



Planbureau voor de Leefomgeving

TOEKOMSTVERKENNING WLO

Cahier
Klimaat
en Energie



Colofon

Toekomstverkenning WLO 2025: Cahier Klimaat en Energie

© PBL Planbureau voor de Leefomgeving
Den Haag, 2025
PBL-publicatienummer: 5455

Contact

Hans.Eerens@pbl.nl

Auteurs

Hans Eerens, Robert Koelemeijer, Marc Schouten, Harmen-Sytze de Boer, Jelle van Minnen, Boris van Beijnum, Peter Zwaneveld (CPB), Joep Tijm (CPB)

Redactie figuren

Beeldredactie PBL

Eindredactie en productie

Uitgeverij PBL

Omslagfoto

Nienke Noorman

Toegankelijkheid

Het PBL hecht veel waarde aan de toegankelijkheid van zijn producten. Mocht u problemen ervaren bij het lezen ervan, dan kunt u contact opnemen via info@pbl.nl. Vermeld daarbij s.v.p. de naam van de publicatie en het probleem waar u tegenaan loopt.

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: PBL (2025), *Toekomstverkenning WLO 2025: Cahier Klimaat en Energie*. Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.

Het PBL doet onderzoek naar de leefomgeving en het leefomgevingsbeleid in Nederland en daarbuiten. Denk aan milieu, natuur en ruimtelijke inrichting. Met onze verkenningen, analyses en evaluaties leveren we strategische kennis voor beleid, politiek, maatschappelijke organisaties en het bredere publiek. We geven daarbij niet alleen feiten en inzichten over het hier en nu, maar kijken ook vooruit naar de nabije en verdere toekomst. We doen ons onderzoek gevraagd en ongevraagd, onafhankelijk en wetenschappelijk onderbouwd.

Inhoud

Voorwoord	4
Samenvatting	5
1 Inleiding	10
1.1 Aanleiding voor de actualisatie van de WLO	10
1.2 WLO Klimaat en Energie, en beleid	12
1.3 Gebruikte data en modellen	12
2 Internationale ontwikkelingen	14
2.1 Methodiek en uitgangspunten	14
2.2 Toekomstige internationale ontwikkelingen	14
3 Nationale ontwikkelingen	19
3.1 Methodiek en uitgangspunten	19
3.2 Algemene uitgangspunten	20
3.3 Veronderstelde sectorale ontwikkelingen	26
3.4 Toekomstige nationale ontwikkelingen	38
4 Klimaat effecten en adaptatieopgave	53
4.1 Inleiding	53
4.2 Mogelijke klimaatontwikkelingen in Nederland	53
4.3 Adaptatieopgaven voor Nederland	57
5 Hoe zijn de scenario's in de praktijk te gebruiken?	61
5.1 Inleiding	61
5.2 Efficiënte prijzen: definitie en interpretatie	61
5.3 Efficiënte CO ₂ -prijzen voor de WLO 2025	63
5.4 Omgang met luchtkwaliteit	63
5.5 Voorgeschreven CO ₂ -prijzen voor ex-ante beleidsanalyses in andere landen	66
5.6 Afwegingen bij het bepalen van de efficiënte CO ₂ -prijzen in de WLO 2025	67
Referenties	68
Bijlage 1: Dankwoord	72
Bijlage 2: IMAGE	73
Bijlage 3: Beschrijving COMPETES	77
Bijlage 4: OPERA	78
Bijlage 5: Efficiënte CO₂-prijzen voor de periode 2025-2100	81

Voorwoord

Een blik in de verre toekomst is vereist om beleid voor de fysieke leefomgeving te maken. Investeren vergen immers niet alleen jaren van voorbereiding en uitvoering, maar ze gaan ook tientallen jaren mee. Ze hebben op de langere termijn effect op de maatschappij.

De toekomst is onzeker en daardoor is het ontwikkelen van robuust beleid niet eenvoudig. In de scenario's binnen de studies 'Welvaart en Leefomgeving' (WLO) uit 2006 en 2015 presenteerden het PBL en het CPB mogelijke toekomstbeelden, die beleidsmakers houvast gaven in het omgaan met deze onzekerheid. Sindsdien zijn er grote verschuivingen geweest, onder andere op het gebied van internationaal klimaatbeleid en geopolitieke kwesties, zoals handelsoorlogen en migratie. Nederland heeft te maken met een verscheidenheid aan maatschappelijke opgaven. Daarom is er behoefte aan een nieuwe toekomstverkenning.

In deze nieuwe studie, de WLO 2025, presenteert het Planbureau voor de Leefomgeving vier mogelijke toekomstbeelden voor Nederland. Het zijn scenario's waarin we meer dan een generatie vooruitkijken naar het Nederland van de toekomst; het Nederland waar nu aan gewerkt wordt. Met de scenario's kan worden verkend wat de maatschappelijke opgaven zijn waar de samenleving de komende decennia voor gesteld wordt, op het gebied van onder andere verstedelijking, infrastructuur en energie. De geschetste toekomstbeelden bieden ook een cijfermatige basis voor het beoordelen van beleidsvoorstellen.

De WLO 2025 bestaat uit verschillende modules. In vijf thematische cahiers komen de volgende onderwerpen aan bod:

1. Demografie
2. Economie
3. Klimaat en energie
4. Regionale ontwikkelingen en ruimtegebruik
5. Mobiliteit

Binnen de opzet van de vier scenario's werkt het PBL, met medewerking van het CPB en de SWOV, in de cahiers op een kwalitatieve en kwantitatieve manier toekomstbeelden uit voor de periode 2040-2060. In het rapport *WLO 2025: vier toekomstscenario's voor Nederland 2040-2060* gaan we in op het doel en de opzet van deze WLO en vatten we de geschetste toekomstbeelden van de vijf cahiers samen.

Voor de WLO 2025 hebben externe deskundigen en vertegenwoordigers van departementen een waardevolle inbreng gehad, waarvan het projectteam dankbaar gebruik heeft gemaakt.

Marko Hekkert
Directeur PBL

Samenvatting

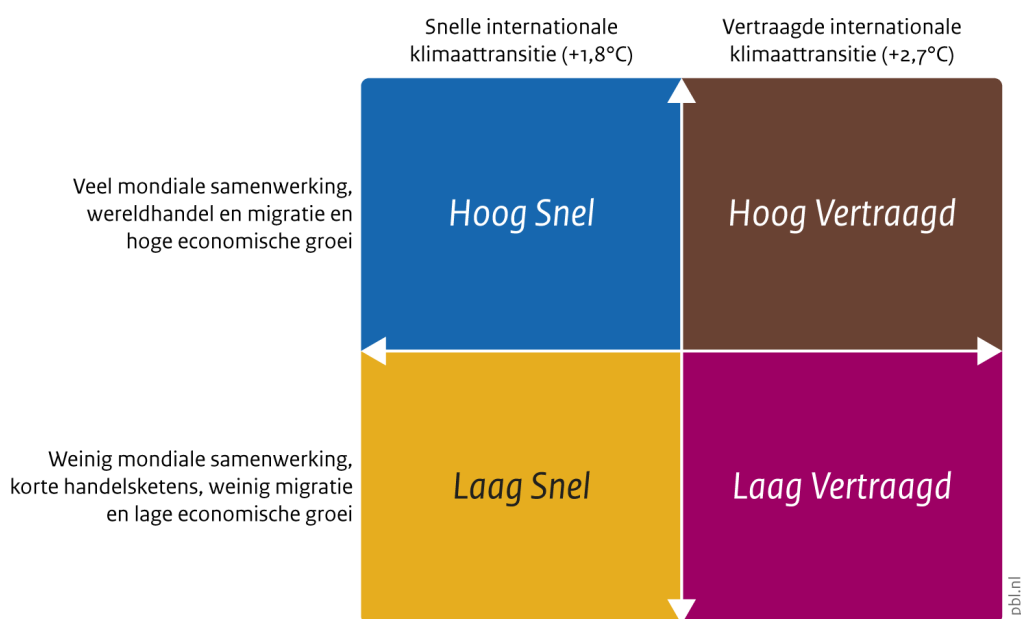
In dit WLO-cahier gaan we aan de hand van de vier scenario's in op de toekomst van klimaat en energie. We verkennen mogelijke ontwikkelingen van het Nederlandse energiegebruik en de daarmee samenhangende emissie van broeikasgassen, de ontwikkeling van de groothandelsprijzen van energie en de prijzen voor emissies van broeikasgassen (aangeduid met CO₂-prijzen). Ook gaan we in op de toekomstige veranderingen van het klimaat in Nederland en de bijbehorende adaptatieopgave.

Vier scenario's voor klimaat en energie

In de WLO van 2025 zijn vier scenario's uitgewerkt, langs twee 'assen' (zie figuur S1). De eerste as is de economische en demografische ontwikkeling, die kan variëren van een hoge demografische en economische groei met veel internationale samenwerking en handel tot en een lage demografische en economische groei met minder internationale samenwerking en handel. De tweede as is de snelheid van de klimaattransitie. Hiermee wordt verschil aangebracht tussen een wereld waarin het klimaatdoel van Parijs wordt gehaald, en een wereld waarin het klimaatbeleid wordt vertraagd en het Parijsdoel niet wordt gehaald. In de scenario's met een snelle transitie bereikt Europa het doel van netto nul broeikasgasemissie in 2050. In de scenario's met een vertraagde transitie laat Europa dit doel los, en bereikt Europa in 2075 netto nul emissie.

Figuur S1

De vier scenario's van de Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving (WLO)



Bron: PBL

Prijzen energie en CO₂-emissie in Europa hoger dan elders in de wereld

Europa heeft in alle WLO-scenario's verdergaande emissiereductiedoelen dan de meeste niet-Europese landen; hierbij zijn we ervan uitgegaan dat het internationale klimaatbeleid van de afgelopen decennia wordt voortgezet. Daarom zijn in alle scenario's de CO₂-prijzen in Europa en dus ook in Nederland hoger dan gemiddeld in de rest van de wereld; ook de energieprijzen liggen in Europa hoger dan voor de wereld gemiddeld. De oplopende CO₂-prijs is nodig om het nettonulemissiedoel

in Europa te halen in 2050 respectievelijk 2075. In het scenario Laag Snel is de CO₂-prijs een stuk hoger dan in de andere scenario's (zie tabel S1). Dit komt doordat in scenario Laag Snel de technologische vooruitgang en kostendalingen beperkt zijn, waardoor het duurder is om de broeikasgasemissies naar nul te brengen in 2050 en er dus een hogere CO₂-prijs voor nodig is.

Tabel S1

Toekomstige temperatuurstijging, broeikasgasemissies, energiegebruik en CO₂-prijs, volgens de 4 WLO-scenario's

Kernvariabele	2021	Hoog Snel	Laag Snel	Hoog Ver-traagd	Laag Ver-traagd
Toename mondiaal gemiddelde temperatuur in 2081-2100 ten opzichte van 1850-1900 (°C)		1,8 [1,3 tot 2,4]	1,8 [1,3 tot 2,4]	2,7 [2,1 tot 3,5]	2,7 [2,1 tot 3,5]
Broeikasgasemissie Nederland in 2060 incl. bunkers en landgebruik (megaton CO ₂ -equivalent)	215	-11	-11	54	54
Primair energiegebruik Nederland in 2060 incl. bunkers (petajoule)	3615	3090	2970	3210	3100
Aandeel import in primair energiegebruik in 2060 incl. bunkers (procent)	80	37	35	61	60
Efficiënte CO ₂ -prijs (euro/ton CO ₂) in 2060		287	675	232	253

Bij een snelle klimaattransitie en veel mondiale samenwerking krimpt de energie-intensieve industrie in Europa en Nederland relatief sterk

De klimaattransitie heeft gevolgen voor het productievolume van energie-intensieve industriële sectoren in Europa en Nederland. In het scenario Hoog Snel, met een snelle klimaattransitie, hoge economische groei en veel mondiale samenwerking, neemt het productievolume van de energie-intensieve industrie, zoals productie van staal uit ijzererts, ammoniak en nieuwe plastics het sterkst af. In scenario's met een snelle klimaattransitie wordt ook buiten de EU meer werk gemaakt van emissiereductiebeleid, en worden energie-intensieve halffabricaten en eindproducten die buiten de EU op een CO₂-arme manier worden geproduceerd naar de EU geëxporteerd. Omdat de EU voorloopt in de mondiale klimaattransitie is de EU-markt een belangrijke afzetmarkt voor CO₂-arme geproduceerde goederen van buiten de EU. Ook is er in de scenario's met een snelle klimaattransitie meer recycling. In het scenario Laag Snel, waarin de internationale samenwerking en handel beperkt is door toenemende mondiale spanningen, worden er door de EU CO₂-eisen gesteld aan producten die op de EU-markt mogen worden gebracht en bestaat de mogelijkheid om additioneel beleid te activeren om, waar nodig, de Europese industrie te beschermen. Daardoor krimpt in scenario Laag Snel de productie minder sterk dan in scenario Hoog Snel.

In de scenario's met een vertraagde klimaattransitie wordt de industrie buiten de EU slechts in een langzaam tempo verduurzaamd. In de EU zelf is er ook vertraging van de verduurzaming van de industrie, maar is het nog wel genoeg om rond 2060 op netto nul emissie in de industrie uit te komen.

Industrie gaat netto CO₂ vastleggen en compenseert daarmee restemissies uit vooral de landbouw

In alle scenario's dalen de broeikasgasemissies van alle sectoren. In de scenario's met een snelle klimaattransitie is de emissie in de industrie rond nul in 2040, en wordt daarna per saldo negatief (tot circa -25 megaton in 2060). De negatieve emissies in de industrie zijn het gevolg van het toepassen van CO₂-afvang en -opslag (CCS) bij biogene bronnen (voornamelijk bij brandstoffenproductie). De emissies van de gebouwde omgeving, binnenlandse transportsector en elektriciteitsproductie nemen af naar nul in 2060 in de scenario's met een snelle klimaattransitie. De emissies van de landbouw en het landgebruik blijven in die scenario's steken op circa 12 megaton CO₂-eq in 2060. Deze emissies zijn met technische maatregelen slechts beperkt te vermijden, terwijl de emissies in andere sectoren met technische maatregelen wel (vrijwel) tot nul te brengen zijn of zelfs negatief kunnen worden, waardoor ze de restemissies uit de landbouw kunnen compenseren.

Primaire energiegebruik daalt ondanks economische groei

Het primaire energiegebruik neemt tussen 2021 en 2060 af met gemiddeld 0,3 tot 0,5 procent per jaar – ondanks een economische groei van 0,5 procent per jaar in scenario Laag en van 2,1 procent per jaar in scenario Hoog. Het primaire energiegebruik daalt vooral sterk in de periode tot 2040. Ook het finale energiegebruik daalt in alle scenario's.

Het primaire en finale energiegebruik dalen als gevolg van efficiencyverbetering, zoals betere isolatie van woningen, toepassen van warmtepompen in de gebouwde omgeving en industrie, energiebesparing bij de industrie en afbouw van energie-intensieve productieprocessen (vooral in het scenario Hoog Snel), en het gebruik van efficiënte elektromotoren in plaats van verbrandingsmotoren in het wegverkeer. Het toenemende gebruik van niet-fossiele brandstoffen verhoogt daarentegen wel het primaire energiegebruik, vanwege aanzienlijke conversieverliezen bij de omzetting van biograndstoffen, CO₂ en elektriciteit naar brandstoffen. Maar per saldo dalen zowel het primaire als finale energiegebruik tussen 2021 en 2060 in alle scenario's.

Energiemix verandert drastisch

De samenstelling van de energiemix verandert drastisch in alle scenario's. Het gebruik van kolen, olie en gas neemt sterk af, vooral in de scenario's met een snelle klimaattransitie. Maar ook in die scenario's is er nog sprake van enig fossiel gebruik; klimaatneutraal is niet synoniem met fossielvrij. Het resterende oliegebruik is dan hoofdzakelijk nog niet-energetisch gebruik, als grondstof voor de productie van plastics. In de scenario's met een vertraagde klimaattransitie houden olie en aardgas tot 2060 nog wel een substantiële rol, met een aandeel in 2060 van nog ruim 30 procent. Het gebruik van biograndstoffen neemt sterk toe tussen 2021 en 2060, met een factor 2,2 (scenario Laag Vertraagd) tot 3,8 (scenario Hoog Snel). Ook de rol van elektriciteit in het energiesysteem neemt in alle scenario's sterk toe tussen 2021 en 2060, met een factor 2,6 in de scenario's Hoog Vertraagd en Laag Vertraagd, en een factor 3,5 in de scenario's Hoog Snel en Laag Snel.

Importafhankelijkheid van energie daalt

Het aandeel van in Nederland zelf geproduceerde primaire energie neemt in alle scenario's toe, en neemt het sterkst toe in de scenario's met een snelle klimaattransitie. In 2060 is in die scenario's 63 tot 65 procent van de energie geproduceerd in Nederland zelf, vooral uit zon en wind, en in beperkte mate ook met biograndstoffen, aardwarmte en omgevingswarmte en afval. De import van fossiele energie neemt in alle scenario's af, en wordt slechts ten dele vervangen door import van biograndstoffen en synthetische brandstof. Ook kernenergie neemt toe in alle scenario's, en

daarmee de import van uranium. Ter vergelijking, in 2021 werd circa 80 procent van de gebruikte energie in Nederland (inclusief gebruik voor bunkers in de internationale lucht- en scheepvaart) geïmporteerd (CBS 2024a).

Het klimaat in de wereld en Nederland blijft veranderen

Klimaatverandering is mondiaal zichtbaar en manifesteert zich ook in Nederland. Nederland is tot op heden bijna twee keer zo sterk opgewarmd als mondiaal gemiddeld (in 2023 en 2024 +2.9°C ten opzichte van de periode 1901-1930 (KNMI 2025)). De jaarlijkse neerslag is in die periode 26 procent gestegen, van 695 millimeter per jaar naar 875 millimeter per jaar.

In de WLO-scenario's met een snelle klimaattransitie wordt uitgegaan van een mondiaal gemiddelde temperatuurstijging van +1,7°C (1,3°C tot 2,2°C) in de periode 2041-2060; deze neemt daarna licht verder toe naar +1,8°C (1,3°C tot 2,4°C) in de periode 2081-2100, ten opzichte van de periode 1850-1900. In de WLO-scenario's met een vertraagde klimaattransitie stijgt de mondiaal gemiddelde temperatuur naar +2,0°C (1,6°C tot 2,5°C) in de periode 2041-2060; deze stijgt verder door naar +2,7°C (2,1°C tot 3,5°C) in de periode 2081-2100.

Hoewel bij een verdergaande mondiale opwarming ook Nederland en Europa waarschijnlijk verder zullen opwarmen, is een andere mogelijke ontwikkeling van het klimaat in Europa ook mogelijk, namelijk als de warme golfstroom verder afzwakt of zelfs stilvalt. Hoewel het stilvallen van de warme golfstroom deze eeuw onwaarschijnlijk is, is het niet onmogelijk, en de gevolgen hiervan kunnen groot zijn, zoals een extra zeespiegelstijging van 0,5 tot 1 meter (ongeveer een eeuw na het stilvallen van de warme golfstroom) en lagere temperaturen (-0,5°C tot -1°C per 10 jaar).

Vooraf op langere termijn (na 2050) verschillen de adaptatieopgaven tussen de scenario's

De effecten van klimaatverandering in Nederland zijn vooral op de langere termijn (na 2050) onzeker. Daarmee is ook de adaptatieopgave onzeker. In de WLO-scenario's met een snelle klimaattransitie is de verwachting dat de klimaatrisico's en de adaptatieopgave en -kosten tot 2050 zullen toenemen en daarna zullen afvlakken. Bij de WLO-scenario's met een vertraagde klimaattransitie blijven deze ook na 2050 toenemen.

Bij een snelle klimaattransitie zal bijvoorbeeld de maximale afvoer van de Rijn in 2100 ongeveer gelijk zijn aan het huidige niveau. Bij een vertraagde klimaattransitie kan de maximale afvoer stijgen met 30 procent ten opzichte van 2025, en zal naar verwachting de frequentie van hoge/maatgevende rivierafvoeren van zowel Rijn als Maas sterk toenemen. Het afvlakken van de risico's na 2050 maakt het bij een snelle klimaattransitie gemakkelijker om de klimaatopgaven aan te pakken, bijvoorbeeld door het dimensioneren van bergings- en afvoercapaciteit, dijken, sluizen en stuwen.

De zeespiegel blijft in alle scenario's stijgen. Bij een snelle klimaattransitie met circa 44 centimeter in 2100 en 68 centimeter in 2150, en bij een vertraagde klimaattransitie met 59 centimeter rond 2100 en 97 centimeter in 2150. Op lange termijn (2150) is echter ook in de scenario's met een snelle klimaattransitie een stijging van een meter niet uit te sluiten, maar dit zal wel 50 jaar later kunnen zijn dan in de scenario's met vertraagde klimaattransitie.

De meest urgente klimaatrisico's worden verwacht voor de gezondheid van burgers (met name als gevolg van hitte), waterveiligheidsvraagstukken (overstromingen en wateroverlast), en droogte gerelateerd aan waterverdeling (natuur, natuurbranden, erfgoed, gebouwde omgeving/funderingschade, landbouw, drinkwater, scheepvaart, koelwater). Omdat risico's met elkaar samenhangen

en tegelijk kunnen optreden en doorwerken via ketens of over grenzen heen, is de totale adaptatie-opgave veelal groter dan de som der delen.

Gebruik van de WLO-scenario's voor MKBA's: efficiënte CO₂-prijzen

Voor Nederlandse maatschappelijke kosten-batenanalyses (MKBA's) geldt dat het schadelijke effect op het klimaat als gevolg van de uitstoot van broeikasgassen moet worden meegewogen, ongeacht waar in de wereld die uitstoot plaatsvindt. Dit wordt gedaan door de broeikasgasuitstoot uit te drukken in zogeheten efficiënte CO₂-prijzen. Met CO₂-prijzen worden emissies van broeikasgassen bedoeld, uitgedrukt in CO₂-equivalenten. Dat betekent dat ook emissies van andere broeikasgassen dan CO₂ met deze prijzen gewaardeerd kunnen worden.

De efficiënte CO₂-prijzen zijn gebaseerd op kosten voor het verminderen van broeikasgasemissies (preventiekosten), en verschillen per WLO-scenario 2025 en zichtjaar. Een maatschappelijke kosten-batenanalyse (MKBA) van een broeikasgasemissiereductiemaatregel waarbij gebruik wordt gemaakt van de efficiënte CO₂-prijzen geeft inzicht of die maatregel efficiënt bijdraagt aan het halen van de emissiereductiedoelstelling zoals beschreven in het beschouwde WLO-scenario. Voor de toepassing van de WLO-scenario's in MKBA's zijn efficiënte CO₂-prijzen bepaald. Deze liggen tussen 149 en 432 euro(2021) per ton CO₂-equivalenten voor 2040, 186 tot 540 euro per ton CO₂-equivalenten voor 2050 en 232 tot 675 euro per ton CO₂-equivalenten voor 2060. De IPCC-bandbreedte bij 2 °C van tussen de 59 en 588 euro voor het jaar 2050 komt redelijk overeen met de bandbreedte uit de WLO-scenario's 2025.

Bij significant nieuw beleid om luchtverontreiniging te verminderen kan aanvullend onderzoek nodig zijn om het effect op de CO₂-prijzen te bepalen. In MBKA's dient de schade door luchtemissies te worden gewaardeerd tegen de schaduw prijzen zoals beschreven in het handboek schaduw prijzen van CE Delft (CE Delft 2023a). Indien er op termijn significant additioneel luchtkwaliteitsbeleid van kracht wordt, bevelen we aan om een aanvullende studie uit te voeren om het mogelijke effect op de voorgestelde CO₂-prijzen te bepalen.

1 Inleiding

In dit WLO-cahier over klimaat en energie beschrijven we de mogelijke toekomstige veranderingen van het Nederlandse energiegebruik en de daarmee samenhangende emissie van broeikasgassen, de ontwikkeling van de groothandelsprijzen van energie en de CO₂-prijzen. Ook gaan we in op de toekomstige veranderingen van het klimaat in Nederland en de bijbehorende adaptatieopgave.

1.1 Aanleiding voor de actualisatie van de WLO

De Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving (WLO) is de basis voor veel beleidsbeslissingen op het gebied van de fysieke leefomgeving in Nederland. De WLO scenario's worden in diverse analyses gebruikt, bijvoorbeeld door Rijkswaterstaat. De WLO levert bovendien de CO₂-prijs die verplicht wordt voorgeschreven in maatschappelijke kosten- en baten analyses (MKBA's).

Over de WLO: vier toekomstscenario's voor 2040, 2050 en 2060

Wat komt er de komende decennia op Nederland af; hoe zullen de bevolking en economie zich ontwikkelen, hoe gaat het verder met de klimaattransitie, wat zijn de ruimtelijke gevolgen voor de verschillende regio's, en voor verkeer en mobiliteit? Dit zijn belangrijke vragen voor beleidsmakers die keuzes en plannen moeten maken op het gebied van verstedelijking, infrastructuur en mobiliteit. Beslissingen die nu genomen worden, bepalen immers talloze investeringen voor de toekomst; investeringen die ook na tientallen jaren nog effect hebben op de samenleving en leefomgeving. Hoe passen de investeringen die nu worden gedaan in de wereld van dan?

Om die onzekere toekomst goed te kunnen doordenken, maken we meerdere scenario's. Scenario's kunnen helpen om beter voorbereid te zijn op de toekomst of, beter gezegd, op verschillende mogelijke toekomsten.

In deze 'WLO' werken we vier toekomstscenario's uit:

- Hoog Snel: Hoge groei met een relatief snelle internationale klimaattransitie
- Hoog Vertraagd: Hoge groei met een vertraagde internationale klimaattransitie
- Laag Snel: Lage groei met een relatief snelle internationale klimaattransitie
- Laag Vertraagd: Lage groei met een relatief langzame internationale klimaattransitie.

Deze scenario's zijn gebaseerd op twee 'assen': een as langs economische en demografische groei, en een as langs de ontwikkeling van de klimaattransitie. De groei varieert van een relatief sterke economische groei wereldwijd met een relatief sterke bevolkingsaanwas in Nederland en Europa (scenario Hoog) tot een gematigde economische groei wereldwijd met een beperkte demografische ontwikkeling in Nederland en Europa (scenario Laag). In de scenario's met een snelle transitie slaagt de internationale gemeenschap erin om de CO₂-uitstoot relatief snel naar beneden te brengen, passend bij het doel om de temperatuurstijging deze eeuw onder de twee graden te houden (scenario Snel); in de scenario's met een vertraagde klimaattransitie gaat de CO₂-uitstoot langzamer naar beneden (scenario Vertraagd).

De vier scenario's omspannen een aantal mogelijke ontwikkelingen: ze vormen een bandbreedte waarbinnen de toekomst zich met enige aannemelijkheid zal afspelen. In de scenario's is geen rekening gehouden met grote schokken, die bijvoorbeeld teweeg kunnen worden gebracht door

nieuwe pandemieën, het snel stilvallen van de Warme Golfstroom (AMOC) of verder escalerende geopolitieke spanningen.

Aan de hand van de scenario's kunnen de effecten van beleidsopties of maatregelen onderzocht worden. Zo kunnen de WLO-scenario's als een basis dienen om de effecten van nieuw beleid te toetsen, bijvoorbeeld met een maatschappelijke kosten-batenanalyse (MKBA). De WLO-scenario's worden ook gebruikt voor diverse toekomstverkenningen van het PBL en het CPB, en de Integrale Mobiliteitsanalyse van het ministerie van IenW.

De laatste WLO is uitgebracht in 2015 en bestond uit twee scenario's: Hoog (met hoge economische- en bevolkingsontwikkeling) en Laag (met lage economische- en bevolkingsontwikkeling). Klimaatbeleid was in deze twee (beleidsarme) scenario's beperkt qua ambitie, ook omdat er nog geen Parijsakkoord lag. In het Laag-scenario werd een afname van broeikasgasemissies bereikt van 45% in 2050 ten opzichte van 1990, en in het Hoog-scenario was dit 65%. In de WLO2015 werden ook twee aanvullende scenario's uitgewerkt (2-°C Centraal en 2-°C Decentraal) waarin een emissiereductie van 80% in 2050 werd bereikt. Gezien de beperkte invulling van het klimaatbeleid in de WLO2015 is er veel politieke en maatschappelijke behoefte aan de nieuwe CO₂-prijzen die beter aansluiten bij de huidige klimaatdoelen.

Sinds de vorige WLO uit 2015 is er veel veranderd op het gebied van klimaat- en energiebeleid. Internationaal is het Parijsakkoord, dat in december 2015 werd gesloten, een belangrijke mijlpaal geweest. Europees was dat het aanscherpen van het EU-doel naar 55 procent reductie in 2030 en klimaatneutraal in 2050, wat verder beleidsmatig werd geïnstrumenteerd via het Fit-for-55 pakket. Nationaal is in 2019 het Klimaatakkoord gesloten, en is ook de klimaatwet van kracht geworden. De oorspronkelijke doelen uit de klimaatwet (streven naar een emissiereductie van 49 procent in 2030, en realiseren van 95 procent reductie in 2050) zijn in 2023 aangescherpt naar 55 procent in 2030 en klimaatneutraal in 2050. Energiezekerheid en betaalbaarheid hebben, als zijnde de andere doelen van het energiebeleid (naast het doel van een schone energievoorziening), veel aandacht sinds de inval van Rusland in de Oekraïne, op 24 februari 2022. De huidige WLO-scenario's sluiten aan bij deze ontwikkelingen.

Leeswijzer

Het cahier Klimaat en Energie is opgezet als volgt. In hoofdstuk 2 schetsen we de internationale context van de 4 scenario's. Voor de mondiale ontwikkelingen sluiten we aan bij de zogenoemde *Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs) (Riahi et al. 2017). Berekeningen in dit hoofdstuk zijn uitgevoerd met het mondiale *integrated assessment model* IMAGE. In hoofdstuk 3 beschrijven we de nationale ontwikkelingen zoals het energiegebruik en de emissies van broeikasgassen in Nederland. We gaan daarbij in op de technologie-mix, de ontwikkeling van vraag en aanbod van energie en de ontwikkeling van de emissie van broeikasgassen per sector. Ook geven we aandacht aan de veronderstelde toekomstige beschikbaarheid van biograndstoffen en waterstof, het potentieel voor afvang en opslag van CO₂, en potentiële voor CO₂-vrije productie van energie in Nederland, waaronder winning uit wind, zon, geothermie, en kernenergie. Hoofdstuk 4 beschrijft mogelijke gevolgen van klimaatverandering voor Nederland, en schetst de daaruit voortvloeiende adaptatieopgaven. In hoofdstuk 5 gaan we in op hoe economisch efficiënte CO₂-prijzen zijn bepaald, en licht toe hoe deze gebruikt zouden moeten worden in maatschappelijke kosten-batenanalyses. Hoofdstuk 5 is een verkorte weergave van het achtergrondrapport 'WLO 2025: efficiënte CO₂-prijzen. Geactualiseerde CO₂-prijzen om effecten van broeikasgasreductiemaatregelen uit te drukken' (CPB & PBL 2025).

1.2 WLO Klimaat en Energie, en beleid

De scenario's van de WLO 2025 zijn omgevingsscenario's die zoveel mogelijk beleidsneutraal zijn uitgewerkt wat betreft Nederlands beleid. Omgevingsscenario's geven aan 'wat er op Nederland afkomt' in de toekomst. Omdat zulke ontwikkelingen voor een groot deel onzeker zijn, worden er meerdere scenario's uitgewerkt die met elkaar een bandbreedte van uitkomsten laten zien. Beleidsneutraal houdt in dat de scenario's zelf geen voorkeur aangeven over het te volgen Nederlandse beleid. De WLO-scenario's kunnen juist worden gebruikt om beleidsopties te analyseren.

Beleidsneutraal wil niet zeggen dat beleid geen enkele rol speelt in de WLO-scenario's. Sowieso kunnen bestaand beleid en vastgestelde beleidswijzigingen onderdeel zijn van een scenario. Daarnaast wordt nieuw beleid alleen in de WLO verwerkt als dat nodig is voor de scenario-ontwikkeling. Dit speelt voor een deel een rol op de 'klimaat-as' van deze WLO, die de snelheid van de (internationale) klimaattransitie weergeeft. Als specifiek nieuw Nederlands beleid een rol speelt bij de scenario-ontwikkeling, is uitgegaan van zogenaamd minimaal gedifferentieerd trendmatig beleid. Dit houdt in dat grosso modo het huidige beleid trendmatig wordt voortgezet, waarbij zo min mogelijk variatie tussen de scenario's is aangebracht. De variatie die wel is aangebracht, hangt logisch samen met verschillen in ontwikkelingen tussen scenario's.

Bij de internationale ontwikkelingen (hoofdstuk 2) is het huidige mondiale klimaatmitigatiebeleid meegenomen conform Dafnomilis et al. (2023). Bij de internationale ontwikkelingen is *niet* verondersteld dat doelen voor het Europese luchtkwaliteitsbeleid worden gehaald; wel zijn effecten van huidig luchtkwaliteitsbeleid meegenomen indien ze ook effect hebben op de emissie van broeikasgassen.

Bij de nationale ontwikkelingen (hoofdstuk 3) is het emissieniveau voor Nederland het belangrijkste beleidsuitgangspunt; de keuze en argumentatie daarvoor is besproken in paragraaf 3.2. In sommige sectoren zijn specifiekere beleidsuitgangspunten verondersteld, die zijn aangegeven in de paragrafen die de sectorale ontwikkelingen beschrijven (paragrafen 3.3.1 t/m 3.3.4).

