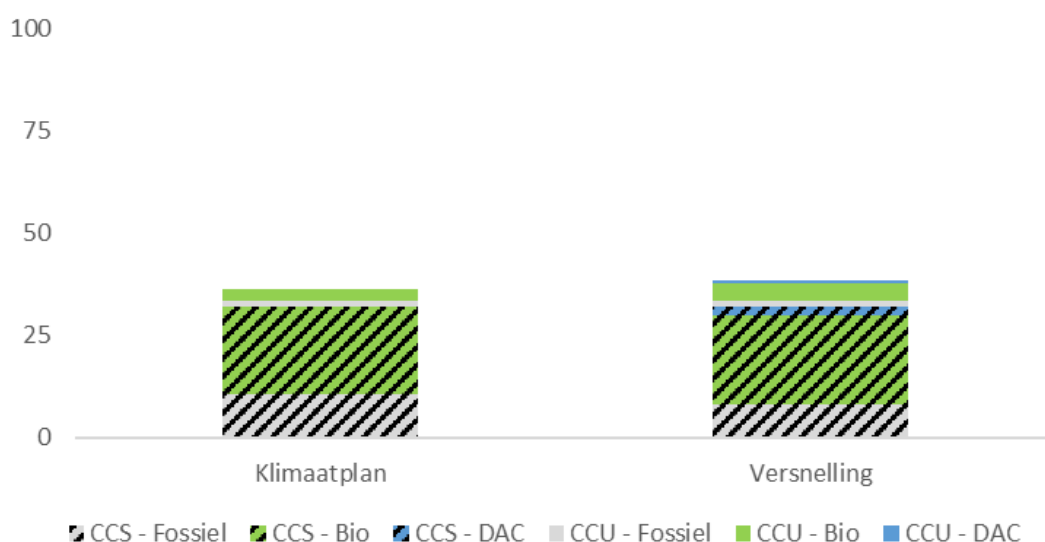
Figuur 4.1 presenteert de emissieontwikkeling binnen het Versnellingsscenario en volgt dezelfde structuur als Figuur 3.1, met een boven- en onderpaneel. In het bovenpaneel worden de emissies uitgesplitst naar ETS1 (industrie en energieproductie), ETS2 (gebouwde omgeving en transport) en LULUCF (landgebruik en bosbeheer). Het onderste paneel toont hoe verschillende technieken zoals CCS, en BECCS en DACCS bijdragen aan negatieve emissies. In vergelijking met het Klimaatplan-scenario laat het Versnellingsscenario een sterkere verschuiving zien in de bron van negatieve emissies: waar in het Klimaatplan vooral de energiesector voor negatieve emissies zorgt, komt dit binnen het Versnellingsscenario voornamelijk vanuit de industriële sector. In het Versnellingsscenario blijft het totale CCS-volume gelijk (CCS zit aan het capaciteitsplafond), maar de inzet verschuift. Ongeveer 5 Mt CO₂ minder wordt afgevangen en opgeslagen bij bioketels/WKK, kunstmestproductie en staal, terwijl juist meer CCS wordt gekoppeld aan DACCS en (bio)raffinaderijen. Deze herschikking volgt uit de kosten- en infrastructuurrestricties in OPERA en wordt in WorldScan vertaald via sectorspecifieke MACC-functies. Hierdoor dalen de residuele emissies relatief sterker bij raffinage en DAC, terwijl in kunstmest en staal meer reductie via alternatieve opties (bijv. elektrificatie, waterstof of procesaanpassingen) wordt gerealiseerd.

In 2040 realiseert Nederland hiermee netto nul emissies, ondersteunt door een toename van negatieve emissies van 21 naar 23 megaton. De inzet van bio-energie CCS neemt toe met 2 megaton. Tegelijkertijd neemt het koolstofhergebruik (CCU) toe met 2 megaton, wat eveneens extra elektriciteitsvraag met zich meebrengt, vooral voor processen zoals de productie van synthetische brandstoffen en chemische bouwstenen.

Scenario's: Klimaatplan en Versnelling Nationale emissies per sector [Mton CO₂-eq]



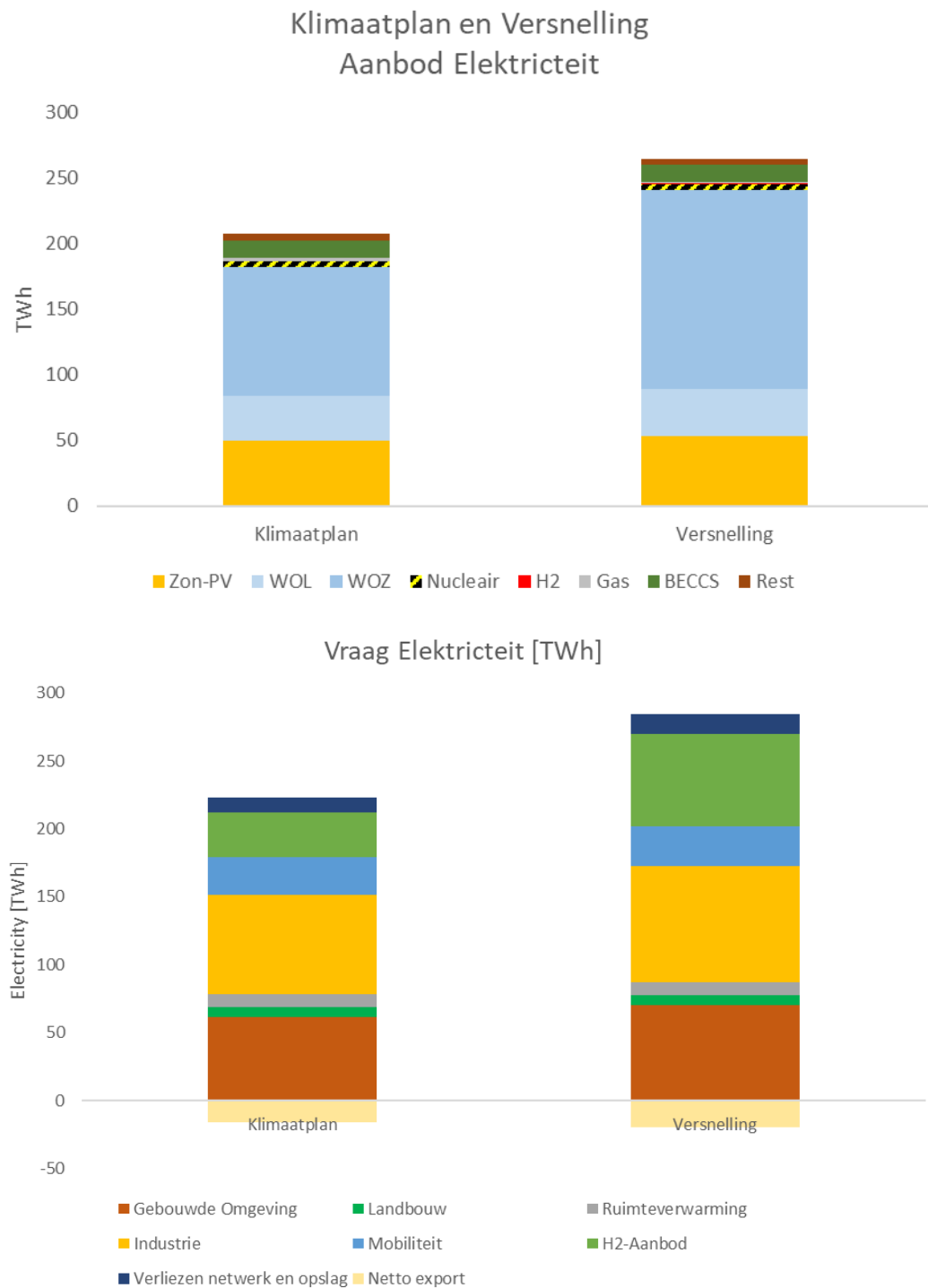
Afvang door CCS / CCU [Mton CO₂]



Figuur 4.1: CO₂eq-emissies in 2040 in Klimaatplan en Versnelling

Samenvattend laat Figuur 4.1 zien dat in het Versnellingsscenario ambitieuze reductiedoelen technologisch mogelijk zijn door verschuivingen en intensivering van negatieve emissies,

vooral via industriële inzet van DACCS/CCU. Dit brengt echter ook hogere elektriciteitskosten en infrastructurele uitdagingen met zich mee. Dit benadrukt opnieuw het belang van proactief beleid en substantiële investeringen in hernieuwbare energie, opslagtechnologieën en netwerkcapaciteit om aan deze sterk groeiende vraag te voldoen.



Figuur 4.2: Aanbod en Vraag Elektriciteit in Klimaatplan en Versnelling

Figuur 4.2 toont het evenwicht tussen elektriciteitsvraag en -aanbod in 2040. In het onderste paneel zien we de totale elektriciteitsvraag in het Versnellingsscenario ten opzichte van het klimaatplanscenario toenemen van circa 210 TWh naar ongeveer 265 TWh. Deze stijging wordt vooral gedreven door de inzet van DACCS, de groei in de gebouwde omgeving (circa 10 TWh), waterstofproductie (circa 35 TWh extra) en verdere elektrificatie in de industrie (circa 12 TWh extra). Deze toenemende vraag wordt hoofdzakelijk gedekt door een sterke groei van wind op zee (WOZ). De netto-export van elektriciteit daalt met circa 1 TWh ten opzichte van het Klimaatplan-scenario, wat mogelijk duidt op een kleinere exportmarge.⁸

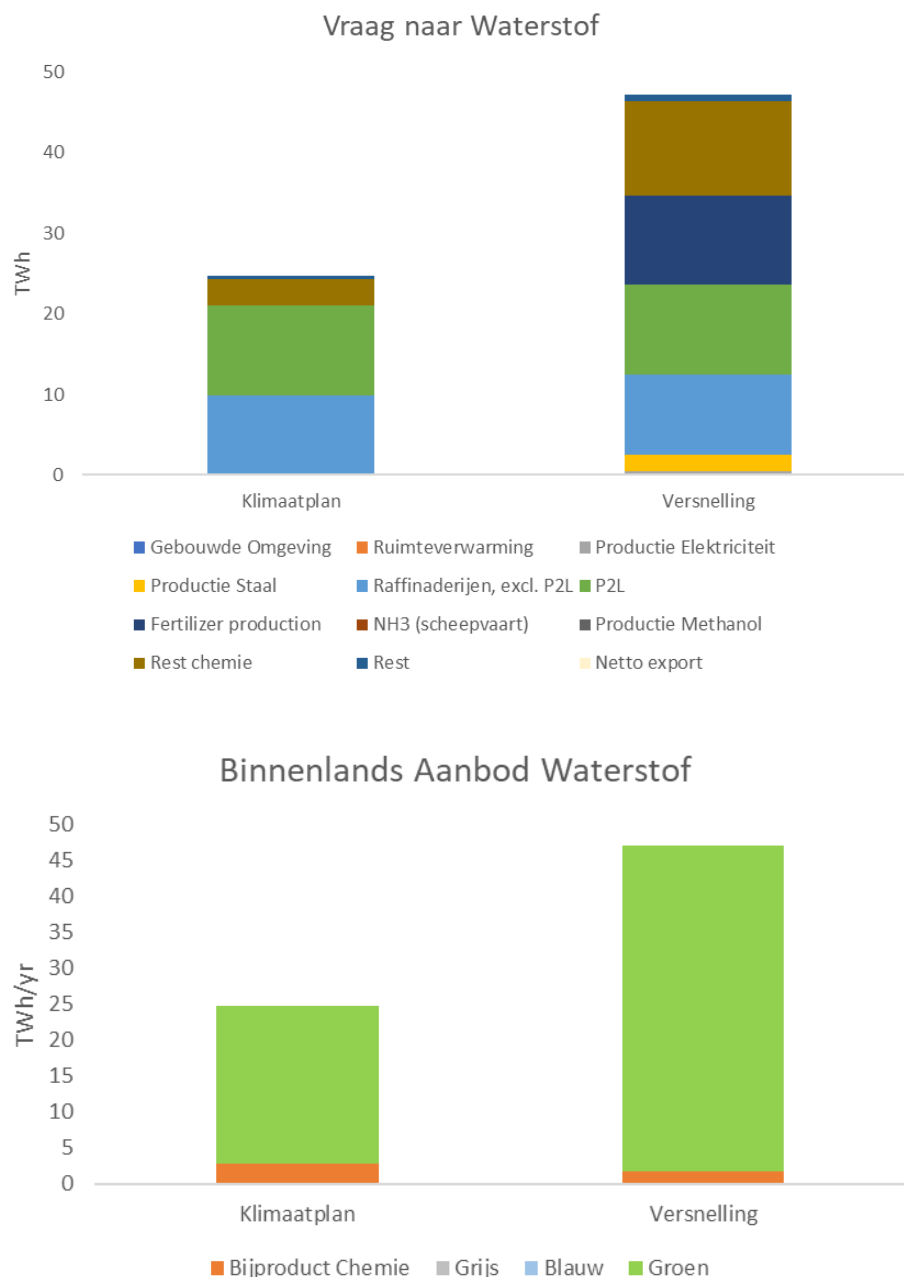
In het onderste paneel blijkt dat de productie uit wind op zee en zon-PV achterblijft bij hun geïnstalleerde capaciteit, wat wijst op curtailment – oftewel afschakeling of productiebeperking door mogelijk netcongestie en gebrek aan flexibiliteitsopties in het systeem. Deze beperkingen benadrukken het belang van verdere investeringen in netcapaciteit, flexibele vraag, en opslagoplossingen zoals batterijen en waterstofbuffers.

Figuur 4.3 laat zien hoe de vraag naar en het aanbod van waterstof zich ontwikkelt in het Klimaatplanscenario en Versnellingsscenario, opnieuw verdeeld over een onder- en bovenste paneel. In het bovenste paneel is de vraag naar waterstof uitgesplitst naar eindgebruik: met name de industrie en scheepvaart (onderdeel van “other”) laten in het Versnellingsscenario een duidelijke toename zien ten opzichte van het Klimaatplan-scenario. De industriële vraag stijgt met ruim 22 TWh, voornamelijk voor hogetemperatuurprocessen en als grondstof in de chemie. Ten opzichte van het Klimaatplan-scenario is dat circa 20 TWh extra, vooral toe te schrijven aan hogere inzet in de kunstmestproductie en overige chemie. Deze toename komt voort uit de technologische keuzes in OPERA-scenario's, waarin waterstof als voorkeursoptie naar voren komt bij hoge CO₂-prijzen in combinatie met een beschikbaar moleculair energiesysteem. Voor zwaar transport betreft het vooral zwaar wegvervoer en mogelijk de maritieme sector. De gebouwde omgeving speelt slechts een marginale rol in de waterstofvraag. In totaal ligt de vraag in 2040 in het Versnellingsscenario op ruim 45 TWh.

Samenvattend laat Figuur 4.3 zien dat het Versnellingsscenario gepaard gaat met een forse opschaling van elektrolysecapaciteit en een bredere inzet van waterstof, met name in moeilijk te elektrificeren sectoren. Dit stelt hoge eisen aan het energiesysteem, met name door de koppeling tussen elektriciteitsvraag en moleculaire ketens. De productie moet niet alleen schoon, maar ook betrouwbaar en betaalbaar zijn. Dit vereist tijdige investeringen in infrastructuur, zoals waterstofleidingen, buffers en importterminals, om het systeem in balans te houden.

Het onderpaneel toont de binnenlandse waterstofproductie naar bron. Hier groeit de elektrolyse op basis van hernieuwbare elektriciteit sterk, van circa 22 TWh in het Klimaatplan naar ruim 45 TWh in het Versnellingsscenario. Het aandeel bijproduct chemie daalt een beetje. Daarmee verduurzamen zowel de vraag- als aanbodzijde van de waterstofketen substantieel. Import blijft bescheiden maar relevant als aanvullende voorzieningsbron. De sterkere inzet op binnenlandse elektrolyse weerspiegelt ook hier de modelmatige optimalisatiekeuzes vanuit OPERA, waarbij binnenlandse productie gunstiger uitvalt dan import.

⁸ Andere verklaring is dat mogelijk de uurbasis import en export ook groter kan zijn.



Figuur 4.3: Waterstofvraag en -aanbod in 2040 in Klimaatplan en Versnelling

Tabel 4.2 presenteert de structuurveranderingen en macro-economische effecten in de Nederlandse economie in 2040 ten opzichte van het basispad. Wat als eerste opvalt in tabel 4.2, is dat de productie in ETS-sectoren in totaal met 13% afneemt ten opzichte van het basispad. Binnen deze groep is vooral de impact op de chemische sector fors, met een productiedaling van 18%. Ook de basismetaalindustrie (–10%) laat een substantiële krimp zien. Deze terugval wordt voornamelijk veroorzaakt door hogere koolstofprijzen, verlies aan internationale concurrentiepositie, en het ontbreken van een breed werkend CBAM voor de chemie. Deze sectoren worden geconfronteerd met oplopende marginale kosten, die niet volledig kunnen worden doorgegeven aan afnemers op de wereldmarkt. Opvallend is ook dat metaal sterk verliest (deze worden zelfs groter dan chemie). Dat komt omdat de

beprizing ten behoeve van versnelling niet door CBAM wordt beschermd (dus meer lekkage), maar ook zien we dat de marginale prijs van emissiereductie in staal boven chemie ligt, althans tot zo'n 60% van het niveau van de emissies van het KEV-basispad in die sector. En dat betekent dat in eerdere jaren richting 2040 metaalproductie al eerder weglekt (padafhankelijkheid). Koolstoflekkage van 8 Mt CO₂ reductie bij de industrie zal voor een deel binnen Europa en een deel buiten EU weglekken (ongeveer 3 Mt).

Daartegenover staan dat andere van oorsprong emissie-extensievere sectoren juist zullen groeien. De bouwmaterialenindustrie laat een productiegroei zien van 3%, mede doordat de binnenlandse vraag naar circulaire en emissiearme materialen sterk toeneemt. Ook de papierindustrie groeit met 4% door o.a. toenemend gebruik van biogene grondstoffen en substitutie van verpakkingsmaterialen.

In de ETS 2-sectoren blijft de totale productie gemiddeld gelijk, maar verschuift de verdeling. De landbouwsector krimpt met 8%, mede door strengere methaan- en stikstofdoelen en beperkte ruimte voor verdere intensivering. Transport laat een daling van 3% zien, onder meer als gevolg van hogere kosten en hogere operationele kosten voor emissievrij rijden, die gedragsverandering ontlokt. Daartegenover staat dat de dienstensector (grootste) groeit (+1%), gedragen door toenemende investeringen in advies, ontwerp, techniek en digitale ondersteuning voor de energietransitie.

De werkgelegenheidseffecten volgen een gedifferentieerd patroon. In ETS-sectoren verdwijnen per saldo circa 16.000 banen (geldt ook voor chemie). Dit weerspiegelt niet alleen productiedaling, maar ook een structurele daling van de arbeidsintensiteit door automatisering en schaalverkleining. Tegelijkertijd ontstaat er substantiële banengroei in de bouwmaterialensector (+3.000) en de papierindustrie (+2.000). In ETS-2 -sectoren is de groei breder gespreid, met name in de dienstensector, waar de werkgelegenheid stijgt met 43.000 banen. Dit duidt op een duidelijke verschuiving van arbeid naar kennisintensieve, niet-fossiele sectoren. De landbouw verliest 18.000 banen (gedragsverandering, technologische substitutie en afbouw van traditionele activiteiten).

Op macroniveau resulteert het Versnellingsscenario in een bbp-daling van 2,5% ten opzichte van het basispad. Dit is een intensivering van het effect in het Klimaatplan-scenario (-2,1%), en weerspiegelt de extra kosten en productieverlies bij een versnelde route naar netto-nul. De export daalt met 8%, vooral door het wegvallen van prijsgevoelige uitvoer in de chemie en zware industrie. De import daalt met 6%, onder andere door verminderde invoer van fossiele energiedragers.

De lonen dalen gemiddeld met 3% ten opzichte van het basispad. Dit is deels het gevolg van de sectorale herstructurering, waarbij relatief goedbetaalde industriële banen verdwijnen en vervangen worden door dienstverlenende arbeid. Tegelijkertijd worden productiekosten hoger door de inzet van kapitaalintensieve technologieën, zoals CCS en DAC, waardoor minder ruimte ontstaat voor loongroei. Dit vraagt om aandacht voor inkomensherverdeling, sociale compensatie en gerichte ondersteuning van kwetsbare groepen.

De systeemkosten – oftewel de extra maatschappelijke kosten van het energiesysteem – stijgen in het Versnellingsscenario met 18 mld./jaar meer ten opzichte van het basispad. Deze kosten zijn gelijk verdeeld over ETS-industrie (+9 mld.) en ETS 2-sectoren. Buiten ETS gaat het vooral door investeringen in gebouwenrenovatie, warmtenetten en emissievrije mobiliteit. Hoewel dit een forse stijging is, moet worden opgemerkt dat de versnelde inzet ook leereffecten genereert, die op de lange termijn juist tot kostenreductie kunnen leiden - een aspect dat in statische modellen niet volledig tot uitdrukking komt.

Tabel 4.2: Structuurveranderingen macro-economische effecten in de Nederlandse economie in 2040 ten opzichte van het basispad

					Productie (%)			Werkgelegenheid (duizenden)		
ETS-1					-9			-16		
Basismetaal					-25			-16		
Chemie, rubber- en kunststofproducten					-18			-6		
Papierindustrie					4			8		
Bouwmaterialenindustrie					3			3		
Voedings- en genotmiddelenindustrie					1			-2		
ETS-2					0			16		
Overige industrie					0			1		
Landbouw					-18			-18		
Transport					0			2		
Overige diensten					1			46		
Macro-Economie (%)										
BBP	-2,5	Export	-5	Import	-2	Ruilvoet	1	Lonen	-3	
Systeemkosten (in mld./jr)										
Totaal		18	ETS-1		9	ETS-2		9		

De modeluitkomsten laten zien dat volledige klimaatneutraliteit in 2040 technisch haalbaar is, mits alle systeemvoorwaarden tijdig en effectief worden ingevuld. In werkelijkheid is dat echter verre van vanzelfsprekend. De versnellingsvariant vereist uitzonderlijke uitvoeringskracht: voldoende technisch personeel voor netaanleg, CCS, verduurzaming van de gebouwde omgeving; versnelde vergunningverlening voor windparken, elektrolyzers en CO₂-opslag; en fysieke inpassing ondanks knelpunten als stikstofruimte, netcongestie en beperkte ruimte op land en zee. Deze belemmeringen zijn niet theoretisch, maar manifest - en leiden nu al tot vertraging bij sleutelprojecten in energie-infrastructuur en industrie.

Deze risico's raken direct aan de drie pijlers waarop het versnellingspad is gebouwd: negatieve emissies (zoals CCS en BECCS), versnelde elektrificatie met hernieuwbare opwek, en effectieve CO₂-beprijzing. De verwevenheid is groot: als één pijler faalt, dreigt het geheel te stagneren of uit te wijken naar duurdere of politiek moeilijker haalbare alternatieven. Daarmee is het versnellingspad niet alleen een economische of technologische opgave, maar vooral ook een bestuurlijke. Het vereist regie op de samenhang, capaciteit in de uitvoering en tijdige besluitvorming op ruimtelijke, ecologische en sociale randvoorwaarden.

Samenvattend laat Tabel 4.2 zien dat klimaatneutraliteit in 2040 gepaard zal gaan met substantiële structurele aanpassingen in de Nederlandse economie. De industriële productie krimpt in delen, arbeid verschuift richting diensten, en de handelsstructuur wordt herijkt. Daarnaast bevestigt de tabel dat de macro-economische effecten van het versnellingspad niet kosteloos is.