1.3 Gebruikte data en modellen

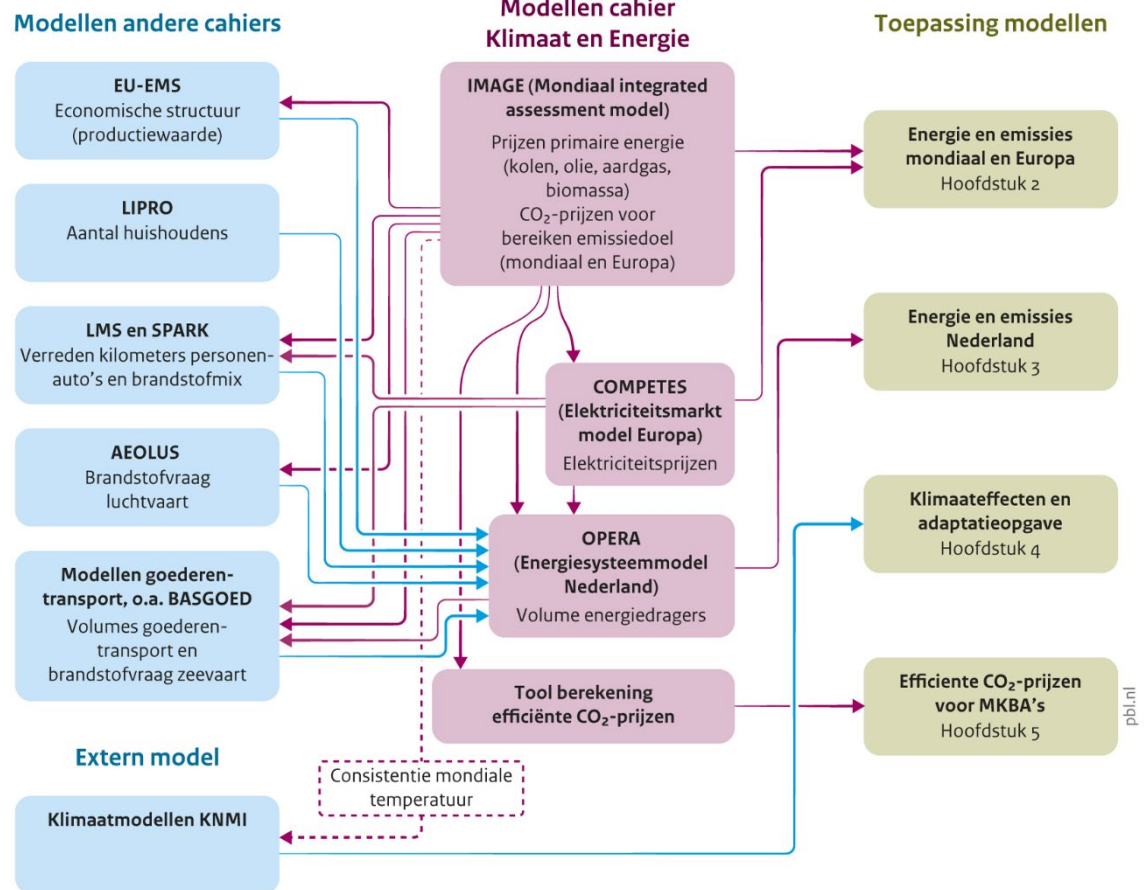
Modelanalyses spelen een belangrijke rol in de WLO. In het cahier Klimaat en Energie zijn de modellen IMAGE, COMPETES en OPERA gebruikt om ontwikkelingen te beschrijven van het energiesysteem en broeikasgasemissies op mondiale en nationale schaal, de prijsontwikkelingen van energiedragers en die van broeikasgasemissies. De invoer voor deze modellen is, waar relevant, afkomstig van of consistent met de andere WLO-cahiers (zie voor de samenhang tussen de belangrijkste modellen figuur 1.1). In bijlagen 2 tot en met 4 zijn de modellen IMAGE, COMPETES en OPERA nader toegelicht.

Het IMAGE-model is gebruikt om, onder andere, internationale groothandelsprijzen te berekenen van primaire energiedragers en de CO₂-emissieprijs die nodig zijn om de mondiale en Europese emissiedoelen te halen. De prijzen voor CO₂-emissies voor West-Europa zijn gebruikt in een reken-tool om te komen tot efficiënte CO₂-prijzen die gebruikt moeten worden in MKBA's. De prijzen van primaire energiedragers en de CO₂-prijzen uit IMAGE worden gebruikt in diverse andere modellen. Zo berekent COMPETES op basis van die inputs de elektriciteitsprijzen op uurbasis. OPERA gebruikt prijzen van energiedragers in de kostenoptimalisatie van het energiesysteem in Nederland, gegeven volumeontwikkelingen uit transportmodellen, modellen voor demografie/woningaantallen, en

sectorale productiewaarde uit het algemene evenwichtsmodel EU-EMS. De inzet van energiedragers, waaronder biogrondstoffen en olie, zoals door OPERA berekend, wordt weer gevoed aan het goederentransportmodel; deze modellen zijn iteratief gedraaid waardoor mogelijke inconsistenties zijn tegengegaan.

Figuur 1.1

Methodologie in WLO-cahier Klimaat en Energie



Bron: PBL

2 Internationale ontwikkelingen

In dit hoofdstuk schetsen we welke toekomstige internationale ontwikkelingen de scenario's laten zien op het gebied van klimaat en energie. We bespreken met name de ontwikkeling van broeikasgasemissies op mondiale en Europese schaal, en de daarmee samenhangende prijsontwikkelingen voor primaire energie en voor emissies van broeikasgassen (aangeduid met CO₂-prijs). Voor we daar op ingaan, lichten we eerst kort de methode en uitgangspunten toe.

2.1 Methodiek en uitgangspunten

Voor de berekeningen van de internationale klimaat- en energieontwikkelingen gaan we net als in de rest van de WLO uit van twee mogelijke scenario's: een snelle klimaattransitie, waarbij de internationale gemeenschap erin slaagt om de uitstoot van broeikasgassen relatief snel naar beneden te brengen – passend bij het doel om de temperatuurstijging deze eeuw onder de twee graden te houden. En een vertraagde klimaattransitie, waarbij de uitstoot van broeikasgassen langzamer naar beneden gaat. Uitgangspunt is ook dat in Europa het doel van klimaatneutraliteit (netto nul emissie) eerder wordt gehaald dan in de rest van de wereld. Bij een snelle klimaattransitie wordt dat doel in 2050 gehaald, bij een vertraagde klimaattransitie in 2075.

Voor deze modelberekeningen met het model IMAGE hebben we ook verder in de tijd gelegen zichtjaren gekozen dan in de rest van de WLO. Dit is nodig omdat de cumulatieve emissies tot het jaar 2100 bepalend zijn voor de temperatuuroptocht aan het eind van deze eeuw. Bij een snelle transitie is het uitgangspunt dat de mondiaal gemiddelde temperatuur tussen 2081 en 2100 toeneemt met 1,8°C (met een bandbreedte van +1,3 tot +2,4°C) ten opzichte van de periode 1850-1900. Bij een vertraagde klimaattransitie neemt de mondiaal gemiddelde temperatuur toe met 2,7°C in 2100 (met een bandbreedte van +2,1 tot +3,5°C). (IPCC 2021a).

In bijlage 2 gaan we uitgebreider in op de toepassing van het model IMAGE en de aannames die we hebben gedaan rondom de interpretatie van het nettonulemissiedoel in Europa.

2.2 Toekomstige internationale ontwikkelingen

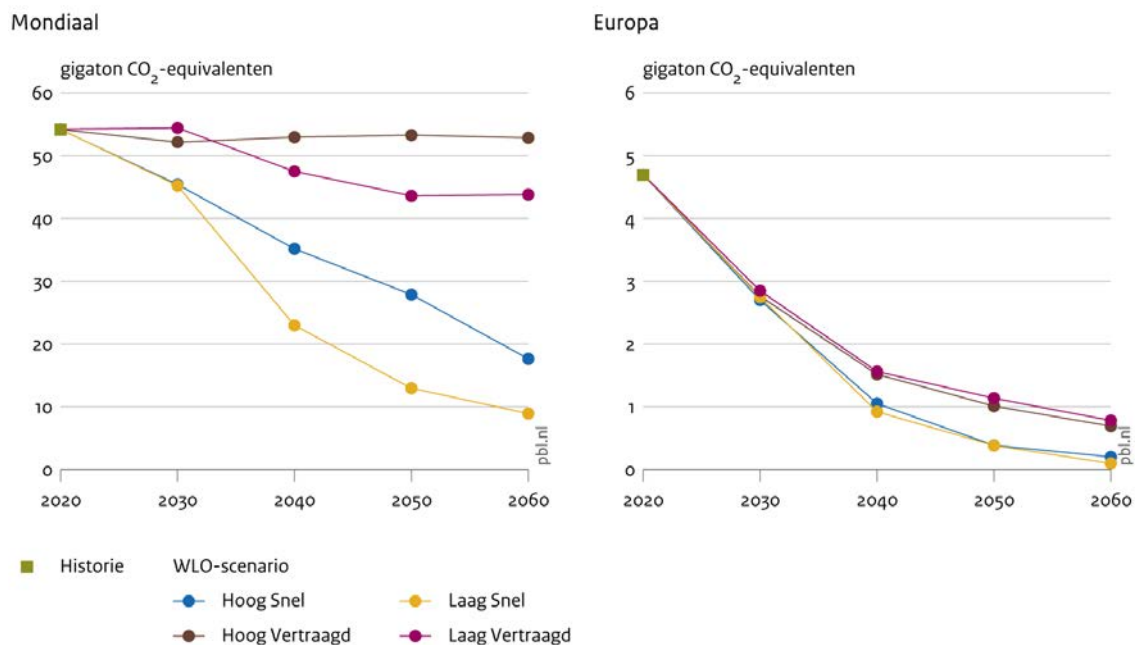
2.2.1 Broeikasgasemissies en CO₂-prijzen, 2020-2060-2100

De ontwikkeling van de emissie van broeikasgassen tot 2060 in de wereld als geheel en in Europa, in de verschillende WLO-scenario's is weergegeven in figuur 2.1. Na 2060 dalen de mondiale emissies in de scenario's met snelle klimaattransitie verder door, waardoor de temperatuuroptocht beperkt blijft tot ruim onder de 2°C aan het eind van de eeuw. In de scenario's met vertraagde klimaattransitie dalen de mondiale emissies veel minder sterk, waardoor de temperatuuroptocht aan het eind van deze eeuw 2,7°C hoger ligt dan in de pre-industriële periode.

De emissies in Europa dalen aanzienlijk sterker dan in de wereld als geheel. Veel van deze reductie wordt gerealiseerd voor 2040, na 2040 dalen de emissies minder sterk. In 2050 is er in de scenario's Hoog Snel en Laag Snel (en na verrekening van negatieve emissies die buiten Europa worden gerealiseerd als gevolg van bio-brandstoffenproductie die aan Europa worden geleverd; zie bijlage 2) nog

een restemissie van enkele honderden megatonnen; die worden gecompenseerd door vastlegging in Europese bossen.

Figuur 2.1
Broeikasgasemissie



In de scenario's komen de emissiereducties tot stand onder invloed van de stijgende CO₂-prijzen (zie figuur 2.2). De mondiale CO₂-prijs ligt in de scenario's Hoog Vertraagd en Laag Vertraagd vooral tot 2060 aanzienlijk lager dan in de scenario's Hoog Snel en Laag Snel.

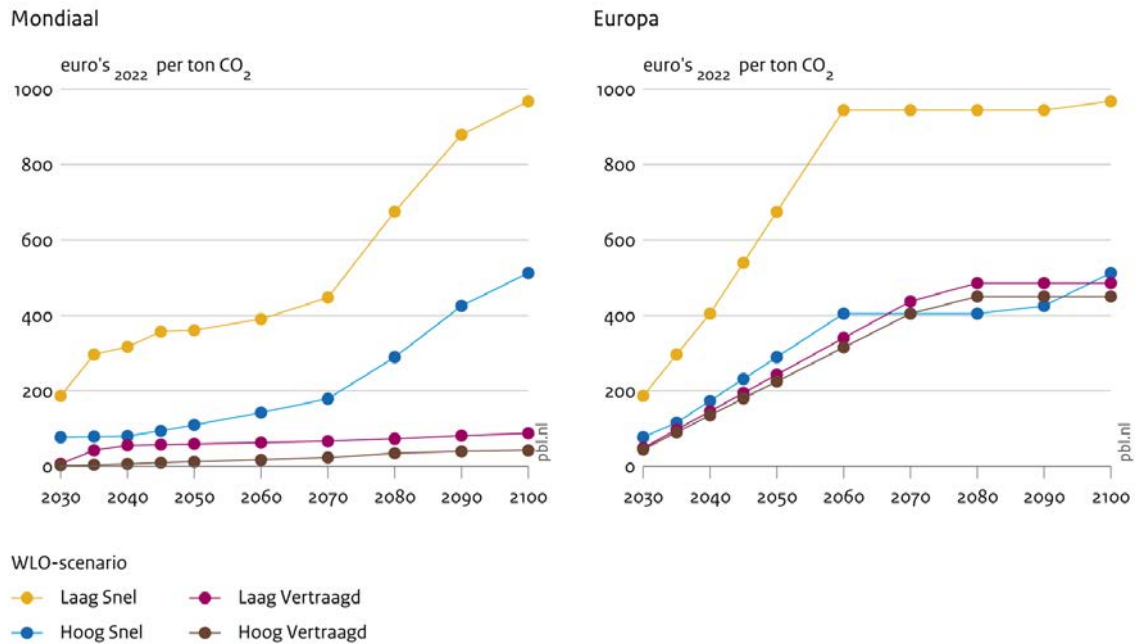
De reden is dat in de scenario's met vertraagde klimaattransitie de mondiale opwarming tot 2100 2,9°C bedraagt, hetgeen in de buurt ligt van een baseline zonder aanvullend klimaatbeleid, waardoor de benodigde koolstofprijs om dit doel te halen laag blijft. Het beperken van de opwarming tot ruim onder de 2°C (snelle klimaattransitie) leidt tot een hogere mondiale CO₂-prijs omdat er duurdere emissiereductiemaatregelen nodig zijn. De CO₂-prijs verschilt daarbij ook tussen de scenario's Hoog en Laag. In het scenario Laag Snel is het aanzienlijk moeilijker het doel uit het Parijs-akkoord (opwarming beperken tot ruim onder de 2°C) te halen dan in het scenario Hoog Snel. De voornaamste oorzaak voor dit verschil zijn de achterliggende aannames op het gebied van technologische ontwikkeling, de mate van internationale samenwerking, de mate van herbebossing, de acceptatie van mitigatieopties en voorkeur voor conventionele energiedragers. Deze factoren leveren in scenario Hoog een positievere bijdrage aan de haalbaarheid van een klimaatdoel ten opzichte van scenario Laag.

Het behalen van een nettonulemissiedoel in Europa in 2050 respectievelijk 2075 vereist in alle scenario's een oplopende CO₂-prijs. De mate waarin deze CO₂-prijs moet oplopen om dit doel te halen verschilt. De voornaamste verschillen in CO₂-prijzen zijn zichtbaar tussen het scenario Laag Snel en de andere scenario's.

In scenario Laag zijn de CO₂-prijzen hoger dan in de corresponderende Hoog-scenario's. Redenen

daarvoor zijn dat in scenario Laag de technologische ontwikkeling langzamer gaat met een minder sterke daling van kosten van technologie, er een grotere omvang van de wereldbevolking is, en er sprake is van meer handelsbarrières. In scenario Laag Snel komt daar nog bovenop dat er een groot beroep wordt gedaan op biograndstoffen om het nettonuldoel in Europa te halen. Maar de beschikbaarheid daarvan is relatief beperkt in het scenario Laag Snel, omdat de rest van de wereld in dit scenario ook meer moeite moet doen om het mondiale doel te halen, en er dus meer concurrentie is om biograndstoffen.

Figuur 2.2
Prijs van broeikasgasemissie

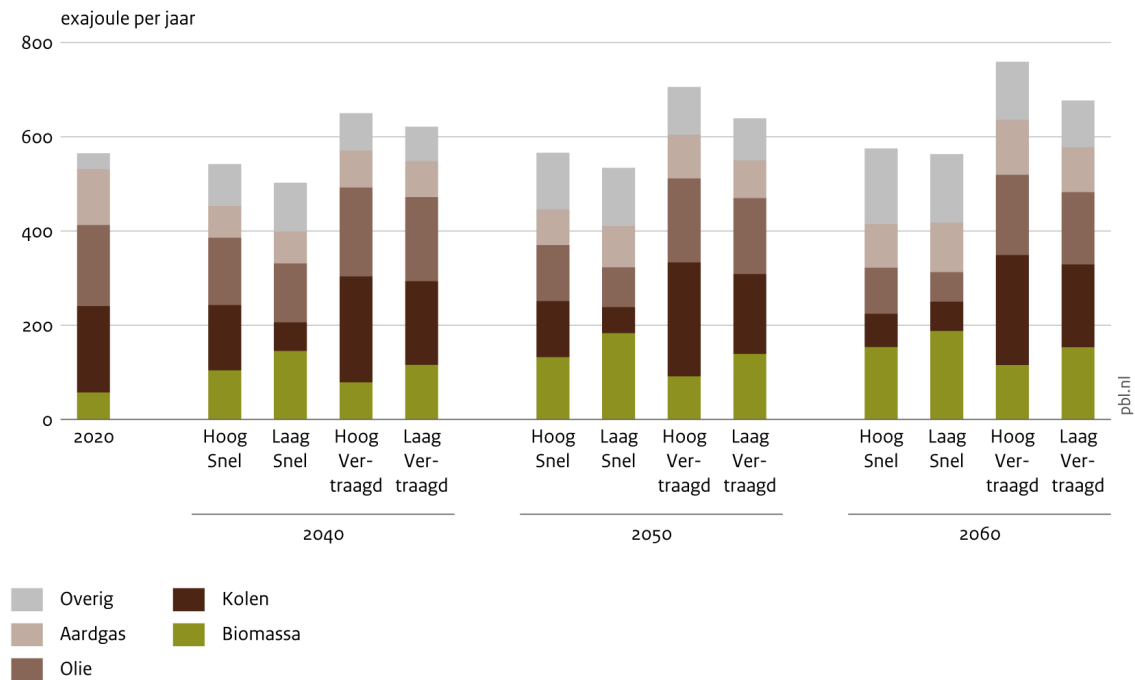


In alle scenario's is de CO₂-prijs in Europa aanzienlijk hoger dan in de rest van de wereld; ook de energieprijzen liggen in Europa hoger dan voor de wereld gemiddeld (zie paragraaf 2.2.2). De mate waarin dit nadelig uitpakt voor het concurrentievermogen van Europese energie-intensieve industrieën hangt onder andere af van de kostenstructuur van de Europese bedrijven versus bedrijven buiten Europa (zie ook het cahier Economie, PBL & CPB 2025). In scenario Laag worden er door de EU CO₂-eisen gesteld aan producten die op de EU-markt mogen worden gebracht en bestaat de mogelijkheid om beleid te activeren om, waar nodig, de industrie te beschermen, zoals door het instellen van grensheffingen (via uitbreiding van het *Carbon Border Adjustment Mechanism* (CBAM)). Uitbreiding van het CBAM is in deze WLO niet expliciet gemodelleerd. De effecten op de economische structuur in Nederland worden behandeld in het cahier Economie.

2.2.2 Energiegebruik en energieprijzen, 2020-2060

Het wereldenergiegebruik (primair energiegebruik) is in de scenario's Hoog Snel en Laag Snel in 2060 op ongeveer hetzelfde niveau als in 2020, terwijl dat in de scenario's Hoog Vertraagd en Laag Vertraagd in 2060 hoger ligt dan nu (zie figuur 2.3).

Figuur 2.3
Primair energiegebruik mondiaal volgens WLO-scenario's



Bron: PBL

In de scenario's met een snelle klimaattransitie halveert het gebruik van fossiele energie ongeveer tussen 2020 en 2060, en in de scenario's met een vertraagde klimaattransitie blijft het gebruik constant of neemt het toe. In scenario's met snelle klimaattransitie neemt het gebruik van kolen het sterkst af tussen 2020 en 2060 (afname van 62 tot 66 procent), gevolgd door olie (afname met 43 tot 63 procent, terwijl het gasgebruik relatief weinig daalt (afname van 12 tot 22 procent). Het gebruik van biomassa en overige energiebronnen (zon, wind, waterkracht en kernenergie) neemt in alle scenario's toe.

Tot 2060 nemen in West-Europa de prijzen van kolen, olie, gas, biograndstoffen en elektriciteit toe in alle scenario's (zie tabel 2.1; prijzen op basis van onderste verbrandingswaarde). De fossiele energieprijzen worden vooral beïnvloed door de vraag naar energie, de mate van handel (en de gerelateerde aannames rond geopolitieke invloeden op prijzen), uitputting van winbare reserves en leereffecten (waardoor kosten kunnen dalen bij meer toepassing van een technologie). Door uitputting van winbare reserves moeten steeds moeilijker (en tegen hogere kosten) winbare reserves worden gebruikt. Dit heeft een prijsopdrijvend effect, wat echter deels gecompenseerd wordt door de verwachte kostendaling bij de winning als gevolg van leereffecten.

De fossiele brandstofprijzen worden op korte termijn beïnvloed door de handel tussen verschillende regio's. In scenario Hoog leidt de snellere hervatting van handel tussen Rusland en westerse regio's tot een snellere daling van brandstofprijzen dan in scenario Laag, waarin handelsblokkades langer van kracht blijven. Ook op lange termijn (tot 2060) hebben de pessimistischere geopolitieke ontwikkelingen in scenario Laag een prijsopdrijvend effect.

Omdat de vraag naar kolen en olie lager is in de scenario's met snelle klimaattransitie dan die met vertraagde klimaattransitie, zijn de internationale groothandelsprijzen ook lager. Na toepassing van

de CO₂-prijs is het gebruik van kolen en olie echter door eindgebruikers wel duurder in de scenario's met een snelle klimaattransitie in vergelijking tot die met een vertraagde klimaattransitie.

Tabel 2.1

Internationale groothandelsprijzen voor energie in West-Europa in de WLO-scenario's, in euro₂₀₂₂/GJ

Scenario	Energiedrager	2020	2040	2050	2060
Hoog Snel	kolen	1,8	4,4	4,6	4,7
Laag Snel	kolen	1,8	4,5	4,3	4,4
Hoog Vertraagd	kolen	1,8	4,5	4,8	5,4
Laag Vertraagd	kolen	1,8	4,5	4,4	4,4
Hoog Snel	olie	3,4	9,1	8,7	8,5
Laag Snel	olie	3,4	10,9	10,8	10,5
Hoog Vertraagd	olie	3,4	9,2	8,8	9,1
Laag Vertraagd	olie	3,4	11,0	11,0	11,6
Hoog Snel	gas	2,4	8,7	8,3	7,9
Laag Snel	gas	2,4	8,7	8,3	8,0
Hoog Vertraagd	gas	2,4	8,6	8,2	7,7
Laag Vertraagd	gas	2,4	8,7	8,2	7,7
Hoog Snel	biograndstoffen	9,9	8,1	10,2	14,1
Laag Snel	biograndstoffen	9,9	15,6	25,1	25,2
Hoog Vertraagd	biograndstoffen	9,9	5,7	7,8	11,2
Laag Vertraagd	biograndstoffen	9,9	8,1	9,9	13,9
Hoog Snel	elektriciteit	10,2	22,1	26,4	31,4
Laag Snel	elektriciteit	10,2	37,1	38,2	37,7
Hoog Vertraagd	elektriciteit	10,2	19,7	22,1	22,4
Laag Vertraagd	elektriciteit	10,2	20,3	23,2	23,9

De internationale groothandelsprijzen voor houtachtige biograndstoffen hangen samen met de klimaatambitie van zowel de EU als van de rest van de wereld. Hoe hoger de CO₂-prijs, hoe groter de vraag naar biograndstoffen en hoe hoger de prijzen voor biograndstoffen. De prijzen voor biograndstoffen lopen in het scenario Laag Snel veel sterker op dan in de andere scenario's, omdat de CO₂-prijs in Europa in dit scenario veel sterker oploopt. De inzet van fossiele energie is daardoor veel duurder dan in de andere scenario's. Omdat op biograndstoffen gebaseerde energiedragers een substituuat vormen voor fossiele energie, is de prijs die aanbieders van houtachtige biograndstoffen kunnen vragen in het scenario Laag Snel aanzienlijk hoger dan in de andere scenario's.

De internationale groothandelsprijzen voor elektriciteit in Europese landen loopt in alle scenario's op, en het sterkte in de scenario's met snelle klimaattransitie. De doorwerking van de CO₂-prijs op de elektriciteitsprijs neemt in belang af naarmate er minder fossiele energie aan de marge nodig is om aan de vraag te voldoen. Daarvoor in de plaats zullen alternatieve vormen van elektriciteitsopwekking, elektriciteitsopslag zoals in batterijen, en andere flexibiliteitsopties worden ingezet om vraag en aanbod van elektriciteit te balanceren. Dit brengt ook kosten met zich mee en daardoor een hogere elektriciteitsprijs. In scenario Laag Snel zijn de leereffecten beperkter dan in scenario Hoog Snel, waardoor de elektriciteitsprijs in scenario Laag Snel het hoogste is.

3 Nationale ontwikkelingen

In dit hoofdstuk schetsen we welke toekomstige nationale ontwikkelingen de scenario's laten zien op het gebied van klimaat en energie. We gaan met name in op het energiegebruik en de daarmee samenhangende emissies van broeikasgassen. Voor we daar op ingaan, lichten we eerst kort de methode en uitgangspunten toe.

3.1 Methodiek en uitgangspunten

In dit hoofdstuk zijn de vier WLO-scenario's uitgewerkt voor emissies van broeikasgassen en energiegebruik. Daartoe zijn berekeningen gedaan met het energiesysteemmodel OPERA (zie bijlage 4). Met OPERA berekenen we de vraag naar en het aanbod van energie in alle sectoren en de daaruit voortvloeiende emissies van broeikasgassen. Ook zijn in OPERA opties opgenomen om niet-energie-gerelateerde emissies van broeikasgassen te verminderen, zoals die als gevolg van landbouw en landgebruik. De gevolgde methodiek sluit aan bij die van de studie Trajectverkenning Klimaat-neutraal (PBL 2024b).

We bespreken hier kort de belangrijkste uitgangspunten en de belangrijkste aannames die we hebben gedaan bij het gebruik van het model. Voor een uitgebreide toelichting verwijzen we naar bijlage 5. De belangrijkste invoervariabelen voor OPERA zijn:

- activiteitsniveaus voor verschillende sectoren, waaronder de omvang van de fysieke productie in industriële sectoren, transportvolumes voor verschillende modaliteiten (wegverkeer, scheepvaart, luchtvaart, rail), aantal woningen en andere gebouwen;
- internationale groothandelsprijzen voor energiedragers (kolen, olie, gas, biogrondstoffen, elektriciteit, waterstof);
- grenzen aan beschikbaarheid van energiedragers en de ingroeisnelheid van technologieën, en de ontwikkeling van de kosten van deze technologieën in de tijd;
- randvoorwaarden ten aanzien van de ontwikkeling van de broeikasgasemissie in Nederland in de beschouwde periode.

Bovenstaande invoervariabelen zijn zodanig gekozen dat ze passen bij de vier WLO-scenario's. De internationale groothandelsprijzen voor primaire brandstoffen zijn berekend met het IMAGE-model en die voor elektriciteit met COMPETES (zie Hoofdstuk 2 en bijlagen). Met OPERA is berekend hoe het energiegebruik en de emissies per sector zich ontwikkelen. Het model optimaliseert daarbij trajecten die leiden tot het laagste nationale kostensaldo¹ over een gekozen periode.

¹ Het nationale kostensaldo omvat hier de directe financiële kosten, besparingen en opbrengsten van technische maatregelen voor Nederland als geheel. Samen worden deze kosten, besparingen en opbrengsten geaggregeerd tot één getal, het nationale kostensaldo (Hof et al. 2020). Het gaat hier concreet om de minimale netto contante waarde van het nationale kostensaldo gedurende 35 jaar (2026-2060), bij een discontovoet van 2,25 procent. Dit is gelijk aan de huidige Nederlandse standaardwaarde van de discontovoet voor toepassing in MKBA's.

Belangrijke uitgangspunten, randvoorwaarden en aannames

In het model hebben we geen beleidsinstrumenten gemodelleerd. Beleid is alleen vooraf expliciet meegegeven aan de berekeningen als het beleid direct relevant is in de verhaallijn van het scenario.

Daarnaast hebben we er bijvoorbeeld voor gekozen om, in de scenario's met een snelle klimaattransitie, het nettonuldoel voor de EU als geheel ook van toepassing te laten zijn op Nederland zelf, inclusief emissies van bunkerbrandstoffen.

Verder hebben we bepaalde uitgangspunten gehanteerd voor de maximale energieproductie in Nederland zelf en voor de maximale energie-import. We sluiten daarvoor aan bij de studie Trajectverkenning Klimaatneutraal 2050 (TVKN; PBL 2024b; TNO 2022) maar hebben de uitgangspunten wel bijgesteld als dat logischer is in een bepaalde scenariocontext.

3.2 Algemene uitgangspunten

In deze paragraaf lichten we de belangrijkste uitgangspunten toe die we gekozen hebben binnen de vier WLO-scenario's en die gebruikt zijn voor de OPERA berekeningen.

3.2.1 Broeikasgasemissiepaden voor Nederland

Keuze om netto nul emissie in de EU ook van toepassing te laten zijn op Nederland zelf, inclusief emissies van landgebruik en emissies van internationale lucht- en scheepvaart

Hoewel in de WLO-scenario's deze emissieniveaus EU-breed worden gerealiseerd, hoeft dit niet te betekenen dat ieder land afzonderlijk netto-nul emissie zou moeten realiseren. Er zijn tal van verschillen tussen EU-landen die van invloed zijn op de mogelijkheden om netto nul emissie te realiseren. Zo zijn er verschillen in het potentieel voor de opwek van hernieuwbare energie, verschillen in de vraag naar energie (zoals door verschil in economische structuur en door klimatologische verschillen die van invloed zijn op de energievraag voor verwarmen en koelen van gebouwen), verschillen in potentieel voor opslag van CO₂, enzovoort.

Er zijn een aantal argumenten te geven waarom Nederland meer of minder zou moeten reduceren dan EU-gemiddeld. Nederland heeft een relatief grote landbouwsector. Het is technisch vrijwel onmogelijk om de emissies van methaan en lachgas uit de landbouw tot netto nul terug te brengen (tenzij de veestapel zou krimpen tot minder dan een kwart van de huidige omvang in combinatie met grootschalige bosaanleg; PBL 2024b). Ook heeft Nederland netto CO₂-emissies als gevolg van landgebruik (door oxidatie van veen), terwijl landgebruik in veel andere EU-landen leidt tot netto vastlegging van koolstof. Dit zou dus een reden kunnen zijn waardoor Nederland nog enige rest-emissie houdt, binnen de EU die netto-nul emissie heeft.

Op een aantal punten heeft Nederland juist een comparatief voordeel: er is een groot potentieel voor windenergie op zee, en Nederland heeft veel lege gasvelden onder de Noordzee waarin CO₂ kan worden opgeslagen. Als in Nederland geavanceerde biobrandstoffenproductie op gang komt (op basis van geïmporteerde biograndstoffen) geeft dat de mogelijkheid om de relatief zuivere CO₂ die daarbij vrijkomt af te vangen en op te slaan. Daarbij wordt recent door planten of bomen uit de lucht gehaalde CO₂ permanent opgeslagen, waardoor negatieve emissies ontstaan die aan Nederland worden toegerekend, ook wanneer het gaat om geïmporteerde biograndstoffen. In het energiesysteem kan Nederland in dat geval netto-negatieve emissies realiseren.

Bovenstaande in ogenschouw nemend, hebben we ervoor gekozen om, in de scenario's met snelle klimaattransitie, het netto nul doel voor de EU als geheel ook van toepassing te laten zijn op Nederland zelf, inclusief emissies van bunkerbrandstoffen. Dit sluit aan bij het uitgangspunt van de Trajectverkenning Klimaatneutraal 2050 (PBL 2024b).

De emissies van de internationale lucht- en scheepvaart tellen in internationale klimaatrapportages niet mee als emissie van een individueel land. In de WLO hebben we er echter voor gekozen om emissies van in Nederland getankte brandstoffen voor de internationale lucht- en scheepvaart – zogenaamde bunkerbrandstoffen – ook mee te nemen, omdat deze sectoren in het kader van het Parijsakkoord ook klimaatneutraal moeten worden.

Bij scenario's met snelle klimaattransitie worden emissies in Nederland na 2050 netto negatief

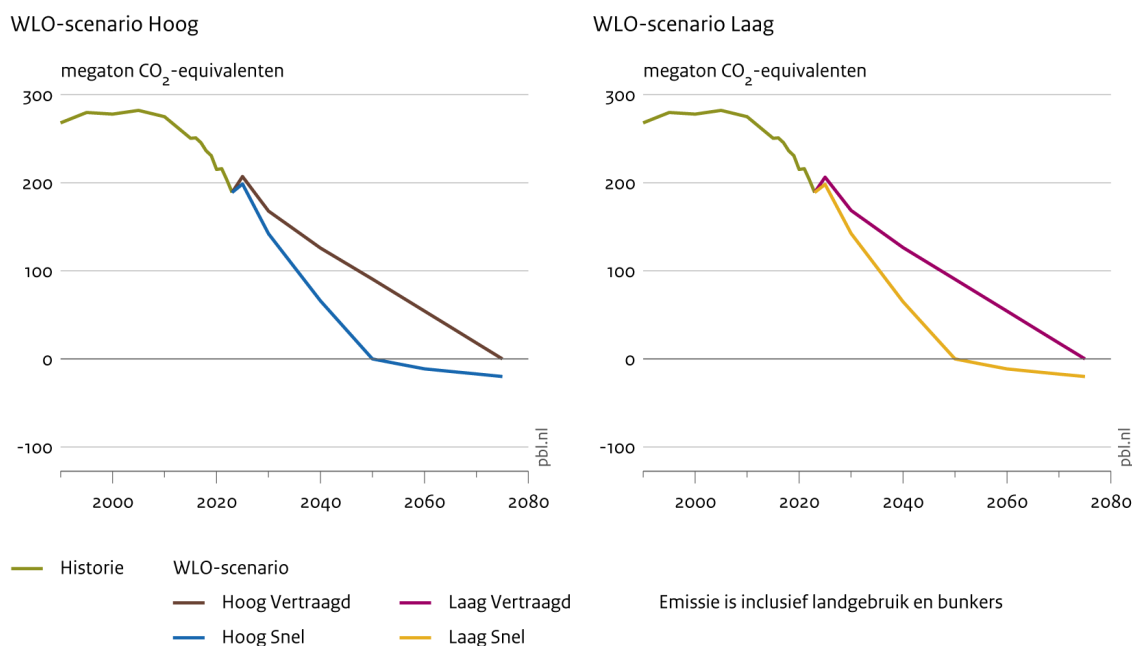
Het doel van netto nul wordt in de scenario's Hoog Snel en Laag Snel in 2050 behaald. In de scenario's Hoog Vertraagd en Laag Vertraagd wordt dit doel niet gehaald, en wordt het niveau van netto nul emissie bereikt in 2075. Na 2050 leggen we in de scenario's met een snelle klimaattransitie op dat de emissie verder afneemt, naar netto 20 megaton negatief in 2075. De 20 megaton netto negatief is gekozen als passend bij het potentieel voor CCS en de veronderstelde restemissie uit landbouw en landgebruik (zie ook paragrafen 3.2.2 en 3.3.4).