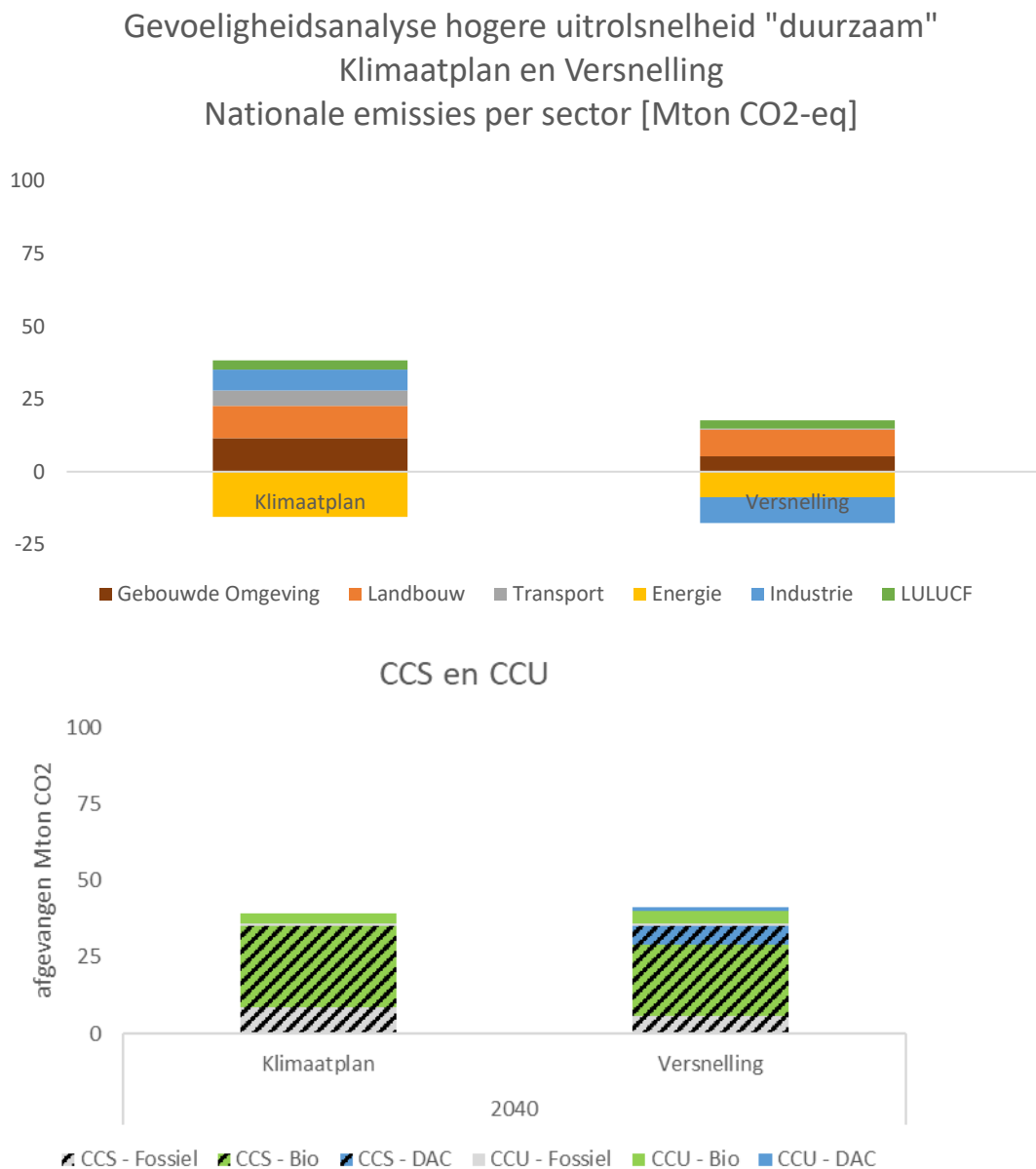
5 Gevoeligheidsanalyse: Meer en snellere uitrol ‘duurzame’ technologie

Hierin presenteren we wat de gevolgen zijn van gevoeligheidsanalyse door te variëren in de veronderstellingen bij expansiemogelijkheden van meerdere technieken. Voor details rond die aannames, zie bijlage D.

Tabel 5.1: klimaatemissies en beprijzing in 2040 in Klimaatplan en Versnellingsscenario met snellere uitrol technologieveronderstelling

	Emissieprijs
	euro/tCO ₂
Energy Package	115
Fit for 55	175
Klimaatplan	
ETS1 = ETS2 prijs	≈100
Versnelling	≈250

In het bovenpaneel van Figuur 5.1 worden de emissies uitgesplitst naar ETS1 (industrie en energieproductie), ETS2 (gebouwde omgeving en transport), landbouw en LULUCF (landgebruik en bosbeheer). Het onderste paneel toont hoe verschillende technieken zoals CCS, BECCS en DACCS bijdragen aan negatieve emissies. Het Klimaatplan-scenario verschilt voor netto-emissies niet wezenlijk; er zijn slechts kleine verschillen zichtbaar in de samenstelling van de negatieve emissiecomponenten. Voor het Versnellingsscenario is dit anders. Hier is sprake van een duidelijke verschuiving in de bron van negatieve emissies: waar in de eerdere variant van het scenario de industrie verantwoordelijk was voor het grootste deel van de negatieve emissies, ligt deze in deze variant bij de energiesector. En daaruit volgt dat het wind op zee potentieel in deze onzekerheidsvariant verder mag oplopen. De inzet van CCS en CCU blijft grotendeels vergelijkbaar met de eerdere variant: beide technieken worden maximaal benut binnen het veronderstelde potentieel. Opvallend is ook dat de toepassing van CCU op basis van biogene stromen (CCU-bio) verdubbelt, van 3 megaton CO₂-equivalent in het eerdere scenario naar 6 megaton in de deze variant.

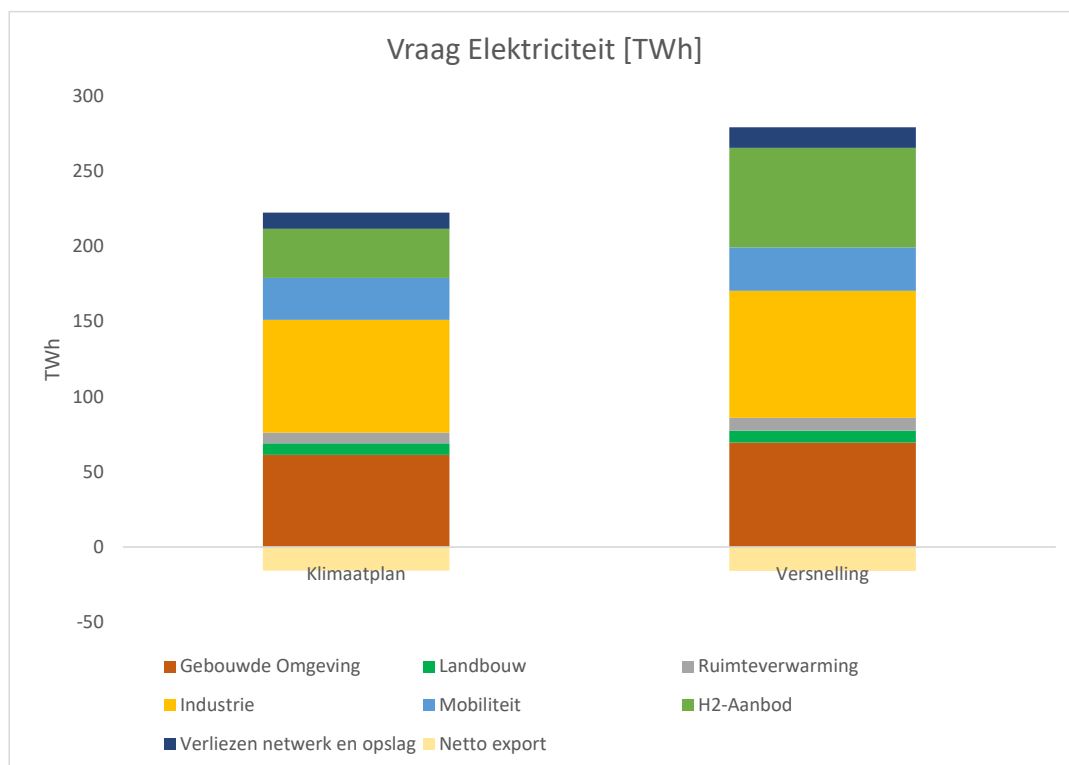
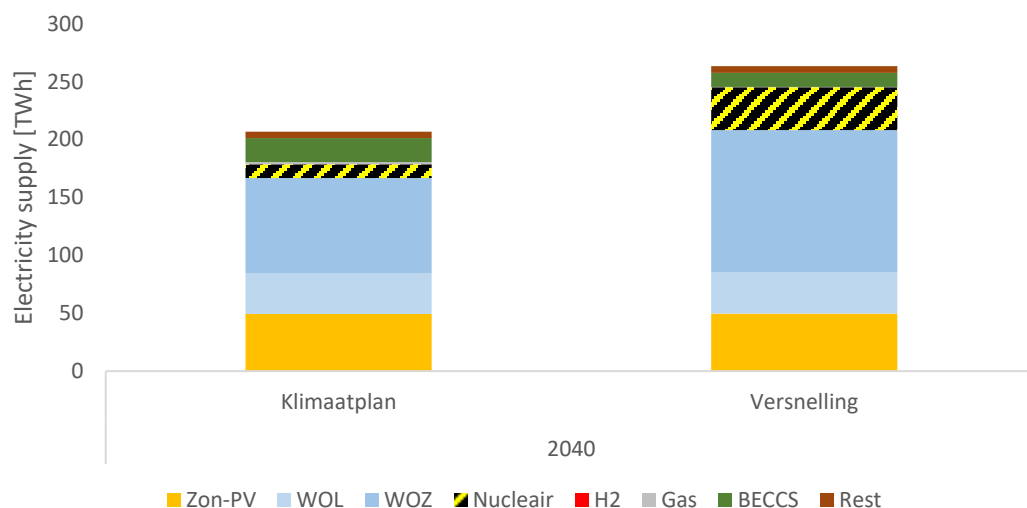


Figuur 5.1: CO₂-eq emissies in 2040 in Klimaatplan en Versnelling bij hogere uitrolsnelheid

Figuur 5.2 toont het evenwicht tussen elektriciteitsvraag en -aanbod in 2040, opnieuw verdeeld over een boven- en onderpaneel. Het verschil met het Klimaatplanscenario's beperkt, maar deze variant van het Versnellingsscenario laat een duidelijk sterkere toename in de totale elektriciteitsvraag zien: circa 60 TWh extra. Deze stijging komt met name door een forse uitbreiding van waterstofproductie (circa 40 TWh) en toegenomen industriële elektrificatie (ongeveer 15 TWh). In het bovenste paneel valt op dat wind op zee (WOZ) in het Klimaatplan-scenario lager uitvalt en deels wordt vervangen door kernenergie, dat daar een productie van 24 TWh bereikt. In het Versnellingsscenario wordt de extra elektriciteitsvraag voornamelijk ingevuld door een combinatie van aanvullende inzet van kernenergie, wind op zee. Maar in deze variant wordt in het Versnellingsscenario vooral ingezet op kernenergie.

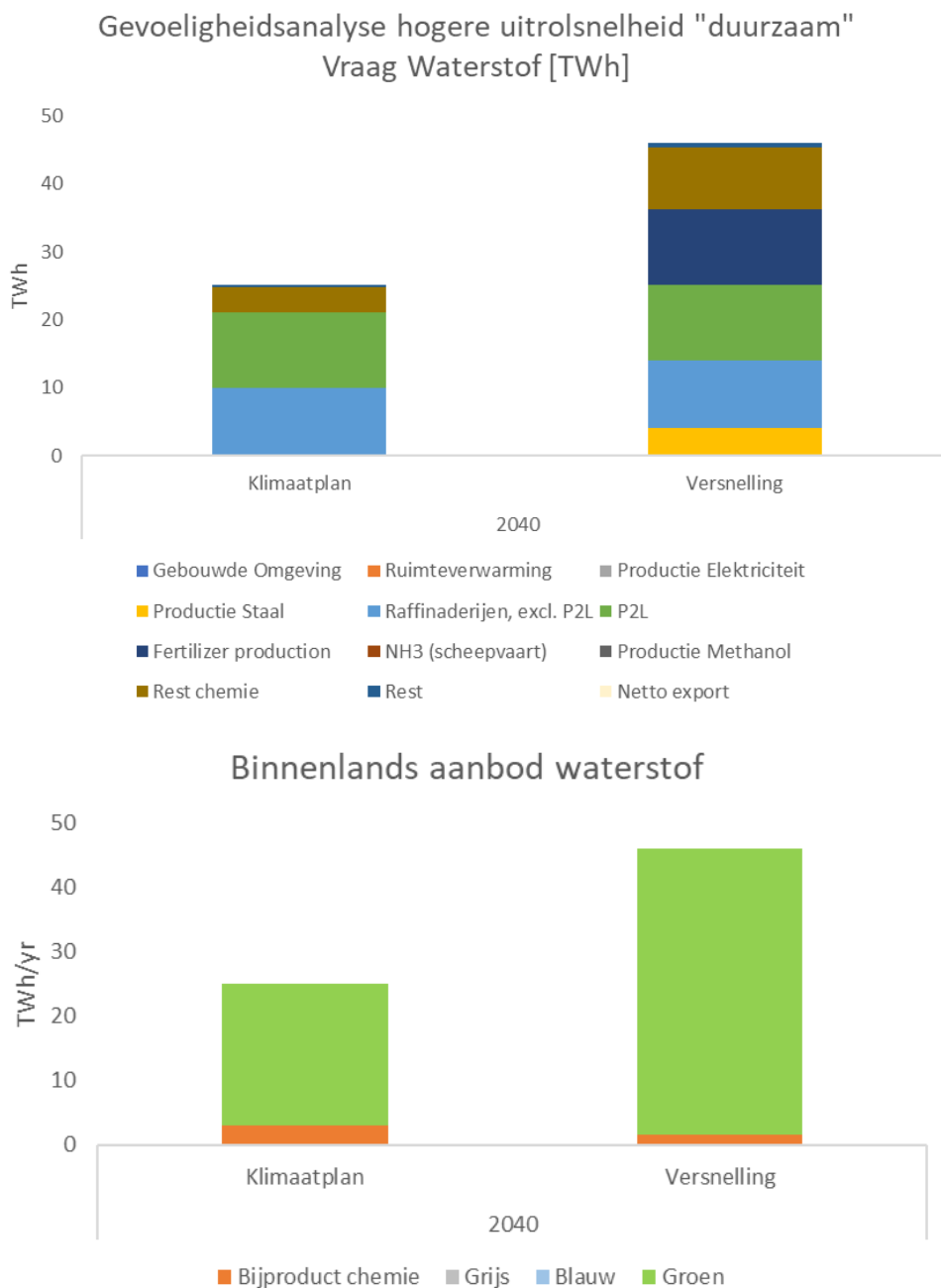
Samenvattend laat Figuur 5.2 zien dat deze variant van het Versnellingsscenario gepaard gaat met een forse groei van de elektriciteitsvraag, waarbij de rol van kernenergie duidelijk groter is dan in het Klimaatplan-scenario. De inzet van meerdere CO₂-arme energie technologieën is nodig om deze extra vraag betrouwbaar en duurzaam te dekken.

Gevoeligheidsanalyse hogere uitroolsnelheid "duurzaam" Klimaatplan en Versnelling Aanbod Elektriciteit



Figuur 5.2: Elektriciteitsvraag en -aanbod in 2040 in Klimaatplan en Versnelling bij hogere uitroolsnelheid

Figuur 5.3 laat zien hoe de vraag naar en het aanbod van waterstof zich ontwikkelt in beide scenario's, opnieuw verdeeld over een boven- en onderpaneel. In het bovenpaneel kunnen we constateren dat er geen grote verschillen zijn voor het Klimaatplan, maar in de versnellingsvariant is de waterstofvraag behoorlijk groter (ongeveer 20 TWh), vooral door extra aanbod van groene waterstof. De versnelling laat in de deze variant een verschuiving zien van 2 extra TWh voor H₂ voor staal ten laste van chemie. Dit stelt hoge eisen aan het energiesysteem, met name door de koppeling tussen elektriciteitsvraag en moleculaire ketens.



Figuur 5.3: Waterstofvraag en -aanbod in 2040 in Klimaatplan en Versnelling bij hogere uitroolsnelheid

Tabel 5.2 geeft een overzicht van de structurele macro-economische verschuivingen in de Nederlandse economie in 2040 wanneer Nederland versnelt naar volledige klimaatneutraliteit (100 procent netto-emissiereductie), vergeleken met het Klimaatplan waarin nog wordt uitgegaan van een reductie van 90 procent. De tabel laat zien hoe productie en werkgelegenheid zich per sector ontwikkelen, en welke effecten zichtbaar zijn op macroniveau, zoals het bbp, de handelsbalans, lonen en systeemkosten. Het gaat daarmee om de extra stap van negentig naar honderd procent emissiereductie, en niet om de vergelijking met de KEV.

In de ETS-sectoren laat de versnelling naar klimaatneutraliteit een duidelijke krimp zien. De totale productie ligt in 2040 2 procent lager dan in het Klimaatplan, en er verdwijnen circa 5000 banen. Maar vooral de basismetaalindustrie en de chemie worden hard geraakt. De basismetaal verliest ongeveer 13 procent productie en achtduizend arbeidsplaatsen, terwijl de chemie, rubber- en kunststofproducten met 3 procent inkrimpt en 2 duizend banen wint (arbeidsintensivering bij extra decarbonisatie). Dat de klap bij metaal groter is dan bij chemie hangt samen met de aard van de maatregelen die deze sector als eerste moet nemen. Voor metaal wegen de initiële reductiekosten relatief zwaar door, en bovendien speelt de bescherming via het Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) in dit stadium een minder doorslaggevende rol. De chemie ervaart juist structurele kwetsbaarheid door het ontbreken van CBAM-bescherming, maar bij de laatste stap van negentig naar honderd procent reductie vertaalt dat zich minder direct in extra productieverlies dan in de basismetaalindustrie. Daar staat tegenover dat subsectoren als papier en bouwmaterialen stabiel blijven of zelfs licht groeien. De papierindustrie wint één procent aan productie en creëert 2 duizend extra banen. De bouwmaterialenindustrie stijgt met 1 procent en duizend banen. De voedings- en genotmiddelenindustrie verandert nauwelijks en voegt hooguit een duizendtal banen toe.

In de ETS-2 sectoren blijft de productie gemiddeld gelijk, maar verschuiven de patronen in de werkgelegenheid. Er komen in totaal vijfduizend banen bij. Binnen de ETS-2 sectoren groeit de overige industrie licht met 1 procent productie en tweeduizend extra banen. De landbouw daarentegen laat een stevige krimp zien van 4 procent productie en verliest ongeveer 2 duizend banen. Ook de transportsector krimpt, met twee procent minder productie en een verlies van 2 duizend banen. Overige diensten groeien daarentegen licht, met 0,2 procent productie en zeventuizend extra banen. Dit bevestigt de trend dat arbeid verschuift van de energie-intensieve productie naar de dienstensector.

Op macroniveau zijn de verschillen tussen Versnelling en het Klimaatplan beperkt maar structureel. Het bbp ligt in 2040 0,5 procent lager dan onder het Klimaatplan. Hoewel de uitrol van technologieën in het scenario positiever verloopt, betekent dit niet dat de economische aanpassingen ook minder ongunstig uitpakken. Het verlies aan bbp is in deze variant zelfs iets groter. Dat komt waarschijnlijk doordat de metaalsector verder wegdrijft (padafhankelijkheid), waardoor daaraan gekoppelde internationale waardeketens onder druk komen te staan. Juist deze ketenwerking zorgt ervoor dat de structurele aanpassingen in de economie zwaarder doorwegen en het bbp-verlies relatief groot uitvalt. Export daalt met twee procent, terwijl de import met één procent terugloopt. De ruilvoet verbetert met één procentpunt, wat betekent dat de waarde van de uitvoer ten opzichte van de invoer toeneemt. De lonen blijven nagenoeg onveranderd.

De systeemkosten stijgen in het versnellingspad met 10 miljard euro per jaar ten opzichte van het Klimaatplan. Deze kosten zijn min of meer gelijk verdeeld over ETS- en ETS-2 sectoren, met respectievelijk 6 miljard en 4 miljard euro. Het gaat om de meerkosten van extra infrastructuur, negatieve emissies en elektrificatie die nodig zijn om de stap van negentig naar honderd procent netto-emissiereductie te maken.

Tabel 5.2: Structuurveranderingen macro-economische effecten in de Nederlandse economie in 2040 in Versnelling ten opzichte van Klimaatplan bij hogere uitroolsnelheid

					Productie (%)			Werkgelegenheid (duizenden)		
ETS-1					-2			-5		
Basismetaal					-13			-8		
Chemie, rubber- en kunststofproducten					-3			2		
Papierindustrie					1			2		
Bouwmaterialenindustrie					1			1		
Voedings- en genotmiddelenindustrie					0			1		
ETS-2					0			5		
Overige industrie					1			2		
Landbouw					-4			-2		
Transport					-2			-2		
Overige diensten					0,2			7		
Macro-Economie (%)										
BBP	-0.5	Export	-2	Import	-1	Ruilvoet	1	Lonen	-0	
Systeemkosten (in mld./jaar										
Totaal		10		ETS-1		6		ETS-2		4

Referenties

Acemoglu, D., Aghion, P., Bursztyn, L., & Hémous, D. (2012). The environment and directed technical change. *American Economic Review*, 102(1), 131–166.

Acemoglu, D., Akcigit, U., Hanley, D., & Kerr, W. (2020). Transition to clean technology. *Journal of Political Economy*, 128(4), 1565–1611.

Bloom, N., Draca, M., & Van Reenen, J. (2016). Trade induced technical change? The impact of Chinese imports on innovation, IT and productivity. *Review of Economic Studies*, 83(1), 87–117.

Bollen, J. en H. Rojas-Romagosa (2018) Trade wars: Economic impacts of US tariff increases and retaliations, an International Perspective. CPB Background Document, november.

Bollen, J., Deelen, A., Hoogendoorn, S., & Trinks, A. (2019). *CO2-heffing en verplaatsing*. CPB Achtergronddocument, CPB.

Bollen, J., et al. (2025). *Compensatie energiekosten nodig voor concurrentievermogen industrie*. ESB.

Bollen, J., G.W. Meijerink en H.A. Rojas-Romagosa (2016) Nederlandse kosten Brexit door minder handel. CPB Policy Brief, 2016/07.

CE Delft & Frontier Economics. (2023). *Carbon price floor for electricity generation and industry*. Geraadpleegd van [link](#)

Coe, D. T., & Helpman, E. (1995). International R&D spillovers. *European Economic Review*, 39(5), 859–887.

CPB & PBL (2019). *Expertworkshop CO2-heffing en verplaatsing*. CPB/PBL Achtergronddocument. Geraadpleegd van [link](#)

CPB en PBL (2018) De werkgelegenheidseffecten van fiscale vergroening. CPB Achtergronddocument, 2018-06.

EIA. (2021). *U.S. liquefaction capacity*. Geraadpleegd van [link](#)

EIA. (2023). *U.S. liquefaction capacity*. Geraadpleegd van [link](#)

Gasunie. (2023). *Benodigde capaciteit en volume voor borging van de leveringszekerheid voor gasjaar 2024/25*. Geraadpleegd van [link](#)

Hirth, L. (2022, September). *The merit order model and marginal pricing in electricity markets*. Retrieved April 2, 2024, from [link](#)

International Energy Agency (IEA). (2024). *Gas market report, Q1-2024*. Paris: IEA.

Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK). (2024). *Kamerbrief Besluitvorming gaswinning onder Waddenzee vanuit Ternaard*. Den Haag: EZK.

Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK). (2024). *Kamerbrief voortgang maatwerkafspraken verduurzaming industrie*. Geraadpleegd van [link](#)

Mulder, A., Bollen, J., Cozijnsen, E., Lomme, C., Rooijers, F., Van Soest, D., & Woerdman, E. (2023). EU-emissiesysteem bepaalt halen CO₂-doelen, fossiele subsidies secundair. *ESB*, 9–10.

Netbeheer Nederland. (2023). *Het energiesysteem van de toekomst: de 113050-scenario's*. Den Haag: Netbeheer Nederland.

Netbeheer Nederland. (2023). *Scenario's investeringsplannen 2024*. Den Haag: Netbeheer Nederland.

PBL (2024). *Klimaat- en Energieverkenning 2024*. Geraadpleegd van [link](#).

Rhodium Group. (2022). *US policy options to reduce Russian energy dependence*. New York: Rhodium Group.

SEO & TNO. (2019). *Verlaging van gaswinning tot beneden het niveau van leveringszekerheid*. Amsterdam: SEO.

TNO. (2022). *Jaarverslag delfstoffen en aardwarmte in Nederland*. Den Haag: Ministerie van Economische Zaken en Klimaat.

TNO. (2022). *North Sea Energy 2020–2022: Energy system and market analysis*. Amsterdam: TNO.

TNO. (2023). *De energiekosten van verschillende typen huishoudens in Nederland*. TNO.
TNO, HyXchange, & Berenschot. (2023). *Hydrogen spot market simulation*. HyXchange.

van Stralen, J.N.P., Dalla Longa, F., Daniëls, B.W., Smekens, K.E.L. & van der Zwaan, B. (2021). OPERA: a New High-Resolution Energy System Model for Sector Integration Research. *Environmental Modeling & Assessment*, 26, 873–889.

Bijlage A: Indicatoren

Voor deze studie zijn verschillende indicatoren gebruikt om de economische en energetische effecten van het klimaatbeleid richting 2040 te beschrijven. De indicatoren zijn afkomstig uit twee modellen: het macro-economische model WorldScan en het energiesysteemmodel OPERA. Deze modellen zijn met elkaar verbonden, zodat de uitkomsten van het ene model als input voor het andere kunnen dienen. Hierdoor ontstaat een samenhangend beeld van de kosten, effecten en verschuivingen die optreden bij versnelde emissiereductie.

Economische indicatoren

De belangrijkste economische indicator in deze analyse is het bruto binnenlands product (bbp). Deze maat geeft een algemene indruk van de omvang van de economie in verschillende scenario's. Een verandering in het bbp geeft aan hoe het versnellingspad zich verhoudt tot het basispad in termen van economische groei en productie.

Daarnaast zijn werkgelegenheid en lonen belangrijke indicatoren. Ze geven inzicht in hoe de energietransitie van invloed is op de arbeidsmarkt en de verdien capaciteit van huishoudens. In het model wordt aangenomen dat werk volledig wordt herverdeeld, maar de verdeling tussen sectoren kan wel degelijk verschuiven. Ook het niveau van de lonen verandert, afhankelijk van arbeidsproductiviteit en kostenontwikkelingen in verschillende sectoren.

De analyse kijkt ook naar de ontwikkelingen in handel, zoals export, import en de ruilvoet. Deze indicatoren zijn relevant om te bepalen in hoeverre de Nederlandse economie verandert door verschuivingen in internationale concurrentie of handelsstromen. Een daling in de export van energie-intensieve producten of een afname van fossiele import heeft directe gevolgen voor de handelsbalans.

Sectorale verschuivingen

Om de economische impact beter te kunnen duiden, is ook gekeken naar de veranderingen in productie per sector. Daarbij ligt de nadruk op de industrie, landbouw, transport en dienstensector. Binnen de ETS-sectoren zijn duidelijke verschuivingen zichtbaar. Zo daalt de productie in de chemie en zware industrie, terwijl sectoren zoals bouwmaterialen en papier juist groeien. Deze verschillen helpen bij het inschatten van waar ondersteuning of heroriëntatie van bedrijvigheid nodig is.

De werkgelegenheid per sector volgt deels hetzelfde patroon. In sectoren waar productie daalt, verdwijnen banen, terwijl andere sectoren juist arbeidsplaatsen creëren. Dit vraagt mogelijk om arbeidsmarktbeleid en investeringen in scholing.

Emissie- en klimaatindicatoren

Het niveau van de broeikasgasemissies (in CO₂-equivalenten) is een van de centrale indicatoren in deze studie. Het geeft aan hoe ver Nederland verwijderd is van de gestelde reductiedoelen in de verschillende scenario's. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen de ETS-1 sectoren, de ETS-2 sectoren en landgebruik en bosbeheer (LULUCF).

Daarnaast is er aandacht voor negatieve emissies, bijvoorbeeld door CCS, BECCS en DACCS. Deze technieken zijn vooral relevant in het versnellingscenario, waarin volledige

klimaatneutraliteit in 2040 wordt nagestreefd. Ook de inzet van CCU (hergebruik van CO₂) wordt besproken, al speelt dit een kleinere rol in de berekeningen.

Een andere belangrijke maat is het lekkagepercentage, oftewel het aandeel van de Nederlandse emissiereductie dat elders weer toeneemt doordat productie naar het buitenland verschuift. Dit effect is vooral zichtbaar in sectoren die internationaal sterk concurreren, zoals de chemie. Lekkage beperkt het mondiale klimaatvoordeel van nationaal beleid, en is dus van belang bij de beoordeling van kosteneffectiviteit. Omdat in 2040 echter de versnelling maar tot een beperkte emissiereductie leidt, is koolstoflekkage niet de meest interessante indicator. Vandaar dat focus in deze analyse zich op productielekkage richt.

Energie-indicatoren

De energieanalyse in dit rapport is gebaseerd op OPERA. Een belangrijke uitkomst is de verwachte elektriciteitsvraag en -productie in 2040. Elektrificatie van industrie, mobiliteit en gebouwde omgeving zorgt voor een forse stijging van de elektriciteitsbehoefte. Tegelijkertijd wordt gekeken naar het aanbod, en in hoeverre dit met hernieuwbare bronnen kan worden ingevuld. Hierbij spelen ook curtailment (onbenutte productie) en netcongestie een rol.

Een tweede kernindicator is het gebruik van waterstof, zowel aan de vraag- als aanbodzijde. Waterstof wordt in toenemende mate gebruikt als energiedrager en grondstof in industrie en zwaar transport. In de scenario's wordt onderscheid gemaakt tussen productie via electrolyse op basis van hernieuwbare elektriciteit en andere bronnen, zoals import of bijproducten uit chemische processen.

Verder is er aandacht voor het aandeel van hernieuwbare energie, de rol van kernenergie en het beperkte gebruik van synthetische brandstoffen. De laatste worden wel genoemd, maar zijn nog niet afzonderlijk als kwantitatieve indicator opgenomen.

Kosten en investeringen

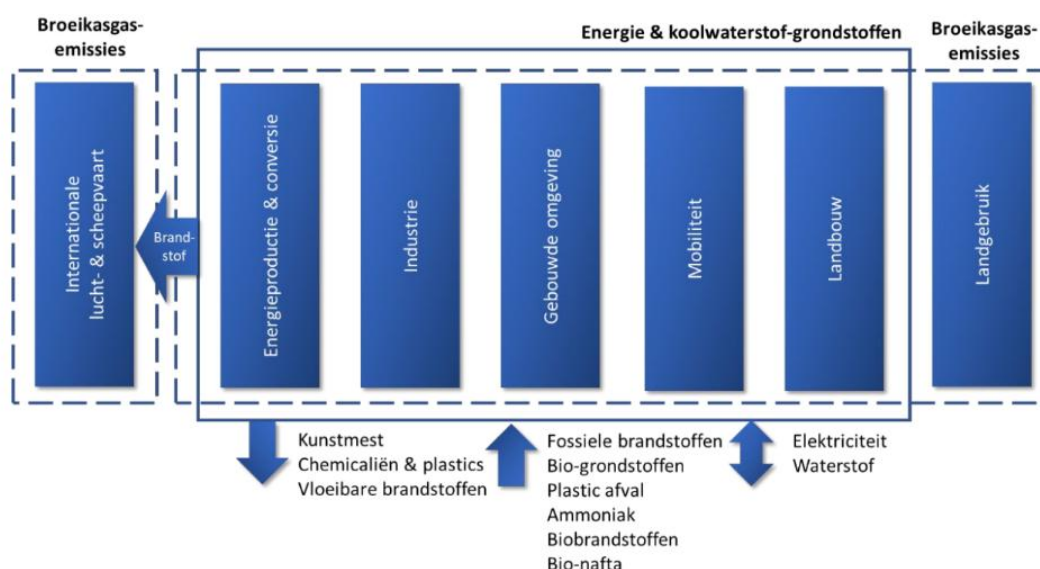
De systeemkosten van het energiesysteem vormen een belangrijke indicator om de financiële impact van de energietransitie te beoordelen. Deze kosten zijn berekend als de jaarlijkse meerkosten ten opzichte van het basispad, en worden uitgesplitst naar ETS-1 en ETS-2 sectoren. Ze omvatten onder andere investeringen in technologie, netwerken en infrastructuur.

Hoewel afzonderlijke infrastructuurinvesteringen (bijvoorbeeld in CO₂-opslag of waterstofleidingen) niet los als indicator zijn opgenomen, zijn ze wel impliciet meegenomen in de modelresultaten. In het rapport worden ze daarnaast op kwalitatieve wijze besproken, met aandacht voor tijdigheid, beschikbaarheid en knelpunten.

Hoewel de systeemkosten een belangrijke factor zijn in de analyse, is er een afweging tussen economische factoren en systeemkosten. In het algemeen gaan economische groei en hoge bbp ook samen met grotere systeemkosten. Vandaar dat bij het minimaliseren van systeemkosten ook aandacht dient te zijn voor de macro-economische factoren.

Bijlage B: OPERA

Met behulp van het OPERA-model (van Stralen, 2021) is het toekomstige Nederlandse energiesysteem berekend. Het OPERA-model omvat alle sectoren van het Nederlandse energiesysteem, inclusief koolwaterstoffen die in de industrie als grondstof worden gebruikt, zie Figuur B1. Het model beschouwt alle BKG-emissies, naast CO₂ ook de niet-CO₂ broeikasgassen (CH₄, N₂O en F-gassen), en de niet-energetische BKG-emissies van landbouw en landgebruik. Het model houdt ook rekening met de brandstoffen van internationale luchtvaart en scheepvaart die in Nederlandse zee- en luchthavens worden getankt. Hoewel de emissies van deze zogenoemde bunkerbrandstoffen niet meetellen voor de Nederlandse BKG doelstelling, worden deze brandstoffen binnen het Nederlandse energiesysteem geproduceerd en bepalen daarmee mede de energievraag en de bijbehorende BKG-emissies. Het Nederlandse energiesysteem importeert brandstoffen (zoals olie, kolen, aardgas en biobrandstoffen) en biograndstoffen, kan elektriciteit en waterstof importeren en exporteren en exporteert industriële producten die uit koolwaterstoffen zijn geproduceerd (zoals kunstmest, chemicaliën en plastics).



Figuur B.1 Nederlands energie- en broeikasgassensysteem in het OPERA-model.

Het OPERA-model wordt schematisch weergegeven in Figuur B2. De invoerparameters zijn:

- Maximale uitstoot van broeikasgassen, d.w.z. de BKG-doelstelling.
- Het bruto vloeroppervlak van woningen en gebouwen in de dienstensector, mobiliteitsvraag, productie van industriële producten en additionele energievraag (elektriciteit en warmte).
- Techno-economische gegevens van de technologische opties.
- Prijs van geïmporteerde energie en grondstoffen.
- Specifieke beperkingen op het gebruik van technologieën, zoals maximaal potentieel voor wind- en zonne-energieproductie, CO₂-opslag en kerncentrales.



Figuur B.2 Schematische weergave van het OPERA-model

Een uitgebreid overzicht van de gebruikte invoerparameters staat in Scheepers, et al. (2024). OPERA is een optimalisatiemodel en berekent een energiesysteem waarmee aan de vraag en de BKG-doelstelling kan worden voldaan op basis van laagste maatschappelijke kosten.⁹

Het OPERA-model levert de volgende resultaten op:

- Fysieke resultaten: energieaanbod en -vraag (totaal en per sector) en hoe die is samengesteld, gebruikte technologieën (bijv. geïnstalleerd vermogen, vollasturen), import en export van energie (bijv. fossiele energie, biomassa, elektriciteit, waterstof), resterende uitstoot van broeikasgassen.
- Economische resultaten: systeemkosten en jaarlijkse investeringen (totaal en per sector) en schaduw prijzen (gebaseerd op marginale kosten voor CO₂-reductie en productie van elektriciteit en waterstof).
- Een koolstofbalans met de herkomst en bestemming van koolstof in het energiesysteem. CO₂ dat wordt opgeslagen of opnieuw gebruikt wordt niet apart gelabeld. De mix van de opgeslagen en opnieuw gebruikte CO₂ wordt bepaald door de herkomst, d.w.z. afvang bij een fossiel of biogeen proces of uit de lucht.

Het OPERA-model houdt rekening met de fluctuerende energievraag gedurende een jaar en de wisselende energieproductie uit wind en zon. Hierbij worden vraag en aanbod per tijdsperiode gebalanceerd, waarbij ook gebruik wordt gemaakt van opties als vraagsturing en energieopslag en wordt rekening gehouden met import van en export naar buurlanden. Voor elk uur van het jaar zijn de import- en exportflows van elektriciteit met bijbehorende prijzen bepaald met behulp van een Europees energiemarktmodel, zie voor details (Scheepers, et al., 2024). Het OPERA-model hanteert een myopische benadering: voor elk volgend jaar waarvoor een energiesysteem wordt berekend, houdt het model rekening met de reeds aanwezige investeringen uit de voorgaande periode op basis van de technische levensduur van deze investeringen. Het model bepaalt of er extra capaciteit moet worden geïnvesteerd om aan de vraag te voldoen. Bij deze benadering wordt geen rekening gehouden met gebeurtenissen en doelen in de volgende jaren.

⁹ Bij het bepalen van de maatschappelijke kosten van het energiesysteem wordt aangesloten bij de nationale kosten-batenanalysemethodiek. De kosten bestaan uit van de som van geannualiseerde investeringskosten op basis van de technische levensduur en een nationale (maatschappelijke) discontovoet van 2.25%, jaarlijkse operationele kosten en energiekosten (of baten in geval van export).

Bijlage C: WorldScan

WorldScan is ontwikkeld als een instrument om lange termijnscenario's voor de wereldeconomie te construeren en om beleidsanalyses op het gebied van internationale economie te kunnen maken.¹⁰ Het model is een wereld-dekkend Computable General Equilibrium (CGE) model waarin de aggregatie van regio's en sectoren flexibel kan worden aangepast. Het detailniveau wordt alleen beperkt door het detail in de GTAP 9-database, die momenteel bestaat uit 57 sectoren en 140 landen; bijvoorbeeld alle EU-landen kunnen worden onderscheiden binnen de wereldeconomie. WorldScan biedt een modelleringskader voor het behandelen van beleid in de internationale economie. Alle soorten belastingen/subsidies op inputs van productie kunnen worden ingevoerd (of verwijderd).

De energie-versie van WorldScan wordt gebruikt voor de simulaties die hier gepresenteerd worden, bestrijkt de emissies van alle broeikasgassen.¹¹ Deze versie heeft een sectorale dekking die de agrarische sector, de fossiele brandstoffenmarkten, olie, gas en steenkool omvat, evenals de elektriciteitsmarkt, inclusief alle belangrijke hernieuwbare technologieën en koolstofafvang en -opslag (CCS). Bovendien bestrijkt het model alle belangrijke bronnen voor CO₂, dat wil zeggen emissies en verwijderingen gerelateerd aan LULUCF, inclusief bosbouw en landbouw. Zo biedt WorldScan de mogelijkheid om interacties tussen klimaatbeleid en ander beleid te beoordelen, met name beleid met betrekking tot industrieel klimaatbeleid, hernieuwbaar beleid, energie-efficiëntiedoelstellingen, luchtverontreiniging, emissies door landgebruik, energie- en hulpbronnen efficiëntie, ETS-beleid en beleid dat leidt tot een verhoogd gebruik van biobrandstoffen en biomassa, en koolstofabsorptiecapaciteiten van landgebruik en bossen. In deze analyse richten we ons op hogere gasprijzen. De sectorale indeling van de industrie (allen vallend onder het Europese Emissiehandelssysteem) in WorldScan is te vinden in Tabel C.1. Voor de toedeling van GAINS sectoren naar WorldScan om de emissieboekhouding en kostencurves te maken buiten Nederland, zie Tabel C.2

De Nederlandse industriële sector wordt gemodelleerd als onderdeel van de wereldmarkt, waarbij rekening wordt gehouden met de handelsverbindingen tussen landen en de resulterende onderlinge afhankelijkheden tussen markten. De regionale indeling van WorldScan is te vinden in Tabel C.3.

¹⁰ Dit deel van de beschrijving van algemene karakteristieken van WorldScan is gebaseerd op Lejour et al. (2006).

¹¹ Recente WorldScan-simulaties van klimaatbeleid worden gerapporteerd in Hoogendoorn, S., Trinks, A., en Bollen (2021), carbon pricing and relocation: Evidence from Dutch industry, zie voxeu.org. Het model wordt uitgebreid beschreven wat betreft zijn algemene eigenschappen in Lejour, A., Veenendaal, P., Verweij, G., en van Leeuwen, N. (2006), WorldScan: een model voor internationale economische beleidsanalyse, CPB Document Nr. 111, CPB. De energieversie van WorldScan wordt beschreven in Bollen (2015), The value of air pollution co-benefits of climate policies: Analysis with a global sector-trade CGE model called WorldScan, Technological Forecasting and Social Change, Volume 90, Part A, 2015, Pages 178-191.

Tabel C.1 Sectors		
Code	Sector	GTAP Sector
HOR	Horticulture	Vegetables, fruit, nuts; Other crops;
OAG	Other Agricultural Activities	Paddy rice; Wheat; Other cereal grains; Oil seeds; Sugar cane; Plant-based fibers; Bovine cattle; Other animal products; Raw milk; Wool; Forestry; Fishing
OIL	Winning of Oil	oil
COL	Winning of Coal	Coal
GAD	Winning and distribution of Gas	Gas; Gas manufacture and distribution
MIN	Other Minerals	Other mining
P_C	Oil Refineries	Petroleum and coal products
BME	Basic Metals	Ferrous metals; Non-ferrous metals
CRP	Chemical, Rubber, and Plastics	Chemical, rubber, plastic products
PPP	Paper prod.& publish.	Paper products, publishing
NMM	Other mineral prod.	Non-metallic minerals
COF	Processed foods	Bovine meat products; Other meat; Vegetable oils and fats; Dairy products; Processed rice; Sugar; Other food; Beverages and tobacco
CPI	Capital Goods	Metal products; Motor vehicles and parts; Other transport equipment; Electronic equipment; Other machinery and equipment
CON	Consumer Goods	Textiles; Wearing apparel; Leather products; Wood products; Other manufacturing
ELY	Electricity Production	Electricity
OTP	Transport over land	Other transport
TRR	Other Transport	Water transport; Air transport
OSE	Other Services	Water, Construction; Trade; Communication; Other financial services; Insurance; Other business services; Recreational and other services; Public administration, defense, education, health; wellings

Source: TNO

Note: Aguiar, Narayanan en McDougall, 2016, an Overview of GTAP9 Data Base, *Journal of Global Economic Analysis*, vol, 1(1): 181-208.

Tabel C.2 Mapping tussen GAINS activities and WordScan sectors

Worldscan sectors	GAINS sectors
Animal Products	Agriculture: Livestock
Other agriculture	Agriculture: Ploughing, tilling, harvesting
	Crops left on field
	Other transport: agriculture and forestry
	Domestic sector - other services, agriculture
	Domestic sector - forestry, fishing, and non-specified sub-sectors
	Storage and handling: Agricultural products (crops)
	Rice cultivation
	Agriculture: grassland and soils / organic soils / Other
	Manure treatment and manure distributed on soils
	Forestry
	Waste: Agricultural waste burning
	Use of mineral N-fertilizer
Minerals NEC	Mining: Bauxite, copper, iron ore, zinc ore, manganese ore, other
	Storage and handling: Iron ore
Consumer Goods	Meat produced
	Food (incl. beverages and tobacco) manufacturing industry
	Fat, edible and non-edible oil extraction
	Textile industry
	Wood and wood products industry
Coal, Oil, Natural gas, Petroleum&coal products	Fuel combustion in furnaces used in the energy transformation sector
Oil, Natural gas	Waste: Flaring in gas and oil industry
Natural gas, Petroleum, coal products	Own use of energy sector and losses during
	production, transmission of final product
Oil	Extraction of crude oil
Natural gas (incl. distribution)	Extraction, proc. and distribution of gaseous fuels
	Transportation of gas
Coal	Mining: Brown coal, Hard coal
	Storage and handling: Coal
Petroleum&coal products	Crude oil & other products - input to Petroleum refineries
	Ind. Process: Briquettes production
	Conversion: Combustion in boilers
Electricity	Power and district heating plants
	Industrial power and CHP plants
Energy intensive, Consumer Goods, Capital goods & durable	Other Industry
	Ind. Process: Agglomeration plant - pellets / Small industrial and business facilities
	Ind. Process: Carbon black production / Open hearth furnace
Energy intensive	Iron and Steel Industry
	Chemical Industry
	Non-Ferrous Metals
	Building Materials Industry
	Paper and Pulp Industry
	N - fertilizer production
	Storage and handling: N,P,K fertilizers
	Wastewater from organic chemical (non-food) manufacturing industry
	Nonenergy use of fuels
	Storage and handling: Other industrial products (cement, bauxite, coke)
	Ind. Process: Production of Cement / Lime / Glass
	Ind. Process: Production of Bricks / Basic oxygen furnace / Cast iron / Coke oven
Transport	Road transport - Heavy duty vehicles / Light duty vehicles
	Road transport - Motorcycles / Motorcycles, mopeds and cars with 2-stroke engines
	Other transport: rail / offroad / other off-road
	Other transport: domestic air traffic - civil aviation / inland waterways / maritime activities
Services	Domestic sector - commercial and public services
	Waste treatment and disposal
	Waste water treatment (domestic)
	Municipal solid waste
	Waste: Open burning of residential waste
	Gasoline distribution
	Construction activities
	Other transport: mobile sources in construction and industry
Consumption categories	
Gross rent and fuel, Other goods and services consumed	Domestic sector - residential
Transport and communication	Road transport - Light duty vehicles: cars and small buses with 4-stroke engines

Tabel C.3 Regions	
Code	Country / region
NLD	Netherlands
REU	EU-28
USA	USA
ROE	Rest of the OECD
ROW	Rest of the World

Source: TNO

Het primaire doel van de analyse is om een beter begrip te krijgen van de effecten van een hogere gasprijs op de vooruitzichten voor de industriële sector en koolstofemissies (inclusief potentiële koolstoflekken). Een hogere gasprijs kan in specifieke sectoren leiden tot kostenstijgingen van inputs voor de productie. Dit heeft op zijn beurt gevolgen voor de concurrentiepositie en de prijzen van leveringen, wat op de lange termijn ook zal leiden tot structurele veranderingen door een herverdeling van arbeid en investeringen over sectoren. WorldScan schat de omvang van directe verschuivingen van belangrijke industriële sectoren naar kostbare, koolstof-intensieve productiemethoden. Deze gesimuleerde respons lost tegelijkertijd eventuele productieveranderingen op als gevolg van veranderingen in de binnenlandse vraag of veranderingen in concurrentievermogen in een op handel gebaseerde wereld (het model bestrijkt de hele wereld in vooraf gedefinieerde regio's of landen). Hoewel het WorldScan simulaties doet met een tijdstap van één jaar tot aan het gekozen eindjaar, hebben we ervoor gekozen ons hier te richten op de simulatieresultaten van het meest beleidsrelevante jaar van 2030.¹²

Scenario en databronnen¹³

De opzet van de basissimulaties in WorldScan volgt de KEV 2022. Dit omvat het herkalibreren van modelparameters (bijvoorbeeld totale factorproductiviteit, energievraagtechnologieën) om macro- en meso-economische groei, energievraag door industriële sectoren en broeikasgasemissies te kunnen simuleren, evenals de prijzen van olie, gas en de EU ETS-prijs zoals gerapporteerd in de KEV 2022.