Uitgangspunt in de WLO is dat de emissies vanaf 2030 lineair afnemen. De emissie in 2030 (exclusief bunkers) verschilt tussen de scenario's met snelle en vertraagde klimaattransitie, maar hangt in de jaren na 2030 niet af van de economische groei: de economie moet zich schikken naar de beschikbare emissieruimte. In de scenario's met een snelle klimaattransitie gaan we uit van het halen van het doel uit de Klimaatwet (een reductie van 55 procent in 2030 ten opzichte van 1990) voor emissies exclusief bunkers. In de scenario's met een vertraagde klimaattransitie gaan we uit van een reductie van 43 procent in 2030 ten opzichte van 1990 voor emissies exclusief bunkers. Deze 43 procent reductie is de emissiereductie die wordt bereikt in 2030 bij de bovenkant van de bandbreedte uit de KEV 2024. Ook de emissies van de internationale lucht- en scheepvaart (bunkerbrandstoffen) worden vooral bepaald door de mate van klimaatbeleid. De resulterende emissiepaden voor een snelle en vertraagde klimaattransitie zijn weergegeven in figuur 3.1. Er is genoeg geen verschil in emissiepad met hoge en lage groei; het emissiepad hangt vrijwel alleen af van de mate van klimaatbeleid.

Emissiepad Nederland neemt vanaf 2030 lineair af naar nul in de nationale scenario's

De aanname van een lineair afnemende emissie tussen 2030 en 2050 (snelle klimaattransitie) c.q. 2075 (vertraagde klimaattransitie) wijkt af van de emissieontwikkeling voor Europa zoals gemodelleerd met het IMAGE-model (hoofdstuk 2). De reden hiervoor is dat we in de nationale scenario's wat minder optimistisch zijn over de snelheid van veranderingen in het energiesysteem, zoals door beperkingen die er zijn in het tempo van verduurzaming van de gebouwde omgeving, in de snelheid van verzwaring van het elektriciteitsnet, doorlooptijd bij vergunningverlening, en uitstel van finale investeringsbeslissingen door onzekerheid in de markt.

Figuur 3.1
Broeikasgasemissie Nederland



Bron: PBL

De procentuele emissiereductie ten opzichte van 1990, en gemiddeld over de scenario's met hoge en lage groei, is weergegeven in tabel 3.1, zowel exclusief als inclusief het meerekenen van emissies als gevolg van in Nederland getankte brandstof voor internationale lucht- en scheepvaart (bunkers). Het gemiddelde is gepresenteerd omdat de verschillen tussen de scenario's Hoog en Laag klein zijn (verschil maximaal 0,3 procentpunt).

Tabel 3.1
Emissiereductie ten opzichte van 1990 bij een snelle en vertraagde klimaattransitie, exclusief en inclusief het meerekenen van emissies als gevolg van in Nederland getankte brandstof voor internationale lucht- en scheepvaart (bunkers). Gemiddeld over de scenario's met hoge en lage economische groei.

Scenario	2030	2040	2050	2060
Snelle klimaattransitie, excl. bunkers	-55%	-79%	-102%	-105%
Vertraagde klimaattransitie, excl. bunkers	-43%	-56%	-69%	-82%
Snelle klimaattransitie, incl. bunkers	-47%	-76%	-100%	-104%
Vertraagde klimaattransitie, incl. bunkers	-37%	-53%	-66%	-80%

Zoals gezegd, gaan we in de scenario's uit van een lineaire afname van emissies tussen 2030 en 2050. Dit impliceert een emissiereductie van 79 procent in 2040 voor Nederland exclusief bunkers. Voor het bijdragen aan het beperken van de wereldwijde temperatuurstijging tot 1,5°C met beperkte overschrijding, zou Nederland, volgens een aantal rechtvaardigheidsprincipes, een emissiereductiedoel moeten nastreven van ongeveer 90 procent tot ruim over de 100 procent in 2040 ten opzichte van de emissies in 1990 (Van Vuuren et al. 2024). Voor het streven naar een beperking van de temperatuurtoename tot ruim onder de 2°C zou dat ongeveer 70 procent tot 80 procent moeten zijn. De hier gehanteerde 79 procent reductie is daarmee lager dan wat Nederland zou moeten doen op basis van een aantal rechtvaardigheidsprincipes in het licht van beperken van de mondiale opwarming tot 1,5°C, maar is wel passend bij het streven naar ruim onder de 2°C. Naast

emissiereducties in Nederland zelf, kan Nederland ook bijdragen aan emissiereducties elders en daarvoor formeel erkenning krijgen, zoals op grond van artikel 6 van het Parijsakkoord.

3.2.2 Beschikbaarheid van voorraden en technologieën

In deze paragraaf bespreken we welke uitgangspunten we hebben gehanteerd voor de maximale energieproductie in Nederland zelf en van welke maximale energie-import we uitgaan. We sluiten aan bij de studie Trajectverkenning Klimaatneutraal 2050 (TVKN, PBL 2024b; TNO 2022) maar hebben die uitgangspunten bijgesteld als dat logischer is in een bepaalde scenariocontext. Als voorbeeld: als in een WLO-scenario de brandstoffenproductie of productie van primaire plastics in Nederland lager is dan volgens de TVKN, zal de productie buiten Nederland hoger moeten zijn om te voldoen aan de mondiale vraag. De vraag naar koolstofhoudende grondstoffen zoals biograndstoffen en plastic afval vanuit de buitenlandse industrie zal dan hoger liggen, waardoor er minder beschikbaar is voor de Nederlandse industrie. In een internationaal perspectief zullen duurzaam geproduceerde biograndstoffen immers een schaars goed zijn. De beschikbare voorraden en potentiële van technologieën nemen in de loop der tijd toe tot hun maximum om rekening te houden met de tijd die nodig is voor opschaling van de ontsluiting van potentieel en de toepassing van technologieën.

In tabel 3.2 staan de in de WLO-scenario's gehanteerde maxima van voorraden en beschikbaarheid van technologieën in 2060. Het gaat daarbij om een maximale beschikbaarheid waarin in de berekeningen van wordt uitgegaan. De daadwerkelijke inzet van voorraden en technologieën in de WLO-scenario's kan lager zijn dan dit maximum (zie paragraaf 3.4).

Tabel 3.2
Veronderstelde maxima van energieaanbod, elektrolyzers en CCS in 2050 (integrale trajecten TVKN) en in 2060 (WLO-scenario's)

Voorraad of technologie	TVKN (2050)	Hoog Snel	Laag Snel	Hoog Ver- traagd	Laag Ver- traagd
Windenergie op zee (gigawatt)	70	60	60	35	35
Windenergie op land (gigawatt)	9,9	9,9	9,9	7,8	7,8
Zon-PV (gigawatt)	132	135	135	135	135
Kernenergie (gigawatt)	0-3,5	7	7	7	7
Biograndstoffen Nederland (petajoule)	125-230	155	155	155	155
Biograndstoffen import (petajoule)	555-1075	575	575	360	360
Plastic afval Nederland (petajoule)	29	15	13	24	21
Totaal (petajoule)	228	40	55	35	35
Inputvermogen elektrolyzers (gigawatt)	15-35	24	24	17	17
Import groene waterstof(dragers) (petajoule)	154-308	120	50	50	25
Geothermie (petajoule)	200	200	200	200	200
Opslagcapaciteit CO ₂ (megaton per jaar)	20-50	30	30	30	30

In de WLO is de omvang van de energie-intensieve industrie in alle scenario's kleiner verondersteld dan in de TVKN en is er ook een kleiner volume van in Nederland getankte bunkerbrandstof.

Daardoor is het aannemelijk dat Nederland ook een minder groot beslag kan leggen op biograndstoffen en waterstof vanuit het buitenland dan de maxima die in TVKN zijn verondersteld, en hebben we ook het maximale vermogen voor ontwikkeling van windenergie op zee verlaagd.

In de scenario's met een vertraagde klimaattransitie is de opschaling van elektriciteitsproductie uit hernieuwbare bronnen beperkter verondersteld dan in de scenario's met een snelle klimaattransitie – als weerslag van de lagere politieke prioriteit voor het tegengaan van klimaatverandering in die scenario's. Het uiteindelijke technische potentieel voor energieproductie in Nederland is overigens onzeker, evenals de import van energie waarop Nederland zou kunnen rekenen. In de TVKN is het daar veronderstelde potentieel ook vergeleken met enkele andere studies, en vallen de in de TVKN gekozen maxima binnen de bandbreedte van de studies. De mate waarin de gehanteerde maxima ook daadwerkelijk volledig worden benut, verschilt per scenario (zie paragraaf 3.4).

Aanzienlijk potentieel voor opschaling van CO₂-vrije elektriciteitsproductie in Nederland

In de TVKN is uitgegaan van maximaal 10 gigawatt windvermogen op land in 2050. We sluiten in de WLO hierop aan, en veronderstellen geen verdere toename richting 2060. Het potentieel voor windenergie op land wordt met name begrensd door mogelijkheden voor ruimtelijke inpassing en lokale acceptatie. In diverse studies of scenario's wordt uitgegaan van hogere potentiëlen voor windenergie op land. In een van de scenario's van Il3050 (Netbeheer Nederland 2023) wordt uitgegaan van een potentieel van 20 gigawatt windenergie op land. In het Nationaal Plan Energiesysteem is uitgegaan van indicatieve vermogensontwikkeling voor windenergie op land naar 17 gigawatt in 2050 (Ministerie van EZK 2023).

In de TVKN is uitgegaan van maximaal 70 gigawatt windvermogen op zee in 2050. Dit sluit aan bij het streefdoel voor windenergie op zee dat in het Nationaal Plan Energiesysteem wordt genoemd. Dit is ongeveer het maximaal technische potentieel voor windenergie op zee op het Nederlands continentaal plat, als er geen windmolens worden geplaatst in gebieden die zijn aangewezen voor natuur en militaire zone. In de WLO gaan we uit van een lagere maximale beschikbaarheid van windenergie op zee, omdat ook de omvang van de energie-intensieve industrie en de bunkervraag lager ligt dan in de TVKN, waardoor er minder vraag is naar elektriciteit en de waterstof en vervolgproducten die uit elektriciteit kunnen worden geproduceerd.

In de TVKN is uitgegaan van maximaal 132 gigawatt zon-PV in 2050. In de WLO is uitgegaan van maximaal 135 gigawatt zon-PV in 2060. Het technisch potentieel voor zon-PV kan nog aanzienlijk hoger liggen, indien ook wordt uitgegaan van de ontwikkeling van zon-PV op zee.

In de TVKN is uitgegaan van maximaal 3,5 gigawatt kernvermogen in 2050. Technisch gezien kan er ook meer gerealiseerd worden. Hier gaan we uit van maximaal 7 gigawatt kernvermogen in 2050 en 2060. Dit komt overeen met de capaciteit van 4 à 5 grote kerncentrales en/of meerdere kleine modulaire reactoren. Het potentieel sluit aan bij de verkenning van het kabinet om te komen tot 7 gigawatt in 2050 zoals genoemd in het Nationaal Plan Energiesysteem.

Koolstofhoudende grondstoffen en brandstoffen (biograndstoffen, afval) uit binnenlands en buitenlands aanbod

In de TVKN is uitgegaan van een beschikbaarheid van duurzame biograndstoffen voor energietoepassingen (inclusief productie van brandstoffen en grondstof voor de organische chemie) van 680 petajoule (beperkte beschikbaarheid) tot 1.305 petajoule (ruime beschikbaarheid). Hiervan is 125-215 petajoule beschikbaar in Nederland zelf voor energietoepassingen, de rest komt beschikbaar

door te importeren uit de EU. Import van biograndstoffen van buiten de EU is niet verondersteld in de TVKN, omdat Europa over een relatief groot potentieel biograndstoffen beschikt en de duurzaamheid van biograndstoffen die van buiten de EU worden geïmporteerd moeilijker te verifiëren is dan die vanuit de EU zelf. In de WLO sluiten we hierbij aan. In de IMAGE-berekeningen is wel import van biobrandstof en primaire biograndstoffen vanuit de rest van de wereld naar Europa toegestaan, maar in IMAGE ligt de som van het totaalgebruik van biograndstoffen (direct gebruik in primaire vorm en gebruik waarbij geïmporteerde biobrandstof is teruggerekend naar gebruik in primaire vorm) in Europa binnen de grens die in TVKN is aangehouden als Europees potentieel voor duurzame primaire biograndstoffen.

Vanwege schaarste aan duurzaam geproduceerde biograndstoffen zullen biograndstoffen vrijwel uitsluitend beschikbaar zijn voor toepassingen waarvoor geen alternatieven zijn (dus typisch toepassingen waarvoor koolstof nodig is zoals biobrandstoffen voor transport en grondstof voor plastics). In de scenario's met een snelle klimaattransitie is de vraag naar en productie van biobrandstoffen in Nederland groter dan in scenario's met een vertraagde klimaattransitie. Daarom is ook de maximale import van biograndstoffen groter gekozen in de scenario's met een snelle klimaattransitie.

Naast biograndstoffen kan ook plastic afval dienen als bron van koolstof voor productie van plastics en koolstofhoudende brandstoffen. Door circulair beleid (*narrow the loop, slow the loop, close the loop*) wordt in alle scenario's minder afval geproduceerd en verbrand in AVI's dan nu, ondanks de toename van de bevolking. In de scenario's met een snelle klimaattransitie is verondersteld dat de verbranding van afval in AVI's ongeveer halveert tot 3 megaton afval in 2050 (TNO 2024), terwijl dat minder sterk (tot 5 megaton in 2050) afneemt in de scenario's met vertraagde klimaattransitie. In de scenario's met een lage bevolkingsgroei is de afname van het afvalvolume sterker dan in die met een hoge bevolkingsgroei. De maximaal veronderstelde import van plastic afval hebben we afhankelijk gemaakt van de omvang van de productie van plastics in Nederland en de klimaatambitie.

Waterstof uit elektrolyse kan sterk toenemen

De maximale capaciteit voor waterstof uit elektrolyse is in de WLO-scenario's begrensd in 2060 tot 24 gigawatt (snelle klimaattransitie) respectievelijk 17 gigawatt (vertraagde klimaattransitie); dit is lager dan in de TVKN omdat ook de potentiële voor windenergie op zee lager zijn gekozen. In de TVKN is uitgegaan van import van maximaal 300 petajoule waterstof (of andere waterstofdragers zoals ammoniak). Waterstof(dragers) worden hoofdzakelijk gebruikt in de industrie en transportsector. Omdat we in de WLO uitgaan van lagere industriële activiteitsniveaus en een lager volume aan inname van bunkerbrandstoffen in Nederland, hebben we de maximale import van waterstof neerwaarts bijgesteld. De grootste toegestane import is in het scenario Hoog Snel, omdat ammoniak daarin een belangrijke energiedrager is voor de zeevaart.

Geothermie kan sterk toenemen

We hebben een bovengrens aangenomen voor het potentieel aan geothermische warmte van 100 petajoule in 2040 en 200 petajoule in 2050 en 2060. Dit sluit aan bij de ambitie uit het masterplan Aardwarmte in Nederland (EBN 2018) om te komen tot 200 petajoule (of meer) winning van aardwarmte in Nederland in 2050. Ter vergelijking: in 2023 bedroeg het gebruik van aardwarmte in Nederland 6,5 petajoule, met vooral toepassing in de glastuinbouw (CBS 2024b).

Aanzienlijk potentieel voor opslag van CO₂ onder de Noordzee

De praktisch beschikbare opslagcapaciteit in ruim 100 lege gasvelden onder het Nederlandse deel van het continentaal plat (NCP) wordt geschat op circa 1.700 megaton CO₂ (Gasunie & EBN 2017). De praktisch beschikbare opslagcapaciteit in ruim 50 kleine gasvelden in de ondergrond van Nederland zelf wordt geschat op circa 1.100 megaton CO₂. Dit is exclusief velden die nu in gebruik zijn voor aardgasopslag, en exclusief het Groningenveld (met een potentieel van circa 6.500 megaton). We veronderstellen echter dat van de opslagcapaciteit onder land geen gebruik wordt gemaakt (in elk geval niet tot 2060).

Het tempo waarin de opslagcapaciteit gevuld wordt, bepaalt hoeveel CO₂ er jaarlijks in kan worden opgeslagen. In de TVKN is uitgegaan van een maximale jaarlijkse opslag van CO₂ tussen 20 en 50 megaton CO₂. In de WLO gaan we uit van 30 megaton per jaar maximale jaarlijkse opslag van CO₂. Bij een dergelijk tempo zou de opslagcapaciteit onder de Noordzee in een aantal decennia gevuld kunnen worden, rekening houdend met toename van afgevangen CO₂ tot circa 2040 en noodzakelijke afbouw vanaf circa 2075.

In de aanloopfase totdat dit maximum bereikt kan worden, neemt het potentieel voor CO₂-opslag stapsgewijs toe. We gaan uit van maximaal 17 megaton opslagcapaciteit van CO₂ in 2030, uitgaande van realisatie van de infrastructuurprojecten Porthos (2,5 megaton) en Aramis (12,3 megaton na realisatie van de eerste uitbreidingsfase; Commissie MER 2022). Ook veronderstellen we dat er in 2030 2,2 megaton opslag mogelijk is buiten Nederland, zoals via het Noorse CO₂-opslagproject *Northern Lights*.

Verondersteld is dat het potentieel voor opslag van CO₂ onder het NCP beschikbaar is voor opslag van CO₂ uit emissiebronnen in Nederland. Het is denkbaar dat via Aramis ook CO₂ van bronnen buiten Nederland wordt opgeslagen onder het NCP, wat dan ten koste gaat van het potentieel voor Nederland. Daar staat tegenover dat Nederland ook meer gebruik kan maken van opslagmogelijkheden buiten Nederland, zoals via *Northern Lights* of andere initiatieven.

3.3 Veronderstelde sectorale ontwikkelingen

In deze paragraaf bespreken we de veronderstelde ontwikkelingen in eindgebruikssectoren die de vraag naar energie bepalen. Deze ontwikkelingen vormen de invoer voor de berekeningen met het OPERA-model.

3.3.1 Gebouwde omgeving

Beleidsveronderstellingen

Zoals in paragraaf 3.1 is beschreven wordt beleid alleen expliciet meegegeven aan de OPERA-berekeningen indien dit direct relevant is binnen de verhaallijn van het scenario. Er zijn op het moment van schrijven nog grote onzekerheden over de uitwerking van Europees en nationaal beleid na 2030, waaronder de ETS₂, de Europese richtlijnen voor de energieprestatie van gebouwen (EPBD IV) en de energie-efficiëntie (EED). Omdat er via beleid slechts beperkt gestuurd wordt in de technologieën bij de verduurzaming van de gebouwde omgeving, is aan OPERA veel ruimte gelaten voor de technologiekeuze in de gebouwde omgeving.

De vraag naar warmte, en technologieën om in die vraag te voorzien

Onder de gebouwde omgeving verstaan we woningen en utiliteitsgebouwen, zoals kantoren, ziekenhuizen en scholen. Het energiegebruik van de gebouwde omgeving bestaat met name uit het energiegebruik voor verwarming en het elektriciteitsgebruik voor verlichting en elektrische apparaten. Bij verwarming maken we onderscheid naar ruimteverwarming, warm tapwater en koken. Momenteel wordt aan de warmtevraag hoofdzakelijk voldaan door inzet van aardgas. Daarnaast wordt binnen diverse utiliteitsgebouwen ook aardgas en elektriciteit ingezet voor (productie)processen (in de dienstensector).

In OPERA maken we onderscheid naar diverse technische oplossingsrichtingen voor een duurzame warmtevoorziening. De technische oplossingsrichtingen zijn:

- All-electric warmtepompen
- Hybride warmtepompen met een duurzaam gas (groengas of waterstof)
- Midden- of hogetemperatuur-warmtenetten (MT-/ HT-warmtenetten)
- Lagetemperatuur-warmtenetten (LT-warmtenetten)
- Gebouwisolatie in de vorm van een verbetering van het energielabel

In het OPERA-model zijn grenzen aangegeven voor de maximale ingroei van technologieën en is er sprake van verschillen in kosten in de toepassing van technologieën per woningtype (onder andere afhankelijk van de isolatiegraad), waardoor in de praktijk een mix van verschillende oplossingen wordt gekozen.

Een onzekerheid betreft het stookgedrag van huishoudens. Het stookgedrag is onder andere afhankelijk van de persoonlijke voorkeur van huishoudens, de hoogte van de energieprijzen, het isolatieniveau, klimaatverandering en de warmtetechnologie. In de praktijk blijkt dat mensen die in goed geïsoleerde woningen wonen, vaak meer kamers verwarmen of de thermostaat wat hoger zetten dan mensen in slecht geïsoleerde woningen (Aydin et al. 2017). Het effect van woningisolatie op de daling van de energievraag blijft daardoor in de praktijk achter bij wat er verwacht zou worden op grond van de hogere isolatiewaarde van de woningen. Dit effect is meegenomen in de berekeningen.

Ontwikkeling van aantallen woningen en utiliteitsbouw

Het aantal woningen volgt de ontwikkeling van het aantal inwoners (zie Cahier Regionale ontwikkelingen en ruimtegebruik). In de scenario's met een hoge economische groei groeit de bevolking naar 21,9 miljoen inwoners in 2060, en neemt het aantal woningen toe tot 10,8 miljoen in 2060. In de scenario's met een lage economische groei groeit de bevolking naar 18,2 miljoen inwoners in 2060, en neemt het aantal woningen toe tot 8,3 miljoen in 2060. Het aantal huishoudens groeit naar 11,0 miljoen in 2060 in scenario Hoog en naar 8,3 miljoen in scenario Laag. De gemiddelde huishoudensomvang gaat van 2,2 naar 2,0 in scenario Hoog, terwijl het in scenario Laag constant blijft op 2,2. De warmtebehoefte die moet worden verduurzaamd betreft echter hoofdzakelijk die van de bestaande bouw; de nieuwbouw heeft immers al een lage warmtebehoefte en wordt gasloos verwarmd.

Utiliteitsgebouwen worden onderscheiden naar functie, zoals kantoren, winkels, gebouwen voor onderwijs, gezondheidszorg, bijeenkomsten, logies, sport en penitentiaire inrichtingen. Verschillende soorten utiliteitsgebouwen worden ingedeeld conform deze functies. De ontwikkeling van de utiliteitsbouw is – naast de bevolkingsgroei – afhankelijk van de economische en andere demografische uitgangspunten in de WLO-scenario's. Zo wordt een verband verondersteld tussen het bbp per capita en de uitgaven die mensen doen in bijvoorbeeld hotels, cafés en restaurants. Verder

wordt een zekere samenhang verondersteld tussen de leeftijdsverdeling van de bevolking en de behoefte aan bijvoorbeeld scholen en ziekenhuizen. In scenario Hoog groeit het totale oppervlak van de utiliteitsbouw naar 581 miljoen vierkante meter in 2060. In scenario Laag groeit dit naar 531 miljoen vierkante meter.

3.3.2 Industrie

Beleidsveronderstellingen

Zoals beschreven in paragraaf 3.1 wordt beleid in OPERA niet expliciet gemodelleerd. De productieniveaus worden aan OPERA exogeen opgelegd. Daarbij is kwalitatief een beleidsbeeld verondersteld dat zou kunnen resulteren in de veronderstelde productieniveaus. Ook kunnen randvoorwaarden worden opgelegd aan de minimale of maximale inzet van een technologie, die onder invloed van beleid tot stand zou kunnen komen. Bij de transportsector is rekening gehouden met verplichtingen uit de EU-verordeningen *ReFuelEU Aviation* en *EUFuelMaritime*; dit beleid werkt door in de industrie waar deze brandstoffen worden geproduceerd. De beleidsveronderstellingen die kwalitatief zijn gebruikt bij het opstellen van de scenario's voor de industriële productievolumes, zijn hieronder beschreven.

Met het huidige EU-beleid neemt emissieruimte in het ETS₁ af naar nul rond 2040. Voor een aantal bulkproducten geldt een Europese grensheffing (CBAM) die wordt berekend over de CO₂-emissie die bij de productie buiten de EU heeft plaatsgevonden. In de scenario's met een snelle klimaattransitie neemt ook de emissieruimte onder het ETS₂ (voor CO₂-emissies van de niet-ETS-industrie) af naar nul rond 2045. Enige fossiele industriële restemissie is in of na 2040 mogelijk, vanwege de inzet van opgespaarde emissierechten uit het verleden. Ook zijn er emissies van niet-CO₂-broeikasgassen die slechts ten dele of niet onder het ETS₁ en ETS₂ vallen. We veronderstellen dat negatieve emissies als gevolg van het toepassen van BECCS nog resterende positieve emissies binnen het ETS kunnen compenseren (één-op-één). In de scenario's met een snelle klimaattransitie wordt het huidige beleid voor het ETS₁ en ETS₂ gecontinueerd. In de scenario's met een vertraagde klimaattransitie wordt het klimaatbeleid in de EU afgezwakt na 2030. De emissieruimte onder het ETS₁ en ETS₂ neemt wel af naar nul, maar dat niveau wordt 20 tot 25 jaar later bereikt.

In het scenario Laag Snel worden in aanvulling op het CBAM in toenemende mate CO₂-eisen gesteld aan producten die op de EU-markt mogen worden gebracht, waaronder een verplicht aandeel groen staal in auto's en andere producten waarin veel staal is verwerkt, en een verplicht aandeel biogeen en gerecycled plastic in plastic producten. Op die manier wordt een sterkere vraag naar CO₂-arm geproduceerde producten gecreëerd, en blijft de energie-intensieve industrie produceren op een hoger niveau dan in het scenario Hoog Snel. De logica hiervan wordt nader toegelicht in onderstaande paragraaf.

Productievolumes energie-intensieve industrie

De productievolumes in Nederland van de energie-intensieve industrie dalen voor de meeste sectoren in drie van de vier WLO-scenario's ten opzichte van het productievolume in 2020 (zie figuur 3.2). Alleen in het scenario Laag Vertraagd groeit het volume voor de meeste sectoren licht ten opzichte van het niveau in 2020, met uitzondering van de organische basischemie (onder andere door sluiting van de Olefins-3 kraker bij Chemelot in 2024) en de ammoniakproductie.

In de scenario's met een hoge economische groei daalt het productievolume van de energie-intensieve industrie voor de meeste sectoren sterker dan in de corresponderende scenario's met een

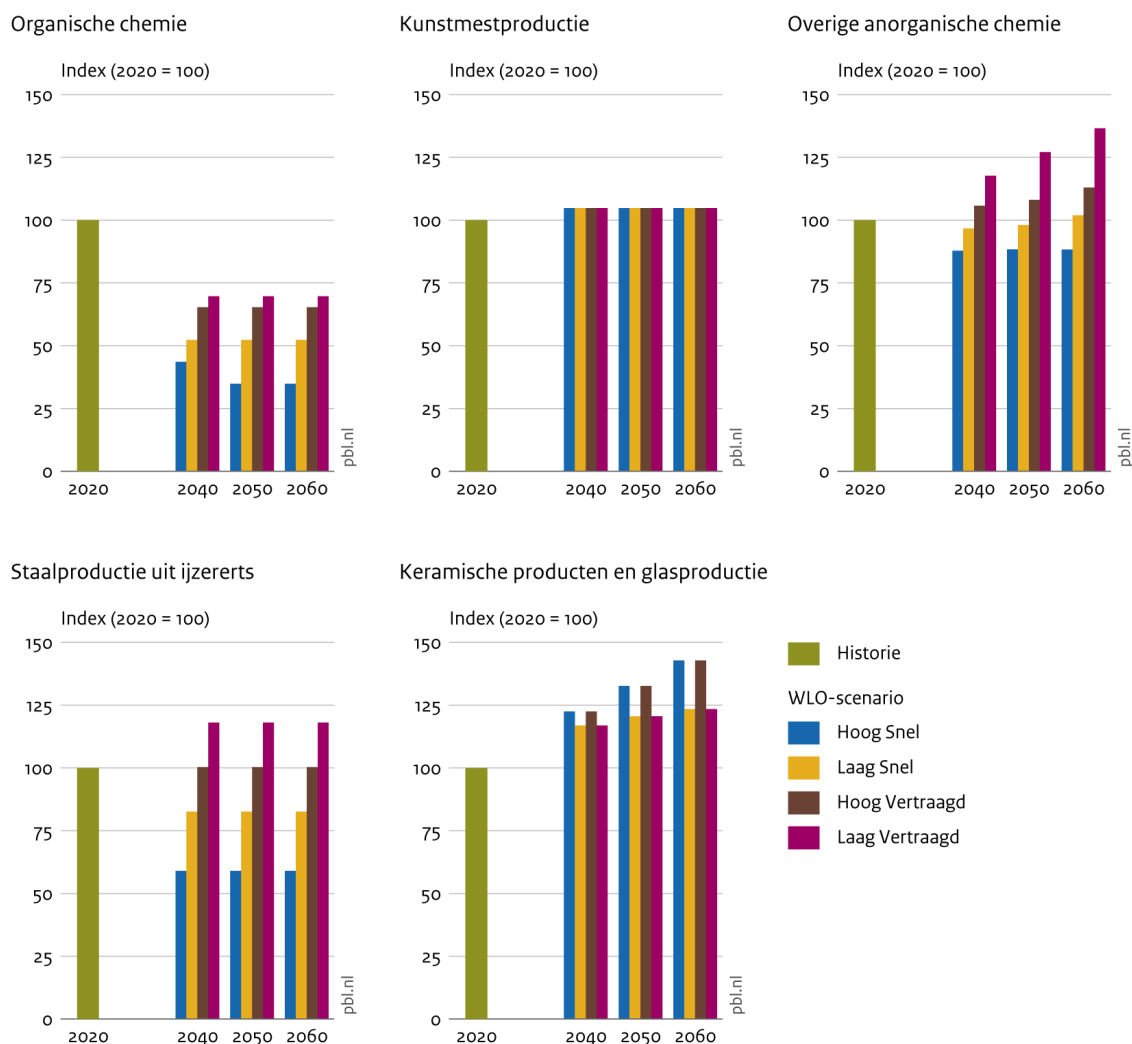
lage economische groei (met uitzondering van de keramische industrie en glasindustrie). Dit is contra-intuïtief, maar het is in de context van de WLO-scenario's een plausibele ontwikkeling. In de scenario's met een lage groei zijn er veel mondiale spanningen en hecht de overheid meer belang aan strategische autonomie. De overheid ondersteunt bij lage groei de energie-intensieve productie in Europa en Nederland (via de genoemde CO₂-eisen aan producten en de mogelijkheid tot uitbreiding van het CBAM), waardoor de productievolumes in het algemeen hoger liggen dan bij de scenario's met een hoge economische groei waar de overheid meer aan de vrije markt overlaat.

Uitzonderingen zijn zoals gezegd de keramische industrie en glasindustrie, die vooral produceren voor de Nederlandse en Noordwest Europese markt en in het scenario Hoog profiteren van de grote vraag in de bouwsector. Ook hoeft de toegevoegde waarde van de industrie als geheel bij een lager productievolume van de energie-intensieve industrie niet noodzakelijkerwijs lager te liggen dan in de scenario's met een lage economische groei, omdat de niet-energie-intensieve industrie (zoals de machinebouw, fijn-chemie en farmaceutische industrie) het verlies aan toegevoegde waarde bij de energie-intensieve industrie kan compenseren, en omdat niet-energie-intensieve nabewerkingsstappen die nu in de energie-intensieve industrie plaatsvinden mogelijk wel gecontinueerd worden. Denk aan het produceren van kunstmest en kunstvezels uitgaande van ammoniak als grondstof in plaats van aardgas, het maken van plastic producten op basis van geïmporteerde polyethyleen en polypropyleen, of het maken van staalproducten op basis van geïmporteerd *hot briquetted iron* in plaats van uit ijzererts.

In de scenario's met een snelle klimaattransitie (scenario Snel) krimpt de energie-intensieve industrie in de meeste sectoren sterker dan in de corresponderende scenario's met een vertraagde klimaattransitie (scenario Vertraagd). In de scenario's met een snelle klimaattransitie wordt ook buiten de EU werk gemaakt van emissiereductiebeleid, en worden energie-intensieve halffabricaten en eindproducten die buiten de EU op een CO₂-arme manier worden geproduceerd naar de EU geëxporteerd. Omdat de EU voorloopt in de mondiale klimaattransitie is de EU-markt een belangrijke afzetmarkt, ook voor CO₂-arme producten van buiten de EU. Ook is er in de scenario's met een snelle klimaattransitie meer recycling. In de scenario's met een vertraagde klimaattransitie wordt de industrie buiten de EU slechts in een langzaam tempo verduurzaamd, en zeker in de periode tot 2040 wordt er buiten de EU nog vooral geïnvesteerd in fossiele industrie. In de EU zelf wordt na 2030 het tempo van duurzame investeringen vertraagd, maar het is nog wel genoeg om in 2060 op netto nul emissie in de industrie uit te komen.

Al met al is de afname van het productievolume van de energie-intensieve industrie het sterkst verondersteld bij het scenario Hoog Snel. De afname is het sterkst bij de ammoniakproductie (een grondstof voor onder andere kunstmest) en de organische basischemie. Ammoniak is relatief makkelijk te transporteren², en CO₂-arm geproduceerde ammoniak wordt in dit scenario – waarin ook technologische vernieuwing snel doorzet – een belangrijke koolstofloze energiedrager in de zeevaart. Verondersteld is dat de productie van groene of blauwe ammoniak buiten de EU flink groeit, en de EU importeur wordt van ammoniak. De keramische industrie en glasindustrie krimpt in geen van de scenario's, omdat de import van die producten (bakstenen, dakpannen, tegels, glas) vanuit andere werelddelen relatief kostbaar is.

² Er zijn wel veiligheidsrisico's bij transport van ammoniak; dit speelt met name bij transport binnen de bebouwde omgeving in geval van transport anders dan via buisleidingen (Elzenga et al. 2025).

Figuur 3.2**Productievolume in energie-intensieve industriesectoren**

Bron: PBL

Productie van transportbrandstoffen

De productie van transportbrandstoffen en daaraan gerelateerde productie van grondstoffen voor de organische chemie in Nederland hangt af van de internationale vraagontwikkeling naar deze producten en de rol van Nederland bij de productie daarvan. De vraagontwikkelingen in de mobiliteitssector worden beschreven in paragraaf 3.3.3. Hier beschrijven we kwalitatief hoe we zijn omgegaan met de productie in Nederland van transportbrandstoffen in relatie tot de vraag naar brandstoffen. Kwantitatieve resultaten op basis van OPERA-analyses zijn beschreven in paragraaf 3.4.