Een hogere prijs kan de productieprocessen veranderen, waardoor een overstap van fossiele energie naar waterstof en elektriciteit wordt bewerkstelligd.¹⁴ De modelopties omvatten verschillende reductieopties qua reductiepotentieel (in tCO₂eq.) en hun marginale reductiekosten (in EUR/tCO₂eq.) zoals gerapporteerd in het Ontwerp Klimaatakkoord.¹⁵

¹² Dit jaar 2030 wordt ook gebruikt als eindjaar om de complexiteit van de analyse minimaal te houden.

¹³ De analyse bouwt met gasprijsvariaties bovenop op het basispad zonder CBAM (zie CEDelft en Frontier Economics, 2023) en met CBAM (binnenkort te verschijnen in een TNO rapport).

¹⁴ De reductie-kostenfuncties zijn gebaseerd op van Dam, D., Gamboa Palacios, S., en Wetzels, W. (2021), manufacturing industry decarbonization data exchange network – the database, PBL-rapport, Den Haag.

¹⁵ Zie, <https://www.klimaatakkoord.nl/documenten/publicaties/2019/06/28/klimaatakkoord>.

Bijlage D: Aannames basispad en scenario's

Deze bijlage beschrijft de belangrijkste uitgangspunten en keuzes voor het basispad – KEV2024, het Klimaatplan en het versnellingscenario. Deze scenario's zijn doorgerekend met het energiemodel OPERA en het macro-economisch model WorldScan.

De scenario's zijn niet bedoeld als exacte voorspellingen, maar om inzicht te geven in de mogelijke economische effecten van beleidsrichtingen met verschillende ambities. Ze illustreren de structurele aanpassingen en bijbehorende risico's van een versnelde decarbonisatie.

Het Klimaatplan-scenario sluit aan bij het concept-Klimaatplan 2025–2035, en gaat uit van:

- 90% emissiereductie in EU in 2040 ten opzichte van 1990;
- Een proportionele bijdrage van Nederland aan het Europese klimaatdoel;
- Europese coördinatie van CO₂-beprijzing via ETS 1 (industrie en energie) en ETS 2 (gebouwde omgeving, mobiliteit en landbouw);
- Gelijmatige groei van CO₂-prijzen, zonder nationale toeslagen;
- Realistische uitrol van infrastructuur, hernieuwbare energie en afvang- en opslagcapaciteit; Deze is wat naar beneden bijgesteld, vanwege de vertragingen die we voor WOZ zien in de afgelopen jaren (en bijstelling van de plannen).
- Geen extra beleidsinterventies naast bestaand (gepland) beleid.
- Het beleid in het basispad buiten Nederland (dus in andere EU-landen) representeert een kostenefficiënt traject, waarin reductie plaatsvindt waar dit het goedkoopst is.
- Het pad vanaf nu wordt ingezet om de CO₂-reducties in 2040 van het Klimaatplan te realiseren waardoor de reductie in 2030 hoger kan uitvallen dan 55% reductie.

Het versnellingspad onderzoekt de gevolgen van het versneld bereiken van volledige klimaatneutraliteit in Nederland in 2040. De belangrijkste kenmerken zijn:

- 100% emissiereductie van broeikasgassen in Nederland in 2040;
- Nationale aanvulling boven op het Europese ETS-beleid via een uniforme nationale CO₂-heffing voor alle sectoren waarbij richting 2040 de CO₂-beprijzing in ETS-1 en ETS-2 volledig convergeert.
- Maximale inzet op negatieve emissies via CCS en BECCS;
- Verregaande elektrificatie en opschaling van wind op zee, kernenergie en groene/blauwe waterstof;
- Geen compensatie via internationale offsets of import van negatieve emissies;
- Constante wereldvraag en -aanbod, met aanpassing via relatieve prijzen en handelsstromen.
- De extra reducties worden nationaal gerealiseerd, zonder gebruik te maken van de flexibiliteitsopties binnen de EU.

Deze scenario's zijn doorgerekend in OPERA en WorldScan. Het mondiale achtergrondpad dat in WorldScan is gebruikt, is gebaseerd op het AMPERE-project ('refpol'-scenario, zie Kriegler et al., 2013). Dit pad bevat trends voor bevolkingsgroei, bbb-ontwikkeling per regio,

energiegebruik per drager en regio, technologische doelstellingen (indien van toepassing) en fossiele brandstofprijzen op basis van WEO2009. Hierbij wordt een olieprijs van 100 USD per vat in 2020 aangenomen; gasprijzen in Europa volgen met vertraging, terwijl kolenprijzen op het niveau van 2009 blijven.

De kalibratie gebeurt via aanpassing van modelparameters: totale factorproductiviteit (TFP) voor bbp, energie-efficiëntie voor energievolumes, en de beschikbaarheid van natuurlijke hulpbronnen voor energieprijzen. In beleidsvarianten worden deze parameters gefixeerd, zodat bbp, energiegebruik en prijzen endogeen zijn.

Beleid

De beleidsmatige uitgangspunten in deze analyse zijn gebaseerd op de Klimaat- en Energieverkenning (KEV) 2024 (PBL, 2024) en aanvullend beleid binnen het Klimaatplan 2025–2035. In de modellering wordt onderscheid gemaakt tussen Europees en nationaal beleid, en tussen wat wel en niet expliciet is meegenomen in de modellen OPERA en WorldScan.

Beide scenario's nemen het bestaande Europese klimaatbeleid als uitgangspunt, waaronder:

- Na 2030 convergeert de CO₂-beprijzing van EU-ETS 1 (voor industrie en elektriciteit), en EU-ETS 2 (voor gebouwde omgeving, transport)
- CO₂ beprijzing in de landbouwsector volgt de ETS2 prijs.
- De veronderstelde doorwerking van het Klimaatakkoord in het huidige beleid (zoals gerepresenteerd in de KEV 2024),
- CBAM (Carbon Border Adjustment Mechanism), dat bescherming biedt aan ETS1-sectoren, met uitzondering van de chemie.

In WorldScan wordt aangenomen dat de belastinginkomsten uit ETS 1 en ETS 2 worden teruggesluisd naar huishoudens. Dit sluit aan bij EU-beleid, al zou een alternatief zijn om deze inkomsten te gebruiken voor sectorale verduurzamingssubsidies.

In het versnellingscenario wordt verondersteld dat andere EU-lidstaten binnen ETS-sectoren energiekosten compenseren om hun industrie op een gelijk speelveld te krijgen. worden, terwijl Nederland dat maar ten dele dan doet (zie ook voorjaarsnota 2025). Daardoor ontstaat in het versnellingspad enigszins een verlies aan gelijk speelveld (level playing field), wat niet optreedt in het Klimaatplan-scenario.

In WorldScan zijn de volgende nationale beleidsmaatregelen opgenomen:

- Energiesubsidies voor grootverbruikers van gas en elektriciteit;
- De actuele belastingstructuur (2024) voor energie en emissies;
- De regeling SDE++ voor duurzame energie;
- De hierboven genoemde terugsluis van ETS-inkomsten naar huishoudens.

Deze elementen reflecteren de beleidsstatus zoals deze bekend was bij opstelling van de KEV 2024.

In OPERA is beleid maar zeer beperkt meegenomen, dit omdat beleid het anders lastig is om kostencurves uit het model te halen. Bovendien is het niet nodig, omdat de KEV 2024 als startpunt wordt gebruikt in het model. In de KEV 2024 zit al heel veel beleid, zoals de SDE++, ETS-1, enz. Het doel van het gebruik van OPERA is juist om, ten op zicht van de KEV, kostencurves uit het model te halen. Hiervoor worden model runs gedaan met emissiereducties t.o.v. de emissies volgens de KEV 2024. Het enige additionele beleid dat in OPERA is meegenomen heeft betrekking op bunkerbrandstoffen namelijk de RefuelEU

aviation regulation voor de luchtvaart en FuelEU maritime regulation voor internationale scheepvaart.

Potentiëlen en energieprijzen in OPERA

Startpunt voor de OPERA modellering is de vraag naar diensten en producten volgens de KEV 2024. Om de ambitieuze emissiereducties te realiseren die in dit rapport zijn is er veel meer hernieuwbare energie en andere emissiereductie opties nodig, dan waar de KEV 2024 vanuit gaat. Verruimde potentiëlen voor dit soort opties zijn weergegeven in Tabel1. Bedenk dat potentiëlen over de tijd best kunnen oplopen (zie ook scenario's als TRANSFORM en ADAPT), maar het heeft ook een praktisch aspect namelijk dat dit het Klimaatplan realiseerbaar maakt, anders lopen de marginale emissiereductiekosten onrealistisch hoog op.

Verder zijn de volgende optie toegelaten in de modellering:

- Energie besparingsopties boven op de KEV 2024
- Niet-energie gerelateerde emissiereductie opties (zoals extra bossen, Rantsoenaanpassingen melkvee, enz.)
- Import van NH₃ voor kunstmestproductie
- Gebruik van alternatieve processen (zoals staalproductie m.b.v. DRI waterstof, enz.)
- Geen beperkingen inzet elektrische boilers in de industrie

Tabel D.1 – Potentiëlen technologieën en bronnen in de KEV 2024 en in het Klimaatplan? scenario

	Eenheid	KEV 2024			Klimaatplan		
		2030	2035	2040	2030	2035	2040
Wind energie	GW						
Op land		7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	10.0
Op zee		12	18.2	18.2	10.0	22.0	34.0
Zon-PV	GW	36.3	47.6	69.2	36.3	50.1	83.0
Kernenergie	GW						
Bestaand (Borssele)		0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Nieuw (Gen III)		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
CO ₂ opslag	MtCO ₂ /jaar	10.3	11.5	11.6	12.7	22.0	32.0
Direct Air Capture	MtCO ₂ /jaar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.0
Aardwarmte	PJ/jaar	50.0	87.5	125.0	50.0	87.5	125.0
Biomassa	PJ/jaar						
Binnenlands		174.7	141.5	163.4	177.2	196.8	219.8
Import		45.00	75.0	100.0	45.0	171.5	366.50
Aandeel elektrische vrachtwagens	%	4.9%	19.6%	38.0%	5.4%	21.5%	41.8%

Voor een beperkt aantal technieken is het potentieel in het snellere uitrol scenario verder verruimt vergeleken met het Klimaatplan scenario. De technieken waarvoor dit van toepassing is en de bijbehorende potentiëlen zijn weergegeven in Tabel D.2.

Tabel D.2 – Potentiëlen voor technieken anders in het snellere uitrolscenario dan het Klimaatplan scenario

	Unit	Klimaatplan			Snellere uitrol		
		2030	2035	2040	2030	2035	2040
Wind op zee	GW	10.0	22.0	34.0	12.0	25.0	40.0
Kernenergie: nieuwe Gen III	GW	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0
CO ₂ opslag	MtCO ₂	12.7	22.0	32.0	12.7	24.0	35.0
Aandeel elektrische vrachtwagens	%	5.4%	21.5%	41.8%	6.1%	24.4%	47.5%

De prijzen van energiedragers die zijn gebruikt in deze studie zijn afgeleid van prijzen zoals gebruikt in de KEV 2024 en zijn weergegeven in Tabel. Elektriciteitsprijzen per uur zijn ook gebaseerd op de KEV 2024.

Tabel D.3– Prijzen van energiedragers in OEPRA in €(2024)/GJ

Energiedrager	2030	2030	2035	2040
Aardgas	7.4	7.4	7.4	7.5
Kolen	2.7	2.7	2.7	2.8
Aardolie	14.9	14.9	14.8	14.7
Biomassa – gebruikte oliën en vetten	-	14.4	14.4	14.4
Biomassa - Houtsnippers	6.9	6.9	6.9	6.9
Biomassa- Import hout pellets (goedkoop deel)	14.2	14.2	14.2	14.2
Biomassa- Import hout pellets (duur deel)	16.7	16.8	16.8	16.8
Bio-olie	-	7.1	7.1	7.1
Bio-methanol	-	36.8	36.8	36.8
Bio-ethanol	-	36.8	36.8	36.8
Bio-kerosine	-	36.8	36.8	36.8
Synthetische brandstoffen	-	49.9	49.9	49.9
Waterstof	18.9	18.9	18.9	18.9
Ammonia	31.6	31.6	31.6	31.6

Bijlage E Klimaatplan

In deze bijlage wordt het rapport *Klimaatplan 2025-2035* samengevat en worden specifiek de verwachte reducties betreffende emissies en energieconsumptie benoemd. Het Klimaatplan 2025-2035 beschrijft de inzet van wettelijke verplichtingen, fiscale prikkels, subsidies en normeringen om sectorale emissiereducties te stimuleren, naast koolstofverwijdering. De emissiereducties in Nederland worden gerealiseerd door een combinatie van beleidsinstrumenten en technologische innovaties gericht op verschillende sectoren.

De beleidsinstrumenten en innovaties binnen een sector hebben echter niet enkel een effect binnen een sector, maar ook daarbuiten. Zo oefent de elektrificatie van de ene sector bijvoorbeeld ook druk uit op de elektriciteitssector. In deze bijlage worden de effecten op de volgende sectoren besproken: elektriciteit, gebouwde omgeving, industrie, landbouw en landgebruik, en mobiliteit en transport.

Het Nederlandse beleid valt ook niet los te zien van het Europese klimaatbeleid. Richting 2030 ligt het Europese klimaatbeleid grotendeels vast [Klimaatplan 2025-2035, p.23]. De basis van het transitiepad wordt gevormd door het Fit-for-55 pakket, waarin het streven is om een reductie van 55% broeikasgassen te behalen in 2030 [Klimaatplan 2025-2035, p.23]. De Fit-for-55 aanpak zit in de drie scenario's (S1, S2 en S3) van het Impact Assessment Report van de Europese Commissie [European Commission, Impact Assessment Report Part 1, p.29], en vormt daarmee een belangrijke basis voor de Europese doelen om klimaatneutraal te zijn in 2050.

In het Fit-for-55 maatregelenpakket zit, onder andere, een herziening van het bestaande EU emissions trading system (EU ETS). De uitbreiding van het bestaande EU ETS omvat: (1) uitbreiding naar emissies uit de scheepvaart, (2) versnelde vermindering van emissierechten in het systeem en geleidelijke afbouw van gratis rechten voor sommige sectoren, (3) implementatie van het wereldwijde systeem voor compensatie en vermindering van CO₂-uitstoot voor internationale luchtvaart via het EU-ETS, (4) verhoging van de financiering voor het moderniseringsfonds en het innovatie-fonds, en (5) herziening van de marktstabiliteitsreserve. Naast het uitbreiden van het bestaande EU ETS, wordt er ook een nieuw, op zichzelf staand emissions trading system voor gebouwen, wegtransport en brandstoffen voor andere sectoren (die buiten de bestaande ETS vallen) gecreëerd.

Elektriciteitssector

De verduurzaming van de elektriciteitssector is cruciaal voor het behalen van de klimaatdoelen en het ondersteunen van de transitie in andere sectoren. Hierbij wordt er in stappen progressie gemaakt. Op dit moment wordt de toename van productie van hernieuwbare elektriciteit gedreven door stimulerende maatregelen, zoals de SDE++-regeling en meerdere innovatiesubsidies zoals de DEI+ en de MOOI (Missiegedreven Onderzoek, Ontwikkeling en Innovatie) en het EU ETS1, waaronder elektriciteitsproducenten rechten nodig hebben voor de uitstoot van hun fossiele CO₂-emissies en voor die rechten moeten betalen [Klimaatplan 2025-2035, p.36].

Met het geagendeerde beleid schat de KEV 2024 dat de uitstoot van de elektriciteitssector met geagendeerd beleid tussen de 10-20 Mton zal zijn in 2030. Echter dient hierbij wel de kanttekening gemaakt te worden dat de breedte relatief groot is door niet-stuurbare factoren, zoals import en export van elektriciteit. Volgens het Klimaatplan 2025-2035 wordt verwacht dat 80% van de elektriciteitsvoorziening op te wekken uit wind en zon in 2030. Door de Wet verbod op kolen voor elektriciteitsproductie mogen de kolencentrales vanaf 2030 geen kolen meer stoken voor elektriciteitsopwekking [Klimaatplan 2025-2035, p.36-37].

In 2035 is het doel om een CO₂-vrij elektriciteitssysteem te hebben, waarbij normering en beprijzen op Europees niveau zorgen voor een fossielvrije elektriciteitsmix. Hierbij wordt er in het Klimaatplan opgemerkt dat er ook uitdagingen zijn bij het fossielvrij maken van de elektriciteitsmix, omdat hierbij de leveringszekerheid onder druk kan komen te staan. Belangrijke instrumenten zijn voor dit streven in 2035 zijn [Klimaatplan 2025-2035, p.61]:

- Progressieve normering en bijmengverplichting voor gascentrales (aardgas, waterstof, biogas).
- Beprijzing van CO₂-uitstoot voor gascentrales, aanvullend op de EU ETS 1.
- Progressieve leveranciersverplichting voor CO₂-vrije elektriciteitsproductie.
- CAPEX/OPEX-subsidies voor CO₂-vrije gascentrales via het Klimaatfonds.
- Invoering van 2-sided contract for difference (CfD) als opvolger van de SDE++ voor hernieuwbare elektriciteitsproductie.

Daarnaast wordt het aandeel kernenergie vergroot door de bouw van twee nieuwe kerncentrales en de verlenging van de operationele periode van de kerncentrale in Borssele. Verder wordt er verkend of Small Modular Reactors (SMR's) een haalbare aanvulling kunnen zijn [Klimaatplan 2025-2035, p.61]. Vanaf 2040 komen er in het EU ETS1 geen nieuwe emissierechten meer op de markt waardoor tegen die tijd in de EU een grotendeels CO₂-vrije elektriciteitssector wordt bewerkstelligd [Klimaatplan 2025-2035, p.36].

Daarbij komt het doel om in 2050 CO₂-vrije elektriciteit als grootste energiebron te hebben. De binnenlandse productie van elektriciteit dient in 2050 volgens het Klimaatplan 2025-2035 “zowel de (dan veel grotere) directe elektriciteitsvraag in de verschillende eindgebruikerssectoren [te] bedienen, als ook beschikbaar [te zijn] voor het produceren van andere energiedragers zoals waterstof en koolstofdramers of export naar onze buurlanden”. Hiervoor wordt veel ingezet op het verhogen van de hernieuwbare elektriciteit. Het streven is om circa 70 GW windenergie op zee te hebben in 2050, en 17 GW op land. Dit is een significante groei ten opzichte van 2032, waarin het de ambitie is om 21 GW windenergie op zee te hebben en 8,8 GW op land. De ambitie bij zonne-energie geeft een vergelijkbaar uitdagend en ambitieus beeld: 172 GW geïnstalleerd paneelvermogen in 2050, na de ambitie om in 2032 een vermogen van 59,3 GW te hebben. Om deze doelen te verwezenlijken meldt het Klimaatplan dat “Aanvullend beleid gericht op de doorontwikkeling van hernieuwbare en CO₂-vrije elektriciteitsproductie richting 2050 is van groot belang [is]” [Klimaatplan 2025-2035, p.37]. Het huidige rapport, met resultaten van OPERA, schat de capaciteit van Nederlandse zonne-energie in 2040 lager in (rond de 40 tot 50 GW voor zonne-energie), terwijl de capaciteit voor Nederlandse windenergie in 2040 hoger ligt dan het Klimaatplan (ongeveer 30 GW voor wind op land, en ongeveer 90 GW voor wind op zee).

Gebouwde omgeving

Met het oog op 2030 is het beleidsdoel om de restemissie in de gebouwde omgeving terug te brengen naar 13,2 megaton CO₂. Deze doelstelling ligt binnen de breedte van de raming in de Klimaat- en Energieverkenning (KEV) 2024 (11,6-17,3 Mton), maar vereist

volledige uitvoering van het huidige en geplande beleid, en gunstige externe omstandigheden. De realisatie hiervan hangt in belangrijke mate af van de verdere groei van het aantal warmtepompen, en van een versnelde uitrol van collectieve warmtenetten in wijken waar dit economisch en praktisch het meest rendeert. Hiervoor heeft het kabinet in oktober 2024 voorstellen gedaan om de benodigde randvoorwaarden te scheppen, waaronder maatregelen om de eindgebruikerskosten laag te houden en zo collectieve warmte aantrekkelijk te maken voor bewoners. Tegelijkertijd is het essentieel dat mensen met een lager inkomen en kleine bedrijven de kans krijgen om mee te doen aan de verduurzaming, zodat de baten van de transitie niet aan hen voorbijgaan [Klimaatplan 2025-2035, p.39].

In aanloop naar 2040 wordt verdere emissiereductie nagestreefd, met als tussendoel een restemissie van circa 5 megaton. Tegen die tijd moeten alle woningen voldoen aan de ZEB-eisen, en wordt er geen gebruik meer gemaakt van fossiele brandstoffen voor verwarming. Een belangrijke beleidswijziging in deze periode is de opname van het aardgasgebruik in gebouwen in het Europese emissiehandelssysteem ETS2, vanaf 2027. Daarmee zal de prijs voor het gebruik van fossiele brandstoffen naar verwachting verder stijgen, omdat na 2044 geen nieuwe emissierechten meer worden uitgegeven. Dit prijsmechanisme moet burgers, bedrijven en maatschappelijke organisaties aanzetten om tijdig over te stappen op duurzame alternatieven. Tegelijkertijd vergt dit toegankelijke beleidsmaatregelen voor huishoudens die moeite hebben met de financiering van deze overstap, om te voorkomen dat zij onevenredig zwaar worden geraakt.

Het Klimaatplan 2025-2035 concludeert dat voor het terugbrengen van de CO₂-emissies van de gebouwde omgeving tot het noodzakelijke niveau de volgende zaken versneld dienen te worden: (1) het beperken van de energiebehoefte, (2) de inzet op meer volledig elektrische warmtepompen, (3) de inzet op meer warmtenetten, en (4) de inzet op meer hybride warmtepompen en groen gas en/of waterstof [Klimaatplan 2025-2035, p.39].

Uiterlijk in 2050 moet de gehele gebouwde omgeving voldoen aan de Europese Zero Emission Building-norm. Voor nieuwbouw geldt deze eis al vanaf 2030. Alle gebouwen moeten dan zeer energiezuinig zijn en vrij van fossiele emissies. Daarnaast streeft Nederland naar een volledig circulaire bouweconomie in 2050, waarin materialen worden hergebruikt en biobased grondstoffen en industriële bouwtechnieken de norm zijn. Deze ontwikkeling moet bijdragen aan een lage milieubelasting, terwijl tegelijkertijd kansen ontstaan voor innovatieve verdienmodellen in de bouw, landbouw en maakindustrie [Klimaatplan 2025-2035, p.39].

Industrie

In 2023 bedraagt de CO₂-uitstoot van de industrie nog 46,6 megaton. Om de doelstelling van maximaal 29,1 megaton in 2030 te halen, moet een reductie van 17,5 megaton worden gerealiseerd. De Klimaat- en Energieverkenning 2024 (KEV) voorspelt een emissie tussen de 32,1 en 41,3 Mton als alle voorgenomen maatregelen volledig en tijdig worden uitgewerkt en maximaal effect hebben. Daarmee blijft de doelstelling buiten bereik als het huidige beleid niet sneller en effectiever wordt uitgevoerd. Om het gat te dichten, wordt ingezet op versnelde toepassing van emissiereducerende technologieën zoals elektrificatie van processen, gebruik van waterstof, toepassing van CCS/CCU, duurzame biograndstoffen, procesoptimalisatie en circulaire grondstofstrategieën. Hiervoor is “een forse inspanning op R&D nodig” en is “een kostendaling van groene technologie cruciaal” [Klimaatplan 2025-2035, p.40-41]. In de systeemaanpak van waterstof wilt het kabinet de binnenlandse elektrolysecapaciteit opschalen naar 4 gigawatt elektrolysecapaciteit in 2030 [Klimaatplan 2025-2035, p.59].