In alle WLO-scenario's neemt de vraag naar brandstoffen voor het wegverkeer in Nederland maar ook elders in Europa sterk af richting 2050, door elektrificatie van het wegverkeer (zowel bij personen- en bestelauto's als vrachtauto's). Ook de productie voor de export ten behoeve van wegtransport buiten Nederland valt grotendeels weg. Wel blijft er een vraag naar brandstoffen voor de lucht- en scheepvaart. In de scenario's met vertraagde klimaattransitie worden in Nederland nog fossiele brandstoffen geproduceerd voor de export (zie paragraaf 3.4.2).

De dominante brandstof die in de zeevaart wordt toegepast, is bepalend voor de bunkerpositie van Nederland. In het geval dat ammoniak een grote rol speelt als scheepsbrandstof veronderstellen we dat zeeschepen dit deels elders tanken, of, voor zover er in Nederlandse havens wordt getankt, dat die ammoniak elders is geproduceerd. Ammoniak is namelijk relatief goedkoop te transporteren, en verondersteld is dat grootschalige productie elders (in regio's met veel zon, wind en ruimte) aantrekkelijker is dan in Noordwest-Europa. In het geval dat biobrandstoffen een grote rol spelen als scheepsbrandstof, veronderstellen we dat de bunkerpositie van Nederland sterker blijft en dat ook Nederland in de productie van deze brandstoffen een aanzienlijke rol heeft. De benodigde biograndstoffen worden in de vorm van houtpellets, getorrificeerde biomassa of oliën geïmporteerd en hier omgezet naar brandstoffen. Ten aanzien van biobrandstoffen veronderstellen we geen netto import in de WLO-scenario's.

Voor de luchtvaart veronderstellen we dat ook in 2060 nog vrijwel uitsluitend op kerosine wordt gevlogen. Het kan dan gaan om een mix van fossiele, biogene of synthetische kerosine. Net als bij de biobrandstoffen voor de zeevaart, gaan we ervan uit dat de biogene of synthetische kerosine die in Nederland getankt wordt ook in Nederland geproduceerd wordt en dat er geen import is van die brandstoffen.

3.3.3 Mobiliteit

Beleidsveronderstellingen

Verschillende onderdelen van het klimaatbeleid bij mobiliteit zijn in de WLO-scenario's expliciet meegenomen. We hebben ervoor gekozen om het klimaatbeleid bij mobiliteit zo veel mogelijk gelijk te veronderstellen bij de scenario's Hoog en Laag; het beleid hangt alleen af van de snelheid van de klimaattransitie (zie cahier Mobiliteit, PBL 2025d). In de scenario's met een snelle klimaattransitie is uitgegaan van het bereiken van klimaatneutrale mobiliteit in 2050. Voor de scenario's met een vertraagde klimaattransitie wordt het klimaatbeleid voor mobiliteit uit het EU-beleidspakket *Fit-for-55* grotendeels vastgehouden. Daar waar *Fit-for-55* nog niet naar nul emissie stuurt in 2050, wordt het beleid in de scenario's met een vertraagde klimaattransitie echter niet aangescherpt of licht vertraagd. De beleidsveronderstellingen zijn samengevat in tabel 3.3. Deze normen en verplichtingen zijn als randvoorwaarden aan OPERA opgelegd. De afbouw van emissierechten onder het ETS₁ en ETS₂ is niet expliciet aan OPERA opgelegd, maar de resulterende emissies zijn hiermee wel in lijn met de scenario's met een snelle klimaattransitie.

De *ReFuelEU Aviation*-richtlijn bevat normen voor de brandstof die wordt gebruikt voor alle vanuit de EU vertrekkende vluchten ongeacht de bestemming. De *FuelEU Maritime*-richtlijn bevat de verplichting om de broeikasgasintensiteit van scheepsbrandstof op basis van ketenemissies te verminderen. De huidige verplichting loopt op naar 80 procent reductie in 2050. De verplichting wordt in scenario's met een snelle klimaattransitie aangescherpt naar het ambitieniveau van de IMO (netto nul broeikasgasemissies in 2050) en in scenario's met een vertraagde klimaattransitie afgezwakt na 2040. We hebben deze verplichting vertaald naar een bijmengeis voor biobrandstof en synthetische brandstof. De eis geldt voor schepen met vertrek en aankomst binnen de EU; voor schepen met bestemming buiten de EU geldt de helft van de intra-EU-bijmengverplichting.

Tabel 3.3
Veronderstellingen over EU-beleid voor de mobiliteitssector

EU-beleid	Snelle klimaattransitie	Vertraagde klimaattransitie
REDIII	Aanscherping van de REDIII om fossiele brandstoffen uit te faseren in 2050	Aanscherping van de REDIII om fossiele brandstoffen uit te faseren in 2075
Bijmengen niet-fossiele brandstoffen ^{a)} in nationaal transport	100% in 2050, lineaire ingroei vanaf 2030	100% in 2075, lineaire ingroei vanaf 2030
Europese normering nulemissie personenauto's & bestelauto's	100% BEV ^{b)} nieuwverkopen in 2035	Lichte vertraging van EU-beleid: 100% BEV nieuwverkopen in 2040
Europese normering nulemissie vrachtauto's	Staan EU-beleid, geen verdere aanscherping: 90% ZE nieuwverkopen in 2040	Lichte vertraging van EU beleid: 90% ZE nieuwverkopen in 2045
ReFuelEU Aviation (bijmengen sustainable aviation fuel (SAF))	34% in 2040, 90% in 2050, 100% in 2060	34% in 2040, oplopend naar 100% in 2075
FuelEU Maritime (vertaald naar bijmengen biobrandstof)	Bijmenging: 80% in 2040 en 100% in 2050	Bijmenging: 36% in 2040 tot 100% in 2075

a) Biobrandstoffen of synthetische brandstoffen

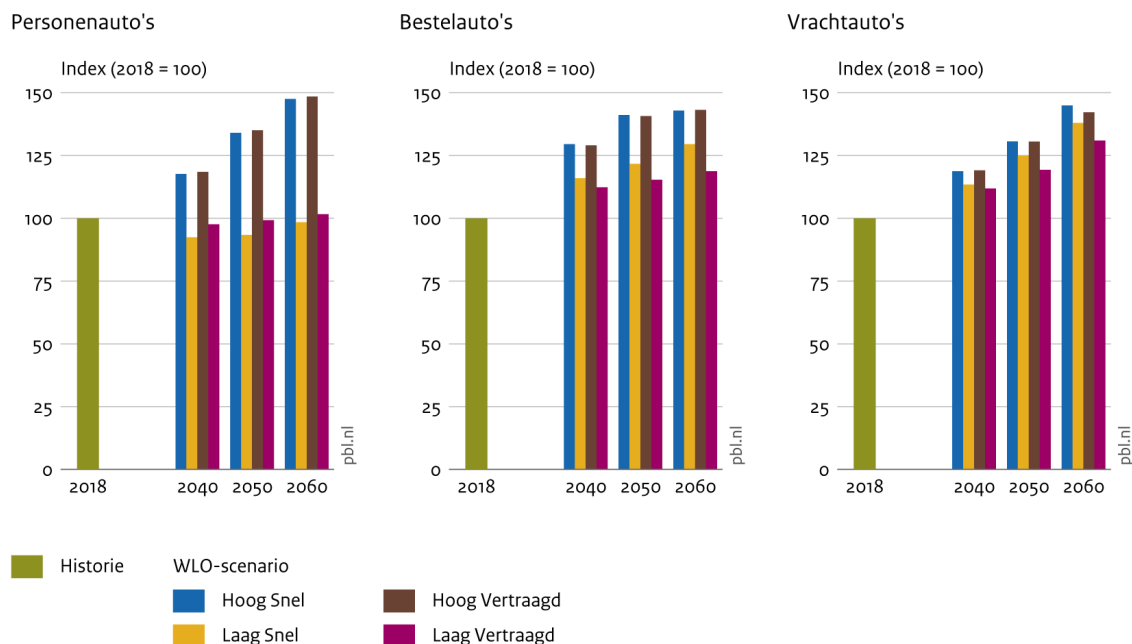
b) Batterij-elektrische voertuigen

Volumeontwikkelingen wegtransport

In de scenario's met hoge groei neemt het gemotoriseerde vervoer over de weg toe, zowel voor personenvervoer als voor bestel- en vrachtvervoer ten opzichte van het referentiejaar 2018.³ In de scenario's met een lage groei blijft het aantal gereden kilometers met personenauto's ongeveer stabiel; de groei van bestel- en vrachtverkeer neemt wel toe maar wat minder sterk dan in de scenario's met een hoge groei (zie figuur 3.3). De ontwikkeling van het weggebruik hangt sterk af van de manier waarop mobiliteit wordt beprijsd. In deze scenario's gaat het om beprijzing zodanig dat de opbrengsten uit autobelastingen (zowel voor autobezit als autogebruik) op peil blijven (zogenoemd minimaal gedifferentieerd trendmatig beleid, zie cahier Mobiliteit, PBL 2025d). In de scenario's met een hoge groei neemt het inwoneraantal sterker toe dan in de scenario's met lage groei, en daarbovenop groeit ook het personenautogebruik per inwoner terwijl dat in scenario's met lage groei juist licht daalt. Het bestel- en vrachtvervoer over de weg groeit ook, maar in alle scenario's relatief minder sterk dan het bbp.

³ Het jaar 2018 of 2023 is voor transport een logischer basisjaar dan bijvoorbeeld 2020, vanwege de gevolgen van Covid-19 in de periode 2020-2022.

Figuur 3.3
Aantal voertuigkilometers

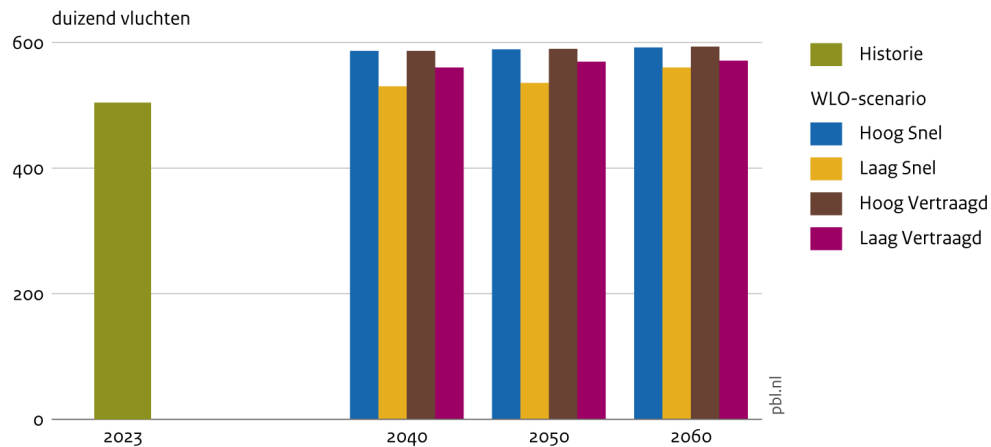


Volumeontwikkeling en gebunkerde brandstof luchtvaart

Het aantal vluchten vertrekkend uit Nederland neemt tussen 2023 en 2060 met 17 tot 19 procent toe in scenario Hoog, en met 11 tot 13 procent in scenario Laag (zie figuur 3.4). Het aantal vluchten vanaf Schiphol is begrensd tot maximaal 500.000 per jaar. Dit plafond is de belangrijkste beperkende factor voor de groei van het aantal vluchten in de scenario's met een hoge economische groei.

In alle WLO-scenario's blijft Nederland een belangrijke hub-functie houden voor de luchtvaart, hoewel de mate waarin verschilt tussen de scenario's. De brandstofinname in Nederland is daarvoor relatief groot. Het energiegebruik neemt sterker toe dan dat van het aantal vluchten in de scenario's met een vertraagde klimaattransitie, maar ook in het scenario Hoog Snel. Alleen in het scenario Laag Snel ligt het energiegebruik in 2060 lager dan in 2023, terwijl het aantal vluchten wel is toegenomen. De reden is dat er weliswaar in alle scenario's sprake is van verbeterde efficiëntie van vliegtuigmotoren, maar er is ook een trend dat er met steeds grotere toestellen gevlogen gaat worden waardoor het energiegebruik per vlucht kan toenemen (per passagier neemt het energiegebruik wel af).

Figuur 3.4
Aantal vluchten vertrekkend vanuit Nederland



Bron: PBL

In de luchtvaart veronderstellen we dat tot 2060 vrijwel uitsluitend gevlogen blijft worden op kerosine. Dit kan, naast fossiele kerosine, ook biokerosine of e-kerosine zijn. Kerosine is een energiedrager met een hoge verbrandingswaarde per eenheid gewicht en eenheid volume en blijft daarom gebruikt worden in de luchtvaart. Daarbij komt dat strikte veiligheidseisen een verandering van energiedrager belemmeren, en ook gaan vliegtuigen technisch gezien lang mee, waardoor nu net gebouwde toestellen nog decennia in gebruik blijven. Het bijmengpercentage voor kerosine van biogene of synthetische oorsprong neemt toe naar 100 procent in 2060 in de scenario's met een snelle klimaattransitie, en naar 72 procent in die met een vertraagde klimaattransitie.

Figuur 3.5
Bijmengpercentage biogene en synthetische brandstof in kerosine



Bron: PBL

Volumeontwikkeling en gebunkerde brandstof zeevaart

Het transportvolume in de zeevaart neemt tot 2060 toe met 34 tot 41 procent in scenario Hoog, en met 4 tot 10 procent in scenario Laag ten opzichte van het jaar 2018. De toename van de brandstofvraag groeit minder hard dan het transportvolume, als gevolg van efficiencyverbetering van schepen, operationele maatregelen zoals lage(re) vaarsnelheden en logistieke maatregelen. Tot 2060 is

aangenomen dat deze verbeteringen leiden tot een besparing op het energiegebruik van 30 procent (scenario Laag) tot 50 procent (scenario Hoog).

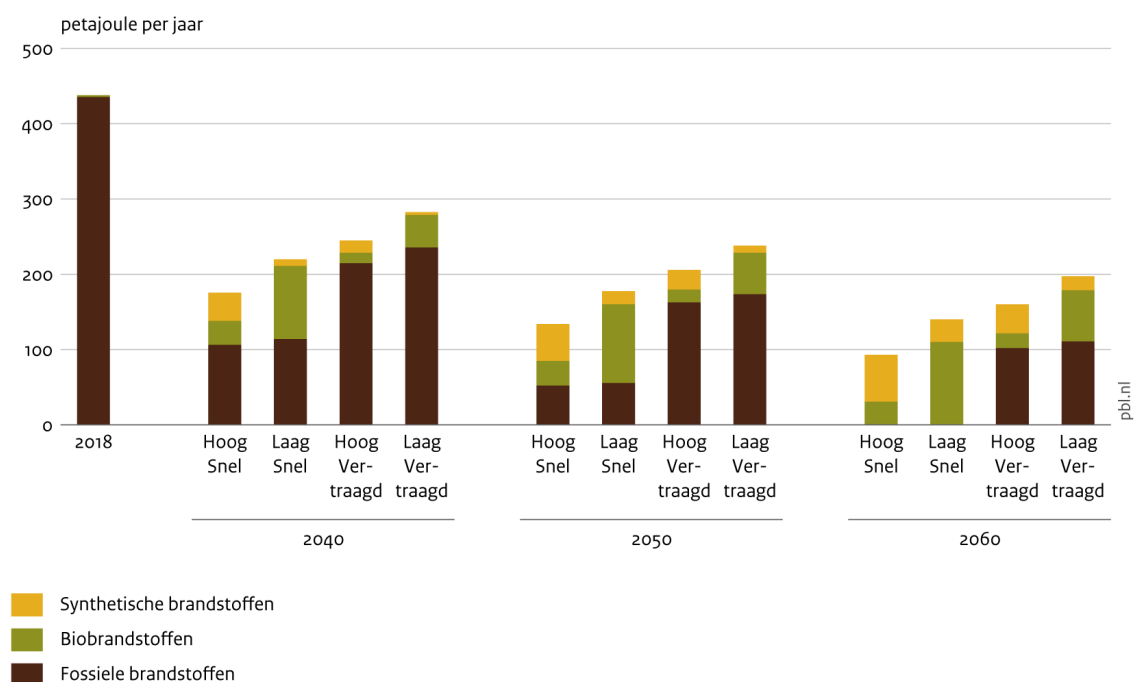
Voor de zeevaart is de onzekerheid over wat de dominante toekomstige CO₂-vrije energiedrager wordt groter dan in de luchtvaart. Een mogelijkheid is het gebruik van biogene brandstof, zoals Fischer-Tropsch-diesel of biomethanol of synthetische koolwaterstoffen (uit groene waterstof en CO₂), maar ook kan ammoniak als koolstofloze brandstof een belangrijke rol gaan spelen (Geilenkirchen et al. 2024). De brandstofkeuze is van belang voor de omvang van de brandstofinname in Nederland in de scenario's. Zeeschepen kunnen, veel makkelijker dan vliegtuigen, elders tanken als de brandstof daar goedkoper is.

In scenario Hoog gaat de technologieontwikkeling snel. Hierbij past een sterkere toename van synthetische brandstoffen, zoals ammoniak of e-methanol, als brandstof voor de zeevaart. In scenario Laag is de rol van synthetische brandstoffen minder groot. In scenario Hoog is er ook veel vertrouwen op andere landen, en is er minder aandacht voor geopolitieke afhankelijkheden. Gecombineerd met de technologie-aannames leidt dat tot een beeld waarin de bunkerpositie van Nederland in alle scenario's sterk vermindert, en zeeschepen in toenemende mate brandstoffen tanken buiten de EU. Figuur 3.6 laat de ontwikkeling zien van de inname van brandstof door zeeschepen.

De bunkerpositie van Nederland kan echter ook niet of veel minder sterk afnemen dan hier is verondersteld (Geilenkirchen 2024). Als de extra gebunkerde brandstof wordt geïmporteerd, heeft dat nagenoeg geen impact op de in paragraaf 3.4 geschetste ontwikkeling van het energiesysteem (vergelijkbaar met meer doorvoer van energie).

Figuur 3.6

Inname van bunkerbrandstoffen door zeeschepen in Nederland volgens WLO-scenario's



Bron: PBL

3.3.4 Landbouw en landgebruik

De broeikasgasemissies vanuit de landbouw en landgebruik zijn grotendeels niet gerelateerd aan energiegebruik, met uitzondering van die van de glastuinbouw. Broeikasgasemissies als gevolg van akkerbouw en veeteelt bestaan vooral uit methaan en lachgas. Landgebruik kan zowel leiden tot emissie van CO₂ als tot vastlegging van CO₂, afhankelijk van het type landgebruik. In 2023 bedroegen de broeikasgasemissies van de landbouw 24,9 megaton CO₂-eq, waarvan 6,0 als CO₂, 14,1 als methaan en 4,8 als lachgas. Broeikasgasemissies van landgebruik bedroegen in 2023 3,8 megaton CO₂-eq, waarvan 3,1 als CO₂, 0,6 als methaan en 0,1 als lachgas (Emissieregistratie 2025).

De WLO-scenario's met een snelle klimaattransitie sluiten qua omvang van het activiteitsniveau aan bij landbouwscenario's die zijn opgesteld voor de TVKN (Westhoek et al. 2024). In de WLO-scenario's met een vertraagde klimaattransitie gaan we qua activiteitsniveau uit van een vertraagde ontwikkeling, waarbij in 2075 de dierlijke productie en veestapel en het agrarisch grondgebruik op het niveau ligt dat in 2050 wordt bereikt bij een snelle klimaattransitie.

In de TVKN-studie zijn drie trajecten uitgewerkt die passen binnen een samenleving die gaat naar netto nul broeikasgasemissie in 2050 (Westhoek et al. 2024). De TVKN-trajecten verschillen in de mate waarin structuuraanpassingen van de landbouw worden verondersteld en de mate waarin technologische oplossingen een rol spelen bij het verminderen van broeikasgasemissies. In de TVKN-trajecten resteert nog circa 9 tot 12 megaton aan restemissie in 2050. Deze restemissies kunnen in andere sectoren binnen Nederland worden gecompenseerd om op netto nul emissie uit te komen, of kunnen elders in Europa worden gecompenseerd. Zoals in paragraaf 3.2.1 is beschreven, gaan we in de WLO-scenario's met een snelle klimaattransitie ervan uit dat de emissies van de landbouw en landgebruik binnen Nederland zelf worden gecompenseerd. Dit is echter mogelijk strenger dan wat de EU van Nederland zal vragen (zie tekstkader 3.1).

Tekstkader 3.1: Vorming van een AFOLU-sector met eigen nettonuldoelstelling ter discussie in de EU

Het Fit-for-55-pakket van de Europese Commissie bevatte een voorstel voor de vorming van een *Agriculture, forestry and land use* (AFOLU)-sector. Deze sector zou zowel de lachgas- en methaanemissies van de landbouwsector omvatten, als de CO₂-emissies én -vastlegging als gevolg van landgebruik (inclusief bosbouw). De energie-gerelateerde emissies uit de landbouwsector maken geen deel uit van deze AFOLU-sector. Het voorstel was dat de AFOLU-sector in 2035 klimaatneutraal zou moeten zijn, dat wil zeggen dat op Europees niveau de resterende emissies gecompenseerd zouden moeten worden door koolstofvastlegging, zoals in bossen. Bij de behandeling van het voorstel zijn echter noch de Europese Raad (de lidstaten), noch het Europese parlement daarmee akkoord gegaan. De Europese Commissie komt echter mogelijk met een nieuw voorstel voor de vorming van een AFOLU-sector. Het is daarbij mogelijk niet noodzakelijk dat in elke lidstaat de AFOLU-sector op netto nul uitkomt. Bij een gelijke daling van de landbouwemissies in de verschillende lidstaten, in combinatie met een stijging van de CO₂-vastlegging, zijn er nog steeds lidstaten met een netto emissie (zoals waarschijnlijk Nederland, Ierland en Denemarken) en lidstaten met een forse netto vastlegging (zoals Zweden en Finland). Nederland zou dan deze netto emissie mogelijk niet in eigen land hoeven te compenseren (bijvoorbeeld via vergroting van de vastlegging in bossen).

Daar staat tegenover dat, als Nederland veel biogrondstoffen importeert en er bij de verdere verwerking van deze biogrondstoffen naar brandstoffen en grondstoffen voor bioplastics de CO₂ wordt afgevangen en opgeslagen in Nederland, dit voor Nederland tot negatieve emissies leidt.

Vanuit dat perspectief is het niet evident dat Nederland meer restemissie over alle sectoren samen zou mogen hebben dan gemiddeld voor de EU-landen (en dit gemiddelde is netto nul in 2050 volgens de Europese Klimaatwet).

Gelet op de onzekerheid over de vorming van een AFOLU-sector en de manier waarop in Europees verband de doelstelling voor deze sector wordt vastgesteld, en gelet op de positie van Nederland rond import van biograndstoffen in combinatie het toepassen van afvang en opslag van CO₂, hebben we ervoor gekozen om in de scenario's met een snelle klimaattransitie uit te gaan van netto nul emissie op het Nederlandse grondgebied in 2050, inclusief emissies als gevolg van in Nederland getankte brandstoffen voor zee- en luchtvaart (zie paragraaf 3.2.1). Bij de scenario's met een vertraagde klimaattransitie wordt netto nul emissie bereikt in 2075.

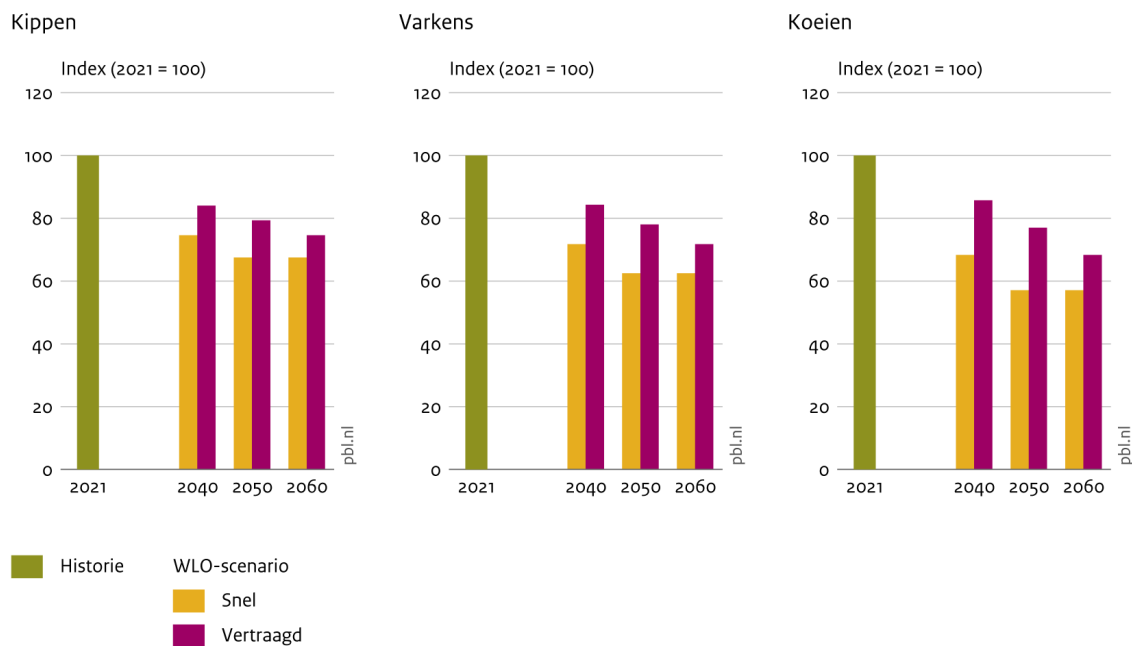
In de WLO-scenario's hebben we voor de ontwikkeling van de veestapel en maatregelen rond landgebruik alleen onderscheid gemaakt langs de klimaat-as; de scenario's voor de ontwikkeling van de veestapel en maatregelen rond landgebruik maken dus geen verschil tussen lage en hoge economische groei. De reden is dat de omvang van de diergebonden landbouw in Nederland vooral bepaald wordt door beperkingen die met milieu- en natuurbeleid worden opgelegd, en minder door de toename van de vraag door de toename van de bevolkingsomvang of door toename van het besteedbaar inkomen per persoon.

In de WLO-scenario's met een snelle klimaattransitie hebben we qua activiteitsniveau het gemiddelde genomen van de TVKN-trajecten 'KlimaatBasis' (met beperkte aanpassing van de landbouwstructuur) en 'KlimaatPlus' (met forse aanpassing van de landbouwstructuur). Dit gemiddelde komt neer op een krimp van de dierlijke productie en veestapel van circa 35 procent tot 2050 (zie figuur 3.7). De veronderstelde krimp van de veestapel wordt voor een deel gedreven door stikstof- en mestbeleid, niet door klimaatbeleid. Na 2050 veronderstellen we geen verdere krimp bij de scenario's met een snelle klimaattransitie. Naast krimp van de veestapel wordt er ook ingezet op emissiereducerende technologieën, zoals stalaanpassingen, voeraanpassingen, precisiebemesting en mestvergistings, en beperkte aanpassingen in het landgebruik (veengebieden, bossen, extra natuur). In de WLO-scenario's met een vertraagde klimaattransitie gaan we uit van een vertraagde ontwikkeling, waarbij in 2075 de dierlijke productie en veestapel en het agrarisch grondgebruik op het niveau ligt dat in 2050 wordt bereikt bij een snelle klimaattransitie. Ook het toepassen van emissiereducerende technologieën en landgebruiksmaatregelen worden in deze scenario's vertraagd uitgevoerd.

De dieren aantallen in 2050 in de WLO-scenario's met snelle klimaattransitie liggen met deze aannames in de buurt van het gemiddelde van de scenario's 'intensief' en 'natuurinclusief' uit de Landbouw- en Natuurverkenning (PBL 2025a, te verschijnen). De dieren aantallen in 2050 in de WLO-scenario's met vertraagde klimaattransitie liggen in de buurt van die van het referentiescenario in de landbouw- en natuurverkenning.

Net als de dieren aantallen, daalt ook het agrarische grondgebruik (bouwland, grasland, glastuinbouw) in alle WLO-scenario's. Het agrarische grondgebruik verschilt juist alleen tussen de scenario's met een hoge en lage economische groei, omdat de vraag naar ruimte voor onder andere woningen en wegen vooral afhangt van de demografische en economische ontwikkeling in Nederland, en deze ruimtevraag ten koste gaat van het landbouwareaal. In scenario Hoog ligt het agrarische grondgebruik 9 procent lager in 2060 dan in 2021; in scenario Laag is de daling minder sterk (6,5 procent lager in 2060 dan in 2021).

Figuur 3.7
Veestapel veehouderij



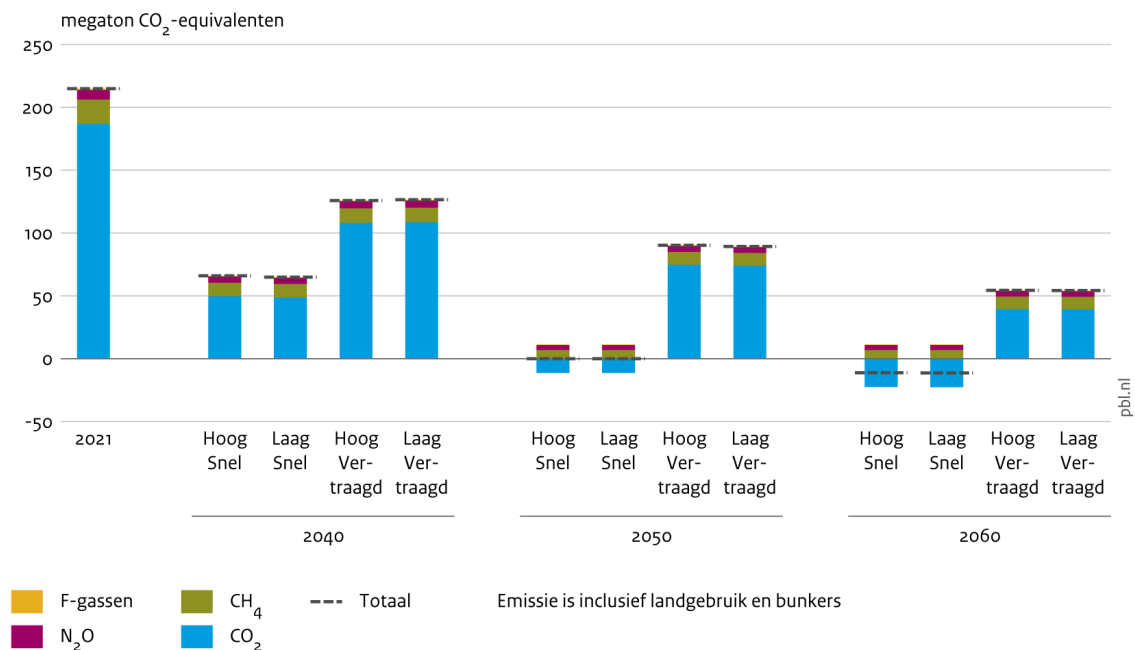
3.4 Toekomstige nationale ontwikkelingen

In deze paragraaf bespreken we de toekomstige ontwikkelingen op het gebied van broeikasgassen (paragraaf 3.4.1), de productie en het gebruik van energie op nationale schaal (paragraaf 3.4.2) en per sector (paragraaf 3.4.3). Hiervoor hebben we ons gebaseerd op de OPERA-berekeningen en de uitgangspunten die in paragrafen 3.2 en 3.3 zijn besproken.

3.4.1 Emissies van broeikasgassen, 2040, 2050, 2060

In de scenario's Hoog Snel en Laag Snel wordt in 2060 per saldo CO₂ vastgelegd door het toepassen van afvang en opslag van CO₂ (CCS) die afkomstig is uit biogene bronnen. Die negatieve emissies compenseren in 2050 de resterende emissies van de overige broeikasgassen en leiden in 2060 tot netto negatieve emissies voor Nederland als geheel (zie figuur 3.8). De afvang en opslag van CO₂ in de scenario's Snel bedraagt 30 megaton in 2060 (het volledige beschikbare potentieel in het scenario wordt dan benut); dit compenseert circa 6-7 megaton aan emissies van CO₂, circa 7 megaton CO₂-eq aan emissie van methaan, circa 4 megaton CO₂-eq aan emissies van lachgas en 0,5 megaton CO₂-eq fluorhoudende broeikasgassen (F-gassen). In 2060 is er dan per saldo circa 12 megaton negatieve emissie voor alle sectoren gezamenlijk.

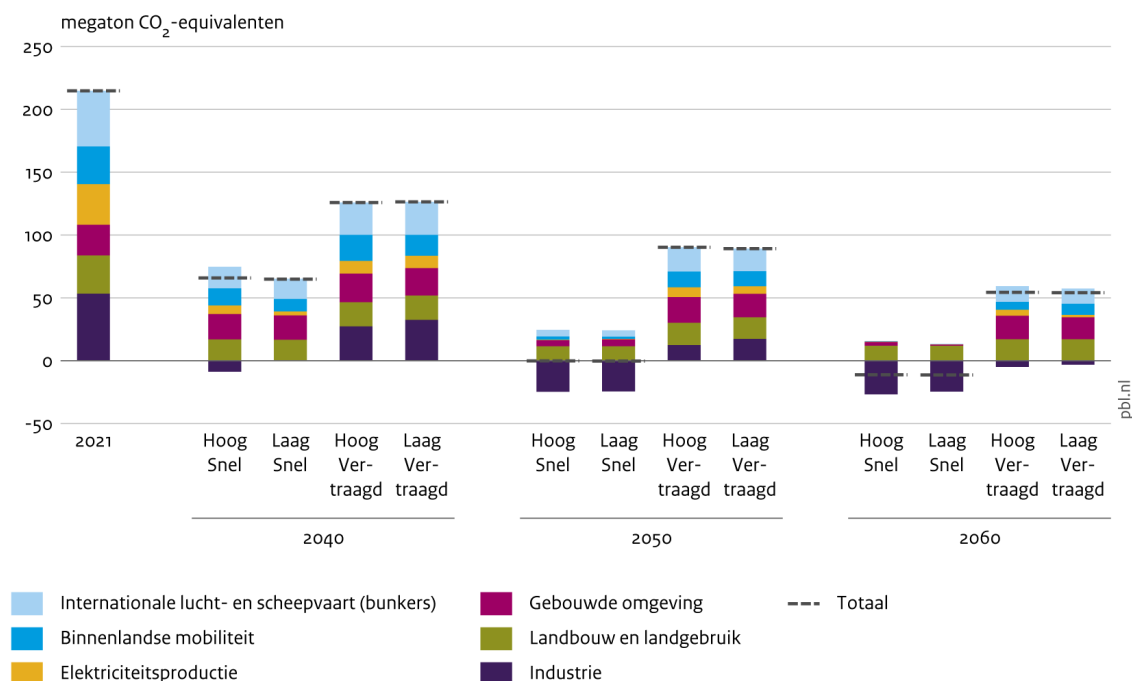
Figuur 3.8
Broeikasgasemissie per stof volgens WLO-scenario's



Bron: PBL

In alle sectoren nemen de broeikasgasemissies af (zie figuur 3.9). In de scenario's Hoog Snel en Laag Snel is de emissie in de industrie per saldo nul rond 2040, en die wordt daarna per saldo negatief (circa -25 megaton in 2060). De negatieve emissies in de industrie zijn het gevolg van het toepassen van CCS bij biogene bronnen (voornamelijk bij brandstoffenproductie). In de scenario's Snel nemen de emissies van de gebouwde omgeving, binnenlands transport en elektriciteitsproductie af naar nul rond 2060. De emissies van landbouw en landgebruik dalen in de scenario's Snel naar circa 12 megaton CO₂-eq in 2060. Deze emissies zijn met technische maatregelen slechts beperkt te verminderen, terwijl de emissies in andere sectoren met technische maatregelen wel (vrijwel) tot nul te brengen zijn of per saldo negatief kunnen worden. In de scenario's Hoog Vertraagd en Laag Vertraagd dalen de emissies ook in alle sectoren, maar in een langzamer tempo.

Figuur 3.9
Broeikasgasemissie per sector volgens WLO-scenario's



Bron: PBL

3.4.2 Energiegebruik op nationaal niveau, 2040, 2050, 2060

Primair energiegebruik daalt licht, samenstelling energiemix verandert drastisch

Ten opzichte van 2021 daalt het primaire energiegebruik⁴ in Nederland licht in alle scenario's (zie figuur 3.10), ondanks de beperkte tot sterke economische en demografische groei. Deze daling is het gevolg van efficiencyverbetering, zoals betere isolatie van woningen, toepassen van warmtepompen in de gebouwde omgeving en industrie, energiebesparing bij de industrie en afbouw van energie-intensieve productieprocessen (dat laatste vooral in het scenario Hoog Snel), en het gebruik van efficiënte elektromotoren in plaats van verbrandingsmotoren in het wegverkeer. Het toenemende gebruik van niet-fossiele brandstoffen verhoogt daarentegen het primaire energiegebruik, vanwege aanzienlijke conversieverliezen bij de omzetting van biograndstoffen, CO₂ en elektriciteit naar brandstoffen; dit conversieverlies is veel groter dan bij omzetting van aardolie naar olieproducten. Bij kernenergie is er sprake van omzettingsverlies bij de conversie van uranium naar elektriciteit.

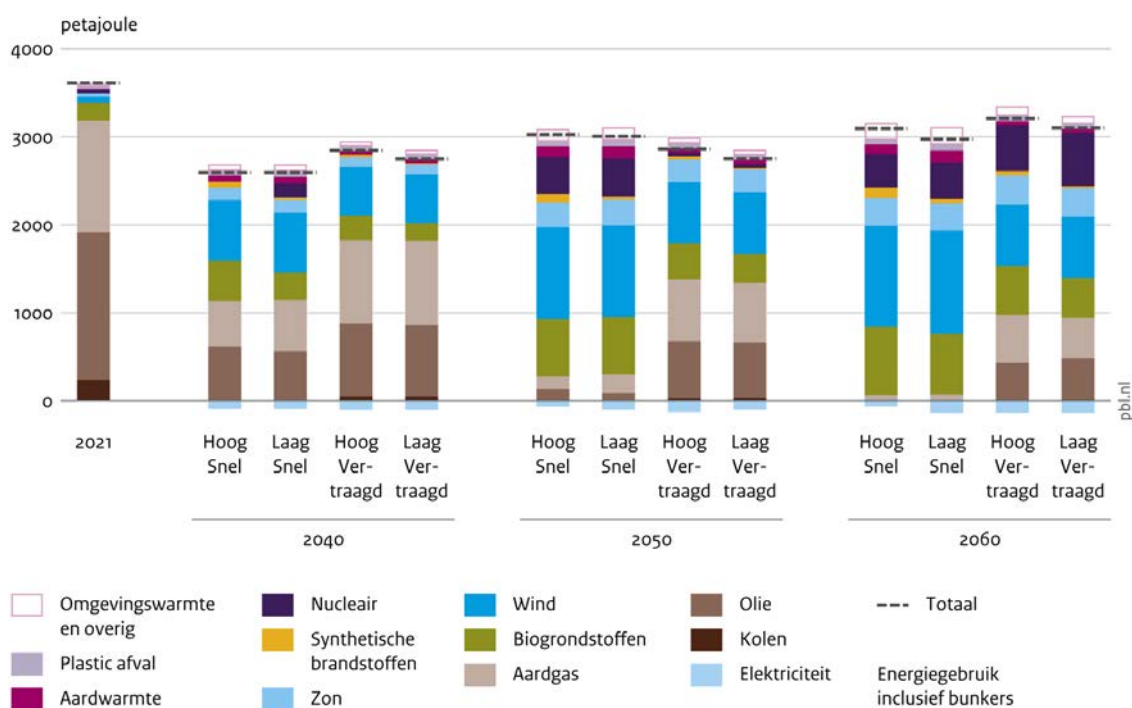
De samenstelling van de energiemix verandert drastisch in alle scenario's. Het gebruik van kolen, olie en gas neemt sterk af, vooral in de scenario's Hoog Snel en Laag Snel. Maar ook in die scenario's is er nog sprake van enig fossiel gebruik; klimaatneutraal is niet synoniem met fossielvrij. Olie en aardgas houden nog wel een substantiële rol tot 2060 in de scenario's met vertraagde klimaattransitie, met een aandeel in 2060 van circa een derde in het primaire energiegebruikssaldo. In die

⁴ Het primair energieverbruik is het finaal (energetisch en non-energetisch) gebruik plus het gebruik voor omzettingen van energiedragers en distributieverliezen.

scenario's vindt er ook nog enige productie van olieproducten plaats ten behoeve van de export.

Het gebruik van elektriciteit uit wind-, zonne- en kernenergie, en het gebruik van biograndstoffen en geïmporteerde groene waterstof (of waterstofdragers, zoals ammoniak) neemt in alle scenario's sterk toe. Het gebruik van biograndstoffen neemt het sterkst toe in het scenario Hoog Snel (775 petajoule inzet in 2060), en het minst sterk in het scenario Laag Vertraagd (450 petajoule inzet in 2060). Import van waterstof vindt uitsluitend plaats in de vorm van ammoniak. De import is het hoogst in scenario Hoog Snel (bijna 120 petajoule in 2060), en is het laagst in scenario Laag Vertraagd (25 petajoule in 2060). In alle scenario's is er circa 90 tot 150 petajoule aan export van elektriciteit. In de scenario's met een snelle klimaattransitie is er naast export van elektriciteit ook sprake van export van waterstof (65 tot 70 petajoule in 2060). In de scenario's met een vertraagde klimaattransitie is er naast export van elektriciteit ook sprake van 155 tot 215 petajoule export van olieproducten voor lucht- en zeevaart in 2060.

Figuur 3.10
Primair energiegebruik volgens WLO-scenario's

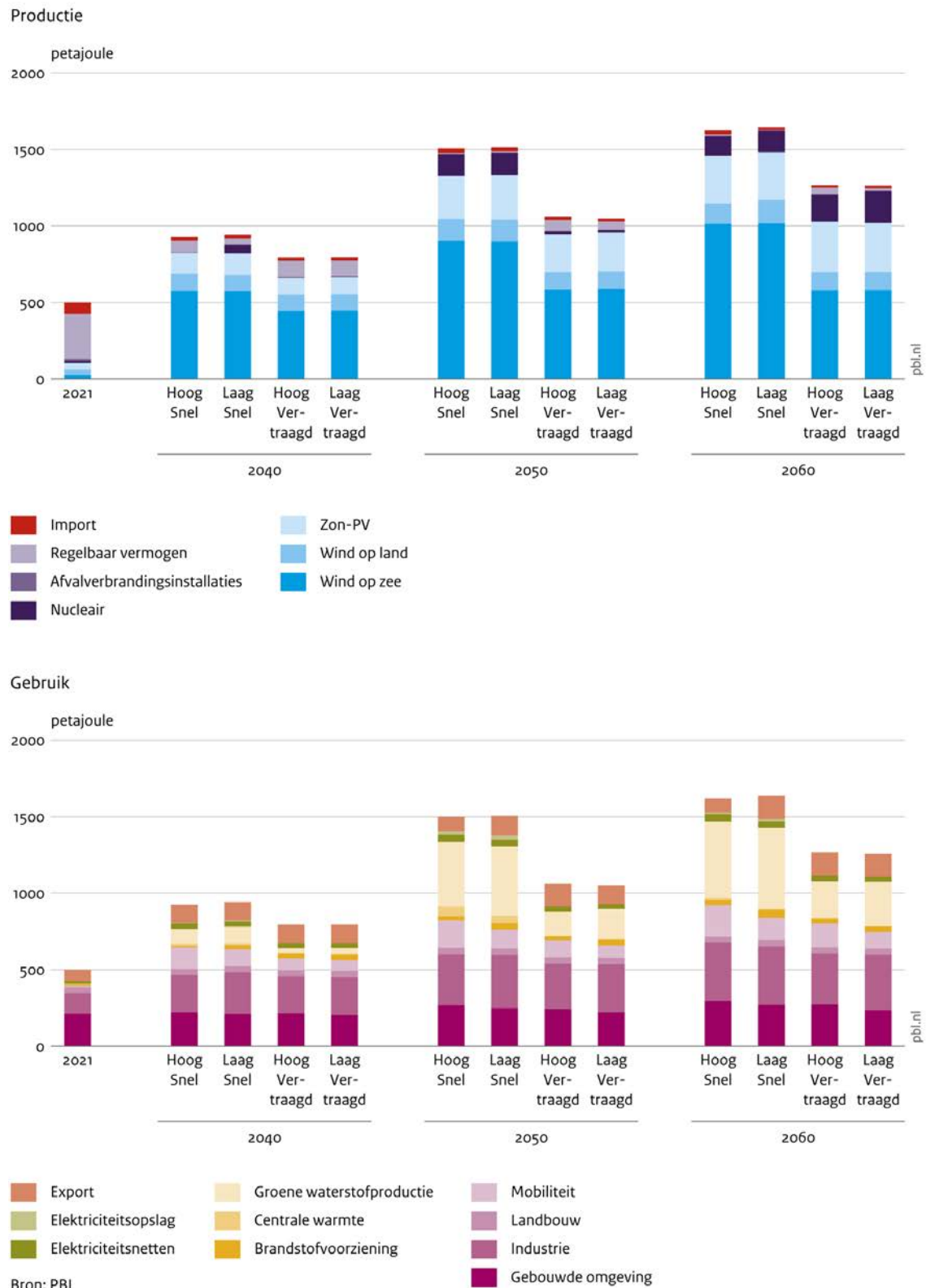


Bron: PBL

Productie en gebruik van elektriciteit neemt in alle scenario's sterk toe

De rol van elektriciteit in het energiesysteem neemt in alle scenario's sterk toe tussen 2021 en 2060, met een factor 2,6 in de scenario's Hoog Vertraagd en Laag Vertraagd, en een factor 3,5 in de scenario's Hoog Snel en Laag Snel (zie figuur 3.11). Productie van elektriciteit uit wind- en zonne-energie domineert in alle scenario's, met een aandeel in 2060 van circa 90 procent in de scenario's met een snelle klimaattransitie en circa 80 tot 85 procent in de scenario's met een vertraagde klimaattransitie. Kernenergie heeft een aandeel in de productie van 9 tot 17 procent in 2060 in de verschillende scenario's.

Figuur 3.11
Elektriciteitsbalans volgens WLO-scenario's

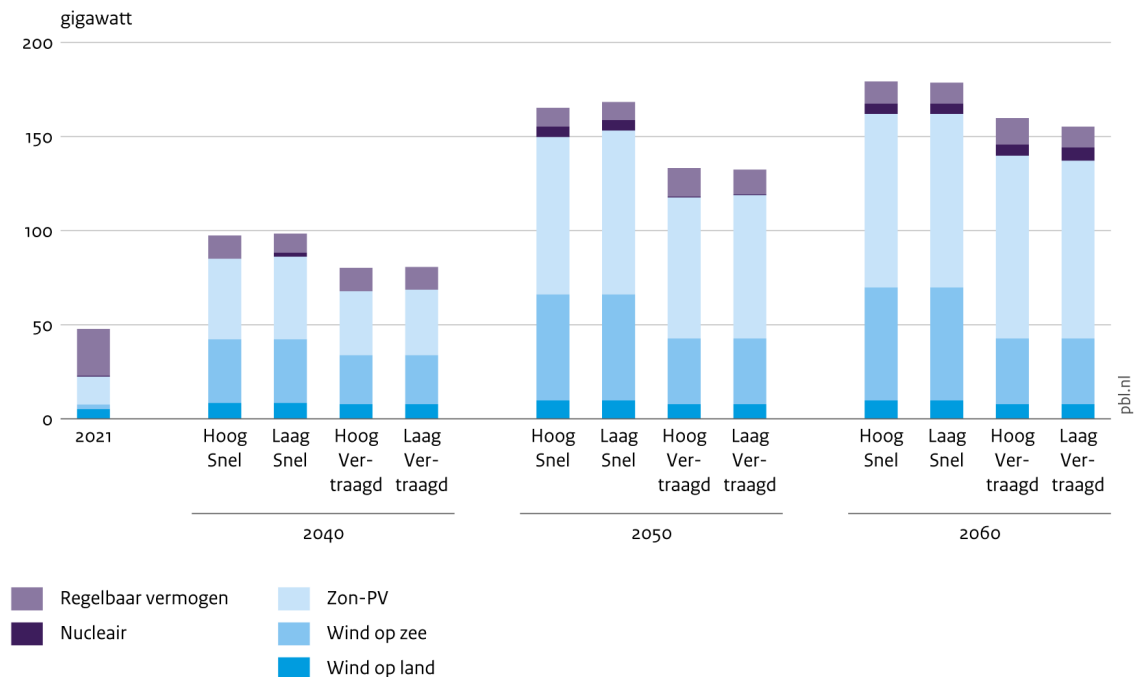


Het opgesteld elektriciteitsproductievermogen (wind, zon, nucleair en overig regelbaar vermogen) neemt sterk toe, van 48 gigawatt in 2021 naar 155 tot 180 gigawatt in 2060 (zie figuur 3.12). Bij de balancering van de momentane vraag en het aanbod van elektriciteit spelen diverse opties een rol:

uitwisseling van elektriciteit met het buitenland, inzet van elektrolyzers en andere flexibele vraag, elektriciteitsopslag (in elektrische auto's, grootschalige batterijen en opslag via gecompriëerde lucht), regelbaar productievermogen en curtailment (afschakelen van wind- en zonvermogen). Het vermogen van elektrolyzers bedraagt 14 tot 24 gigawatt in 2060 in de verschillende scenario's.

Figuur 3.12

Opgesteld elektriciteitsproductievermogen volgens WLO-scenario's



Bron: PBL

Bijna een derde deel elektriciteitsvraag voor productie groene waterstof in scenario's met snelle klimaattransitie

Circa 65 tot 75 procent van de elektriciteitsvraag in 2060 betreft een directe vraag van de verschillende sectoren. Circa 20 tot 33 procent betreft de elektriciteitsvraag van elektrolyzers, waarbij de elektriciteit wordt omgezet naar groene waterstof. De groene waterstofproductie in 2060 bedraagt 360 petajoule (Laag Snel) tot 165 petajoule (Hoog Vertraagd). De groene waterstof wordt hoofdzakelijk ingezet voor productie van transportbrandstoffen en als grondstof voor de organische chemie, als energiedrager ter vervanging van aardgas in verschillende eindgebruikssectoren, in de basismetallindustrie voor reductie van ijzererts, en als grondstof voor de productie van ammoniak en methanol. De mate waarin verschilt tussen de scenario's; zo speelt het gebruik van groene waterstof als brandstof ter vervanging van aardgas in de scenario's Hoog Vertraagd en Laag Vertraagd een veel kleinere rol dan in de scenario's Hoog Snel en Laag Snel. In de scenario's met een snelle klimaattransitie is er in 2060 sprake van 65 tot 70 petajoule export van groene waterstof.

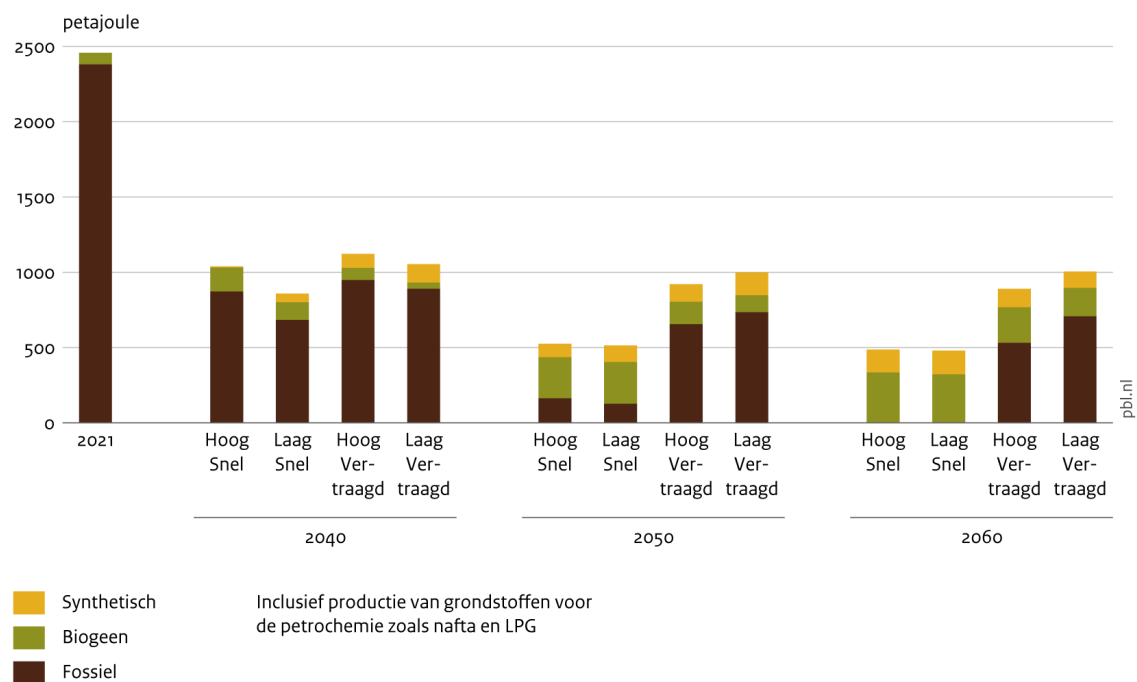
Productie van koolstofhoudende brandstoffen

In alle scenario's neemt de productie van fossiele brandstoffen sterk af, en wordt die slechts deels vervangen door productie van biogene of synthetische koolstofhoudende brandstoffen (zie figuur 3.13). De vraag naar koolstofhoudende transportbrandstoffen daalt sterk in het wegverkeer door de toename van elektrische auto's; hierdoor daalt de productie voor de binnenlandse markt, maar ook de productie van brandstoffen voor de export. Bij de zeevaart daalt de inname van

koolstofhoudende brandstoffen in Nederland doordat zeeschepen biogene en synthetische brandstoffen verhoudingsgewijs meer buiten Nederland tanken. De getoonde productie van brandstoffen is inclusief de productie van grondstoffen voor de petrochemie zoals nafta en LPG. In de scenario's Hoog Snel en Laag Snel wordt fossiele brandstof vrijwel geheel vervangen door biogene brandstof en synthetische brandstof. De synthetische brandstof kan worden geproduceerd in installaties waarin ook biobrandstof wordt geproduceerd, en waarbij extra waterstof wordt toegevoegd om een groter deel van de koolstof in de biograndstoffen (en die anders vrij zou komen als CO₂) om te zetten naar brandstof. In dat geval noemen we dit synthetische brandstof omdat de energie-inhoud afkomstig is van de waterstof. Daarnaast kan het bij synthetische koolstofhoudende brandstof ook gaan om brandstof geproduceerd uit waterstof en afgevangen CO₂ uit puntbronnen of uit de lucht (direct air capture). In de scenario's Hoog Vertraagd en Laag Vertraagd is er nog een aanzienlijke rol voor fossiele brandstof, en is er ook nog circa 65 tot 80 petajoule productie van fossiele brandstoffen ten behoeve van de export.

Figuur 3.13

Productie van koolstofhoudende brandstoffen volgens WLO-scenario's



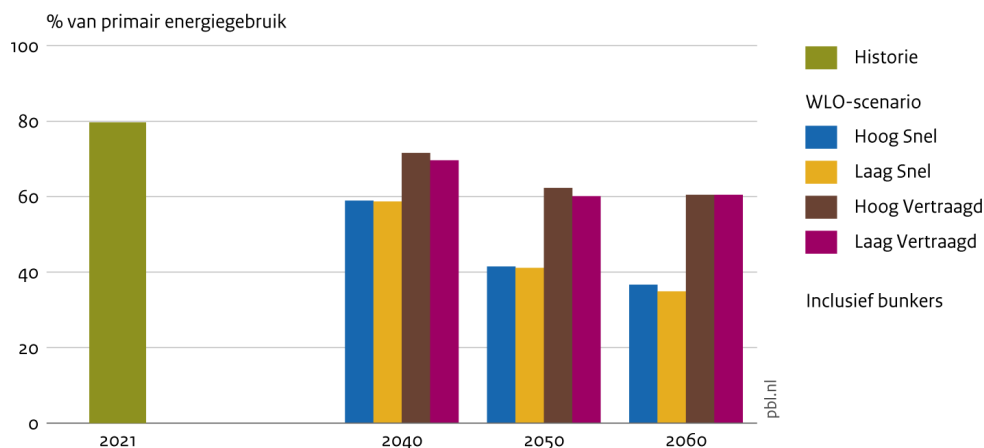
Bron: PBL

Importafhankelijkheid van energie daalt

Het aandeel van in Nederland zelf geproduceerde energie in het primaire energiegebruik (inclusief het gebruik van in Nederland getankte brandstoffen voor de internationale lucht- en zeevaart; bunkers) neemt in alle scenario's toe, en het sterkst in de scenario's Hoog Snel en Laag Snel (zie figuur 3.14). In 2060 is in de scenario's met een snelle klimaattransitie 63 tot 65 procent van de energie geproduceerd in Nederland zelf (vooral uit zonne- en windenergie, en in beperkte mate ook uit Nederlandse biograndstoffen en afval), tegen circa 40 procent in de scenario's Hoog Vertraagd en Laag Vertraagd. De import van fossiele energie neemt in alle scenario's af, en wordt slechts ten dele vervangen door import van biograndstoffen, groene waterstof(dragers) en plastic afval. Ook kernenergie neemt toe in alle scenario's, en daarmee de import van uranium. Ter vergelijking, in 2021 werd circa 80 procent van de gebruikte energie in Nederland (inclusief gebruik voor bunkers in de internationale lucht- en scheepvaart) geïmporteerd (CBS 2024a).

Hoewel de importafhankelijkheid van energie daalt, neemt de afhankelijkheid van metalen of producten die daarvan worden gemaakt toe. De energietransitie leidt tot een toenemende vraag naar windturbines, zonnepanelen, elektrolyzers en batterijen. Voor de productie daarvan zijn onder andere metalen zoals ijzer, koper, lithium en andere zeldzame aardmetalen nodig. Voor deze kritieke metalen, of voor de producten die worden gemaakt met deze metalen, zijn Nederland en de EU op dit moment vrijwel volledig afhankelijk van aanvoer uit andere landen (Leiden-Delft-Erasmus 2022; CE Delft 2024).

Figuur 3.14
Aandeel geïmporteerde energie



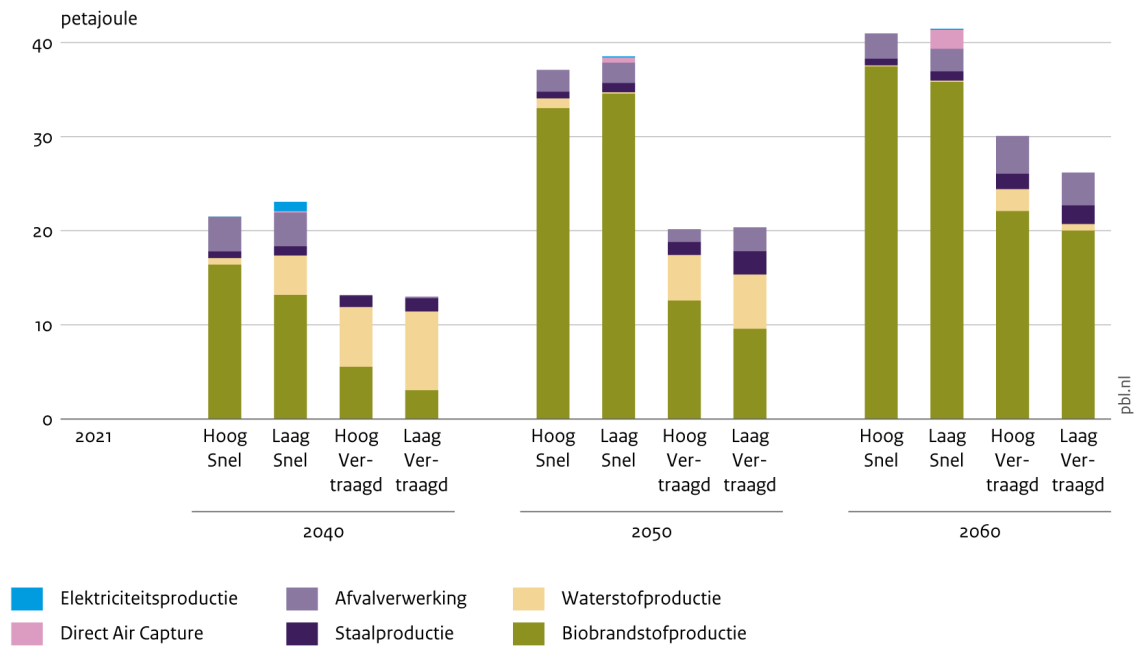
Bron: PBL

Herkomst en bestemming van CO₂

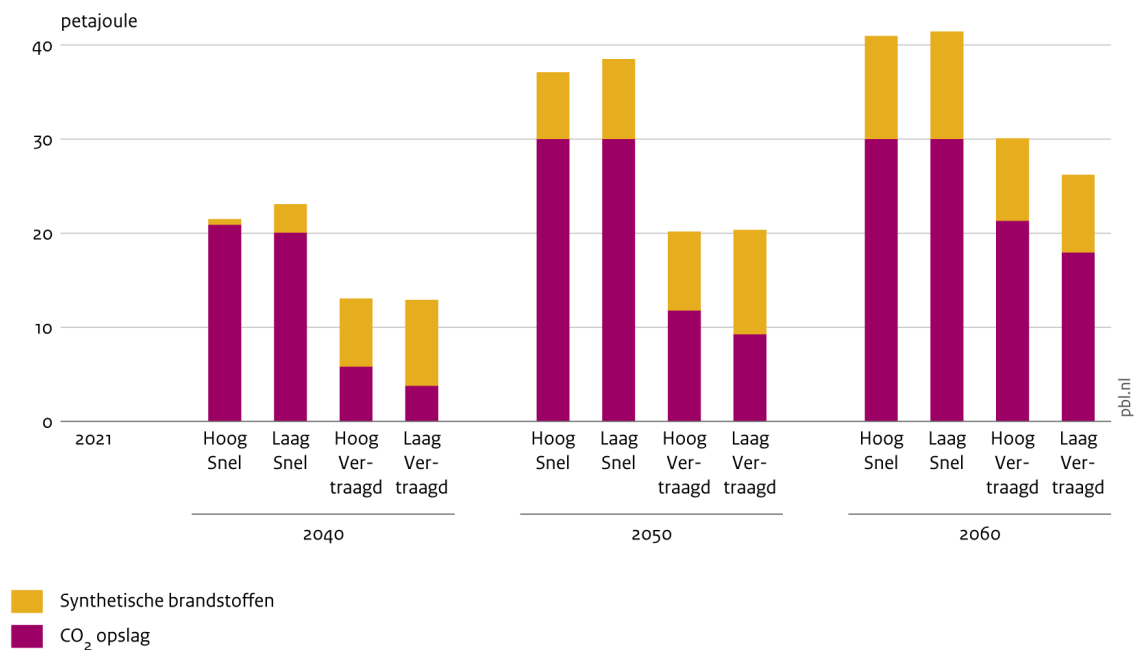
In de scenario's met een snelle klimaattransitie wordt het in het model opgelegde maximum voor opslag van CO₂ van 30 megaton in 2060 volledig benut (zie figuur 3.15). In de scenario's met een vertraagde klimaattransitie is dit niet het geval, en wordt in 2060 21 megaton (Hoog Vertraagd) en 18 megaton (Laag Vertraagd) opgeslagen. Afhankelijk van het scenario wordt in 2060 8 tot 11 megaton CO₂ toegepast voor synthetische brandstofproductie. De belangrijkste bron voor CO₂ is CO₂ die vrijkomt bij biobrandstoffenproductie. Afvang van CO₂ bij waterstofproductie uit aardgas of restgassen is in 2050 al afgebouwd in de scenario's met een snelle klimaattransitie, terwijl dat pas na 2060 volledig is afgebouwd in scenario's met een vertraagde klimaattransitie. Ook wordt CO₂ afgevangen bij afvalverwerkingsinstallaties in alle scenario's. Na 2050 speelt verwijdering van CO₂ uit de buitenlucht (*direct air capture*) een beperkte rol in de scenario's met een snelle klimaattransitie.

Figuur 3.15
Herkomst en bestemming van CO₂ volgens WLO-scenario's

Herkomst



Bestemming



Bron: PBL

3.4.3 Energiegebruik in eindgebruikssectoren

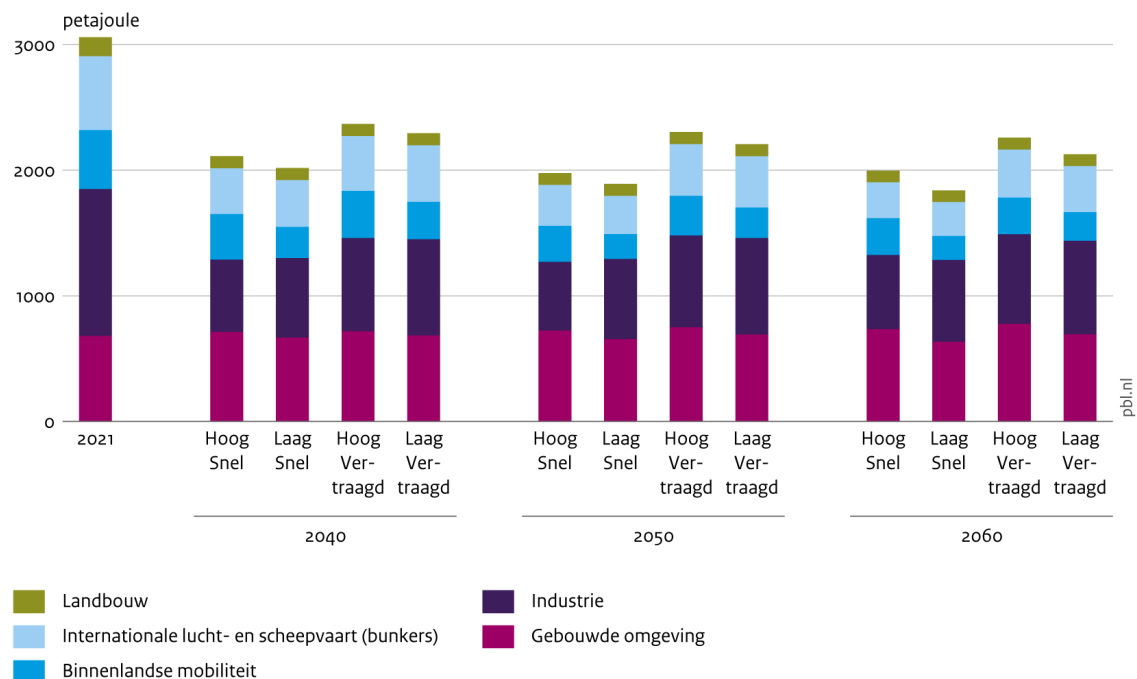
Energiegebruik van eindgebruikssectoren in Nederland neemt af

In deze paragraaf beschrijven we de ontwikkeling van de energievraag door ‘eindgebruikssectoren’, dus sectoren waar energie gebruikt wordt. Het gaat om de sectoren gebouwde omgeving, industrie, mobiliteit en landbouw en landgebruik. Energiegebruik voor de productie van energiedragers (brandstoffen, elektriciteit, waterstof) valt hier dus niet onder, en is al besproken in paragraaf 3.4.2. De energievraag bevat het finaal energetisch gebruik, maar in de industrie ook het niet-energetisch gebruik en gebruik voor omzettingen van energie bij de nijverheid.

Het totale energiegebruik in eindgebruikssectoren neemt in alle scenario's af (zie figuur 3.16). In de scenario's met een snelle klimaattransitie daalt het energiegebruik sterker dan in die met vertraagde klimaattransitie, en in de scenario's met een lage groei daalt de energievraag sterker dan die met een hoge groei. Het energiegebruik neemt echter niet in alle sectoren en scenario's af.

Figuur 3.16

Energiegebruik per sector volgens WLO-scenario's



Bron: PBL

Zo neemt dat in de gebouwde omgeving juist toe in het scenario Hoog Vertraagd; de toename van energiegebruik door de sterke groei van het aantal inwoners wordt niet gecompenseerd door energiebesparing.⁵ In scenario Laag Snel daalt het energiegebruik in de gebouwde omgeving juist wel, omdat de bevolkingsgroei laag is en er maatregelen worden genomen die tot lager energiegebruik leiden. Het energiegebruik in de industrie daalt het sterkste in scenario Hoog Snel, omdat in dat

⁵ Eurostat definieert het finale energiegebruik exclusief de gewonnen omgevingswarmte door warmtepompen. Volgens de definitie van Eurostat neemt het finale energiegebruik in de gebouwde omgeving sterker af dan de hier gerapporteerde cijfers.