Voor 2040 is het uitgangspunt dat de industrie vrijwel klimaatneutraal functioneert. Dat is ook het gevolg van de werking van het Europese emissiehandelssysteem ETS1, dat naar verwachting na 2040 geen nieuwe emissierechten meer zal uitgeven. In Nederland wordt ingeschat dat de industrie dan nog maximaal 5 megaton uitstoot, grotendeels bestaande uit moeilijk te vermijden procesemissies. Voor deze restemissies wordt ingezet op koolstofverwijdering, onder andere via CO₂-opslag bij raffinage en afvalinstallaties, met behulp van biogene CO₂ en CCS-technologie. Tegelijkertijd groeit het belang van circulaire productie, waarbij materialen hergebruikt worden en koolstof zo veel mogelijk in de keten blijft [Klimaatplan 2025-2035, p.41]. Binnen de opschaling van koolstofafvang en -opslag speelt het nationale project Aramis een centrale rol [Klimaatplan 2025-2035, p.62]. In 2040 wordt een opslagcapaciteit van 20–25 megaton CO₂ per jaar voorzien, waarmee moeilijk te vermijden procesemissies gecompenseerd kunnen worden [Klimaatplan 2025-2035, p.28].

In 2050 moet de industrie volledig klimaatneutraal, circulair en schoon zijn, met een modern en robuust vestigingsklimaat. Dat betekent dat processen elektrisch zijn, restwarmte wordt benut, en emissievrije brandstoffen en grondstoffen – zoals waterstof, hernieuwbare koolstofdragers, recycalaat en biograndstoffen – de standaard vormen. Het grondstoffengebruik is tegen die tijd sterk verminderd en gericht op hergebruik en producten met een lange levensduur. Door middel van strategisch industriebeleid blijven ook na 2050 industriële activiteiten behouden in Nederland, met name binnen bestaande clusters. Daarbij speelt niet alleen klimaatneutraliteit een rol, maar ook Europese strategische autonomie, leveringszekerheid en economische concurrentiekracht [Klimaatplan 2025-2035, p.42].

Om de transitie op lange termijn mogelijk te maken, is naast elektrificatie ook vraagsturing (Demand Side Response, DSR) van industriële processen essentieel. Naar verwachting wordt in 2050 circa 60% van de industriële energievraag elektrisch ingevuld. DSR maakt het mogelijk industriële processen aan te passen aan fluctuaties in het energieaanbod, waarmee leveringszekerheid wordt versterkt en systeemkosten worden beperkt. Om dit te realiseren zijn investeringen nodig in flexibilisering, opslagtechnologieën, en een stabiel en transparant regelgevingskader dat bedrijven de ruimte biedt om te innoveren [Klimaatplan 2025-2035, p.42].

Internationaal concurrerend blijven is tot 2050 een randvoorwaarde. De kosten van groene technologieën, de beschikbaarheid van infrastructuur en de nabijheid van afzetmarkten bepalen mede of bedrijven verduurzaming in Nederland uitvoeren of productie verplaatsen. Daarom is een consistent en aantrekkelijk Europees en nationaal vestigingsklimaat voor duurzame industrie onmisbaar. Nederland levert zo ook een bijdrage aan mondiale klimaatoplossingen via renderende duurzame industriële productie [Klimaatplan 2025-2035, p.42].

Landbouw en landgebruik

De landbouw en het landgebruik bevinden zich in een transitie naar een duurzaam, veerkrachtig en klimaatbewust voedselsysteem. De sector kan vanwege de biologische aard van voedselproductie niet volledig klimaatneutraal worden in 2050, maar een aanzienlijke emissiereductie is wél voorzien. In 2030 moet de landbouw en het landgebruik gezamenlijk een aanzienlijke bijdrage leveren aan de nationale emissiereductie. De indicatieve restemissie uit de veehouderij en akkerbouw wordt geraamd op 15,8 Mton CO₂-eq, met een doelstelling van 13,6 Mton CO₂-eq. Dit vraagt om forse inspanningen in de sector. De aanpak richting 2030 is gebaseerd op bedrijfsspecifieke emissiedoelen, die boeren ruimte geven om zelf te bepalen met welke maatregelen zij hun reductie realiseren. Innovatie, vrijwillige

beëindiging van veehouderijbedrijven, en een gebiedsgerichte aanpak vormen de pijlers van het beleid [Klimaatplan 2025-2035, p.42-43].

Binnen de glastuinbouw is het doel om de uitstoot terug te brengen naar 4,3 Mton CO₂-eq in 2030, met als einddoel een klimaatneutrale sector in 2040. Hiervoor zijn in het Convenant Energietransitie Glastuinbouw afspraken gemaakt over CO₂-heffing (vanaf 2025), energiebesparing en toegang tot duurzame bronnen zoals geothermie, restwarmte en warmtepompen. De beschikbaarheid van alternatieve biogene CO₂ voor gewasgroei in kassen is hierbij een cruciale randvoorwaarde, aangezien deze CO₂ momenteel nog grotendeels via aardgas vrijkomt [Klimaatplan 2025-2035, p.44].

Ook het landgebruik draagt al vóór 2030 bij aan de emissiereductie. De voortgang in de vernatting van veenweidegebieden, herstel van natuurlijke habitats, uitbreiding van het bosareaal en koolstofopslag in landbouwbodems wordt actief ondersteund. Onder andere via provinciale veenweidestrategieën, subsidies voor verhoging van grondwaterstanden, en de uitvoering van de Bossenstrategie worden boeren en landgebruikers gestimuleerd hun bedrijfsvoering aan te passen [Klimaatplan 2025-2035, p.45].

Deze inspanningen dragen bij aan bredere Europese klimaatdoelstellingen. Het ETS1-plafond voor 2030 is vastgesteld op 785 megaton, een reductie van 62% ten opzichte van 2005. Voor de ETS-2 sectoren onder het Effort Sharing Regulation (ESR) bedraagt het plafond 1483 megaton in 2030, overeenkomend met een reductie van 40% ten opzichte van 2005. Het LULUCF-domein (land use, land use change and forestry) laat in 2030 naar verwachting een negatieve emissie van 310 megaton zien. Samen levert dit een geraamde totaalreductie van 57% ten opzichte van 1990, toen de uitstoot 4633 megaton bedroeg [Klimaatplan 2025-2035, p.23].

Na 2030 wordt gerekend op verdere emissiereductie via innovatie, omdat veel technologische oplossingen zich nog in de ontwikkelingsfase bevinden. Doorlopende ondersteuning voor innovatie en langetermijnbeleid moet het volledige reductiepotentieel benutten. Ook worden bestaande regelingen zoals productierechten en stikstofbeleid beter afgestemd op het systeem van bedrijfsgerichte emissiedoelen, met het oog op integrale aanpak en het voorkomen van stapeling van verplichtingen.

In de glastuinbouw blijft CO₂ nodig als meststof. Daarom is blijvende inzet nodig op efficiënter gebruik van CO₂ en beleidsmatige afwegingen over de inzet van schaarse biogene koolstofbronnen, zowel voor gewasgroei als voor negatieve emissies en duurzame chemie.

Op het gebied van landgebruik blijft het voorkomen van emissies uit veenoxidatie een kernopgave. De combinatie van vernatting, bosaanplant en boslandbouw (agroforestry) vormt het hart van de reductiestrategie. Daarnaast worden via Europees en nationaal beleid maatregelen gestimuleerd zoals meer rustgewassen, behoud van permanent grasland en inzet van groenbemesters, waarmee in minerale landbouwbodems naar verwachting jaarlijks 0,5 Mton CO₂-eq extra wordt vastgelegd.

In 2050 is de Nederlandse landbouw geen netto klimaatneutrale sector, maar wel structureel emissiearm en integraal onderdeel van een duurzaam voedselsysteem. Boeren dragen via afrekenbare doelen, innovatie en marktprikkels actief bij aan emissiereductie. De landbouwsector levert ook bijdragen aan de bredere klimaatdoelen door koolstofvastlegging, biodiversiteitsherstel, alternatieve eiwitproductie en multifunctioneel landgebruik.

In het landgebruik wordt gestreefd naar structurele netto CO₂-vastlegging via bossen, veenweidebeheer en bodemmaatregelen. De uitdagingen liggen bij financiering, ruimtelijke inpassing en integratie van klimaat- en natuurdoelen, waarvoor een toekomstgericht, samenhangend beleidsinstrumentarium wordt ontwikkeld.

Mobiliteit en Transport

Voor 2030 is het indicatieve restemissiedoel voor nationale mobiliteit vastgesteld op 21 megaton CO₂, een reductie van 37% ten opzichte van 1990. Volgens de KEV 2024 ligt de geprojecteerde uitstoot tussen de 21,1 en 25,9 Mton, waarmee het doel slechts bij stevige aanvullende inzet haalbaar is. [Klimaatplan 2025-2035, p.47].

Om dit te bereiken wordt ingezet op:

- Verplichte verkoop van emissievrije voertuigen in de EU (100% voor personen- en bestelauto's in 2035, 90% voor vrachtauto's en bussen in 2040).
- Laadinfrastructuur voor elektrische voertuigen, ondersteund door publieke en private investeringen.
- Slim en bidirectioneel laden, waarbij EV's energie kunnen terugleveren aan het net.
- Beprijzing via ETS2 (vanaf 2027) en hogere accijnzen, MRB en BPM die fossiel rijden minder aantrekkelijk maken.
- Zero-emissiezones in steden voor stadslogistiek.
- Vrachtwagenheffing vanaf 2026, met korting voor emissievrije trucks.
- Subsidies voor emissievrije voertuigen en tank- en laadinfrastructuur.

Volgens de verkenning Klimaatneutraal Wegverkeer 2050 zal de CO₂-uitstoot van het wegverkeer in 2030 met 12% en in 2040 met 44% zijn gedaald ten opzichte van 1990. Voor 2040 wordt een verdere emissiereductie naar circa 7–8 megaton CO₂ uit het wegverkeer als haalbaar beschouwd, op voorwaarde dat de elektrificatie van het wagenpark versnelt, waterstof wordt opgeschaald in het zware transport en de benodigde infrastructuur tijdig beschikbaar komt. Deze inzet is noodzakelijk om de mobiliteitssector haar evenredige bijdrage te laten leveren aan de Europese doelstelling van 90% emissiereductie in 2040 [Klimaatplan 2025-2035, p.47].

Om dit te realiseren wordt:

- Het gebruik van biobrandstoffen beperkt tot sluitstuktoepassingen zoals zwaar transport en mobiel erfgoed.
- Elektrificatie gezien als hoofdroute vanwege energie-efficiëntie en onafhankelijkheid.
- Synthetische brandstoffen (e-fuels) onderzocht voor sectoren waar elektrificatie niet volstaat (zoals luchtvaart, scheepvaart, mobiel erfgoed).
- Aandacht besteed aan de capaciteit van het energiesysteem, omdat productie van e-fuels en waterstof hoge elektriciteitsvraag met zich meebrengt.

In 2050 is het doel een volledig klimaatneutraal mobiliteitssysteem, met:

- Een nagenoeg volledig elektrisch wagenpark voor personen- en goederenvervoer.
- Gebruik van duurzame waterstof voor zwaar vervoer en langeafstandstoepassingen.
- Een goed werkend systeem van vraagsturing, deelmobiliteit en digitaal ondersteund reisgedrag, waardoor mobiliteit efficiënter en duurzamer wordt.

Internationale luchtvaart en scheepvaart worden tegen 2050 eveneens klimaatneutraal, op basis van internationale afspraken (ICAO, IMO). Nederland streeft naar:

- Halvering van CO₂-uitstoot van vertrekkende vluchten in 2050 t.o.v. 2005 (en nul in 2070).

- Duurzame brandstoffen voor internationale lucht- en zeevaart, via ReFuelEU Aviation, FuelEU Maritime en RED III.
- Invoering van afstand afhankelijke vliegbelasting vanaf 2027, naast reeds verhoogde ticketheffingen.

Nederland investeert via het Klimaatfonds en Nationaal Groeifonds in de ontwikkeling van biobrandstoffen en e-fuels, met name in de haven van Rotterdam en via de CEPS-pijpleiding voor luchtvaart. Tegelijkertijd is de productie van deze brandstoffen afhankelijk van ruimtelijke inpassing, elektriciteitscapaciteit, en marktzekerheid. Daarom wordt gewerkt aan een visie op de verduurzaming van bunkerbrandstoffen, inclusief het creëren van een gunstige businesscase voor producenten.

Het gebruik van biobrandstoffen biedt bovendien mogelijkheden voor koolstofverwijdering, bijvoorbeeld via afvang van biogene CO₂ bij de productie. Deze negatieve emissies kunnen helpen om moeilijk vermijdbare nationale emissies elders in het systeem te compenseren. Daarmee speelt mobiliteit ook een rol in de bredere strategie voor klimaatneutraliteit.

Koolstofverwijdering, zoals CCS, speelt in het algemeen een belangrijke rol in de klimaatplannen. Om in 2050 op klimaatneutraal uit te komen, schat de Europese Commissie dat de EU 400 Mton CO₂ per jaar moet verwijderen via koolstofverwijderingstechnieken vanaf 2040 [Klimaatplan 2025-2035, p.51]. In 2050 dient dit zelfs 450 Mton CO₂ per jaar te zijn volgens de Europese Commissie [Klimaatplan 2025-2035, p.51]. De verwachte Nederlandse bijdrage in 2040 hierin ligt op de 20-25 Mton CO₂ per jaar, ongeveer 10% van de 1990-uitstoot [Klimaatplan 2025-2035, p.5, p.28]. Om een 90% emissiereductie te behalen, worden er vier verschillende emissiepaden besproken in het Klimaatplan; bij een hogere inzet van koolstofverwijdering is er meer ruimte voor restemissies. [Klimaatplan 2025-2035, p.27-28]. Bij 15% koolstofverwijdering is er 34,5 Mton opgevangen, bij 10% is er 23 Mton, en bij 5% is er 11,5 Mton. De resultaten in dit rapport, afkomstig van OPERA, komen overeen met een koolstofverwijdering conform het emissiepad van 5% tot 10% koolstofverwijdering.

Economische impact van het Klimaatplan

Werkgelegenheid

De transitie naar hernieuwbare energie en energie-infrastructuur zorgt voor een sterke toename in werkgelegenheid, vooral in sectoren zoals windparken, warmtenetten, en hernieuwbare energieoplossingen. Daarentegen neemt de werkgelegenheid in de fossiele industrie af. Deze verschuiving vraagt om omscholing en bijscholing, wat een uitdaging vormt door de huidige krapte op de arbeidsmarkt en de vergrijzing van de beroepsbevolking. De vraag naar technici, onderzoekers, operators en monteurs neemt sterk toe.

BBP (Bruto Binnenlands Product)

Het bbp wordt verwacht met ongeveer 20% te groeien tegen 2040 ten opzichte van het niveau van 2023, onder alle emissiescenario's (S1, S2 en S3). De verschillen tussen de scenario's zijn beperkt, wat aangeeft dat een strikter CO₂-reductiepad geen significante negatieve impact heeft op de productiviteit.

De investeringen in het energiesysteem zullen stijgen van 1,5% naar 3% van het bbp tussen 2021 en 2050, wat een verdubbeling betekent ten opzichte van de periode 2011-2020.

Lonen en Inkomens

Het besteedbaar inkomen van huishoudens zal gemiddeld stijgen. In 2040 is er een toename van 16% en in 2050 zelfs 41% ten opzichte van 2023. Echter, lagere

inkomensgroepen worden zwaarder belast door de transitie, omdat zij een groter deel van hun inkomen aan energie uitgeven en minder mogelijkheden hebben voor investeringen in energiebesparing. Hierdoor ontstaat er een risico op energiearmoede.

Handelsbalans en Materialen

De afhankelijkheid van fossiele brandstoffen daalt met 55% in importwaarde tegen 2040 ten opzichte van 2023. Echter, de afhankelijkheid van kritieke metalen zoals ijzer, koper en zeldzame aardmetalen neemt toe, wat risico's met zich meebrengt op het gebied van leveringszekerheid.

Brede Welvaart

De uitstoot van luchtverontreinigende stoffen zal afnemen, waardoor de gezondheidsschade door luchtvervuiling afneemt van €13,3 miljard in 2023 naar €7,3 miljard in 2040, en verder naar €5,3 miljard in 2050. De biodiversiteitsschade vermindert eveneens significant.

Investeringsen

Er is een jaarlijkse investeringsbehoefte van ongeveer €46 miljard per jaar tussen 2031 en 2050 om de transitie in de industrie, mobiliteit, transport en residentiële sector te realiseren.

Onzekerheden

Ondanks de uitgebreide plannen zijn er onduidelijkheden over de kosten en effectiviteit van sommige technologieën, zoals CCS en grootschalige waterstofproductie. Ook de economische bijeffecten, zoals de gevolgen voor werkgelegenheid in fossiele sectoren en de kosten voor de burger, blijven aandachtspunten. Het kabinet zet in op robuuste monitoring en bijstelling van beleid om deze onzekerheden te mitigeren. De integratie van hernieuwbare energie vraagt om grote investeringen in netcapaciteit en opslagtechnologieën, waarvan de kostenverdeling nog niet volledig duidelijk is. Extra aandacht gaat uit naar de mogelijke prijsstijgingen van energie en de impact hiervan op huishoudens met lage inkomens.

Bijlage F: Samenvatting EU Impact studie vergeleken met effecten Klimaatplan scenario

Deze bijlage vergelijkt de uitkomsten van het zogeheten Klimaatplan Scenario (zie Hoofdstuk 4), waarin Nederland het Europese reductiepad tot 2040 volgt, met de scenario's van de Europese Commissie (S1, S2, S3 en LIFE). De analyse richt zich op de onderliggende aannames van het basispad en de scenario's, de economische effecten zoals bbp-verandering, sectorale impact en koolstoflekage, en de wijze waarop beleid en technologie worden gemodelleerd. Hiermee wordt inzicht geboden in de vraag of het volgen van het Europese pad voor Nederland per definitie efficiënt en evenwichtig uitpakt, of dat nationale omstandigheden tot afwijkende effecten leiden.

De Europese Commissie heeft in haar impact assessment van de 2040-doelstelling drie scenario's en de LIFE variant (variant op scenario 3) uitgewerkt:

- **S1** is het laagste ambitieniveau (–78% broeikasgasreductie in 2040 t.o.v. 1990) en fungeert als verlengde van het Fit-for-55-beleid. Tot 2040 volgt het scenario de Fit-for-55 energytrends. Na 2040 moeten alle sectoren broeikasgasuitstoot drastisch verminderen voor klimaatneutraliteit in 2050, en dienen 'alle technologieën' ingezet te worden [European Commission, Impact Assessment Report Part 1, p.29].
- **S2** is het middenpad en leidt tot een –85% reductie in 2040. Qua beleidsmaatregelen vertrekt dit scenario vanuit S1. S2 voegt hieraan verdere ontwikkeling van CCS en e-fuels toe, alsook aanzienlijke reducties van broeikasgasuitstoot en koolstofverwijdering in de LULUCF-sector [European Commission, Impact Assessment Report Part 1, p.29].
- **S3** is het meest ambitieuze pad, met –90% reductie in 2040. Bovenop de maatregelen in S2 bevat S3 een 'volledig ontwikkeld koolstofmanagementsysteem' in 2040, waarin koolstofafvang alle industriële processen omvat en koolstofverwijdering een 'aanzienlijke bijdrage' levert. Verder ligt de productie en consumptie van e-fuels hoger dan in S2 om de energiemix verder te decarboniseren [European Commission, Impact Assessment Report Part 1, p.29].
- **LIFE** bereikt eveneens –90%, maar met een andere aanpak: nadruk op gedragsverandering, efficiëntie en circulaire economie in plaats van technologie.

Het rapport van de Europese Commissie concludeert dat het bbp in de EU in de verschillende scenario's vergelijkbaar is. Vergeleken met het baseline scenario S2, levert het minst ambitieuze pad, S1, ongeveer 0,5% tot 0,6% extra bbp op. Schattingen van het bbp in het meest ambitieuze pad, S3, lopen uiteen van hetzelfde bbp als in S2 tot 0,8% bbp-verlies. Ondanks de impact op het BBP van de verschillende paden beperkt is, zijn er wel grotere

verschuivingen in de opbouw van groei. Het verlies van consumptie wordt opgevangen door investeringen in schone technologieën en infrastructuur.

In het *Klimaatplan Scenario* uit dit rapport laat Nederland een structureel verlies in bbp zien ten opzichte van het basispad. Dit verlies ontstaat door de cumulatie van hogere productiekosten, verschuivingen in handelsstromen en een relatief hoge nationale belastingdruk op energie. Hoewel ruilvoetwinsten (bijvoorbeeld lagere importkosten voor fossiele brandstoffen) dit effect enigszins beperken, blijft de totale economische impact negatief.¹⁶

In het rapport van de Europese Commissie worden reflecties en voorspellingen gedaan voor verschillende sectoren in de EU. In het onderstaande richten wij ons op de bevindingen van het rapport van de Europese Commissie betreffende de industrie, gebouwen, transport, energie, landbouw, en landgebruik. Na de samenvatting hiervan worden deze aannames en resultaten vergeleken met de bevindingen in dit rapport.

Het rapport van de Europese Commissie observeert dat de industriële sector een cruciale rol speelt in de transitie naar een klimaatneutrale economie, waarbij de verschillende scenario's duidelijk uiteenlopende strategieën hanteren om de emissies terug te dringen. In 2020 kwam 26% van de GHG-emissies van de EU vanuit de industrie (McKinsey, 2020). Het rapport van de Europese Commissie benoemt dat er verschillende oplossingen in verschillende subsectoren geïmplementeerd gaan worden om klimaatneutraliteit te bereiken. Deze oplossingen zijn het verminderen van de vraag naar ruwe materialen, verhogen van de energie-efficiëntie, indirecte en directe elektrificatie, vervangen van fossiele brandstoffen door bio- en e-fuels in gevallen waar elektrificatie niet mogelijk is, en koolstofafvang. Gezamenlijk zouden deze oplossingen een reductie van 86% van de industriële emissies in de EU kunnen bereiken in 2050, vergeleken met het niveau in 2019 [European Commission, Impact Assessment Report Part 3, p.60].

De verwachte impact op toekomstige industriële productie van verschillende materialen in de EU in het rapport van de Europese Commissie varieert per materiaal en per scenario, zie Tabel F.1.

Tabel F.1 Aannames over de verwachte verandering van de groei/krimp van Europese productie in verschillende scenario's in het rapport van de Europese Commissie (European Commission, Impact Assessment Report Part 3, p.63, Tabel 8, eigen bewerking).

	S1, S2, S3 2050 vs 2015	LIFE
Staal	0%	vs. S1, S2, S3 in 2050
Aluminium	35%	-15% (-25% primair)
Papier	5%	-20%
Cement (inclusief klinker)	20%	-25% (-40% primair)
Petrochemicaliën en organische materialen	25%	-15%

¹⁶ totale investeringskosten tussen 2030-2050 zijn voor alle scenario's gelijk.

Door veranderingen in de activiteiten in de industrie verandert het energieverbruik mee. Vanaf 2030, wordt verwacht dat de totale energieconsumptie van de industriële sector in S1, S2, en S3 daalt met 20 procentpunt in de periode 2031-2040, en daar bovenop nog een krimp van 7 procentpunt in de periode 2041-2050. De lagere CO₂-uitstoot in S2 en S3 ten opzichte van S1 is voornamelijk het gevolg van een hogere koolstofafvang. In LIFE geldt een eenzelfde daling in 2031-2040, maar ligt de energieconsumptie in 2050 net een paar procentpunt lager dan in S1, S2 en S3.