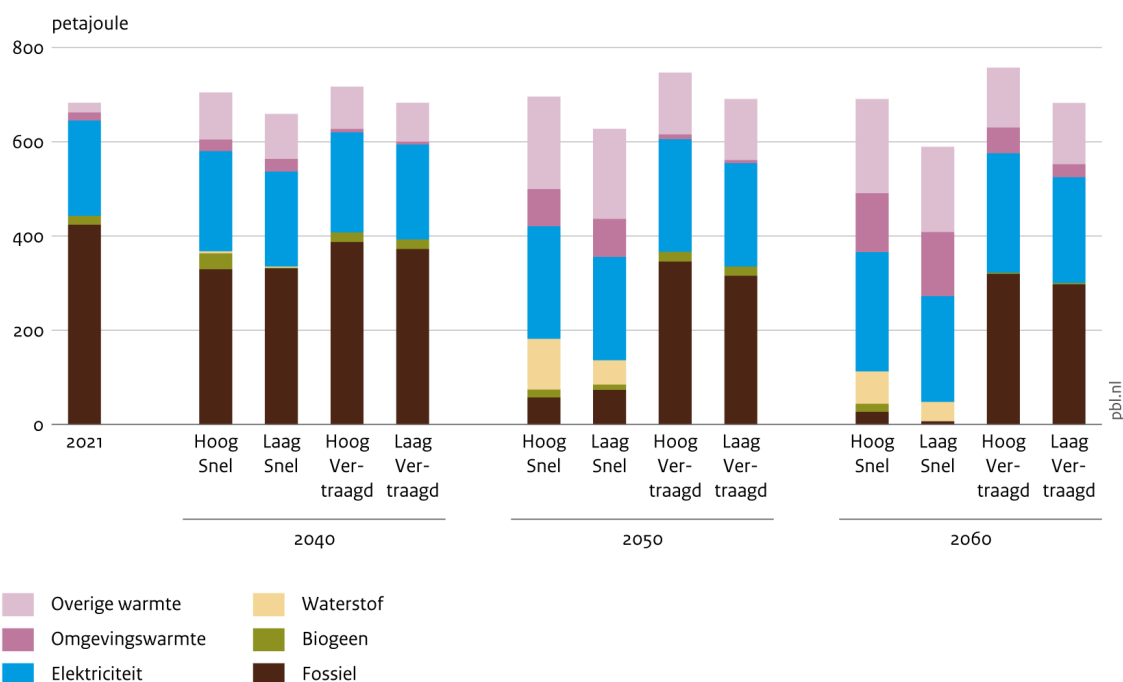
scenario de omvang van de energie-intensieve industrie het sterkst daalt. Bij mobiliteit neemt het energiegebruik in alle scenario's af, ondanks groei van transportvolumes; dit vanwege verregaande penetratie van efficiënte elektrische voertuigen in het wagenpark. Ook de vraag naar transport-brandstof in lucht- en zeevaart neemt af in alle scenario's ondanks groei van transportvolumes. Dit als gevolg van efficiencyverbetering en een afnemende bunkerpositie van Nederland (zeeschepen tanken meer brandstoffen elders).

Toename verwarmen met elektriciteit en warmtenetten in de gebouwde omgeving

De energievraag in de gebouwde omgeving neemt toe in het scenario Hoog Vertraagd, en daalt juist in scenario Laag Snel, als netto-effect van bevolkingsgroei en maatregelen die tot besparing leiden (zie figuur 3.17). In de scenario's met een snelle klimaattransitie worden woningen en utiliteitsgebouwen in 2060 niet langer met aardgas verwarmd, maar hoofdzakelijk met elektrische warmtepompen, warmtenetten (gevoed met warmte uit de industrie, e-boilers en geothermie) en lokale hernieuwbare warmte. In de periode tot 2050 neemt ook het gebruik van waterstof in de gebouwde omgeving toe, maar na 2050 neemt dit weer af en wordt het vervangen door vooral lokale hernieuwbare warmte. In de scenario's met een vertraagde klimaattransitie speelt verwarming met aardgas nog een belangrijke rol in 2060, maar ook in deze scenario's wordt meer dan de helft van de woningen van warmte voorzien via elektriciteit, warmtenetten of lokale hernieuwbare warmte.

Figuur 3.17

Energiegebruik door gebouwde omgeving volgens WLO-scenario's

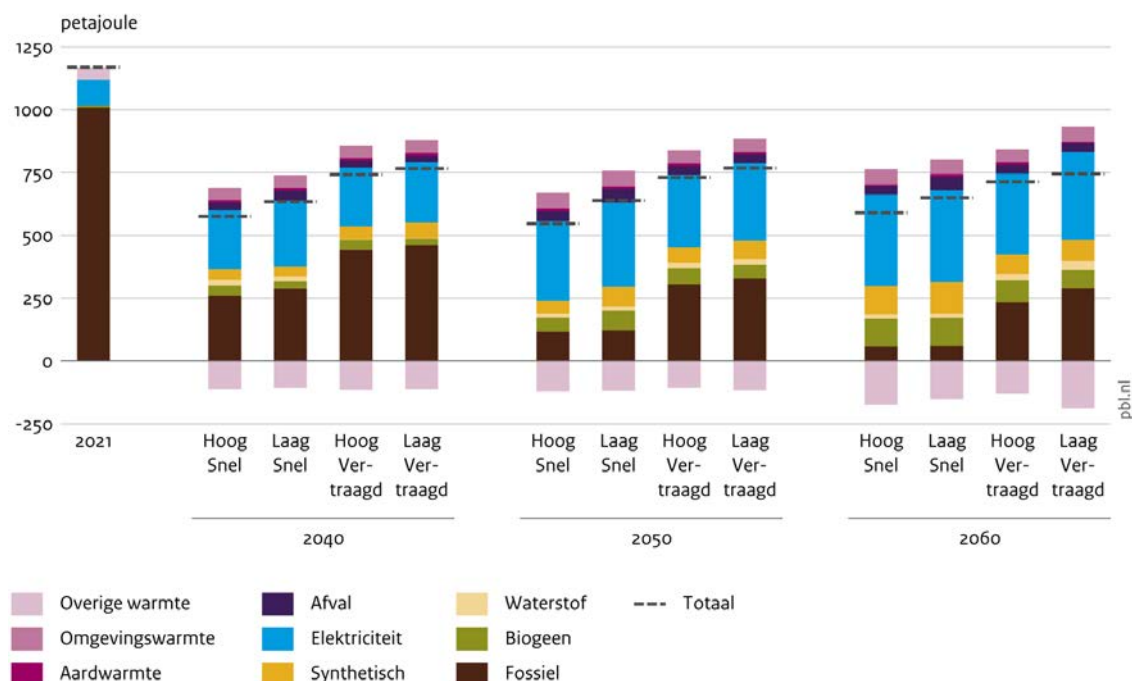


Bron: PBL

Elektriciteit wordt belangrijkste energiebron voor de industrie

De energievraag van de industrie in 2060 ligt tussen de 590 en 745 petajoule, en weerspiegelt de omvang van de industriële activiteiten in de verschillende scenario's (zie figuur 3.18). Het gaat om het energiegebruik in de nijverheid, dat wil zeggen: de chemie, kunstmestproductie, ferro en non-ferro basismetaleindustrie (inclusief hoogovens en cokesfabrieken), voedingsindustrie, en overige nijverheid, maar dus exclusief het energiegebruik van energie-aanbodsectoren (brandstofproductie en waterstofproductie; zie daarvoor paragraaf 3.4.2).

Figuur 3.18
Energiegebruik door industrie volgens WLO-scenario's



Bron: PBL

Het directe energiegebruik van elektriciteit door de industrie neemt in alle scenario's toe met een factor 3 tot 3,5 in de periode 2021-2060, afhankelijk van het scenario. De elektrificatie bestaat vooral uit de inzet van elektrische boilers en warmtepompen, elektrisch kraken in de koolstofchemie, en staal maken via het DRI-proces. Dit laatste leidt tot het uitfaseren van het gebruik van kolen.

Het gebruik van fossiele energie in de industrie daalt sterk in alle scenario's, maar het tempo waarin verschilt tussen de scenario's. De afname van fossiel gebruik hangt samen met de afname van energie-intensieve processen in de industrie en vervanging van fossiele energie door inzet van elektriciteit, waterstof en hernieuwbare energie (zowel energetisch als niet-energetisch gebruik). Het niet-energetisch gebruik van aardgas en aardolie (gebruik als grondstof) neemt in de scenario's sterk af. In 2021 was dat nog circa 520 petajoule, in 2060 is dat nog circa 30 petajoule in scenario Snel en 130-160 petajoule in scenario Vertraagd. Ook de inzet van WKK's voor de productie van warmte en elektriciteit wordt grotendeels uitgefaseerd, omdat er steeds meer elektriciteit wordt opgewekt uit wind- en zonne-energie.

Aardgas wordt nog beperkt gebruikt voor methanolproductie, voor de reductie van ijzererts, en als grondstof voor kunstmestproductie; de mate waarin verschilt tussen de scenario's. Aardolie speelt vooral een rol als grondstof voor de olefinenproductie (een tussenproduct voor plastics), vooral in de scenario's met een vertraagde klimaattransitie. In de scenario's met een snelle klimaattransitie is bionafta de belangrijkste grondstof voor de olefinenproductie. De inzet van plastic afval voor plasticproductie neemt in alle scenario's toe, maar vooral in het scenario Laag Snel. Het grootste deel daarvan wordt mechanisch gerecycled. Aardgas als grondstof voor de ammoniakproductie speelt in geen van de scenario's meer een rol, en is vervangen door import van ammoniak of binnenlandse productie van ammoniak met groene waterstof. De uitkoppeling van warmte vanuit de

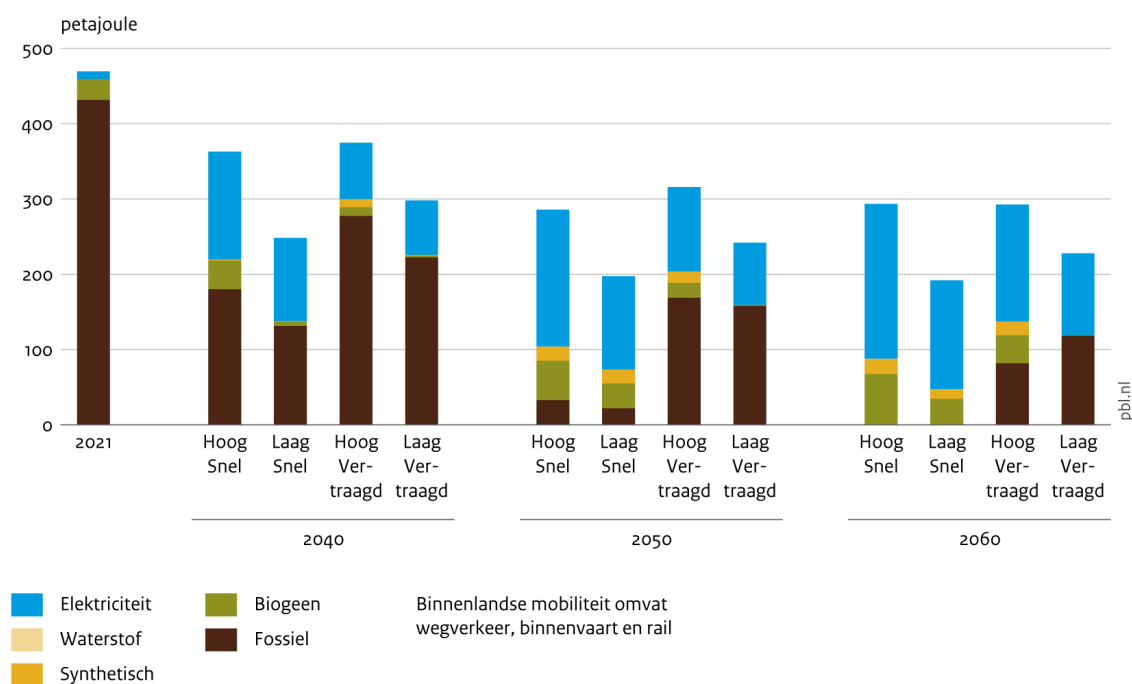
industrie neemt in alle scenario's toe, en wordt ingezet in warmtenetten voor de gebouwde omgeving.

Elektrificatie wegverkeer zet door, toename inzet bio- en synthetische brandstof bij lucht- en zeevaart

Het energiegebruik van de binnenlandse mobiliteit, waaronder wegverkeer, rail, binnenvaart en mobiele werktuigen, daalt in alle scenario's, ondanks de groei van het transportvolume, vooral als gevolg van elektrificatie van wegverkeer (zie figuur 3.19). Per gereden kilometer gebruiken elektrische voertuigen ruwweg vier tot vijf keer minder energie dan voertuigen met een verbrandingsmotor. In de scenario's met een snelle klimaattransitie is er naast elektriciteit nog een rol voor biobrandstoffen en synthetische brandstoffen, met name bij de binnenvaart, zwaar wegverkeer en mobiele werktuigen. Fossiel energiegebruik speelt nog een aanzienlijke rol in de scenario's met een vertraagde klimaattransitie.

Figuur 3.19

Energiegebruik door binnenlandse mobiliteit volgens WLO-scenario's

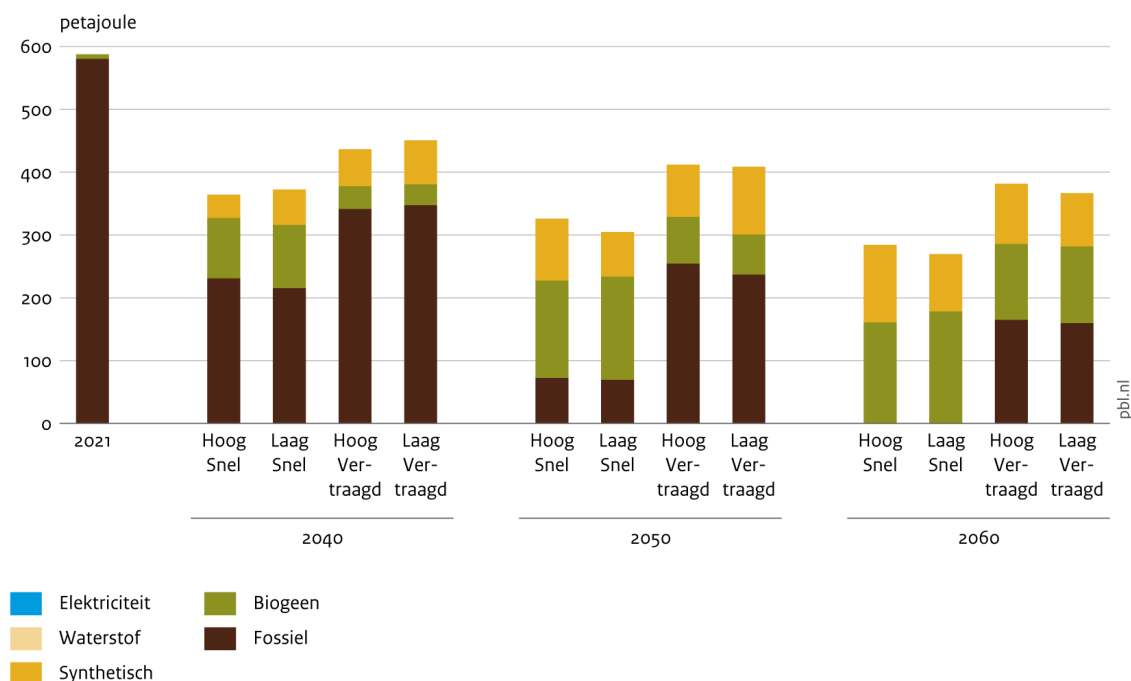


Bron: PBL

De brandstofafzet (bunkers) voor de internationale lucht- en zeevaart neemt ook in alle scenario's af (zie figuur 3.20). Dit is een gevolg van efficiencyverbetering en een afnemende bunkerpositie van Nederland: zeeschepen zullen meer brandstoffen elders tanken, vooral daar waar het gaat om synthetische brandstoffen die elders goedkoper kunnen worden geproduceerd, zoals ammoniak (zie ook paragraaf 3.3.3).

Figuur 3.20

Energiegebruik door internationale lucht- en scheepvaart volgens WLO-scenario's

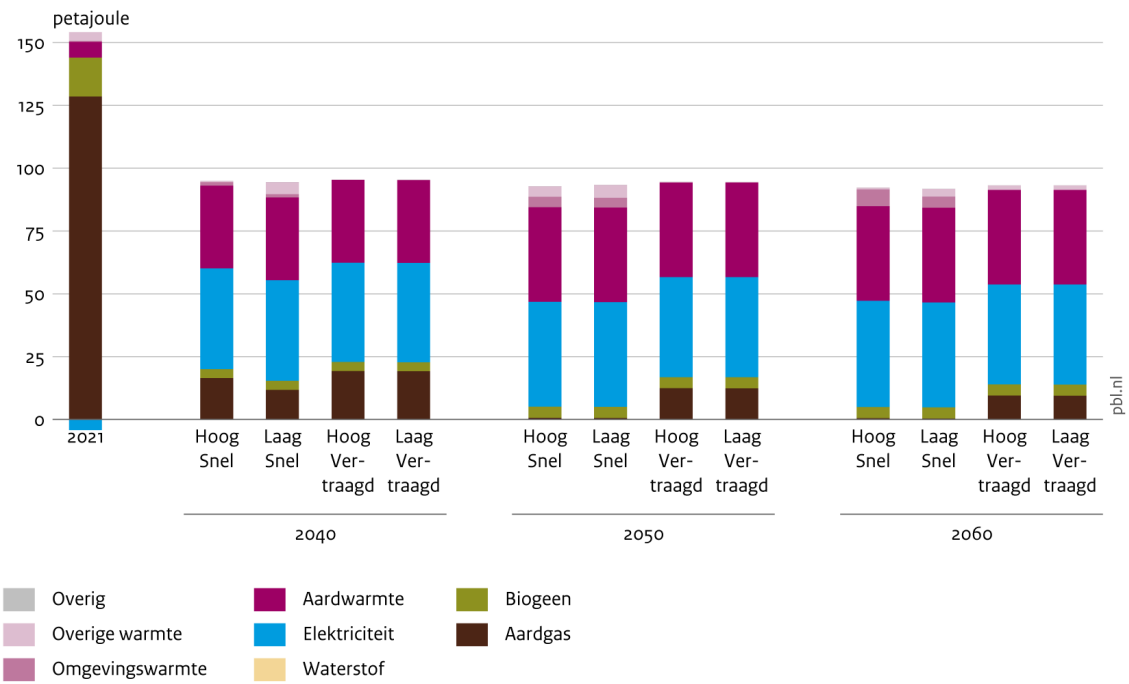


Bron: PBL

Belang geothermie en warmtepompen neemt toe in de glastuinbouw

De energievraag van de landbouw wordt gedomineerd door die van de glastuinbouw. Het energiegebruik van de landbouw bedraagt in 2060 circa 90-95 petajoule in de verschillende scenario's (zie figuur 3.21). In deze vraag wordt hoofdzakelijk voorzien met aardwarmte (geothermie) en elektriciteit (warmtepompen). In de scenario's met een vertraagde klimaattransitie speelt fossiele energie nog een bescheiden rol in 2060. De grote afname van het gebruik van aardgas tussen 2021 en 2040 komt door het nagenoeg wegvallen van de productie van elektriciteit met aardgas in WKK's; die wordt vervangen door elektriciteitsgebruik uit het net. De landbouw voorzag in 2021 nog via WKK's in de eigen vraag naar elektriciteit (en levert per saldo aan het net). Door het wegvallen van conversieverliezen die optreden bij omzetting van aardgas naar elektriciteit in de scenario's neemt ook het totale energiegebruik van de landbouw af.

Figuur 3.21
Energiegebruik door landbouw volgens WLO-scenario's



Bron: PBL

4 Klimaateffecten en adaptatieopgave

In dit hoofdstuk beschrijven we aan de hand van de WLO-scenario's hoe het klimaat in Nederland kan veranderen in de periode tot 2050 en 2100, en welke adaptatieopgaven daaruit volgen. We kijken dus verder dan door dan 2060, omdat de verschillen tussen de scenario's in klimaat effecten en adaptatieopgave zich juist op langere termijn (tot 2100) manifesteren. Hoe deze opgaven kunnen worden aangepakt is onderdeel van een PBL-studie naar het verkennen van toekomstige klimaatrisico's (op basis van PBL 2024c) die begin 2026 zal uitkomen.

4.1 Inleiding

Het klimaat in de wereld verandert onverminderd: eind 2024 lag mondiaal de langjarige jaargemiddelde temperatuur 1,3°C hoger dan 'pre-industrieel': het gemiddelde van de periode 1850-1900 (ECMWF 2025; NASA/GISS 2025). Het jaar 2024 was wereldwijd het warmste jaar sinds het begin van de metingen (KNMI 2025). Ondanks jaarlijkse fluctuaties is de onderliggende trend van de toenemende temperatuur op aarde onmiskenbaar.

Klimaatverandering is ook zichtbaar in Nederland. Zo is Nederland tot op heden bijna twee keer zo sterk opgewarmd als mondiaal gemiddeld (trendmatig in 2023 en 2024 +2,3°C (KNMI 2025)) en is de jaarlijkse neerslag 20 procent gestegen naar 875 millimeter per jaar (beide ten opzichte van de periode 1901-1930). Door deze opwarming is ook de frequentie en intensiteit van klimaatextremen zoals hittestormen, extreme buien, en droogtes (met name in binnenland) toegenomen. Verder heeft de mondiale temperatuurstijging ook geleid tot opwarming van de oceanen en afsmelten van landijs, met een versnelde zeespiegelstijging tot gevolg, ook voor de Nederlandse kust (bijna 3 millimeter per jaar gemiddeld over laatste 30 jaar, Deltares, 2023).

De klimaatverandering en zeespiegelstijging hebben al geleid tot diverse klimaatrisico's, mondiaal (IPCC 2021b), in Europa (EUCRA 2024) en ook in Nederland (PBL 2024c). De Nederlandse samenleving en leefomgeving zijn nog niet op alle fronten aangepast en ingericht op de veranderende klimaatomstandigheden (PBL 2024c). Dit brengt de nodige opgaven met zich mee.

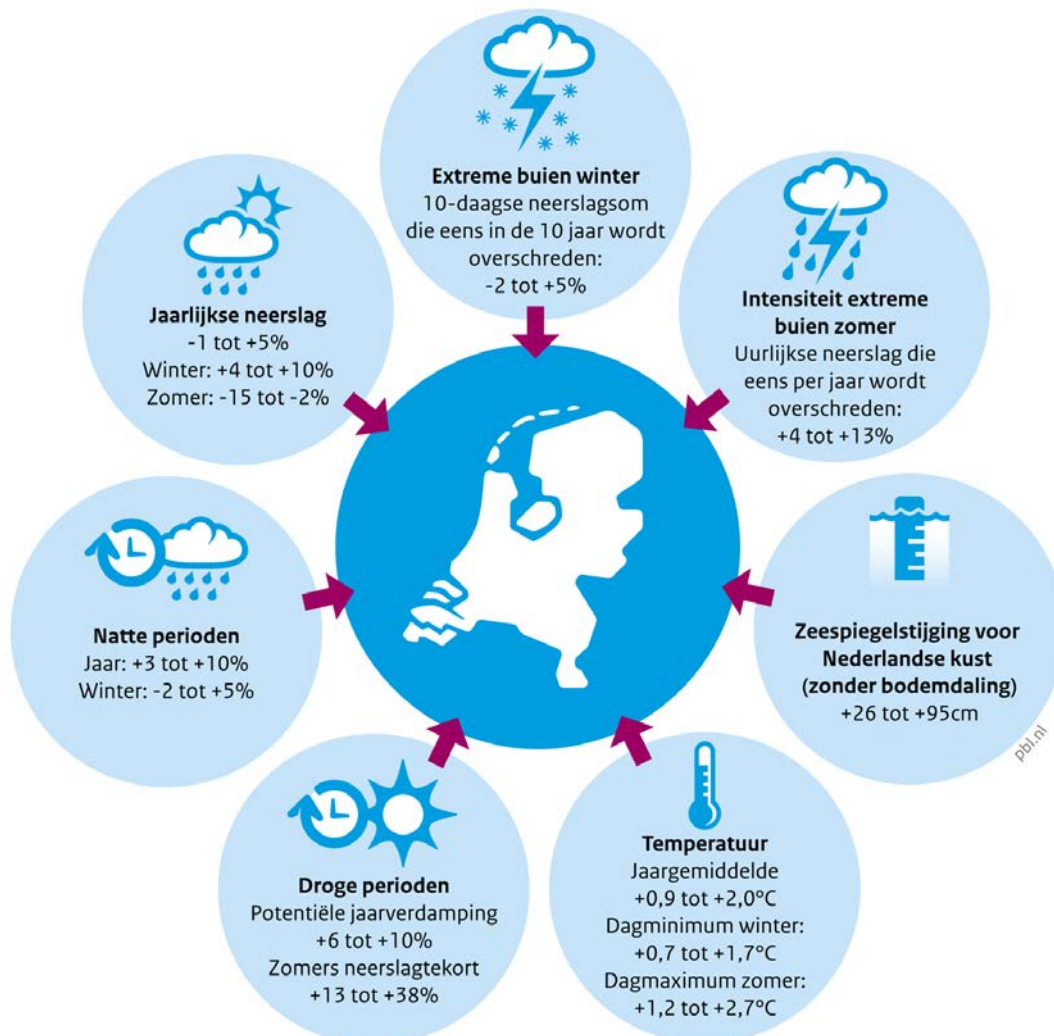
4.2 Mogelijke klimaatontwikkelingen in Nederland

Naar verwachting zullen de veranderingen in het klimaat ook in Nederland de komende eeuw doorzetten, waarbij de mate van die veranderingen nog onzeker is; we geven die daarom weer als bandbreedte (zie figuur 4.1). Om deze bandbreedte te beschrijven is een koppeling gelegd tussen de WLO-scenario's en de KNMI'23-scenario's (KNMI 2023). In de WLO-scenario's met een vertraagde klimaattransitie stijgt de mondiaal gemiddelde temperatuur naar verwachting met +2,0°C [1,6°C tot 2,5°C] rond 2050 ten opzichte van pre-industrieel; vervolgens stijgt die verder naar +2,7°C [2,1°C tot

3,5°C] rond 2100. Dit sluit het best bij het KNMI'23 matige uitstootscenario.⁶ Als uitgegaan wordt van meer klimaatbeleid in de wereld, leidend tot een snelle klimaattransitie, is de verwachting dat de mondiaal gemiddelde temperatuur rond 2050 rond +1,7°C [1,3°C tot 2,2°C] hoger ligt ten opzichte van pre-industrieel; daarna neemt deze nog licht verder toe naar +1,8°C [1,3°C tot 2,4°C] rond 2100, ten opzichte van de periode 1850-1900. Dit sluit het beste aan het KNMI'23 lage uitstootscenario. Het KNMI'23 hoge uitstoot scenario valt buiten de range die in deze WLO is gekozen.⁷

Figuur 4.1

Mogelijke klimaatveranderingen bij WLO-scenario's Snel en Vertraagd rond 2100 ten opzichte van de periode 1991 – 2020



Bron: KNMI'23 laag en midden scenario's

Een andere ontwikkeling van het klimaat in Europa inclusief Nederland is echter ook mogelijk, namelijk als de warme golfstroom verder afzwakt of zelfs stilvalt. Hoewel het stilvallen van de warme

⁶ Door de onzekerheid in het klimaatsysteem en bij afgezwakt klimaatbeleid zullen de opwarming en de daarmee verbonden risico's groter zijn dan beschreven in deze studie.

⁷ Dit hoge KNMI'23-scenario wordt wel meegenomen in de beschrijving van klimaatrisico's, maar past vanwege de aannames en onzekerheden minder in de WLO-studie.

golfstroom in deze eeuw onwaarschijnlijk is, kunnen de gevolgen hiervan heel groot zijn, ook voor Nederland. De mogelijke impact van het stilvallen van de warme golfstroom is beschreven in tekstkader 4.1.

Tekstkader 4.1: Stilvallen van de Warme Golfstroom

De temperatuur in Noordwest-Europa wordt beïnvloed door de Warme Golfstroom in de Atlantische Oceaan. De gemiddelde temperatuur in Noordwest-Europa is daardoor bijvoorbeeld hoger dan in het zuiden van Canada, terwijl deze gebieden op dezelfde breedtegraad liggen. De Warme Golfstroom voert warm water van de Golf van Mexico mee naar het noorden. Ten zuidwesten van Groenland zinkt het water 2 tot 3 kilometer naar beneden en stroomt hierna weer terug naar het zuiden. Deze stroming heet de Atlantische Meridionale 'Overtuning' Circulatie (AMOC).

Door het smelten van steeds meer ijs op Groenland en in het Noordpoolgebied en door een toename van de neerslag in die regio, wordt het water rond Groenland steeds zoeter en daarmee lichter. Het gevolg is dat minder water afzinkt en de AMOC verzwakt. Sinds het midden van de vorige eeuw is de AMOC met zo'n 10-15 procent vertraagd (Van Westen et al. 2024; Petersen et al. 2024; Rahmstorf, 2024). Metingen aan bijvoorbeeld sediment en ijsboorkernen wijzen uit dat de AMOC in de afgelopen duizend jaar niet zo zwak is geweest als nu.

Er zijn signalen dat de oceaancirculatie een kantelpunt nadert

In een Deense studie (Ditlevsen & Ditlevsen 2023), gebaseerd op statistiek, werd geconcludeerd dat de AMOC deze eeuw met wel 80 procent kan afzakken (en – onwaarschijnlijk, maar niet onmogelijk – zelfs helemaal kan stilvallen). Recente studies met klimaatmodellen (Van Westen et al. 2024) concluderen dat bij een mondiale opwarming van 3°C de kans op een sterke afzakking van de AMOC voor 2100 substantieel is (kans rond 50 procent). Bij een opwarming van 2,2°C is deze kans rond de 10 procent.

Oceaancirculatie is al vaker nagenoeg stilgefallen

Dat de AMOC kan afzakken of zelfs stilvallen weten we uit het verre verleden. Zo kwam er na het einde van de laatste ijstijd, zo'n 12.000 jaar geleden, in korte tijd een grote hoeveelheid smeltwater in de Atlantische Oceaan terecht, afkomstig van de smeltende IJskap op Noord-Amerika, waardoor de AMOC nagenoeg tot stilstand kwam (Rahmstorf 2024). Een sterke afkoeling van het klimaat op het noordelijk halfrond gedurende een aantal duizenden jaren was het gevolg. Dit is in het verleden, met name in de periode tussen tien- en honderdduizend jaar geleden, meer dan tien keer gebeurd.

Als de oceaancirculatie stilvalt is het effect op het klimaat groot

Het stilvallen van de AMOC heeft grote gevolgen wereldwijd, ook voor Nederland. Voor de Nederlandse kust kan de zeespiegel met 0,5 tot 1 meter extra stijgen na het geheel stilvallen van de AMOC, ruwweg een eeuw na het passeren van het stilvallen (KNMI 2025). Deze extra stijging wordt veroorzaakt door de verandering in dichtheid van het zeewater ten zuiden van Groenland. Verder krijgt West-Europa bij stilvallen te maken met drogere zomers, strenge winters en lagere temperaturen (-0,5°C tot -1°C per 10 jaar; Westen et al. 2024a). Ter vergelijking, de opwarming in Nederland is zo'n 0,4°C per 10 jaar. Wintertemperaturen dalen ongeveer anderhalf keer zo snel als de jaargemiddelde temperatuur. Dit heeft te maken met oprukkend zee-ijs vanuit het arctisch gebied. Een ander effect van het stilvallen van de AMOC is minder neerslag in de zomer (KNMI 2025). Landbouwopbrengsten kunnen in dat geval met zo'n 30 procent dalen (Ritchie et al. 2020).

Temperatuur neemt naar verwachting vooral toe in de zomer

Naar verwachting zal de jaargemiddelde temperatuur in Nederland verder toenemen, vergelijkbaar met de wereldgemiddelde opwarming. Hierbij zullen vooral de zomers warmer worden. De warmere zomers worden veroorzaakt door meer droogte in de zomer in samenhang met het vaker optreden van oostenwind.

Naar verwachting zal het aantal dagen met extreem hoge temperaturen verder toenemen, meer dan de gemiddelde temperatuur. In De Bilt kan de frequentie van het aantal tropische dagen (dagen met maximaal temperatuur boven de 30°C) toenemen van gemiddeld 5 per jaar in de referentieperiode (gemiddeld over 1991-2020) naar 9 (voor WLO scenario's met een snelle klimaattransitie) tot 16 (WLO-scenario's met een vertraagde klimaattransitie) in 2100. In dat laatste scenario zullen in de stedelijke omgeving temperaturen boven de 40°C rond 2100 elk jaar één of meerdere keren voorkomen.

In de zomer zorgen ook tropische nachten met minimumtemperatuur van 20°C of hoger voor potentiële gezondheidsproblemen. In het huidige klimaat komen dergelijke nachten gemiddeld over Nederland 0,3 keer per zomer voor. In de WLO-scenario's met een vertraagde klimaattransitie zal deze frequentie naar verwachting toenemen tot 1 rond 2050 en doorstijgen tot 4 in 2100. In scenario's met een snelle klimaattransitie zal de frequentie ook na 2050 blijven hangen op gemiddeld 1 keer per jaar. Hierbij wederom de notie dat de temperaturen in een stedelijke omgeving hoger zijn dan in landelijke gebieden, waardoor ook tropische nachten veelvuldiger in stedelijke omgevingen zullen voorkomen dan in landelijke gebieden.

Veranderingen en uitdagingen worden vooral in stedelijke gebieden verwacht. Nu al is de gemiddelde temperatuur in stedelijke gebieden hoger dan de landelijke omgeving (het zogeheten hitte-eilandeffect), met name door de wijze waarop veel steden zijn ingericht. Naar verwachting blijven deze temperatuurverschillen tussen stad en omgeving bestaan, maar verandert het verschil niet verder bij meer opwarming. Wel zullen eventuele negatieve effecten van de extreme temperaturen het eerst en vaker in de steden gevoeld worden, omdat men daar door het hitte-eilandeffect al dichterbij de grenswaarden zit, zoals nachttemperaturen van boven de 20°C, of dagtemperaturen van boven de 30°C. In steden zullen de mogelijke toekomstige uitdagingen daarom eerder en vaker ervaren worden en groter zijn.

Meer neerslag, vooral in winters, en drogere zomers

Naar verwachting zal de jaarlijkse neerslag gemiddeld over Nederland tot 2100 met maximaal 5 procent toenemen ten opzichte van de referentieperiode 1991-2020 voor WLO-scenario's met een vertraagde klimaattransitie, en minder bij WLO-scenario's met een snelle klimaattransitie (daarbij kan de neerslag ook licht dalen in het droge KNMI-scenario). Hierbij zullen de winters natter worden (+4 tot +5 procent in 2050, +4 tot +10 procent in 2100), en de zomers droger (afname van de neerslag tussen 2 en 9 procent in 2050, en tussen 2 en 15 procent in 2100). De bandbreedte wordt bepaald door het verschil tussen de scenario's (WLO-scenario's met een snelle klimaattransitie en die met vertraagde klimaattransitie), maar ook door onzekerheid in hoe de atmosferische circulatie zal veranderen. Met name bij meer oostenwinden wordt er meer droge lucht aangevoerd, en zal er naar verwachting minder neerslag vallen en kan het neerslagtekort in de zomer sterk oplopen (in 2050 +13 tot +25 procent ten opzichte van de 160 millimeter in de referentieperiode 1991-2020, in 2100 +13 tot +38 procent).

Tegelijk met een grotere kans op zomerdroogte is ook de verwachting dat er in de zomer een

grotere kans is op extremere buien, met mogelijk wateroverlast tot gevolg. In alle scenario's zullen (heel) extreme buien niet alleen frequenter optreden maar ook heftiger zijn doordat (i) verdamping kan toenemen door hogere temperaturen; (ii) in een warmer klimaat de atmosfeer meer waterdamp kan bevatten waardoor er meer neerslag valt bij een bui; (iii) bij condensatie van meer waterdamp ook meer warmte/energie vrijkomt, waardoor de lucht sneller kan opstijgen en uitregenen. Daarentegen nemen naar verwachting het aantal lichte buien in de zomer af. Er vindt dus een verschuiving plaats van lichte naar intensere buien, waardoor de opgave groter wordt om met die hoeveelheden water om te gaan (zoals waterafvoer en lokaal opslaan van water).

Zeespiegel stijgt versneld

Net als op de meeste plekken op aarde stijgt ook de zeespiegel langs de Nederlandse kust (zie Keizer 2023; CLO 2023). Lang was er sprake van een vrijwel lineaire toename in de tijd, maar zijn er signalen van een versnelling (rond 3 millimeter per jaar in laatste 30 jaar, Deltares, 2023). Daarnaast draagt bodemdaling langs de Nederlandse kust bij aan de relatieve zeespiegelstijging. Deze bijdrage is onzeker en varieert van plaats tot plaats, maar kan plaatselijk oplopen tot 5 millimeter per jaar (AtlasLeefomgeving 2025).

De zeespiegelstijging zet in de periode tot 2050, 2100 en erna verder door, ook als de uitstoot van broeikasgassen beperkt wordt (KNMI 2023). De verwachting is dat rond 2050 de verschillen tussen de WLO-scenario's nog relatief klein zijn (circa 24 centimeter ten opzichte van het gemiddelde over 1995 - 2014). In de scenario's met een vertraagde klimaattransitie is de verwachte stijging in 2100 gemiddeld circa 59 centimeter [40-95 centimeter], en voor 2150 gemiddeld circa 97 [65-156] centimeter. Een stijging van 1 meter rond 2100 is in dit scenario niet uit te sluiten. Dit kan 50 jaar eerder zijn dan in de scenario's met snelle klimaattransitie. Maar ook in die scenario's blijft de zeespiegel na 2050 doorstijgen; tot circa 44 [26-73] centimeter in 2100 en circa 68 [43-103] centimeter in 2150.

Deze projecties van de toekomstige zeespiegel zijn omgeven met een grote onzekerheid, onder meer omdat veel processen een rol spelen, en de zeespiegel traag reageert op deze processen (KNMI 2023). Hier speelt bijvoorbeeld de onzekerheid van het afsmelten van ijskappen. Voor de snelheid van de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust is vooral de snelheid waarmee de Antarctische ijskap (zuidpool) afsmelt van belang. Als in dit afsmeltproces een extra versnelling zou optreden, dan behoort een zeespiegelstijging van vele meters op lange termijn tot de mogelijkheden.

4.3 Adaptatieopgaven voor Nederland

Naar verwachting zullen klimaatverandering en de daarmee samenhangende risico's in Nederland toenemen tot 2050, 2100 en daarna (KNMI, 2023, Deltares, 2023, PBL, 2024). Met adaptatiebeleid probeert Nederland om de omvang van die risico's voor de bevolking, diverse sectoren en de leefomgeving te beperken en de daarmee samenhangende (maatschappelijke) kosten zo laag mogelijk te houden.

Bij de WLO-scenario's met een vertraagde klimaattransitie zullen de risico's, kosten en adaptatieopgaves sterk toenemen ten opzichte van 2020-2025, ook na 2050. In de scenario met een snelle

klimaattransitie zullen de risico's lager uitkomen, doordat de verandering in klimaat minder groot zijn, met name na 2050 (alleen de zeespiegel blijft daarna in beperkte mate verder stijgen),⁸

Duidelijke verschillen in urgentie

De meest urgente klimaatrisico's worden verwacht voor de gezondheid van burgers (met name door hitte), waterveiligheidsvraagstukken (overstromingen en wateroverlast), en droogte gerelateerd aan waterverdeling (natuur, natuurbranden, erfgoed, gebouwde omgeving/funderingschade, landbouw, drinkwater, scheepvaart en koelwater) (PBL 2024c).

De potentiële risico's van overstroming vanuit zee, grote rivieren en meren zullen toenemen. Het kan dan gaan om mogelijk duizenden getroffen mensen, vele miljarden euro's aan economische schade en onomkeerbare schade aan natuur en milieu (DNB 2023; Deltares, 2024; PBL 2024). Uitgaande van de WLO-scenario's met een vertraagde klimaattransitie zijn grote toenames van alle risico's te verwachten. Zo is in deze scenario's een zeespiegelstijging van 1 meter rond 2100 niet uit te sluiten, zal de frequentie van hoge/maatgevende rivierafvoeren van zowel Rijn als Maas sterk toenemen (bijvoorbeeld 11.000 kubieke meter per seconde in de Rijn bij Lobith van nu eens in 30 jaar naar eens in 10 jaar) rond 2050, en kunnen de maximale afvoeren van zowel Rijn als Maas toenemen met circa 30 procent (KNMI 2023; Deltares 2024, 2024b).

In de scenario's met veel beleid en een snelle klimaattransitie zullen de risico's naar verwachting beperkt toenemen. De extreme afvoeren van de Rijn zullen bijvoorbeeld ook richting 2100 ongeveer hetzelfde blijven, en die van de Maas zullen maximaal 4 procent stijgen (Deltares 2024).

Wel zal dankzij het huidige adaptatiebeleid en de structurele investeringen in waterveiligheid de kans op een overstroming klein blijven. Sinds 2017 gelden er nieuwe normen voor de waterveiligheid, die uiterlijk in 2050 moeten zijn gehaald. De voortgang van de dijkversterking verloopt echter trager dan van tevoren is ingeschat (Deltares 2021; RLI 2024). De kustveiligheid hangt vooral samen met de mate van zeespiegelstijging, en vormt vooral op langere termijn (na 2050) een uitdaging.

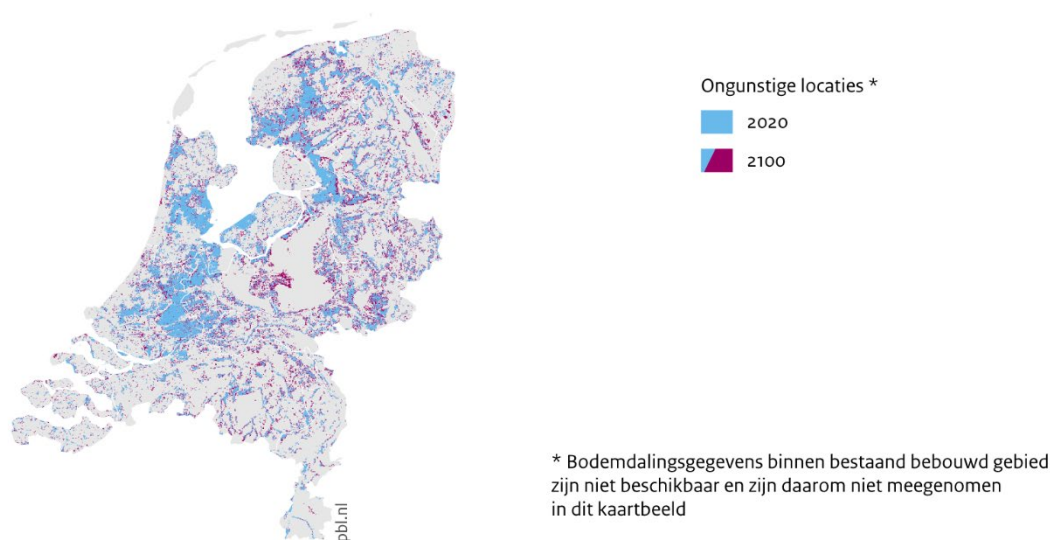
Klimaatproblemen in steden anders dan in het landelijk gebied

Stedelijke gebieden hebben nu al te maken met veelvoud aan klimaatrisico's, die veelal anders zijn dan in het landelijke gebied. Zo hebben steden meer te maken met hittestress – het zogeheten hitte-eiland-effect (KNMI 2023) – en daaruit voortvloeiende gezondheidsrisico's. Ook kunnen door klimaatverandering de schadekosten flink toenemen. Woningen en utiliteitsgebouwen in met name laag-Nederland hebben door toegenomen droogte bijvoorbeeld meer te maken met paalrot en scheefzakken/ontzetting van ondiepe funderingen. Verdergaande klimaatverandering kan ertoe leiden dat tot 2050 de schadekosten toenemen met 3 tot 15 miljard euro, vooral door toenemende droogte (RLI 2024). Overigens betreft dit veelal eenmalige kosten. Klimaatverandering kan er ook toe leiden dat er minder locaties geschikt zijn voor nieuwbouw. Door risico's van wateroverlast, potentieel regionale overstroming en bodemdaling neemt het voor woningbouw ongeschikte oppervlak toe van 470.000 hectare in 2025 naar 690.000 hectare in 2100 (zie figuur 4.2).

⁸ Hierbij de opmerking dat het meer extreme klimaatscenario van KNMI'23 buiten beschouwing is gelaten, wat betekent dat risico's, kosten en opgave ook hoger kunnen uitvallen dan hier geschetst.

Figuur 4.2

Verwachte ongunstige locaties voor bebouwing vanwege waterhuishouding en bodemdaling



Bron: Deltares 2021

In het stedelijk gebied zijn adaptatiemaatregelen nodig om die hittestress, droogteschade en wateroverlast te temperen. Het gaat dan om aanpassingen in en rond de woning (meer schaduw, minder instraling), en aanpassingen in de inrichting van buurten en wijken (bijvoorbeeld meer groen). Ook kunnen technische en ruimtelijke maatregelen in en rondom steden helpen de klimaatbestendigheid te vergroten, zoals het treffen van voorzieningen voor wateropslag. Ook zijn aanpassingen in gedrag (bijvoorbeeld meer drinken, minder naar buiten op hele warme dagen) een optie om de kwetsbaarheid van mensen te verlagen.

In het landelijk gebied zal met name de beschikbaarheid van zoetwater een probleem worden; in sommige periodes is er te veel en in andere juist te weinig. Dit heeft consequenties voor bijvoorbeeld landbouw, natuur, drinkwater en cultureel erfgoed. Deze opgave is al op de korte termijn urgent. Er zal bijvoorbeeld water nodig zijn voor vernatting van veen, om verdere afbraak van veen te beperken, of om toenemende verzilting tegen te gaan. Tegelijk kunnen verlaagde grondwaterstanden als gevolg van het frequenter voorkomen van droge periodes tot onomkeerbare schade leiden aan 'nat' archeologisch erfgoed (PBL 2024c), en neemt de kans op grootschalige, intense en zelfs onbeheersbare natuurbranden toe (Stoof et al. 2024). Dat laatste kan leiden tot bijvoorbeeld evacuaties van woningen en campings. Door droogte en gebrek aan zoetwater in combinatie met temperatuurstijging kan in het landelijk gebied ook de landbouw (inclusief hittestress bij vee) en de natuur, en de daarmee samenhangende ecosystemendiensten, meer onder druk komen te staan.

De verwachte extra opgaven in het landelijk gebied vragen om aanvullende maatregelen waarbij gezocht moet worden naar synergie en afstemming tussen sectoren. Zo zullen naar verwachting de opgaven voor waterbeschikbaarheid niet volledig zijn op te lossen binnen het watersysteem zelf, maar zal er ook gekeken moeten worden naar bijvoorbeeld het beperken van de watervraag, functieveranderingen, beheer of herinrichtingen.

In de WLO-scenario's met een vertraagde klimaattransitie blijven naar verwachting de wateropgaven in heel Nederland steeds verder toenemen, in de WLO-scenario's met een snelle klimaattransitie is er na 2050 op sommige plekken in Nederland sprake van een stabilisatie, en in andere zoals de kustregio's (in verband met verdere zeespiegelstijging), een beperkte toename. Dat maakt het in de

scenario's Hoog Snel en Laag Snel gemakkelijker om bergings- en afvoercapaciteit, dijken, sluizen en stuwen te kunnen blijven aanpassen.

Totale impact kan groter zijn dan de som van afzonderlijke risico's

In het voorafgaande zijn de klimaatrisico's apart besproken. Maar deze risico's zullen naar verwachting elkaar versterken, waardoor de gezamenlijke impact groter is dan de som van afzonderlijke risico's. Dit heeft te maken met samenhang: in impact (zogenoemde cascade-effecten, onder andere door sterke verwevenheid en intensief gebruik van netwerken), in tijd (gelijktijdig verschillende klimaatrisico's) en plaats (bijvoorbeeld natuurbranden op meerdere plekken, of droogte in grote delen van Europa).

5 Hoe zijn de scenario's in de praktijk te gebruiken?

5.1 Inleiding

In de praktijk van maatschappelijke kosten-batenanalyses (MKBA's) en andere ex-ante beleidsevaluaties worden vaak WLO-scenario's gebruikt om toekomstige ontwikkelingen en de onzekerheid daarin in kaart te brengen (Romijn en Renes 2013; Rijksoverheid 2020; Rijkswaterstaat 2018). Deze scenario's bieden elk een 'basispad' voor de autonome ontwikkelingen ten aanzien van technologie, economie, demografie en klimaatbeleid. Ex-ante beleidsanalyses, zoals een MKBA, bepalen de effecten van een maatregel ten opzichte van deze basispaden.

In dit hoofdstuk gaan we in op de CO₂-prijzen, die zijn afgeleid van de vier WLO 2025-scenario's, waarmee in MKBA's de uitstoot van broeikasgassen kan worden gewaardeerd. Dit hoofdstuk is een verkorte weergave van CPB (2025); gebruikers van CO₂-prijzen wordt verwezen naar CPB (2025) voor een uitgebreidere toelichting.

De zogeheten efficiënte CO₂-prijzen geven binnen een WLO 2025-scenario de waardering voor broeikasgassen in verschillende jaren. Conceptueel geven de CO₂-prijzen de waardering (schaduw-prijzen) weer van de doelstelling om broeikasgassen terug te dringen conform het betreffende WLO 2025-scenario.

Voor Nederlandse beleidsevaluaties geldt dat voor alle broeikasgasuitstoot, ongeacht waar in de wereld die plaatsvindt, deze CO₂-prijzen gebruikt dienen te worden bij gebruik van de WLO-scenario's. Een MKBA van een maatregel waarbij gebruik wordt gemaakt van de efficiënte CO₂-prijzen voor het waarderen van broeikasgassen geeft inzicht of die maatregel efficiënt bijdraagt aan het halen van de emissiereductiedoelstelling zoals beschreven in het beschouwde WLO 2025-scenario. De waarde van de efficiënte CO₂-prijzen is gebaseerd op de zogeheten preventiekostenbenadering, die een weergave is van de (marginale) kosten om broeikasgassen te reduceren tot een bepaald niveau. De keuze voor preventiekosten hangt primair samen met de wijze waarop de WLO 2025-scenario's zijn geconstrueerd. De scenario's variëren immers in de mate van emissiereductie waardoor ook de CO₂-waardering hiermee dient mee te bewegen. Preventiekosten vormen de basis voor de te hanteren CO₂-prijzen in meerdere landen en ook in de vorige WLO-scenario's (Aalbers et al. 2016). De efficiënte CO₂-prijzen geven de prijzen weer die zouden gelden als alleen gebruik wordt gemaakt van beprijzing en er geen sprake is van ander beleid.

5.2 Efficiënte prijzen: definitie en interpretatie

De zogeheten efficiënte CO₂-prijzen geven een benchmark voor het waarderen van CO₂-effecten van maatregelen in MKBA's bij gebruik van de WLO 2025-scenario's. Om de gestelde transitie en klimaatdoelen in elk WLO 2025-scenario te halen is er wereldwijd beleid nodig. Binnen een scenario wordt ervan uitgegaan dat dit beleid efficiënt is zowel in de EU als elders in de wereld. Dat wil zeggen dat klimaatbeleid zo is vormgegeven dat emissiereductiedoelen tegen zo laag mogelijke (maatschappelijke) kosten worden gehaald. De efficiënte CO₂-prijzen geven het prijspad (prijs in elk jaar)

weer dat nodig is om binnen een WLO-scenario tegen de laagst mogelijke kosten het emissiereductiedoel te realiseren. Een MKBA van een klimaatmaatregel waarbij gebruik wordt gemaakt van de efficiënte CO₂-prijzen voor het waarderen van broeikasgassen, geeft inzicht of die maatregel op een bepaald tijdstip efficiënt bijdraagt aan het halen van de emissiereductiedoelstelling van het beschouwde WLO 2025-scenario.

Er bestaat aanzienlijke onzekerheid rondom de hoogte van de efficiënte CO₂-prijzen. De hoogte van de CO₂-prijzen in de verschillende scenario's is afhankelijk van vele noodzakelijke aannames. Genoemd kunnen worden: economische en demografische ontwikkelingen, de mogelijkheden rondom internationale handel en samenwerking, de kosten van technieken om emissies van broeikasgassen te verminderen, het potentieel van die technieken en hulpbronnen (bijvoorbeeld bio-grondstoffen) en de mate van technologische vooruitgang die zowel de kostenreductie van bestaande broeikasgasreductietechnieken bepaalt alsmede het ontstaan van nieuwe technieken.

Overwegingen voor het toepassen van de WLO 2025-scenario's in MKBA's

In het WLO-hoofdrapport wordt geadviseerd om bij analyses, waarin rekening wordt gehouden met toekomstonzekerheid, in beginsel alle vier de scenario's toe te passen (tenzij scenario's niet-onderscheidend van elkaar zijn in de relevante uitkomstvariabelen). Als een onderzoeker door gebrek aan tijd of om andere niet-inhoudelijke redenen maar twee scenario's wil gebruiken is het advies om in ieder geval een scenario met relatieve lage groei en een met relatieve hoge economische groei te kiezen en om daarbij ook te variëren in de snelheid van de internationale klimaattransitie, zodanig dat de grootste bandbreedte resulteert. Wat de efficiënte CO₂-prijzen betreft, betekent dit toepassing van scenario's Laag Snel en Hoog Vertraagd, met respectievelijk de hoogste en laagste CO₂-prijzen.⁹

De efficiënte CO₂-prijzen zijn toepasbaar zolang de beschikbaarheid van CO₂-reducerende technologieën en de kosten daarvan in de toekomst niet substantieel wijzigen ten opzichte van wat er nu is aangenomen

In het hoofdrapport van de WLO 2025 staat dat ontwikkelingen die afwijken van de uitgangspunten van de scenario's van de WLO 2025 aanleiding kunnen geven om actualisaties te overwegen. Belangrijk bij de efficiënte CO₂-prijzen is dat de prijzen geldig zijn binnen de aannames en broeikasgasreductiedoelstellingen die horen bij de WLO 2025-scenario's. Een voorbeeld van een mogelijke wijziging is het introduceren van aanzienlijk strenger luchtkwaliteitsbeleid als gevolg waarvan ook emissies van broeikasgassen verminderen. Dergelijk beleid kan een effect hebben op de hoogte van de efficiënte CO₂-prijzen. Ook als de kosten van maatregelen om emissies van broeikasgassen te verminderen en die grootschalig kunnen worden geïmplementeerd, aanzienlijk anders uitvallen dan in de WLO verondersteld, kan dit invloed hebben op de efficiënte CO₂-prijzen. In dergelijke gevallen dienen de gevolgen voor de WLO-scenario's van de betreffende ontwikkelingen te worden onderzocht. Er kan op basis daarvan worden overwogen om nieuwe efficiënte CO₂-prijzen te bepalen.

⁹ Indien het nadrukkelijk de bedoeling voor de MKBA is om de beoordeling uit te voeren gericht op het realiseren van het huidige klimaatbeleid kan ook worden volstaan met het variëren van de economisch as in de snel beleidsscenario's.

5.3 Efficiënte CO₂-prijzen voor de WLO 2025

De efficiënte CO₂-prijzen geven het prijspad weer dat nodig is om in een WLO-scenario tegen de laagst mogelijke (marginale) kosten de broeikasgasreductie te realiseren. Een MKBA van een klimaatmaatregel waarbij gebruik wordt gemaakt van de efficiënte CO₂-prijzen voor het waarderen van broeikasgassen, geeft inzicht of die maatregel op een bepaald tijdstip efficiënt bijdraagt aan het halen van de emissiereductiedoelstelling van het beschouwde WLO 2025-scenario.

De efficiënte CO₂-prijzen voor het waarderen van emissies van broeikasgassen voor de verschillende WLO 2025-scenario's in MKBA's staan in tabel 5.1. De prijspaden voor de WLO 2025-scenario's tot en met 2100 zijn weergegeven in figuur 5.1. Een tabel met prijzen voor meerdere steekjaren voor de periode 2025-2100 kan worden gevonden in bijlage 4.

Bij het afleiden van het prijspad is gebruik gemaakt van de West-Europese CO₂-prijzen uit het IMAGE-model (zie hoofdstuk 2). Die uitkomsten zijn gebruikt om met behulp van de Hotelling¹⁰-regel en de huidige Nederlandse standaardwaarde van de discontovoet voor toepassing in MKBA's van 2,25 procent, prijspaden te maken van CO₂-prijzen van 2025 tot en met 2100.

Tabel 5.1

Efficiënte CO₂-prijzen voor de WLO 2025-scenario's; in euro per ton CO₂e, prijspeil 2021^{a)}

Scenario	2025	2040	2050	2060
Hoog Snel	132	184	230	287
Laag Snel	310	432	540	675
Hoog Vertraagd	107	149	186	232
Laag Vertraagd	116	162	202	253

a) Prijzen zijn exclusief productgebonden belastingen en subsidies waaronder btw. Zie Zwaneveld (2011) voor nadere uitleg.

De hierboven gepresenteerde CO₂-prijzen kunnen ook gebruikt worden als deze emissie(reductie) buiten Nederland of Europa plaatsvindt. Voor het klimaat maakt het immers niet uit waar CO₂-reductie plaatsvindt, derhalve maakt het voor de waardering van broeikasgasemissie(reductie)s ook niet uit waar deze uitstoot plaatsvindt. Praktisch heeft deze aanbeveling ook het voordeel dat er geen verschillende prijspaden voor zowel de EU als de rest van de wereld voor efficiënte CO₂-prijzen hoeven te worden gehanteerd en dat in MKBA's ook niet hoeft te worden nagegaan of bepaalde broeikasgassen nu betrekking hebben op de Europese doelen dan wel de doelen in de rest van de wereld.

5.4 Omgang met luchtkwaliteit

Het voeren van luchtkwaliteitsbeleid kan effect hebben op de benodigde CO₂-prijzen behorend bij klimaatdoelen. Dit kan spelen wanneer er maatregelen worden genomen ten behoeve van een verbetering van de luchtkwaliteit die ook CO₂-uitstoot reduceren. Als dergelijke maatregelen vanuit een CO₂-perspectief relatief kostbaar waren, maar vanwege eisen aan de luchtkwaliteit toch al

¹⁰ zie voor meer informatie hierover CPB (2025).

genomen worden onafhankelijk van CO₂-reductiedoelen, hoeven er minder ‘overige’ maatregelen getroffen te worden om CO₂-uitstoot te reduceren. Omdat de maatregelen in oplopende volgorde van CO₂-kosten worden genomen, leidt dat ertoe dat de efficiënte CO₂-prijs lager kan uitvallen. Deze situatie is echter alleen relevant onder bepaalde omstandigheden die niet van toepassing zijn in de opzet van de WLO 2025. We verduidelijken dit in deze paragraaf mede omdat luchtkwaliteitsbeleid in de vorige WLO (Aalbers et al. 2016) een groot effect had op de hoogte van de efficiënte CO₂-prijzen.

Luchtvervuiling wordt in de EU op drie verschillende manieren gereguleerd: via emissie-, concentratie- en depositienormen

Emissienormen betreffen maxima ten aanzien van de uitstoot bij individuele processen of voor een land als geheel. Concentratienormen betreffen eisen ten aanzien van de luchtkwaliteit in een gebied. Dit kan een gemiddelde waarde over een bepaalde periode zijn, of een maximaal aantal dagen waarop een concentratieniveau niet mag worden overschreden. Depositie betreft het neerdalen van stoffen op de grond en het opbouwen van deze stoffen in de bodem en (grond)water. We verduidelijken dit in deze paragraaf. De huidige Europese emissie-, concentratie- en depositiedoelen zijn gericht op het jaar 2030 en daarna.

Tekstkader 5.1: EU-emissiereductieverplichtingen

De EU heeft in 2016 emissiereductieverplichtingen voor de stoffen NO_x, SO₂, NH₃, PM_{2.5} en NMVOS (EU 2016) vastgesteld. In tabel 5.2 staan de reductieverplichtingen voor Nederland en voor de EU als geheel. Het gaat om emissiereducties ten opzichte van de emissies in het jaar 2005. Er zijn twee verplichtingen: een verplichting voor de periode tussen 2020 tot en met 2029 en een verplichting vanaf 2030. In tabel 5.2 staan ook de verwachte emissiereducties voor 2030 volgens de meest recente ramingen (PBL & RIVM 2025). Hieruit volgt de conclusie dat voor de meeste stoffen de emissiedoelstellingen worden gehaald. Zoals uit tabel 5.2 valt af te lezen heeft Nederland een relatief kleine opgave voor NMVOS en SO₂ in vergelijking met de EU28. Nederland heeft voor 2005 hier al veel in gedaan. De emissiereductieverplichtingen voor NO_x, NH₃, PM_{2.5} volgen de gemiddelde reductieafspraken in de EU28.

Tabel 5.2
Emissiereductieverplichting ten opzichte van 2005 voor Nederland en de EU28 in de periode voor 2030, en voor de periode vanaf 2030 voor SO₂, NO_x, NH₃, PM_{2.5} en NMVOS

Component	Nederland		EU28		Verwachte reductie NL
	Voor 2030	Vanaf 2030	Voor 2030	Vanaf 2030	2030
SO ₂	28%	53%	59%	79%	71%
NO _x	45%	61%	42%	63%	70%
NH ₃	13%	21%	6%	19%	35%
PM _{2.5} ^{a)}	37%	45%	22%	49%	57%
NMVOS ^{b)}	-8%	15%	28%	40%	25%

a) PM= fijn stof, direct uit bronnen geëmitteerd
b) NMVOS=Niet Methaan Vluchtige Organische Stoffen
Bron: PBL & RIVM (2025)

Voor het jaar 2050 is er wel een ambitieuze luchtkwaliteitsvisie (EC 2024) geformuleerd (zie tekstkader 5.2). De ambitie (ook wel visie genaamd) is om in 2050 de effecten van alle

luchtverontreiniging tot nul terug te brengen. Deze visie is echter noch als wettelijke doelstelling geformuleerd noch worden er maatregelen voorgesteld om deze ambitie/visie na te streven. De visie wordt gepresenteerd als een kompas voor mogelijke toekomstige EU-maatregelen. Omdat de WLO met uitzondering van klimaatbeleid en enkele exercities in het cahier Mobiliteit in de basis uitgaat van bestaand beleid en er op dit moment geen concreet nieuw luchtkwaliteitsbeleid is geformuleerd, gaan we er in de WLO van uit dat de bestaande doelen niet worden aangescherpt. WLO-uitgangspunt is dat de bestaande luchtkwaliteitsdoelen ook in de periode tot 2060 worden gehaald. Voor de externe schadebepaling van luchtemissies in MBKA dient de schade door luchtemissies te worden gewaardeerd tegen de schaduw prijzen zoals beschreven in het handboek schaduw prijzen van CE Delft (CE Delft 2023a). Indien er op termijn significant additioneel luchtkwaliteitsbeleid wordt geformuleerd wordt het aanbevolen om dan tevens een aanvullende studie te doen om het effect op de voorgestelde CO₂-prijzen te bepalen.

Tekstkader 5.2: EU-doelstelling voor luchtkwaliteitsnormen voor de gezondheid van de mens

2030-afspraken

Op 23 oktober 2024 heeft de EU nieuwe luchtkwaliteitsnormen voor de gezondheid van de mens aangenomen (EU 2024), zie tabel 5.3. Volgens de impactanalyse van de EC zijn deze doelen grotendeels haalbaar met het huidige beleid (EC 2022; Maas et al. 2023). Ook het RIVM (Maas et al. 2023) heeft gekeken naar gevolgen van dit beleid voor Nederland. Hieruit bleek dat in 98 procent van Nederland de nieuwe normen vanaf 2030 met bestaande beleidsmaatregelen worden gehaald. Op enkele plekken zouden extra maatregelen nodig zijn. Gegeven de huidige inzichten is de verwachting dat die maatregelen veelal dermate specifiek en lokaal zijn, dat er geen invloed op de CO₂-prijs is.

2050-afspraken

In 2024 heeft de Europese Commissie doelen geformuleerd om in 2050 geen effecten van luchtverontreiniging meer te hebben (EC 2024b). Een mogelijk invulling hiervoor kan de WHO bieden (WHO 2021). De WHO heeft luchtkwaliteitsdoelstellingen geformuleerd waarbij de effecten van luchtverontreiniging op de gezondheid verwaarloosbaar zouden worden, zie tabel 5.3. Zoals hierboven is vermeld worden de 2030-doelen gehaald met het huidige beleid, de strengere 2050o ambitie vergt aanvullend luchtbeleid. Deze ambitie is echter nog niet omgezet in concrete maatregelen en daarom niet meegenomen in de WLO-scenario's.

Verplichtingen voor het beschermen van de natuur in Nederland

De afgesproken emissiedoelen voor met name NH₃ en NO_x voor 2030 blijken onvoldoende om de afgesproken doelen voor stikstofdepositie in de Natura 2000-gebieden te realiseren. In de voorbereiding voor deze publicatie was de Rijksoverheid bezig met een herijking van het beleid om deze doelen te realiseren, waarbij het nog niet duidelijk is of dat beleid vooral volumemaatregelen zal betreffen (waarbij tevens de broeikasgasemissies omlaag gaan) of juist technologiemaatregelen (met minder effect op de broeikasgasemissies). Voor de WLO-scenario's 2025 betekent dit dat er geen aanvullend beleid is verondersteld (zie hoofdstuk 3 voor aanvullende informatie hierover) voor het realiseren van de natuurdoelstellingen. Toekomstig beleid rond depositienormen kan een effect hebben op de uitstoot van broeikasgassen. Daarmee kan dit beleid ook effect hebben op de efficiënte CO₂-prijs. Als de resterende broeikasgasemissies uit de landbouw op EU-niveau kunnen worden gecompenseerd door negatieve emissies in de natuur in Europa (bijvoorbeeld extra aanplanten van bossen; zie paragraaf 3.3.4), zal toekomstig beleid rond depositienormen naar verwachting geen grote gevolgen hebben voor de CO₂-prijzen.

Tabel 5.3

Maximale jaargemiddelde concentraties voor PM_{2,5}, PM₁₀ en NO₂ en de maximale 8-uurs richtwaarde voor ozon, in microgram per kubieke meter (µg/m³) bij de huidige EU-grenswaarde en de WHO-advieswaarde voor het jaar 2050 (zoals voorgesteld door de WHO in 2021)

Component	Huidige EU grenswaarde	EU grenswaarde 2030	WHO advieswaarde (~2050)	Aanvullende reductie (%) tov 2030 voor 2050
PM _{2,5a})	25	10	5	50%
PM ₁₀ *	40	20	15	25%
NO ₂	40	20	10	50%
Ozon (8u)	120	120	100	17%

a) PM (Particulate Matter) is fijn stof. Fijn stof bestaat zowel uit direct geëmitteerd fijn stof (primair fijn stof), als uit in de lucht gevormde deeltjes, waarbij via atmosferische processen de gassen NH₃, SO₂, NO_x en NMVOS worden omgezet in fijn stof (secundair fijn stof). Fijn stof bestaat uit deeltjes van verschillende grootte. Het getal achter PM geeft aan wat de maximale diameter (in micrometer) is van de deeltjes waarvoor de norm van toepassing is. De verwachting is dat bij het realiseren van de emissiereductiedoelstellingen vanaf 2030 (PBL & RIVM 2025) de EU-grenswaarden vrijwel overal in Nederland kunnen worden gerealiseerd en er dus geen extra luchtkwaliteitsbeleid na 2030 is vereist dat de CO₂-prijzen kan beïnvloeden.

Waarderen effecten op emissies luchtverontreinigende stoffen

Bij het gebruik van de efficiënte CO₂-prijzen in beleidsanalyse, dienen de effecten van meer of minder luchtverontreiniging separaat te worden gewaardeerd. Voor het waarderen van luchtverontreiniging verwijzen we naar het Handboek Milieuprijzen van CE Delft (2023a).