De daling in energieconsumptie is voornamelijk het gevolg van elektrificatie. Waar het aandeel van elektriciteit in de industriële energieconsumptie in 2021 nog rond de 21% lag, is de verwachting in het rapport van de Europese Commissie dat het aandeel naar 48% stijgt in 2040, en naar 62% in 2050. Dit komt overeen met de voorspellingen van Eurelectric (2023). Verder worden fossiele brandstoffen, met name natuurlijk gas, gedeeltelijk vervangen door biofuels en in toenemende mate door waterstof en andere hernieuwbare brandstof van niet-biologische oorsprong (*Renewable Fuels of Non-Biological Origin*, RFNBO). Het aandeel van waterstof in de elektrificatie van de energieconsumptie verschilt per scenario: 7% in S1, 9% in S2, en 12% in S3. Eurelectric (2023) voorspelt een aandeel rond de 10-15% toe aan waterstof. LIFE is qua aandeel van waterstof vergelijkbaar met S2, waar de extra emissiedaling in LIFE toe te schrijven is aan een uitgebreide inzet van e-fuels. In 2050 zijn nagenoeg alle fossiele brandstoffen verdwenen als een resultaat van een volledige wissel in ovens en de introductie van alternatieve verwarmingsprocessen.

Naast een verandering in energieconsumptie bespreekt het rapport van de Europese Commissie ook het niet-energetisch verbruik in de industrie, m.a.w. de brandstoffen die als grondstof worden gebruikt (bijvoorbeeld olie die wordt omgezet in plastic of bitumen voor wegenbouw). In de periode 2031-2040 blijft het totale verbruik rond het niveau van 2030. In 2041-2050 vinden echter significante veranderingen plaats: fossiele brandstoffen, die tot 2040 ongeveer 90% van de industriële grondstoffen vertegenwoordigen, nemen af met 15 Mtoe en worden deels vervangen door waterstof en elektriciteit. In hetzelfde decennium stijgt het gebruik van waterstof met ongeveer 25 Mtoe. Er zijn nauwelijks verschillen te zien tussen de scenario's S1, S2 en S3. In het LIFE-scenario wordt een kleine daling van het niet-energetisch verbruik verwacht: ongeveer 5% in 2040 en 10% in 2050, voornamelijk door een afname van de activiteiten in de petrochemische en andere industriële sectoren.

De gebouwensector is goed voor 42% van het totale energieverbruik in de EU in 2021. Om de Fit for 55 doelen te behalen in 2030 wordt voornamelijk ingezet om de sector energie-efficiënter te maken. Richting de doelen in 2040 en klimaatneutraliteit in 2050 is het van belang dat de elektrificatie in gebouwen versneld wordt, dus dat bij ruimteverwarming fossiele brandstoffen wordt vervangen door hernieuwbare energie. In mindere mate kunnen de emissies verlaagd worden door te wisselen naar koolstofarme brandstoffen.

De verduurzaming van de gebouwensector wordt bemoeilijkt door een verwachte groei van het vloeroppervlak in zowel de residentiële als dienstensector. De verwachte groei in de residentiële sector is 21% in 2040 en 26% in 2050 ten opzichte van 2015. Deze toename wordt veroorzaakt door een afname van het aantal bewoners per huishouden en een grotere gemiddelde woninggrootte. In de dienstensector groeit het vloeroppervlak naar verwachting met 5% tegen 2040. Deze ontwikkeling verhoogt de energievraag, wat inspanningen vereist om het energieverbruik te beperken.

In S1 ligt de focus op elektrificatie en renovatie van gebouwen, waarbij vooral warmtepompen en isolatiemaatregelen centraal staan. De renovatiegraad is laag in 2031-2040, maar versnelt in 2041-2050. In S2 blijft de renovatiegraad stabiel, met extra

energiebesparing door efficiëntere verwarmingssystemen. Warmtenetten en slimme technologieën ondersteunen deze besparingen. S3 zet in op snellere renovaties in de eerste periode (2031-2040), gevolgd door een afname daarna. De energiebesparing wordt vroegtijdig gerealiseerd door intensieve isolatie en verduurzaming van verwarmingssystemen. Het LIFE-scenario legt de nadruk op gedragsverandering, zoals aangepaste thermostaatinstellingen, en circulaire bouwmethoden met hernieuwbare energie. Dit leidt tot structurele dalingen in energieverbruik en emissies in de gebouwensector.

In de transportsector wordt zowel een sterke groei van de activiteiten verwacht alsook een krimp van de emissies in alle scenario's. De verwachte groei van de algehele transportsector vanaf 2015 ligt rond de 26-27% in 2040 voor de verschillende scenario's en is ongeveer 32% in 2050. De verschillen per type transport zijn wel groot. Het treinvervoer verwacht een grote groei (65-67% in 2040, 83-86% in 2050) en ook de groei van luchtverkeer binnen de EU is aanzienlijk (56-57% in 2040, 74% in 2050). Het wegverkeer groeit in mindere mate (20-21% in 2040, 23% in 2050).

Ondanks de groei van de transportsector daalt energievraag in alle scenario's door grootschalige elektrificatie en efficiëntere technologieën. De brandstofmix verandert fundamenteel: fossiele brandstoffen maken plaats voor emissievrije energiedragers zoals elektriciteit, biobrandstoffen, waterstof en e-fuels, vooral na 2040. Weg- en spoorvervoer worden grotendeels geëlektrificeerd, terwijl maritiem en luchtvervoer zich richten op energie-efficiëntie en duurzame brandstoffen. De verwachte krimp van de energieconsumptie van de algehele transportsector is 33-35% in 2040 en 42-44% in 2050, beide vergeleken met het niveau in 2015. De verschillen tussen de verschillende type transport zijn opnieuw groot, waarbij de afname voor wegtransport zeer groot is (52-53% in 2040, 65-67% in 2050), terwijl treinvervoer een toename ziet van de totale energieconsumptie van ongeveer 48% in 2040.

De transformatie van het Europese energiesysteem wordt gekenmerkt door een sterke daling in het totale energieverbruik, voornamelijk gedreven door de afname van fossiele brandstoffen en de groei van hernieuwbare energiebronnen. In de scenario's S1, S2 en S3 daalt het totale energieverbruik met 30% in 2040 ten opzichte van 2019, terwijl in het LIFE-scenario een extra afname zichtbaar is door circulaire economie en veranderingen in consumptiepatronen.

De energiemix verandert in alle scenario's drastisch door een geleidelijke afname van fossiele brandstoffen en een toenemend aandeel hernieuwbare energie. Het aandeel fossiele brandstoffen neemt af van 1060 Mtoe in 2019 naar 275-375 Mtoe in 2040 (een reductie van 65% tot 74%). In 2050 blijft er slechts 155 Mtoe over, vooral voor niet-energetisch gebruik en langeafstandstransport. Tegelijkertijd stijgt het aandeel hernieuwbare energiebronnen sterk, van 17% in 2019 naar 50-60% in 2040 en meer dan 70% in 2050. Kernenergie neemt af van 200 Mtoe in 2019 naar 130 Mtoe in 2030 en stabiliseert daarna rond 13-14% van de totale energiemix.

De verschuiving naar hernieuwbare energie, grotendeels binnen de EU geproduceerd, zorgt voor een sterke daling in de netto-import van energie. In 2040 dalen de importen met 62% tot 71% en in 2050 met 83% ten opzichte van 2019. De invoer van steenkool stopt vrijwel volledig tegen 2040 en de invoer van olie en gas neemt drastisch af. Het REPowerEU-plan om Russische gasimporten af te bouwen wordt in alle scenario's gerealiseerd.

Door de elektrificatie van de economie stijgt de vraag naar elektriciteit met 31-34% tussen 2021 en 2040. De productie van elektriciteit groeit naar 4565-5210 TWh in 2040, grotendeels opgewekt door hernieuwbare energie (81-87% van de elektriciteitsmix). Fossiele brandstoffen dalen naar 3-8% in 2040 en worden tegen 2050 vrijwel volledig vervangen door gascentrales met CO₂-afvang (CCS) of als piekcentrales.

Netto-installatiecapaciteit van hernieuwbare energiebronnen verdrievoudigt tegen 2040. Voor flexibiliteit in het netwerk wordt fors ingezet op energieopslag, met name batterijen, elektrolyzers en waterkrachtopslag. De opslagcapaciteit groeit van 50 GW in 2020 naar 350-530 GW in 2040. In S3 is de behoefte aan opslagcapaciteit het grootst vanwege de hoge inzet op hernieuwbare energie.

Het gebruik van aardgas daalt tussen 54% en 68% tegen 2040, terwijl het verbruik van biomethaan toeneemt. Waterstof wordt een belangrijke energiedrager, vooral in de industrie, transport en de productie van synthetische brandstoffen (e-fuels). In 2040 ligt het gebruik van waterstof tussen 55-95 Mtoe en verdubbelt dit naar 170-175 Mtoe in 2050.

Het eindenergieverbruik daalt gestaag en bereikt 606-624 Mtoe in 2040 en 560 Mtoe in 2050. Het aandeel fossiele brandstoffen daalt van 60% in 2019 naar 23-30% in 2040 en naar 6% in 2050. Elektriciteit neemt een steeds groter aandeel in, van 23% in 2015 tot 57% in 2050, voornamelijk door elektrificatie van transport en gebouwen. De afname in fossiele brandstoffen wordt deels opgevangen door waterstof en e-fuels.

De energiegerelateerde CO₂-uitstoot daalt in alle scenario's, vooral in de elektriciteitsproductie en stadsverwarming. In 2040 bedragen de emissies nog slechts 200-590 MtCO₂, een reductie van 83-94% ten opzichte van 1990. De elektriciteitssector bereikt zelfs negatieve emissies tegen 2050 dankzij koolstofafvang en -opslag (CCS) en biogebaseerde energie. In 2050 worden zelfs negatieve emissies bereikt door BECCS-technologie.

De transformatie van het Europese energiesysteem richting 2050 is gericht op elektrificatie, hernieuwbare energie en waterstof, met sterke dalingen in fossiele brandstoffen en energie-import.

De uitstoot in de landbouwsector is sinds 1990 met 23% afgenomen door verbeterde efficiëntie per eenheid productie, maar bleef de laatste tien jaar stabiel. Deze stabiliteit geldt ook voor de uitstoot door veeteelt, die 65% van de totale landbouwemissies vertegenwoordigt. De uitstoot door bodembeheer steeg in dezelfde periode met 4% en maakt nu 30% van de sectorale emissies uit. Verschillen tussen lidstaten zijn aanzienlijk, met dalingen of stijgingen tot 20%, wat wijst op ruimte voor verdere emissiereductie. Meningingen over de potentie van de landbouwsector om uitstoot te verminderen zijn verdeeld, waarbij ngo's en onderzoeksinstellingen optimistischer zijn dan overheidsinstanties en burgers.

Duurzaam landgebruik, zoals agroforestry, behoud van veengronden en precisielandbouw, kan helpen om koolstofvoorraden te behouden en emissies te verminderen. Praktijken als optimalisatie van veevoer, fokprogramma's en betere mestverwerking kunnen methaanuitstoot verlagen. Anaërobe vergisting van mest biedt niet alleen emissiereductie, maar ook extra inkomsten door biogasproductie.

Beter beheer van stikstofmeststoffen, bijvoorbeeld via precisielandbouw, kan de uitstoot van lachgas (N₂O) beperken. Het gebruik van remmers en organische meststoffen verhoogt de efficiëntie en verlaagt stikstofverliezen.

In de toekomst kunnen veranderingen in de voedselketen, zoals minder voedselverspilling, veranderingen in dieet en efficiëntere landbouwtechnieken, bijdragen aan verdere reducties. Het LIFE-scenario gaat uit van een duurzamer voedselsysteem, met vermindering van veestapel, optimalisatie van mestgebruik en lagere uitstoot van CH₄ en N₂O.

Zonder extra maatregelen wordt de uitstoot van de landbouwsector in de EU in 2040 geschat op 351 MtCO₂-eq en in 2050 op 347 MtCO₂-eq, een beperkte daling ten opzichte van 2015. Het LIFE-scenario kan deze emissies verder verlagen tot 271 MtCO₂-eq in 2040 en 269 MtCO₂-eq in 2050, wat een afname van 30% betekent ten opzichte van 2015.

Het landgebruik in de EU speelt een cruciale rol in het vastleggen en verminderen van broeikasgasemissies in de EU. De LULUCF-sector (Land Use, Land-Use Change, and Forestry) omvat bosbeheer, landgebruik voor landbouw, natte gebieden en andere natuurlijke ecosystemen die CO₂ vastleggen en opslaan. Wijzigingen in landgebruik, zoals het omzetten van landbouwgrond naar bossen of natuurgebieden, kunnen bijdragen aan een netto vermindering van CO₂-uitstoot. Sinds 2000 is er in de EU een gestage toename te zien in bosgebieden (+4 Mha) en stedelijke gebieden (+3 Mha), terwijl landbouwgrond afnam met 7 Mha. In de verschillende scenario's (S1, S2, S3 en LIFE) worden diverse ontwikkelingen geschetst voor landgebruik tot 2040. De LIFE-scenario's laten de grootste veranderingen zien, zoals een verschuiving van landbouwgrond voor veevoer naar natuurgebieden, wat leidt tot meer bossen (+4 Mha) en natuurgebieden (+6,8 Mha). Dit draagt bij aan verhoogde koolstofopslag en herstel van ecosystemen. Hierbij merkt het rapport op dat de ontwikkelingen in de LULUCF elkaar rap opvolgden in de laatste jaren, waardoor ook de toekomstige ontwikkelingen en netto impact onzeker zijn [European Commission, Impact Assessment Report Part 1, p.35].

Voor het bereiken van de EU-klimaatdoelstellingen is de bijdrage van LULUCF essentieel. De recent herziene LULUCF-verordening stelt een doel van -310 MtCO₂-eq netto koolstofverwijderingen in 2030 [European Commission, Impact Assessment Report Part 3, p.129]. Om dit te bereiken, is een carbonprijs van 50 €/tCO₂-eq. nodig [European Commission, Impact Assessment Report Part 3, p.129]. Daarbij zijn vooral natuurgebaseerde oplossingen nodig, zoals herbebossing, veenherstel en duurzaam bosbeheer. Deze maatregelen zijn niet alleen kostenefficiënt (veelal onder de 20 €/tCO₂-eq), maar leveren ook voordelen op voor biodiversiteit.

In de toekomst zijn technische en natuurgebaseerde verwijderingen beide nodig om de netto nul-uitstoot in 2050 te behalen. Technische oplossingen zijn echter onzeker qua kosten en schaalbaarheid, waardoor natuurgebaseerde maatregelen een betrouwbare basis vormen. In scenario's zoals LIFE worden landbouwgronden omgezet naar koolstoflandbouw en natuurgebieden, wat bijdraagt aan een grotere koolstofopslag.

Klimaatverandering vormt echter een bedreiging voor de capaciteit van bossen om CO₂ op te slaan. Droogte, bosbranden en stormen worden vaker en heviger door stijgende temperaturen, vooral in Zuid-Europa en Scandinavische bossen. Het herstel van bossen na extreme weersomstandigheden is essentieel voor het behoud van hun koolstofopslagcapaciteit, maar kan jaren duren afhankelijk van de ernst en het herstelbeheer.

Vergeleken met het rapport van de Europese Commissie zoals hierboven besproken, worden in het *Klimaatplan Scenario* daarentegen de volgende sectorale effecten waargenomen:

- **Industrie:** Hoewel CBAM een deel van de industrie vooralsnog beschermt (met name metalen, papier, etc.), wordt de Nederlandse maakindustrie zwaarder getroffen door afwenteling van CO₂-kostenstijging van de productie van door hen gebruikte materialen. Maar ook de chemische sector valt niet onder CBAM, waardoor kostenstijging door CO₂-beprijzing voor hen in het verschiet ligt zonder dat er een beschermende importtariefmuur voor hen wordt opgetrokken.
- **Transport:** Nederland wordt afhankelijk van een snellere uitrol van elektrische voertuigen en e-fuels. Beperkingen in infrastructuur en netwerkcapaciteit maken deze transitie echter duurder dan gemiddeld.
- **Landbouw:** De sector wordt geconfronteerd met hoge marginale reductiekosten en relatief beperkte ondersteuning via Europees beleid. In LIFE wordt weliswaar ingezet op gedragsverandering (minder vleesconsumptie), maar dat element ontbreekt grotendeels in het *Klimaatplan Scenario*.
- **Gebouwde omgeving:** Hoge energieprijzen, beperkte netcapaciteit en de noodzaak tot grootschalige renovatie maken deze sector kwetsbaar. In het LIFE-scenario speelt efficiëntie (zoals energiebesparing) een grotere rol, waardoor de kosten daar lager liggen.

De verschillen tussen de EU-scenario's en het scenario Versnelling zijn samengevat in Tabel F.2.

Tabel F.2 Vergelijking EU-scenario's en Versnelling scenario.

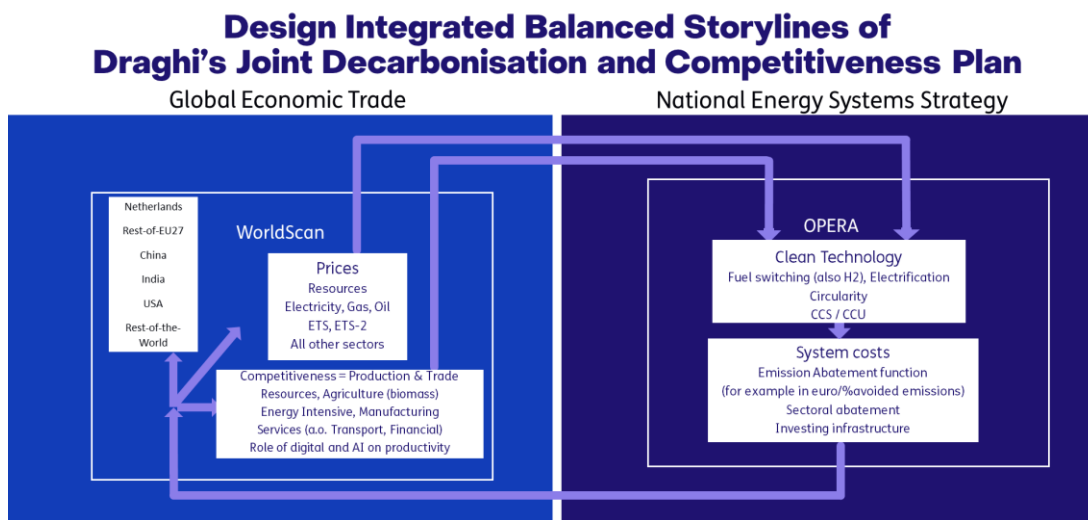
Sector	EU-scenario's (S3/LIFE)	Versnelling
Industrie	Sterke inzet CCS, elektrificatie, circulariteit (LIFE)	Lastiger te verduurzamen door relatief hoge energiebelasting en beperkte CCS-capaciteit; exportpositie verslechtert
Transport	Elektrificatie + e-fuels voor zwaar transport	Meer druk op elektrificatie en moleculair alternatief, bijv. synthetische kerosine via import
Landbouw	Sterke emissiereductie in S3; dieetverandering in LIFE	Inkrimping sector waarschijnlijk door hoge kosten en minder CO ₂ -compensatiemogelijkheden
Gebouwde omgeving	Renovatie en elektrificatie (warmtepompen), gedragsverandering in LIFE	Hogere investeringskosten; beleid is afhankelijk van nationale subsidies en netcapaciteit

Een belangrijk verschil tussen de EU impact studie en de effecten van het Klimaatplan scenario in dit rapport betreft de inschatting van koolstoflekkage. Waar de Europese Commissie uitgaat van beheersbare lekkage (onder meer via CBAM). Dit betekent dat meer reductie-inspanningen leidt tot verplaatsing van productie naar landen buiten de EU. CBAM biedt slechts gedeeltelijke bescherming, vooral in de metaalsector, en is vooralsnog niet toereikend voor de breedte van de Nederlandse exportgerichte industrie.

De Europese Commissie werkt met een set van modellen die met name zijn toegespitst op energie- en klimaatdoelstellingen op EU-niveau. De modellen (zoals PRIMES en EUCalc) gaan uit van uniforme beleidsimplementatie, en modelleren lidstaten niet in detail. Regionale of nationale asymmetrieën worden beperkt meegenomen. Technologie wordt als breed beschikbaar beschouwd, en gedragseffecten worden slechts in het LIFE-scenario gemodelleerd.

Bijlage G Soft-link

WorldScan en OPERA



Figuur G.1 Modellschema

Figuur G.1 toont de geïntegreerde benadering via twee modellen:

- **WorldScan** (links): een algemeen-evenwichtsmodel dat mondiale economische ontwikkelingen, handel en sectorale productie simuleert;
- **OPERA** (rechts): een nationaal energiesysteemmodel dat technologische opties, systeemkosten en emissiereducties optimaliseert.

De koppeling tussen beide modellen verloopt via een *soft-link*, met twee richtingen van informatie-uitwisseling:

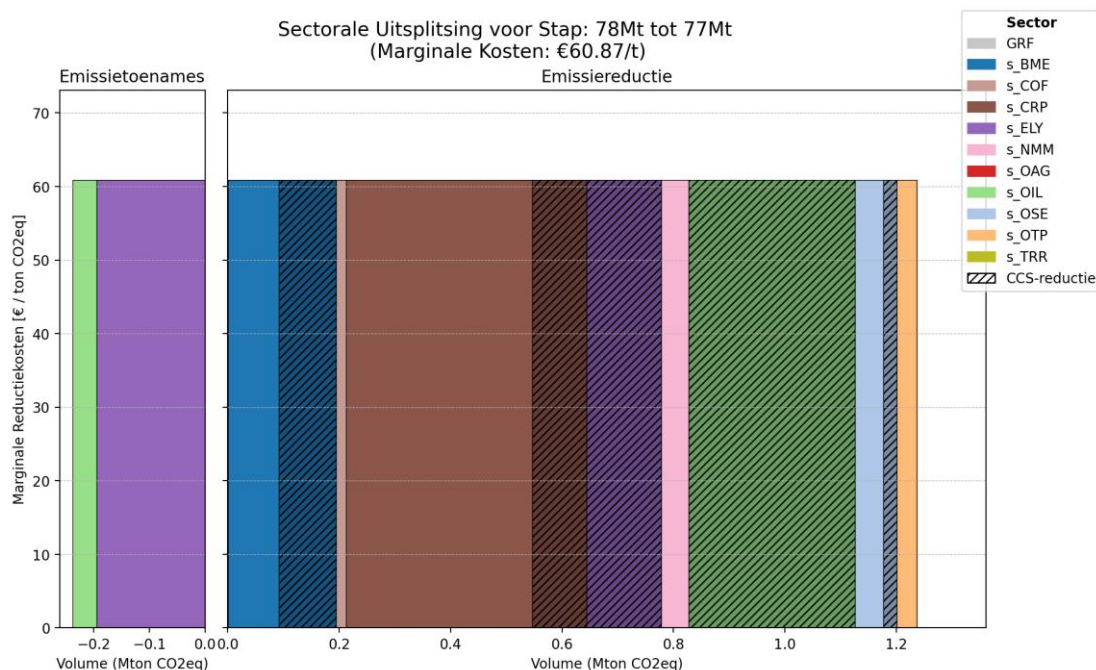
1. Van OPERA naar WorldScan
 - Kostencurves en reductie-opties: OPERA levert per sector een marginale emissiereductiekostencurve (MACC), gebaseerd op doorgerekende technologieën zoals elektrificatie en CCS/CCU.
 - Systeemkosten: Gemodelleerde systeemkosten voor emissiereductie (bijvoorbeeld euro per vermeden ton CO₂) worden vertaald naar marginale kosteninput voor WorldScan.
2. Van WorldScan naar OPERA
 - Economische vraag en productie-informatie: WorldScan levert informatie over de vraag naar warmte, transportdiensten, intermediaire inputs, en sectorale productievolumes.
 - Prijssignalen en emissiekosten: Ontwikkelingen in wereldmarktprijzen, ETS-prijzen en gedragsmatige responsen (zoals substitutie tussen sectoren) worden meegenomen als input voor OPERA.

De paarse pijlen in de figuur geven deze datastromen weer. De integratie maakt het mogelijk om technologische scenario's uit OPERA te analyseren binnen de economische en geopolitieke context die WorldScan biedt, en omgekeerd om economische structurele effecten door te rekenen op basis van realistische emissiereductieopties.

Deze gekoppelde benadering zorgt voor beleidsconsistentie over verschillende schaalniveaus en beleidsdomeinen: van nationale investeringen in infrastructuur tot mondiale handels- en concurrentiedynamiek. Bijlage I illustreert voor een aantal sectoren hoe de soft-link daadwerkelijk uitpakt en leidt tot een convergentie van modelresultaten.

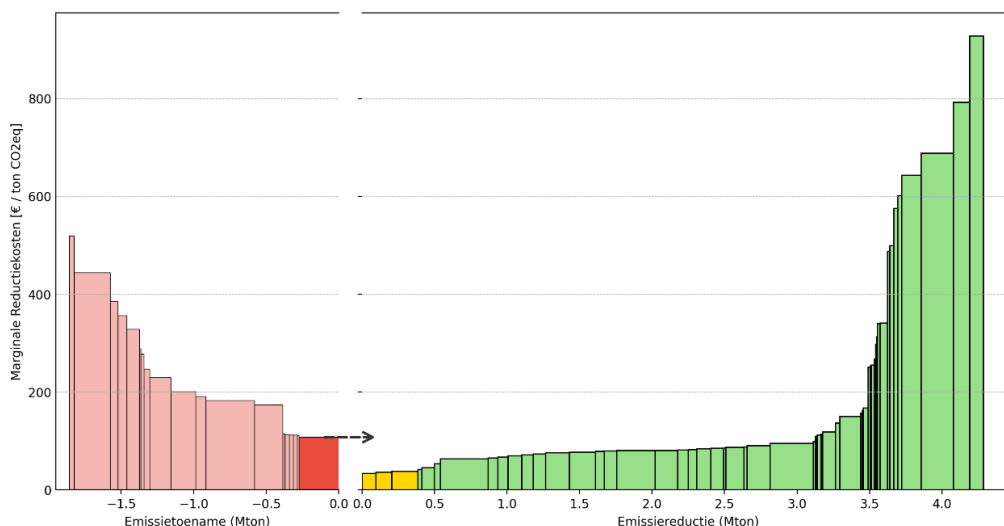
Kostencurves uit OPERA

De belangrijkste data-uitwisseling van OPERA naar WorldScan is de sectorale marginale kostencurve voor emissiereductie, ofwel Marginal Abatement Cost Curve (MACC). Om een dergelijke curve te genereren, wordt het OPERA-model stapsgewijs (in dit geval met stappen van 1 megaton) uitgevoerd met een steeds lagere emissiereductie. Dit levert twee belangrijke resultaten op die worden gebruikt om de kostencurves te genereren: de emissies per technologie (en dus per sector) en de systeemkosten. De emissies per technologie worden sectoraal gegroepeerd en gebruikt om de bijdrage van elke sector aan de totale emissiereductie te berekenen. Als we bijvoorbeeld de uitstoot met 1 megaton verminderen, kan het zijn dat 0,5 megaton reductie plaatsvindt in de sector Basismetalen en 0,5 megaton in de oliewinningsector. Dit geeft ons twee "blokken" van reductie voor elk van deze sectoren om te gebruiken in de kostencurve. De hoogte, in dit geval de kosten van de reductie, wordt berekend aan de hand van de systeemkosten. We berekenen de gemiddelde kosten van de reductie door de systeemkosten voor en na de reductiestap van 1 megaton te vergelijken. Vervolgens moeten we aannemen dat de reductiekosten voor deze stappen van 1 megaton ongeveer gelijk zijn tussen de sectoren. Zodra we deze twee berekeningen hebben uitgevoerd, krijgen we de "blokken" voor die stap.



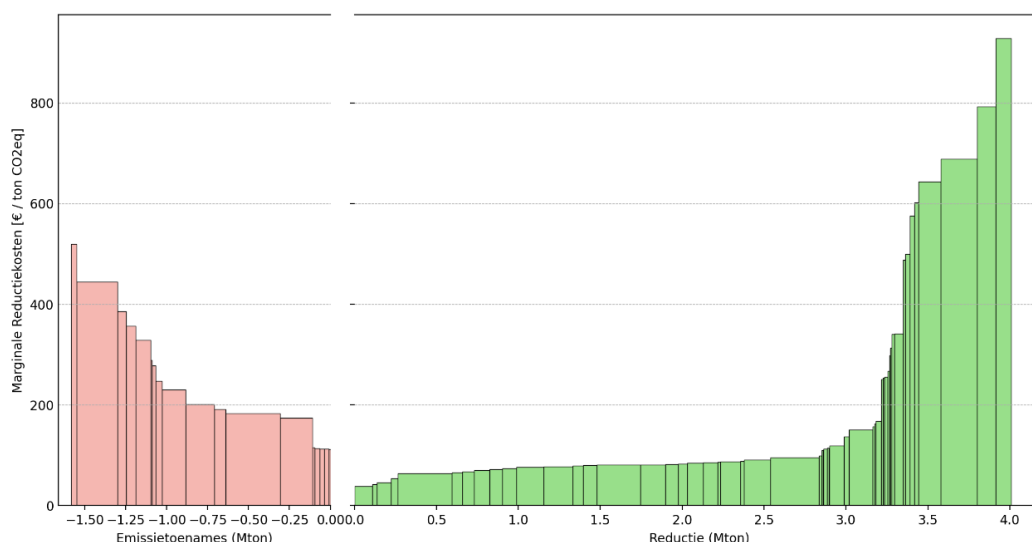
Figuur G.2: De blokken gevormd in de emissie reductie stap van 78Mt naar 77Mt.

Zoals echter duidelijk wordt uit Figuur G.2, zijn er ook sectoren met een netto-emissietoename, of negatieve reductie, voor deze stapgroottes. Dit komt door het feit dat sommige opties goedkoop maar niet efficiënt zijn, en deze plaats moeten maken voor opties die efficiënter maar duurder zijn. Dus als een technologie de meest kosteneffectieve optie was voor een minder streng emissiedoel, is deze mogelijk niet langer kosteneffectief bij strengere emissiedoelen. Dit betekent dat een aantal eerdere reducties onhaalbaar worden bij strengere emissiedoelen. Als gevolg hiervan worden emissietoenames verrekend met reducties uit eerdere stappen in een salderingsprocedure die wordt gebruikt om de uiteindelijke MACC te genereren. Dit gebeurt stapsgewijs, voor elke emissietoename stap, tot dat alles verrekend is. Het gebeurt individueel per sector, apart voor de CCS en non-CCS opties. Zodra alle positieve emissie blokken gecompenseerd zijn, gebruiken we de overgebleven blokken om de totale en sectorale marginale kostencurves te genereren. Dit proces wordt weergegeven in Figuur G.3 en Figuur G.4.



Figuur G.3: Deze figuur illustreert een voor-stap uit de salderingsprocedure voor de olieproducten sector. Een blok met emissietoename wordt behandeld en weggestreept tegen een emissiereductie. Hierbij representeert het donker rood gekleurde blok de emissietoename in deze stap en de geel gekleurde blokken de emissiereducties die teniet gedaan worden door deze emissietoename.

Als we het voorbeeld van de oliesector nemen, toont Figuur G.3 de laatste stap van de compensatie van positieve emissies voor een bepaald scenario. Blok voor blok berekenen we hoeveel goedkopere reductie later als te inefficiënt wordt beschouwd, door de omvang van de emissietoename af te trekken van de reductie, te beginnen bij de goedkoopste optie en door te gaan totdat het blok volledig is gecompenseerd. Voor de laatste stap compenseren we dus twee blokken volledig en één blok gedeeltelijk. Dit wordt getoond in Figuur G.4.



Figuur G.4: Deze figuur illustreert een na-stap uit de salderingsprocedure voor de olieproducten sector. De saldering die geïllustreerd wordt in Figuur G.3 is verwerkt en de emissiereductie en emissietoename zijn weggestreept. Deze procedure wordt doorgezet, totdat alle emissietoename verrekend is.

Kostencurves in WorldScan

WorldScan maakt gebruik van kostencurves per sector, geschat op basis van het PBL-modelinstrumentarium uit de KEV.¹⁷ Deze zijn afgestemd op de meer gedetailleerde OPERA-berekeningen, die zelf zijn gevalideerd aan KEV 2024. Omgekeerd zullen nieuwe simulatieresultaten van WorldScan op een consistente manier in OPERA worden verwerkt. Dit betreft onder andere de productie van intermediaire sectoren en finale consumptie (zoals de vraag naar warmte en vervoersdiensten, inclusief personenauto's en warmtevraag). De afstemming tussen de economie (WorldScan, inclusief bottom-up energiekosten) en de exogene factoren van OPERA gebeurt via *soft-linkage*.

Met de soft-linkage van simulaties met beide modellen kunnen de energie-technologische scenario's uit OPERA verrijkt worden met een economische geopolitieke handelscontext en de structuur van economische ontwikkeling en het verdienvermogen van de Nederlandse en/of Europese economie uit WorldScan.

Emissies van een bepaalde verontreinigende stof door sector s worden gemodelleerd als:

$$UEM_s = \sum_i \varepsilon_{i,s} q_{i,s} + \varepsilon_{Q,s} Q_s \quad (1)$$

waarbij

- UEM_s emissies zonder retrofitting (in het Engels: End-Of-Pipe, ofwel EOP)-reductie is,
- $q_{i,s}$ het volume van input i dat wordt gebruikt in de productie van sector s (zoals fossiele brandstoffen en kunstmest),
- $\varepsilon_{i,s}$ de emissie per eenheid van deze input, en
- $\varepsilon_{Q,s}$ de emissiefactor voor proces-emissies in sector s (de emissies per eenheid output Q_s).

¹⁷ Het gaat om sectorspecifieke kostencurves die zijn gebruikt bij analyses rond het klimaatakkoord, zie Ontwerp klimaatakkoord (2019), zie kader 1 pagina 11 van CPB Doorrekening ontwerp-Klimaatakkoord en kabinetsvarianten en Bollen, J., Deelen, A., Hoogendoorn, S., Trinks, A. (2020), CO₂-heffing en verplaatsing, CPB Achtergronddocument 2020.

EOP-reductie verlaagt de emissies ten opzichte van de BAU voor alle niet-CO₂ broeikasgassen en luchtpolluenten in elke sector, zowel door abatement op energie-inputs (indien van toepassing), kunstmestgebruik (energie-intensieve goederen) als procesemissies:

$$EM_s = \sum_i (1 - x_{i,s}) \varepsilon_{i,s} q_{i,s} + (1 - x_{Q,s}) \varepsilon_{Q,s} Q_s \quad (2)$$

waarbij

- $x_{i,s}$ het relatieve reductieniveau is voor input-gerelateerde emissies, en
- $x_{Q,s}$ het relatieve reductieniveau voor output-gerelateerde emissies

De totale reductiekosten (indices voor regio-sector-activiteit-stof weggelaten) luiden:

$$C(x) = UEM_s \cdot \left\{ \frac{\beta}{1-\chi} \left[\bar{x}^{1-\chi} - (\bar{x} - x)^{1-\chi} \right] - \gamma x \right\} \cdot \sum_i \delta_i p_i \quad (3)$$

waarbij

- $C(x)$ de kosten van emissiereductie is als functie van x ,
- $\bar{x}$, de maximale fractie emissiereductie door EOP-opties,
- β en χ (> 0) de vorm van de aanbodfunctie bepalen, en
- γ de constante is die het startniveau van de marginale kosten $c(0)$ vastlegt.¹⁸

Emissiereductie via EOP vereist inputs van energie, kapitaal, arbeid, tussenproducten en diensten. De parameter δ_i is het aandeel van input i in de kapitaalgoederensector in het basisjaar.¹⁹ Als bijvoorbeeld lonen stijgen, nemen de marginale kosten van reductie ook toe. Er is geen leereffect in EOP-abatement.

EOP wordt toegepast tot het niveau waarop de marginale kosten gelijk zijn aan de emissiebelasting. De investering in EOP en de emissiebelasting leiden tot extra productiekosten. Bovendien verhoogt de emissiebelasting de productiekosten afhankelijk van de substitutie-elasticiteit tussen de vervuilende input en andere inputs. Deze hogere productiekosten leiden tot prijsstijgingen van het product, wat op zijn beurt structurele verschuivingen in de economie veroorzaakt: van producten met hoge emissie-intensiteit en dure abatement naar minder vervuilende producten.

Ten slotte wordt verondersteld dat de overheidstekorten ongewijzigd blijven bij het invoeren van belastingen op koolstof of luchtpolluenten of subsidies op hernieuwbare energie, en dat de werkloosheid op macroniveau constant blijft. Deze aannames zijn gebruikelijk in lange termijn economische simulaties om de structurele effecten van beleid helder te isoleren. Constante overheidstekorten impliceren dat beleidsmaatregelen budgetneutraal worden ingevoerd, wat consistent is met houdbaar begrotingsbeleid. Constante macro-werkloosheid veronderstelt dat de economie op termijn terugkeert naar een natuurlijk evenwicht, en dat sectorale herschikkingen geen blijvend effect hebben op de totale werkgelegenheid.

Samenvattend simuleert WorldScan een efficiënte reactie op emissieprijsen van luchtvervuilingstypen en broeikasgassen via:

1. Arbitrage van middelen naar EOP-emissiereductie op inputs (verbranding van brandstoffen) en procesemissies,

¹⁸ De marginale kosten $c(x)$ wordt over het gehele reductiedomein gekalibreerd op basis van de MAC-curves in OPERA (voetnoot 6). In de OPERA-databases worden alleen MAC-curves voor 2020 en 2030 gepresenteerd. WorldScan hanteert daarom de MAC-curves van 2020 voor alle jaren tot en met 2020, en past de MAC-curves van 2030 toe voor alle jaren na 2020.

¹⁹ Aangezien emissiebeheersmaatregelen in veel gevallen kapitaalgoederen zijn, zullen de productie en implementatie daarvan gemiddeld vergelijkbaar zijn met die van kapitaalgoederen.

2. Structurele veranderingen door herallocatie van middelen van hoge- naar lage-emissieactiviteiten (binnen en tussen sectoren), en
3. Verschoven consumptie van vervuilende naar minder vervuilende goederen.

Het model simuleert een emissieprijs in een volledig sectorale CGE-kader met handel, maar let erop dat energie-emissietechnologie expliciet wordt weergegeven alleen in de elektriciteitssector. In alle andere delen van het model wordt technologie impliciet gemodelleerd via CES-substitutiefuncties, zowel in productie als consumptie. Hoewel de EOP-emissiereductie in dit model in een CGE-perspectief is geplaatst (structuuraanpassingen en in balans zijnde EOP-emissiereductie), worden de EOP-technologieën ook alleen impliciet weergegeven.^{20,21}

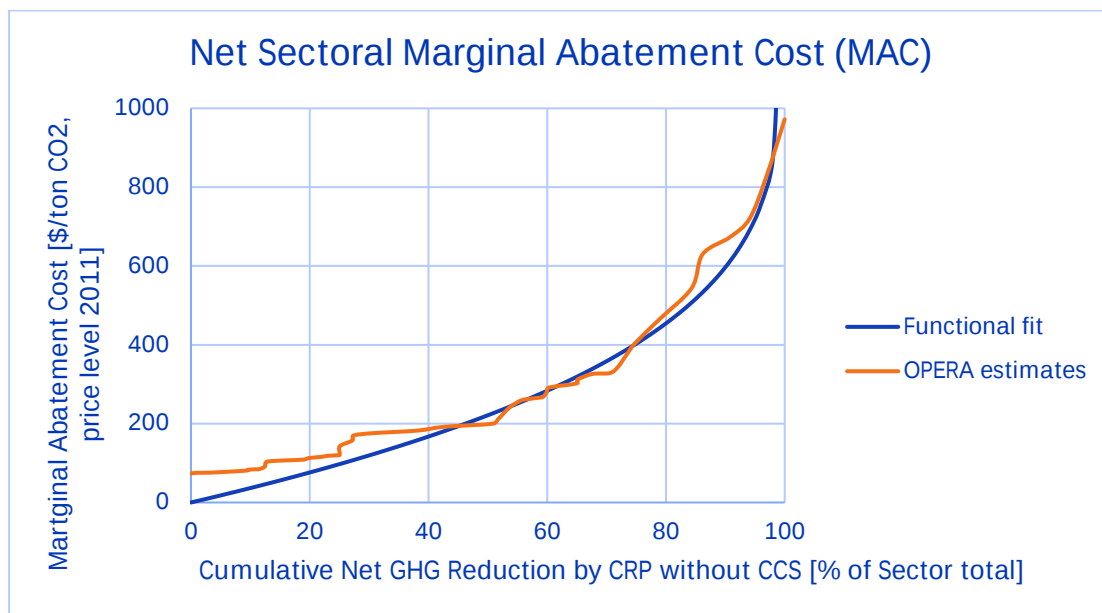
Figuren G.4 en G.5 tonen de geschatte MACC, die in WorldScan gebruikt worden voor de sectoren chemie en raffinageprocessen (CRP) en basis metaal (BME) respectievelijk. De geschatte MACCs van de andere sectoren zijn terug te vinden in bijlage H. De horizontale as toont de cumulatieve broeikasgasreductie in megaton CO₂-equivalent, en de verticale as de bijbehorende marginale kosten per ton reductie in euro's. In de figuren is ook zichtbaar in hoeverre die overeenkomt met de OPERA-gegevens (oranje lijn).

De schatting volgt uit vergelijking (3), en gekozen waardes voor β , γ , $\bar{x}$, en χ , om zo het verschil tussen de curve van de geschatte totale reductiekosten voor een sector uit vergelijking (3) en de MACC uit OPERA te minimaliseren. De kosten zijn omgerekend naar US dollars en prijspeil 2011. De originele resultaten in OPERA zijn in euro's op prijspeil 2015. De gehanteerde correctiefactor van 1.042 volgt uit de geschatte inflatie van 2011 tot 2015 (6%) gedeeld door de wisselkoers in 2011 (1.11).

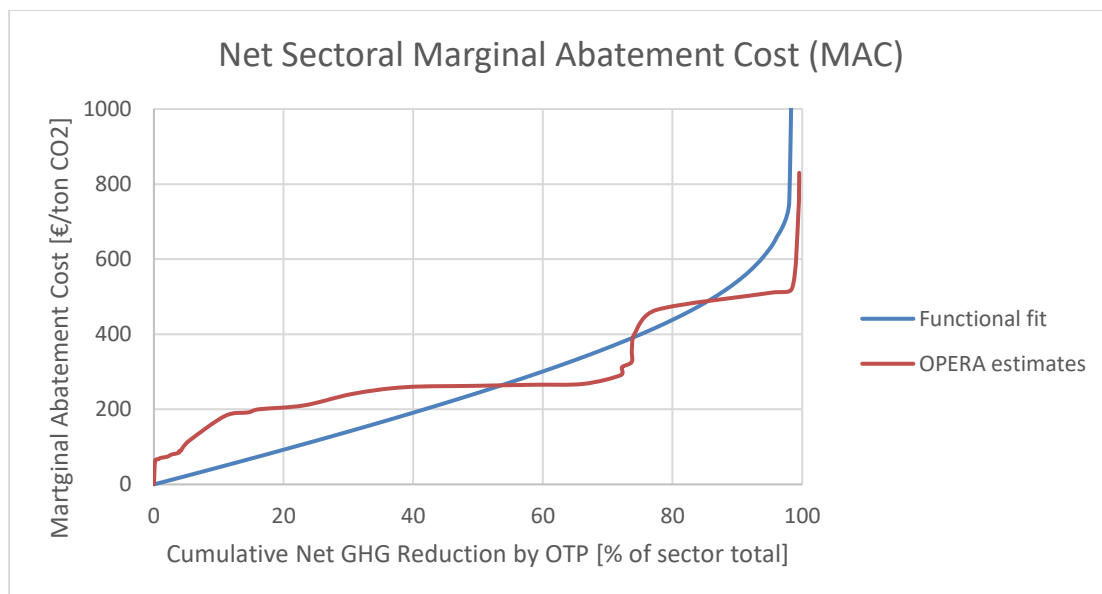
De kosten van een 1% extra netto reductie van broeikasgassen verschilt per sector. F toont aan dat de kosten voor de eerste emissiereducties van CRP relatief goedkoop zijn, onder de €50/ton, waar de kosten gestaag oplopen tot €200/ton in de range van 40-50% reductie. De kosten van abatement per ton stijgen rap bij reducties van 70% of meer. Figuur toont dat de marginale abatement kosten voor het vervoer van overig vervoer (OTP) structureel anders zijn. Zo lopen de reductiekosten al op naar €200/ton rond de 16% reductie. De kosten voor een extra -reductie zijn voor het eerst boven de €300/ton bij een reductie van 72%. Daarna stijgen de kosten rap.

²⁰ Hoewel de toegepaste EOP-technologie-opties in een gesimuleerd beleids-scenario kunnen worden afgeleid uit de endogene emissieprijsen, geldt dat de emissieprijs gelijk is aan het niveau van de marginale kosten van reductie. Daardoor maken alle opties met marginale kosten lager dan de emissieprijs deel uit van het EOP-emissiereductieportfolio.

²¹ Energiebesparingen kunnen worden opgewekt door prijsveranderingen van energie (via emissieprijsen), maar worden alleen impliciet weergegeven. Op sectorniveau kunnen energiebesparingen ontstaan door een vermindering van de productie of door een wissel van inputs bij constant blijvende substitutie-elasticiteiten (tussen energie- en niet-energie-inputs). Op macroniveau kunnen energiebesparingen tot stand komen door herallocatie van arbeid en kapitaal van energie-intensieve naar energie-extensieve sectoren. Ten slotte kunnen energiebesparingen ook optreden door lagere consumptie of door substitutie tussen energie-intensieve en energie-extensieve goederen (bijvoorbeeld van transportdiensten naar niet-transportdiensten).

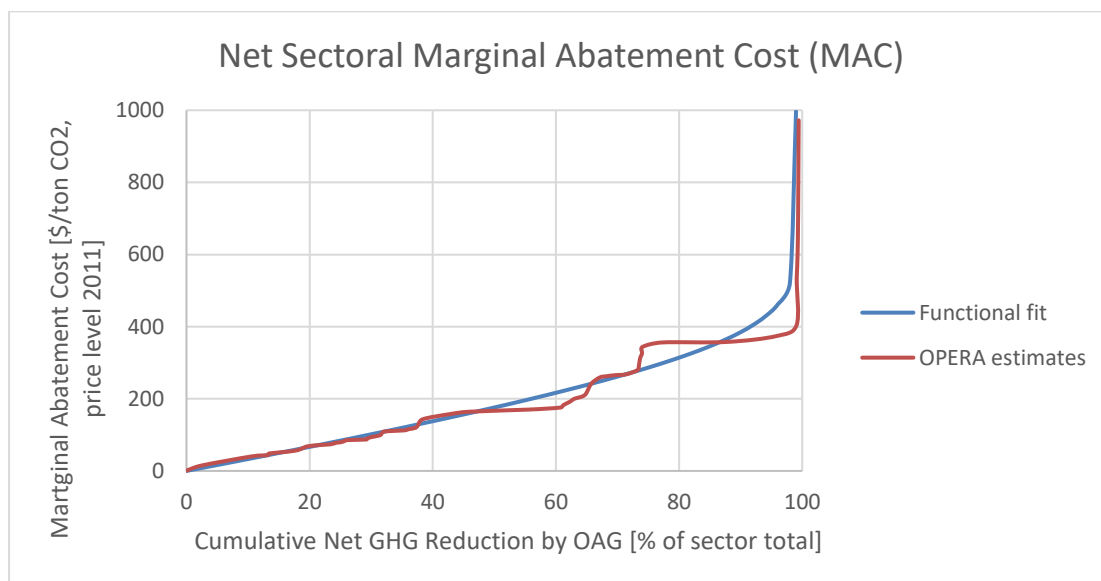


Figuur G.4 Marginal Abatement Cost Curve (MACC) in 2040 van basis chemie en raffinageprocessen (CRP), functional fit a.d.h.v. vergelijking (3) en parameterwaarden $\beta = 350$, $\gamma = 0$, $\bar{x} = 0.99$, $\chi = 0.7$.

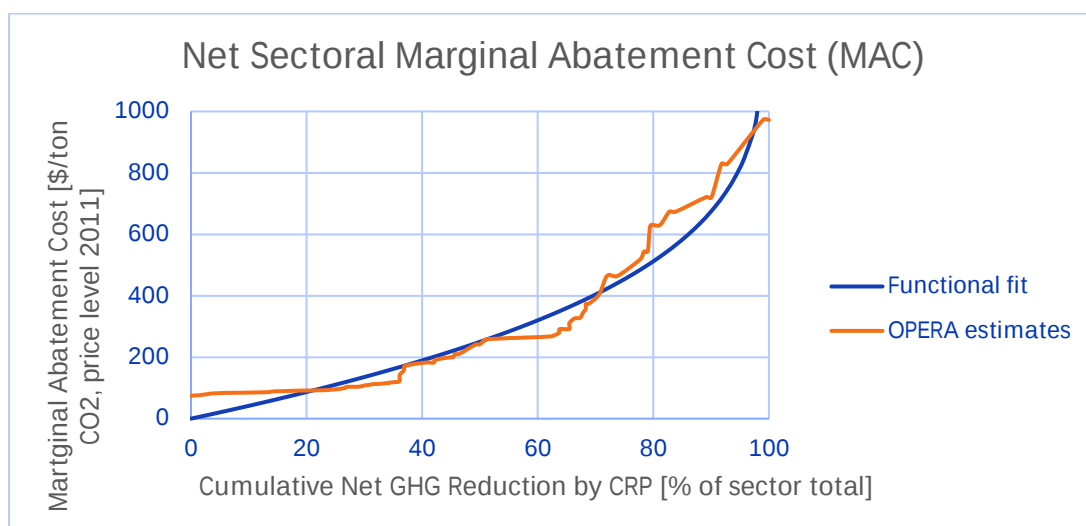


Figuur G.5 Marginal Abatement Cost Curve (MACC) in 2040 van overig vervoer (OTP), functional fit a.d.h.v. vergelijking (3) en parameterwaarden $\beta = 100$, $\gamma = -350$, $\bar{x} = 0.99$, $\chi = 0.95$.

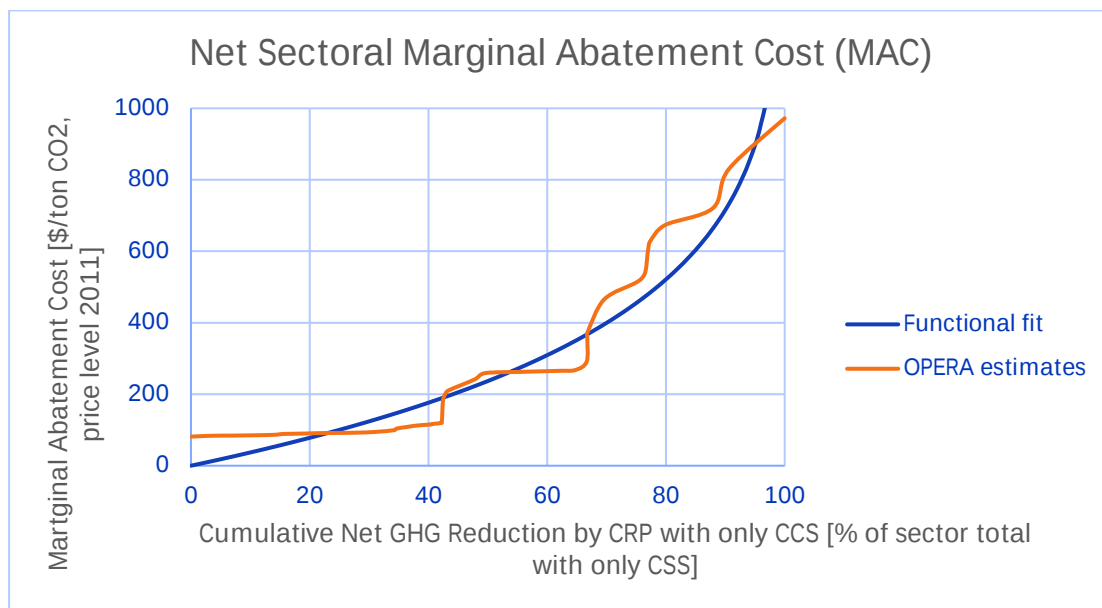
Bijlage H Sectorale MACCs 2040 (Versnelling)



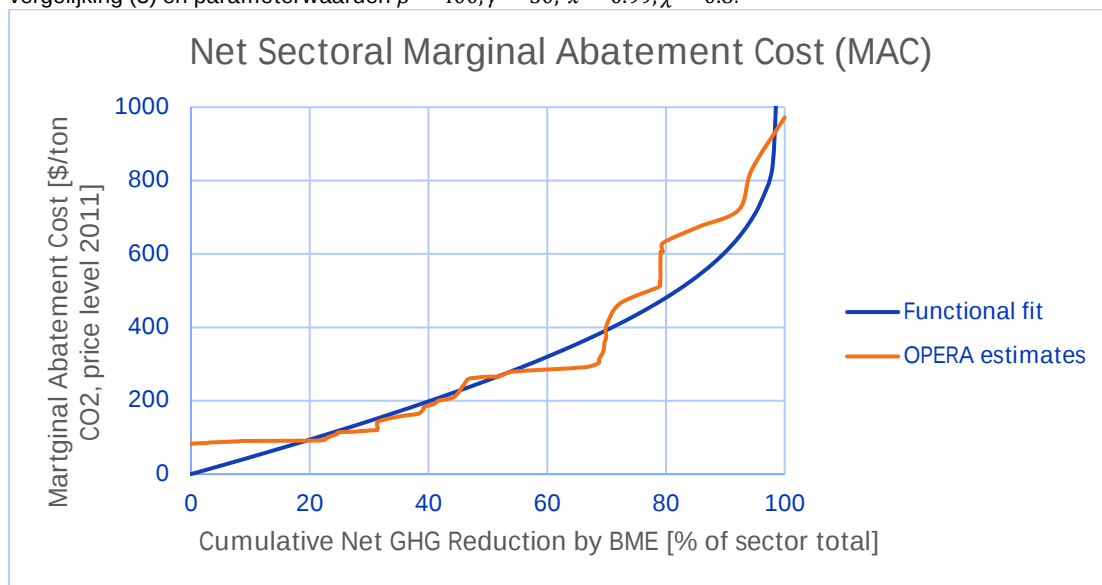
Figuur H.1 Marginal Abatement Cost Curve (MACC) in 2040 van OAG, functional fit a.d.h.v. vergelijking (3) en parameterwaarden $\beta = 75$, $\gamma = -250$, $\bar{x} = 0.99$, $\chi = 0.9$.



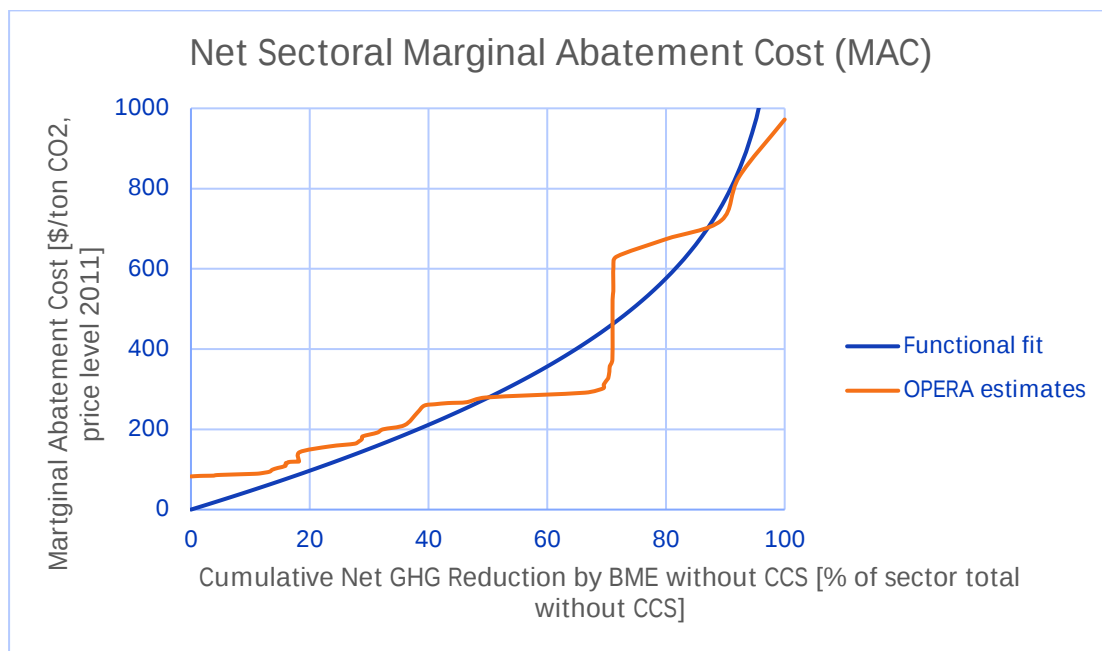
Figuur H.2 Marginal Abatement Cost Curve (MACC) in 2040 van CRP, functional fit a.d.h.v. vergelijking (3) en parameterwaarden $\beta = 350$, $\gamma = -50$, $\bar{x} = 0.99$, $\chi = 0.75$.



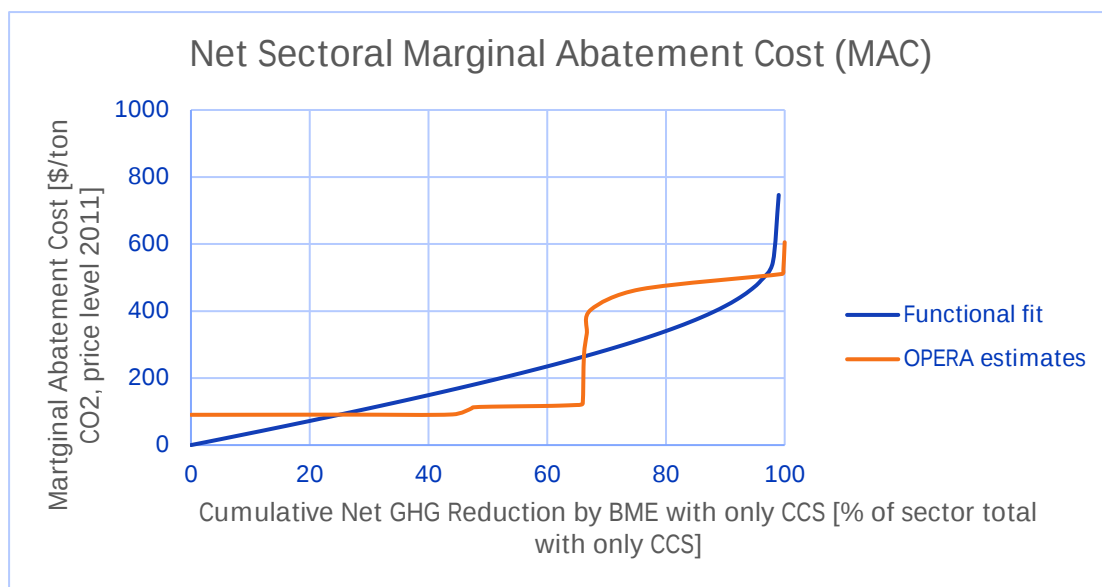
Figuur H.3 Marginal Abatement Cost Curve (MACC) in 2040 van CRP met enkel, functional fit a.d.h.v. vergelijking (3) en parameterwaarden $\beta = 400, \gamma = 50, \bar{x} = 0.99, \chi = 0.8$.



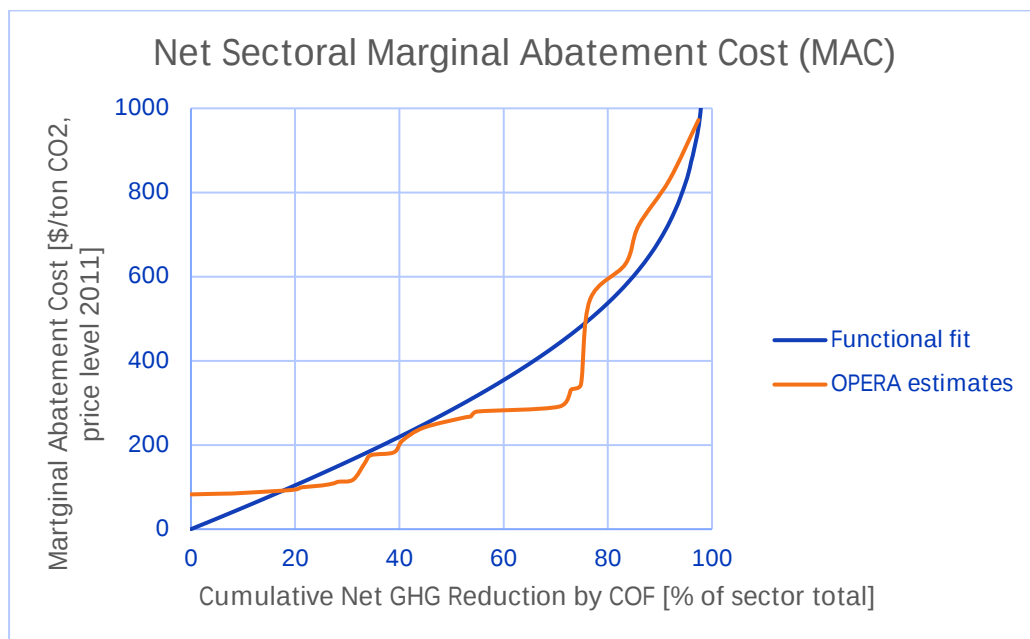
Figuur H.4 Marginal Abatement Cost Curve (MACC) in 2040 van BME, functional fit a.d.h.v. vergelijking (3) en parameterwaarden $\beta = 200, \gamma = -250, \bar{x} = 0.99, \chi = 0.8$.



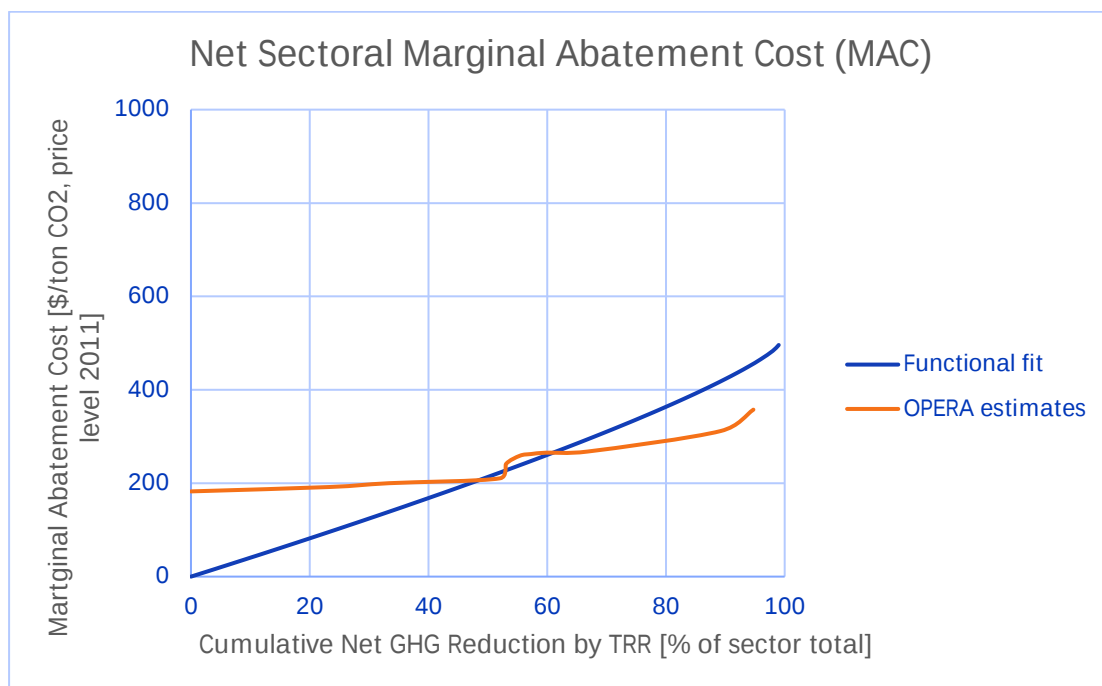
Figuur H.5 Marginal Abatement Cost Curve (MACC) in 2040 van BME zonder CCS, functional fit a.d.h.v. vergelijking (3) en parameterwaarden $\beta = 300, \gamma = -150, \bar{x} = 0.99, \chi = 0.9$.



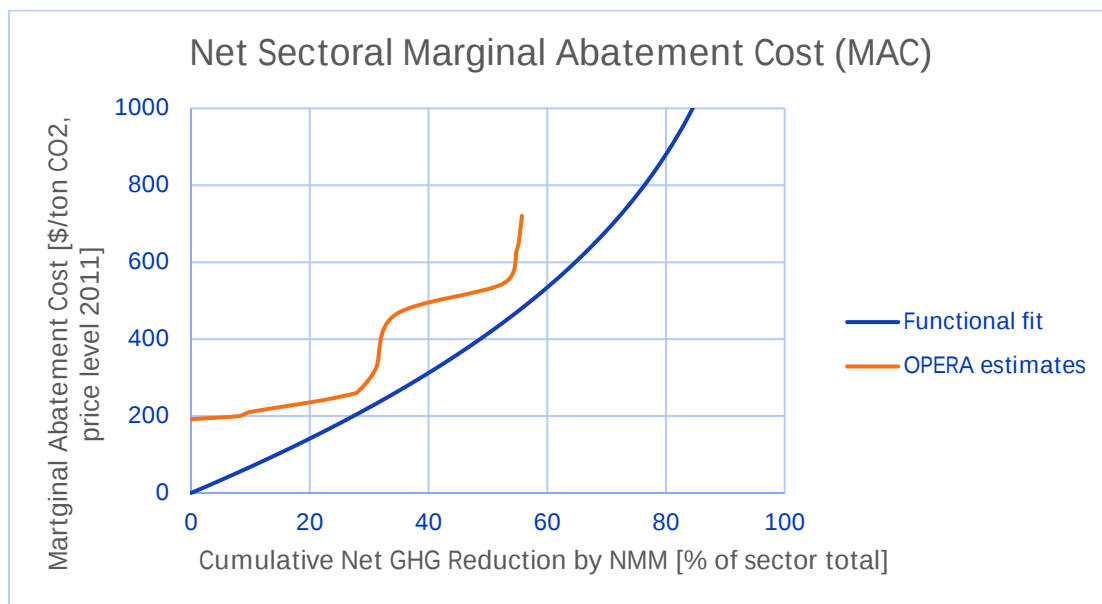
Figuur H.6 Marginal Abatement Cost Curve (MACC) in 2040 van BME met enkel CCS, functional fit a.d.h.v. vergelijking (3) en parameterwaarden $\beta = 100, \gamma = -250, \bar{x} = 0.99, \chi = 0.8$.



Figuur H.7 Marginal Abatement Cost Curve (MACC) in 2040 van COF, functional fit a.d.h.v. vergelijking (3) en parameterwaarden $\beta = 75, \gamma = -325, \bar{x} = 0.99, \chi = 0.95$.



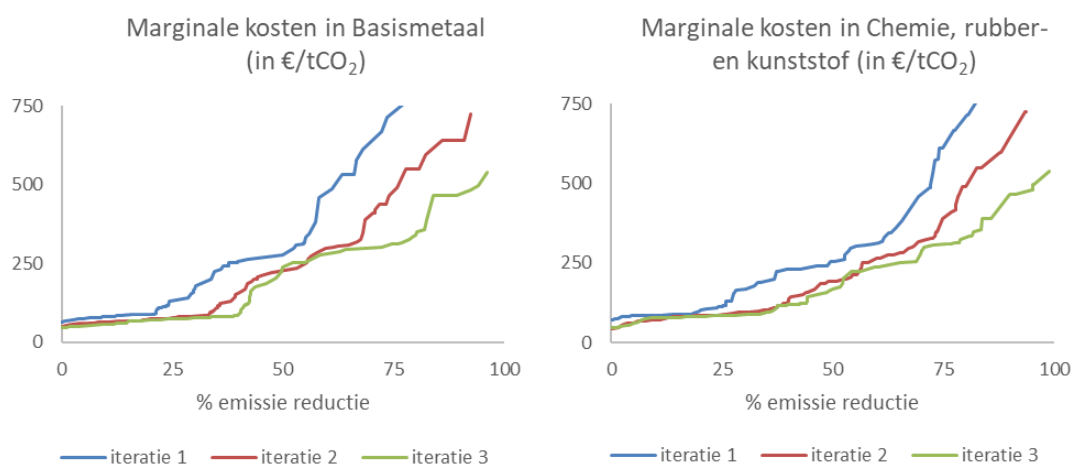
Figuur H.8 Marginal Abatement Cost Curve (MACC) in 2040 van TRR, functional fit a.d.h.v. vergelijking (3) en parameterwaarden $\beta = 400, \gamma = 0, \bar{x} = 0.99, \chi = 0.2$.



Figuur H.9 Marginal Abatement Cost Curve (MACC) in 2040 van NMM, functional fit a.d.h.v. vergelijking (3) en parameterwaarden $\beta = 500$, $\gamma = -150$, $\bar{x} = 0.99$, $\chi = 0.9$.

Bijlage I Soft-link aan het werk

Figuur I.1 en de bijbehorende tabel laten zien hoe MACC's en productieveranderingen zich ontwikkelen in het versnellingsscenario. De grafieken tonen de relatie tussen het reductiepercentage ten opzichte van het KEV-basispad en de marginale kosten per vermeden ton CO₂, voor respectievelijk de basismetaal- en de chemiesector –zowel verduurzamingsopties in de sector als de CCS-opties. De verschillende iteraties geven het resultaat weer van de koppelingen tussen OPERA en WorldScan. Deze iteratieve benadering illustreert hoe reductiekosten en productie-effecten zich gaandeweg stabiliseren.



Productie (%)	Basismetaal	CRP	Papier	Bouw	Voedsel	ETS-2
iteratie 1	0	0	0	0	0	0
iteratie 2	-28	-19	5	4	3	-0,1
iteratie 3	-25	-18	4	3	1	0,1

Figuur I.1: MACC voor Basismetaal en Chemie, Rubber, -en Kunststof Nederland in 2040 in verschillende iteraties in het Versnellingsscenario. De MACC daalt, omdat productie in energie-intensiefste sectoren daalt, en dure maatregelen niet meer van toepassing zijn.

De tabel onder de grafieken kwantificeert productieveranderingen per sector. De productie in de energie-intensieve basismetaal- en chemiesector daalt, terwijl andere sectoren zoals papier, bouw en voedsel juist een lichte productiestijging (structurele verandering van emissie-intensieve sectoren naar relatief minder emissie-intensieve sectoren). De emissiereducties worden bepaald door de marginale reductiekosten, terwijl de productieveranderingen vooral worden gestuurd door de oppervlakte onder de MACC-curves, vermenigvuldigd met de emissies in het basispad (KEV). Als de oppervlakte onder de MACC bij het door WorldScan gesimuleerde emissiereductieniveau (ongeveer 75–90%) tussen iteraties kleiner wordt, nemen de bijbehorende productieveranderingen af en convergeren de modelresultaten.

ICT, Strategy & Policy

Anna van Buerenplein 1
2595 DA Den Haag
www.tno.nl