5.5 Voorgeschreven CO₂-prijzen voor ex-ante beleidsanalyses in andere landen

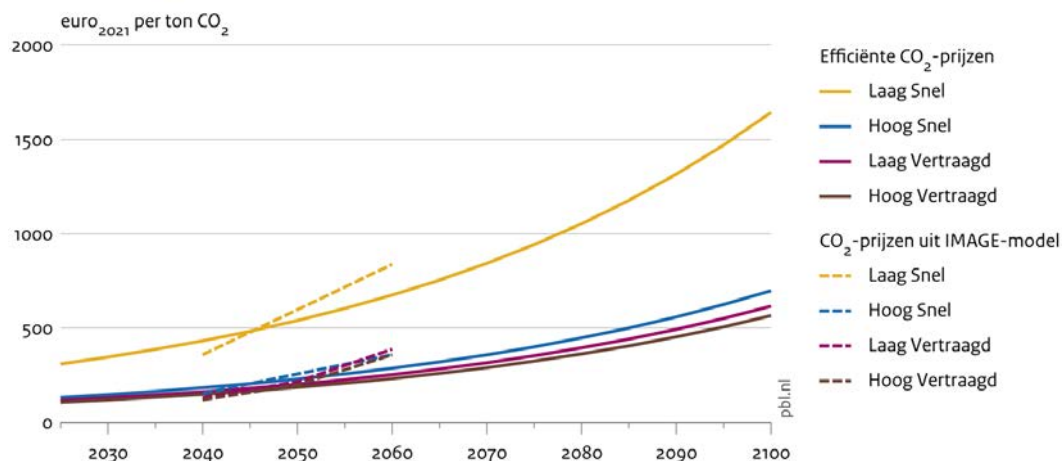
Andere landen gebruiken uiteenlopende CO₂-prijzen voor ex-ante beleidsanalyses (waaronder MKBA's). De CO₂-prijs wordt in de meeste landen gebaseerd op de preventiekosten van CO₂-reductie consistent met een opwarming van 1,5°C tot 2°C; schattingen van de bandbreedte lopen van minimaal 73 tot maximaal 896 euro in 2050. Vrijwel alle landen in de EU met een preventiekostenbenadering benoemen dat zij de preventiekosten volledig of mede baseren op een doelstelling van klimaatneutraliteit in 2050, consistent met een 1,5°C-doelstelling. Het IPCC presenteert in zijn meest recente modelanalyses (IPCC 2022) preventiekosten voor uiteenlopende reductiedoelstellingen. De CO₂-prijzen die horen bij een 2°C-scenario (kans > 67 procent om onder de 2°C opwarming te blijven in 2100; aangeduid door IPCC als 'C3'), komen ongeveer overeen met die van de WLO 2025-scenario's met een snelle klimaattransitie. De CO₂-prijzen uit IPCC (2022) zijn in het jaar 2030 lager dan in de WLO 2025, maar hoger na 2050 door een hogere jaarlijkse prijsstijging. De IPCC-bandbreedte bij 2°C van 59 tot 588 euro voor het jaar 2050 komt redelijk overeen met de bandbreedte uit de WLO 2025-scenario's. De WLO 2025-prijzen in alle scenario's zijn in de gehele periode tot 2050 globaal in lijn met de CO₂-prijzen die in MKBA's in andere landen bij vergelijkbare klimaatambities worden voorgeschreven.

5.6 Afwegingen bij het bepalen van de efficiënte CO₂-prijzen in de WLO 2025

De CO₂-prijzen zijn gebaseerd op de CO₂-reductiekosten uit de periode 2040-2060 uit IMAGE. De IMAGE-resultaten voor de periode 2040-2060 geven hierbij een globale indruk van het verloop van deze kosten in de loop der tijd – en vooral – de onderlinge verhoudingen tussen de scenario's in deze periode voor West-Europa (zie figuur 5.1). Het kostenverloop zoals bepaald met het IMAGE-model is gebaseerd op beschikbare (technologie)opties op een bepaald tijdstip en de optimale inzet ervan in een bepaalde tijdsperiode.¹¹ De optimale inzet van technologische opties wordt in IMAGE en de praktijk mede bepaald door noodzakelijke investeringen in sectorspecifieke kennis en kunde om broeikasgassen te reduceren alsmede de snelheid waarmee dit kan worden op- of afgeschaald (zie bijvoorbeeld Vogt-Schilb et al. 2018). Daardoor kunnen de jaarlijkse marginale preventiekosten uit dergelijke modellen afwijken van de efficiënte CO₂-prijzen, die zijn bepaald door gebruik te maken van de Hotelling-regel. Deze regel geeft een op economische theorie gebaseerde jaarlijkse stijging van de CO₂-prijs die ook als er sectorspecifieke kennis en kunde nodig is, een tijdsconsistent prijspad oplevert voor investeringen in duurzame technologie (zie Vogt-Schilb et al. 2018).

Het prijspad is zodanig gekozen dat de gemiddelde prijsprikkel die producenten ervaren in de drie steekjaren (2040, 2050 en 2060) gelijk is bij zowel de efficiënte CO₂-prijzen op basis van de Hotelling-regel als ook de oorspronkelijke prijzen uit IMAGE; zie CPB (2025) voor verdere toelichting over het construeren van het tijdspad.

Figuur 5.1
Efficiënte CO₂-prijzen volgens WLO-scenario's



Bron: PBL, CPB

Prijzen zijn exclusief productgebonden belastingen en subsidies, waaronder btw. Zie Zwaneveld (2011) voor nadere uitleg.

¹¹ Zo kan het voorkomen dat als een technologie steeds vaker wordt ingezet, en door massaproductie goedkoper wordt, de prijs in de loop der tijd, zelfs bij een toenemende emissiereductieopgave, gaat dalen.

Referenties

- Aalbers R, G Renes & G Romijn (2016), WLO-scenario's en de waardering van CO₂-uitstoot in MKBA's. CPB/PBL Achtergronddocument 23 november 2016. [Link](#).
- AtlasLeefomgeving (2025), <https://www.atlasleefomgeving.nl/nieuws/nieuwe-kaart-laat-bodemdaling-in-nederland-zien>
- Aydin E, N Kok & D Brounen (2017), Energy efficiency and household behavior: the rebound effect in the residential sector, RAND Journal of Economics 48, pp. 749–782. <https://doi.org/10.1111/1756-2171.12190>
- CBS (2024a), Ruim tweehonderd jaar energiegebruik in Nederland, Transitie, afhankelijkheid en besparing van 1800 tot 2023. [Ruim tweehonderd jaar energiegebruik in Nederland | CBS](#)
- CBS (2024b), Hernieuwbare energie in Nederland 2023. <https://www.cbs.nl/nl-nl/longread/rapportages/2024/hernieuwbare-energie-in-nederland-2023>
- CBS (2025), Statline, Energiebalans; aanbod, omzetting en verbruik. <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/83140NED/table?ts=1734961022788>
- CE Delft (2023a), Handboek Milieuprijzen 2023. Versie 1.0. Februari 2023. [Link](#).
- CE Delft (2023b), Werkwijzer Nationale Kosten – Uitgangspunten bij berekeningen van het PBL, Delft, CE Delft. [Werkwijzer nationale kosten](#)
- CE Delft (2024), Impactanalyse Klimaatplan 2025-2035, Delft: CE Delft. [CE Delft 240285_Impactanalyse Klimaatplan 2025-2035_def-1.pdf](#)
- Commissie voor de milieueffectrapportage (2022), Aramis - CO₂ transport (CCS Project), Advies over reikwijdte en detailniveau van het milieueffectrapport. [a 3630 rd](#)
- CPB & PBL (2025), Toekomstverkenning WLO 2025: efficiënte CO₂-prijzen. Geactualiseerde CO₂-prijzen om effecten van broeikasgasreductiemaatregelen uit te drukken. Den Haag, CPB/PBL.
- Crespo Cuaresma J (2017), Income projections for climate change research: A framework based on human capital dynamics, Global Environmental Change 42, 226–236. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.02.012>
- Dafnomilis I, M Den Elzen, M & DP Van Vuuren (2023), Achieving net-zero emissions targets: An analysis of long-term scenarios using an integrated assessment model, Annals of the New York Academy of Sciences 1522, 98–108. <https://doi.org/10.1111/nyas.14970>
- Dellink R et al. (2017), Long-term economic growth projections in the Shared Socioeconomic Pathways. Global Environmental Change 42, 200–214. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378015000837>
- Deltares (2021), Nederland later II – thema klimaatadaptatie. Delft. <https://www.deltares.nl/expertise/publicaties/nederland-later-ii-thema-klimaatadaptatie>
- Deltares (2024), Deltascenario's 2024 - Zicht op Water in Nederland. Rapport nr11209219-000-ZKS-0004 <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2024/05/14/bijlage-2-deltascenarios-2024-hoofdrapport>
- Ditlevsen P and S Ditlevsen (2023), Warning of a forthcoming collapse of the Atlantic meridional overturning circulation, Nat Commun 14: 4254. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39810-w>.
- ECMWF 2025, Climate indicators – temperature. <https://climate.copernicus.eu/climate-indicators/temperature>
- Elzenga (2025), Groene waterstof: de praktische uitdagingen tussen droom en werkelijkheid; een verkenning naar de knelpunten en mogelijke oplossingsrichtingen in de ontwikkeling van een

groenewaterstofmarkt, Den Haag: PBL. <https://www.pbl.nl/system/files/document/2025-02/pbl-2025-groene-waterstof-de-praktische-uitdagingen-tussen-droom-en-werkelijkheid-5608.pdf>

Emissieregistratie (2025), Overzicht emissies broeikasgassen. [Broeikasgassen | Emissieregistratie](#)

EUCRA (2024), European Climate Risk Assessment. EEA rapport 01/2024, Kopenhagen. 488 blz. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/european-climate-risk-assessment>

European Commission (2022), Impact assessment report accompanying the document Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on ambient air quality and cleaner air for Europe (recast) COM(2022) 542 final, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52022SC0545>

European Commission (2024a), Impact Assessment part 3 accompanying the document ‘Securing Our Future –Europe’s 2040 climate target and path to climate neutrality by 2050 building a sustainable, just and prosperous society, COM (2024) 63 final. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2024%3A63%3AFIN>

European Commission (2024b), European institutions reach agreement on future of air quality laws. [Link](#).

European Union (2016), Directive (EU) 2016/2284 of the European Parliament and of the Council of 14 December 2016 on the reduction of national emissions of certain atmospheric pollutants, amending Directive 2003/35/EC and repealing Directive 2001/81/EC, [Directive - 2016/2284 - EN - EUR-Lex](#)

European Union (2024), Directive (EU) 2024/2881 of the European Parliament and of the Council of 23 October 2024 on ambient air quality and cleaner air for Europe (recast) [Directive - EU - 2024/2881 - EN - EUR-Lex](#)

Fuss S et al. (2018), Negative emissions—Part 2: Costs, potentials and side effects, Environmental Research Letters 13(6), 063002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9f>

Gasunie & EBN (2017), Transport en opslag van CO₂ in Nederland, [https://www.ebn.nl/wp-content/uploads/2018/07/Studie-Transport-en-opslag-van-CO₂-in-Nederland-EBN-en-Gasunie.pdf](https://www.ebn.nl/wp-content/uploads/2018/07/Studie-Transport-en-opslag-van-CO2-in-Nederland-EBN-en-Gasunie.pdf)

Geilenkirchen, GP et al. (2024), Klimaatneutrale zeescheepvaart in 2050. Een verkenning van beelden en paden daar naartoe, Den Haag: PBL. <https://www.pbl.nl/publicaties/klimaatneutrale-zee-scheepvaart-in-2050>

Hof B et al. (2020), Kosten- en batenbegrippen in klimaatbeleid, Den Haag: PBL en CPB. <https://www.pbl.nl/publicaties/kosten-en-batenbegrippen-in-klimaatbeleid>

Hoogendoorn S en G Romijn (2020), Discontovoet voor de Nederlandse economie, Den Haag: CPB. <https://www.cpb.nl/sites/default/files/omnidownload/CPB-Notitie-Discontovoet-voor-de-Nederlandse-economie.pdf>

IPCC (2021a), Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32, [Summary for Policymakers \(SPM\) - Climate Change 2021 – The Physical Science Basis](#)

IPCC (2021b), Summary for Policymakers. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>

IPCC (2022), Mitigation Pathways Compatible with Long-term Goals. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the

Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

<https://doi.org/10.1017/9781009157926.005>

Kärtlitz A, MC Cavarretta, N Buyuk, O Lebois & P Boersma (2022), TYNDP 2022 Scenario Report. In Entsog, Entso-E (Issue April). <https://2022.entsos-tyndp-scenarios.eu/>

Keizer I, D Le Bars, C de Valk, A Jüling, R van de Wal, and S Drijfhout (2023), The acceleration of sea-level rise along the coast of the Netherlands started in the 1960s, *Ocean Sci.*, 19: 991–1007, <https://doi.org/10.5194/os-19-991-2023>.

KNMI (2023), KNMI'23-klimaatscenario's voor Nederland, KNMI, De Bilt, KNMI-Publicatie 23-03. [KNMI Klimaatscenario's](#)

KNMI (2025), [Wat betekent het voor Nederland als de Golfstroom stilvalt? - Klimaatadaptatie](#)

Korosuo A et al. (2023), The role of forests in the EU climate policy: are we on the right track?, *Carbon Balance Manage* 18, 15. <https://doi.org/10.1186/s13021-023-00234-0>

Leiden-Delft-Erasmus (2022), Grondstoffen, geld en geopolitiek. [Grondstoffen, geld en geopolitiek - Naar een duurzame en sociale energietransitie in Europa](#)

Maas RJM et al. (2023), Gevolgen van de voorgestelde Europese luchtkwaliteitsrichtlijn voor Nederland. RIVM-briefrapport 2023-0167.

NASA/GISS (2025), GISS Surface Temperature Analysis (v4). https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v4/

Ministerie van EZK (2023), Nationaal Plan Energiesysteem. <https://open.overheid.nl/documenten/2f5cbb52-0631-4a4d-b3dd-5088fab859c5/file>

Özdemir Ö, BF Hobbs, M van Hout, PR Koutstaal (2020), Capacity vs energy subsidies for promoting renewable investment: Benefits and costs for the EU power market, *Energy Policy*, 137. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111166>

PBL (2024a), IMAGE 3.3 documentation. [IMAGE - Integrated Model to Assess the Global Environment | PBL Netherlands Environmental Assessment Agency](#)

PBL (2024b), Trajectverkenning Klimaatneutraal 2050. Trajecten naar een klimaatneutrale samenleving voor Nederland in 2050, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving. <https://www.pbl.nl/publicaties/trajectverkenning-klimaatneutraal-2050>

PBL (2024c), Klimaatrisico's in Nederland. De huidige stand van zaken. Planbureau voor de Leefomgeving. Den Haag, 160 blz. <https://www.pbl.nl/publicaties/klimaatrisicos-in-nederland>

PBL (2025a, te verschijnen), Landbouw- en Natuurverkenning, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.

PBL (2025b, te verschijnen), Toekomstige klimaatrisico's en klimaatadaptatie in Nederland. Planbureau voor de Leefomgeving. Den Haag. In voorbereiding

PBL & RIVM (2025), Emissieramingen luchtverontreinigende stoffen 2025, Rapportage bij de Klimaat- en Energieverkenning 2024, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.

Petersen et al. (2024), Advies Kantelpunten; signaalgroep Deltaprogramma; November 2024. <https://www.deltaprogramma.nl/documenten/publicaties/2024/11/29/signaal-1a.-kantelpunten-algemeen-en-amoc>

Rahmstorf S (2024), Is the Atlantic overturning circulation approaching a tipping point?, Early online release, *Oceanography* 37(3): 16-29 <https://www.jstor.org/stable/27333920>

Riahi K et al. (2017), The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42: p. 153-168. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378016300681>

Rijksoverheid (2020), Rapport Werkgroep discontovoet 2020. Versie 1.0, 9 oktober 2020. [Link](#).

Rijkswaterstaat (2018), Werkwijzer MKBA bij MIRT-verkenningen

Ritchie et al. (2020), Shifts in national land use and food production in Great Britain after a climate tipping point, *Nature food*, 1:76-83 <https://doi.org/10.1038/s43016-019-0011-3>

RLI (2024). Ruimtelijke Ordening in een veranderend Klimaat. Raad voor de leefomgeving en infrastructuur. <https://www.rli.nl/publicaties/2024/advies/ruimtelijke-ordening-in-een-veranderend-klimaat>

Romijn G & G Renes (2013), Algemene leidraad voor maatschappelijke kosten-batenanalyse, CPB/PBL, Den Haag. [Link](#).

Stehfest E et al. (2014), Integrated Assessment of Global Environmental Change with IMAGE 3.0. Model description and policy applications, The Hague: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. https://www.pbl.nl/uploads/default/downloads/pbl-2014-integrated_assessment_of_global_environmental_change_with_image30_735.pdf

TNO (2022), Towards a sustainable energy system for the Netherlands in 2050 – Scenario update and analysis of heat supply and chemical and fuel production from sustainable feedstocks, <https://resolver.tno.nl/uuid:5c7f19fb-9e6d-4830-9ad6-1e83d1355ece>

TNO (2024), Een verkenning naar de verbranding van Nederlands afval en de milieuprestatie in 2030 en 2050, Den Haag, TNO. [Verkenning naar verbranding Nederlands afval en milieuprestatie in 2030 en 2050 | Rapport | Rijksoverheid.nl](https://www.tno.nl/verkenning-naar-verbranding-nederlands-afval-en-milieuprestatie-in-2030-en-2050)

Van Vuuren D et al. (2021), The 2021 SSP scenarios of the IMAGE 3.2 model. <https://eartharxiv.org/repository/view/2759/>

Van Vuuren D and Stehfest E (2021), The IMAGE Strategy Document 2022-2027, The Hague: PBL. [The IMAGE Strategy Document 2022-2027](https://www.pbl.nl/system/files/document/2022-03/pbl-2022-image-strategy-document-2022-2027.pdf)

Van Vuuren et al. (2024), Wat zijn rechtvaardige en haalbare klimaatdoelen voor Nederland?, Den Haag: PBL. https://www.pbl.nl/system/files/document/2024-03/pbl-2024-wat-zijn-rechtvaardige-en-haalbare-klimaatdoelen-voor-nederland_5439.pdf

Van Westen RM, M Kliphuis & HA Dijkstra (2024), Physics-based early warning signal shows that AMOC is on tipping course. *Science Advances*, 10(6), <https://doi.org/10.1126/sciadv.adk1189>

Vogt-Schilb A, G Meunier & S Hallegatte (2018), When starting with the most expensive option makes sense Optimal timing, cost and sectoral allocation of abatement investment, *JEEM* 88 , pp. 210-233. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2017.12.001>

Westhoek H, L Schulte-Uebbing en A Plomp (2024), Trajecten naar een ‘klimaatneutrale’ landbouw, landgebruik en glastuinbouw in 2050, Den Haag: PBL. <https://www.pbl.nl/publicaties/trajecten-naar-een-klimaatneutrale-landbouw-landgebruik-en-glastuinbouw-in-2050>

WHO (2021), WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide, Geneva: World Health Organization. [WHO global air quality guidelines: particulate matter \(PM_{2.5} and PM₁₀\), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide](https://www.who.int/publications-detail/who-global-air-quality-guidelines-particulate-matter-pm2.5-and-pm10-ozone-nitrogen-dioxide-sulfur-dioxide-and-carbon-monoxide)

Zwaneveld, P. (2011). De btw in kosten-batenanalyses. CPB, Den Haag. <https://www.cpb.nl/publicatie/de-btw-in-kosten-batenanalyses>.

Bijlage 1: Dankwoord

Voor het cahier WLO2025 Klimaat en Energie heeft het PBL dankbaar gebruikgemaakt van de input van externe deskundigen en vertegenwoordigers van provincies en departementen.

Met medewerking van

Dick van Dam, Bert Daniels, Paul Koutstaal, Henk Westhoek (allen PBL).

We danken de leden van de stuurgroep WLO, de ambtelijke klankbordgroep WLO en de kennisadviescommissie WLO voor hun commentaar op eerdere concepten van dit cahier. De samenstelling van deze groepen is hieronder aangegeven. We danken Tijs Langeveld (RVO) voor het visualiseren van energiestromen door middel van Sankey-diagrammen. We danken Janette Bessembinder en Rob van Dorland voor hun ondersteuning bij het hoofdstuk over klimaat effecten en adaptatieopgave.

Stuurgroep WLO

André van Lammeren, Femke Verwest, Marjolijn van Asselt, Bram Bregman, Olav-Jan van Gerwen, Tejo Spit, Jaco Stremler en Martine Uytterlinde (allen PBL)

Ambtelijke Klankbordgroep WLO

Lilian van den Aarsen (voorzitter; staf Deltacommissaris), Bram van Dijk (EZK/KGG), Sjef Ederveen (EZK/KGG), Niek Hazendonk (LVVN), Yntze van der Hoek (LVVN), Clovis Hopman (EZK/KGG), Willemieke Hornis (VRO/BZK), Isabelle Jennekens (VRO/BZK), Olga van Kalles (LVVN), Rutger Kaput (VRO/BZK), Steven Kroesberg (VRO/BZK), Micha Lubbers (LVVN), Sam Peeperkorn (FIN), Maarten Piek (VRO/BZK), Erik Schmieman (IenW), Marieke Spijkerboer (IenW), Boudewijn Steur (VRO/BZK), Wieke Tas (IenW), Taede Tillema (IenW), Erik Verroen (RWS), Dirk-Jan de Vries (IenW), Kimberly Wedage-Mol (EZK/KGG), Ellinore Wolterink (EZK/KGG), Paul van Zijl (LVVN)

Kennisadviescommissie WLO:

Bas Arts (voorzitter; PBL), Martijn Blom (CE), Prof. Machteld van den Broek (TU Delft), Sara Hardus (SCP), Prof. Carl Koopmans (VU; SEO), Gerbert Romijn (KiM), Jan Maarten van Sonsbeek (CPB), Prof. Bert van Wee (TUDelft), Patrick Witte (UU)

Bijlage 2: IMAGE

Algemene beschrijving

IMAGE is een ecologisch-milieu-model dat de milieugevolgen van menselijke activiteiten wereldwijd simuleert¹². Het model representeert interacties tussen de samenleving, de biosfeer en het klimaat-systeem om duurzaamheidvraagstukken zoals klimaatverandering, biodiversiteit en menselijk welzijn te bestuderen. Het doel van het IMAGE-model is om de lange termijn-dynamiek en de impact van wereldwijde veranderingen te verkennen die voortkomen uit de interactie van sociaaleconomische en milieufactoren. Documentatie over het IMAGE-model is te vinden in het IMAGE 3.0-boek (Stehfest et al. 2014) of op de IMAGE-website (PBL 2024a).

IMAGE modelleert socio-economische ontwikkelingen in 26 wereldregio's. Landgebruik, landbedekking en de bijbehorende biofysische processen worden ruimtelijk gemodelleerd met een ruimtelijke resolutie van 5 x 5 boogminuten (wat overeenkomt met 10 x 10 kilometer aan de evenaar). Het IMAGE 3.0-model heeft een breed scala aan uitvoer, waaronder:

- primair en finaal energiegebruik en energieprijzen;
- landbouwproductie, landbedekking en landgebruik;
- nutriëntenkringlopen in natuurlijke en landbouwsystemen;
- emissies naar lucht en oppervlaktewater;
- koolstofvoorraden in biograndstoffen, bodems, atmosfeer en oceanen;
- atmosferische emissies van broeikasgassen en luchtverontreinigende stoffen;
- concentratie van broeikasgassen in de atmosfeer en stralingsforcering;
- temperatuur- en neerslagveranderingen;
- zeespiegelstijging;
- waterverbruik voor irrigatie.

Deze standaarduitvoeren worden aangevuld met aanvullende impactmodellen met indicatoren voor biodiversiteit, menselijke ontwikkeling, waterschaarste en overstromingsrisico's.

IMAGE is ontwikkeld door het IMAGE-team onder leiding van het Planbureau voor de Leefomgeving. Er wordt samengewerkt met onderzoeksteams en onderzoekers van andere instellingen. In het bijzonder zijn er sterke samenwerkingen met de Universiteit Utrecht en Wageningen University & Research. Deze onderzoekers kunnen deel uitmaken van het IMAGE-team en IMAGE gebruiken en verder ontwikkelen.

In 2014 werd IMAGE beoordeeld door een internationale adviesraad (Internationale beoordeling van IMAGE3.0). De ontwikkelingsstrategie voor de periode 2022-2027 is uitgewerkt in het IMAGE-strategiedocument (van Vuuren en Stehfest 2021). IMAGE maakt deel uit van de wereldwijde IAMC (*Integrated Assessment Modeling Consortium*), een organisatie van wetenschappelijke onderzoeksinstituten die wetenschappelijk inzicht nastreeft in kwesties die verband houden met de ontwikkeling

¹² <https://www.pbl.nl/en/image/home>

van *Integrated Assessment Modellen* (IAM's) en analyses met deze modellen. Verschillende IAM's, waaronder IMAGE, zijn gedocumenteerd op de IAMC-modellenwebsite.

Toepassing van IMAGE in de WLO

Klimaatdoel in IMAGE

We hebben aan IMAGE een mondiaal klimaatdoel opgelegd in termen van de stralingsforcering.¹³ in het jaar 2100. In de scenario's met een snelle klimaattransitie wordt de mondiale stralingsforcering in 2100 beperkt tot 2,6 W/m², hetgeen leidt tot een toename van de mondiaal gemiddelde temperatuur in de periode 2081-2100 van +1,8°C (met een bandbreedte van +1,3 tot +2,4°C) ten opzichte van de periode 1850-1900. In de scenario's met een vertraagde klimaattransitie loopt de mondiale stralingsforcering op naar 4,5 W/m² in het jaar 2100, hetgeen leidt tot een toename van de mondiaal gemiddelde temperatuur in 2100 van +2,7°C (met een bandbreedte van +2,1 tot +3,5°C) (IPCC 2021a).

Het is in IMAGE niet mogelijk om te optimaliseren op verschillende doelen tegelijkertijd (zoals op een mondiaal klimaatdoel en een emissiedoel voor Europa). Om ervoor te zorgen dat het nettonuldoel in Europa wordt gehaald, hebben we de koolstofprijs voor de Europese regio's in IMAGE lineair in de tijd laten oplopen tot een niveau waarbij het nettonulemissiedoel gehaald wordt. In de zeldzame gevallen dat de mondiale koolstofprijs hoger is dan de lineair oplopende koolstofprijs in Europa, is de mondiale prijs gehanteerd. Hieronder gaan we in op twee belangrijke aannames die we hebben gedaan rondom de interpretatie van het nettonulemissiedoel in Europa.

Omgaan met het Europese doel van netto nul emissie in IMAGE

We maken twee kanttekeningen bij de invulling van het nettonulemissiedoel voor Europa. De eerste heeft betrekking op de manier waarop wordt omgegaan met de vastlegging van koolstof in bossen. De tweede heeft betrekking op de manier waarop we zijn omgegaan met import van biograndstoffen en biobrandstoffen en de toerekening van de negatieve emissies die bij de productie van biobrandstoffen kunnen worden gerealiseerd.

- a) De mate waarin CO₂ uit de atmosfeer wordt opgenomen en in de biosfeer wordt vastgelegd als gevolg van landgebruik, landgebruiksverandering en bosbeheer (LULUCF), wordt door landen gerapporteerd in klimaatrapportages aan de UNFCCC. De koolstofvastlegging als gevolg van LULUCF in Europa bedroeg volgens de rapportages aan UNFCCC gemiddeld zo'n 325 megaton per jaar tussen 1990 en 2016, met een afname van de vastlegging tot 230 megaton per jaar in 2021. Hierbij is in bossen sprake van netto vastlegging, die netto uitstoot als gevolg van ander landgebruik meer dan compenseert (Korosuo et al. 2023). De EU beoogt in haar strategie om te komen tot netto nul emissie deze vastlegging te verhogen naar 400 megaton per jaar in 2050 (EC 2024a). Klimaatmodellen en de meeste emissie-databases die door wetenschappers worden bijgehouden gebruiken een iets andere definitie voor door menselijk handelen vastgelegde CO₂ in de biosfeer: daar is alleen sprake van menselijke vastlegging (of emissie) door bossen bij verandering van landgebruik. Dit voorkomt dat CO₂-vastlegging in bossen als gevolg van de

¹³ De stralingsforcering (als mondiaal en jaargemiddelde) geeft aan hoeveel energie de aarde meer ontvangt van de zon dan dat de aarde weer uitstraalt – in de vorm van warmtestraling – naar de ruimte. Bij een stralingsforcering groter dan nul warmt de aarde op, en ontstaat op termijn een nieuw stralings-evenwicht, bij een hogere oppervlaktetemperatuur van de aarde.

verhoogde CO₂-concentratie wordt meegeteld in de aan menselijk handelen gerelateerde koolstofstromen. Deze laatste manier heeft een grotere natuurlijke opname en een kleinere opname veroorzaakt door de mens. Ook voor IMAGE wordt deze methode gebruikt. Omdat het EU-doel echter gebaseerd is op de UNFCCC-methode en we ervan uitgaan dat de EU slaagt in het realiseren van 400 megaton vastlegging, kunnen deze 400 megaton gebruikt worden ter compensatie van resterende emissie om het netto nul doel te realiseren. De met IMAGE berekende emissies hoeven dus niet volledig op nul uit te komen om toch te voldoen aan het EU-doel van netto nul emissie. De vastlegging in bossen is de laatste jaren overigens juist vermindert, als gevolg van bosbranden en bossterfte zoals door uitbraken van schorskevers (Korosuo et al. 2023).

- b) Een belangrijke technologie om te komen tot een systeem met netto nul emissie is het produceren van biobrandstoffen uit houtige biograndstoffen, waarbij de overtollige koolstof – de koolstofinhoud van de biobrandstoffen is namelijk lager dan die van de houtige biograndstoffen die als input wordt gebruikt – wordt afgevangen en permanent opgeslagen. Hierdoor is er sprake van netto CO₂-vastlegging (negatieve emissies). Doordat Europa voorop loopt in het mondiale klimaatbeleid in de WLO-scenario's, neemt het gebruik van biobrandstoffen in Europa sterker toe dan elders. Deze biobrandstoffen kunnen in Europa zelf worden geproduceerd uit biograndstoffen die in Europa zelf worden gewonnen, of op basis van geïmporteerde houtpellets of getorificeerde biomassa uit andere delen van de wereld. Ook kan de biobrandstof buiten Europa worden geproduceerd en in die vorm worden geïmporteerd. In dat laatste geval treedt de emissiereductie die samenhangt met afvang en opslag van CO₂ ook buiten Europa op. In dit laatste geval gaan we er echter van uit dat de negatieve emissies aan Europa worden toegerekend, waardoor het emissie-effect rekenkundig equivalent is met import van houtpellets en verwerking tot biobrandstoffen binnen Europa. Artikel 6 van het klimaatverdrag van Parijs laat een dergelijke verrekening van emissies toe. Het gaat in de IMAGE-analyses om circa 100 (scenario Hoog Vertraagd) tot 300 megaton CO₂ aan vastlegging buiten Europa die aan Europa wordt toegerekend om te voldoen aan het doel van netto nul emissie (scenario Laag Snel). In de analyses van het energiesysteem in Nederland zelf gaan we ervan uit dat alle biobrandstof in Nederland of Europa zelf wordt geproduceerd, waardoor ook de negatieve emissies aan Nederland of Europa kunnen worden toegerekend. Door bovenstaande keuze in de IMAGE-analyses wordt gewaarborgd dat de emissie-effecten van de analyses met IMAGE en die van het nationale energiesysteem consistent zijn.

Mondiale sociaaleconomische ontwikkelingen

Voor de mondiale sociaaleconomische ontwikkelingen sluiten we aan bij de aannames in het cahier Demografie en het cahier Economie. Voor het cahier Economie zijn onder andere de *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP's) gebruikt. De SSP's beschrijven een breed palet aan mogelijke toekomstige sociaaleconomische ontwikkelingen tot 2100 (zie tekstkader B1 voor een korte beschrijving).

Die sociaaleconomische ontwikkelingen zijn gevat in termen van ontwikkeling van het bruto binnenlands product, omvang van de bevolking, energiegebruik en industriële productie, landgebruik, transport en de mate van handel in fossiele brandstoffen (tabel B1). Deze ontwikkelingen zijn bepalend voor de CO₂-uitstoot per wereldregio. In tabel B1 is ook het potentieel voor biograndstoffen weergegeven en algemene beleidsuitgangspunten voor het mondiale klimaatbeleid en het EU luchtkwaliteitsbeleid. In de WLO-scenario's met een hoge economische groei gaan we uit van SSP1 voor de ontwikkeling van het bruto binnenlands product (bbp), en SSP2 voor overige ontwikkelingen. In de WLO-scenario's met lage economische groei gaan we uit van SSP3.

Tabel B1

Uitgangspunten voor de belangrijkste sociaaleconomische ontwikkelingen in de IMAGE-berekeningen voor de scenario's Hoog en Laag

Aspect	Scenario Hoog	Scenario Laag
Bruto binnenlands product	SSP1 (Crespo Cuaresma, 2017; Delink et al. 2024)	SSP3 (Crespo Cuaresma, 2017; Delink et al. 2024)
Populatie	WLO Hoog (cahier Demografie)	WLO Laag (cahier Demografie)
Energiegebruik en industriële productie	SSP2 (Van Vuuren et al. 2021)	SSP3 (Van Vuuren et al. 2021)
Landgebruik	SSP2 (Van Vuuren et al. 2021)	SSP3 (Van Vuuren et al. 2021)
Transport	WLO Hoog (cahier Mobiliteit)	WLO Laag (cahier Mobiliteit)
Handel fossiele brandstoffen	Handel tussen westerse landen en Rusland geblokkeerd. Vanaf 2030-2035 weer handel mogelijk	Handel tussen westerse landen en Rusland geblokkeerd. Vanaf 2035-2040 weer handel mogelijk
Potentieel biograndstoffen	Maximaal 60 EJ primair gebruik van biograndstoffen mondiaal totaal (Fuss et al. 2018)	Maximaal 60 EJ primair gebruik van biograndstoffen mondiaal totaal (Fuss et al. 2018)
Huidig klimaatbeleid	Huidig mondiaal klimaatbeleid conform Dafnomilis et al. (2023)	Huidig mondiaal klimaatbeleid conform Dafnomilis et al. (2023)
EU-luchtkwaliteitsbeleid	Geen doelen meegenomen*	Geen doelen meegenomen*

* Geen doelen voor luchtkwaliteit meegenomen, tenzij huidig beleid gericht op luchtkwaliteit ook impact heeft op broeikasgassen.

Tekstader B1: De Shared Socioeconomic Pathways

Er zijn vijf *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP) hoofdszenario's, die we hier summier beschrijven. De scenario's worden gebruikt binnen de klimaatonderzoeksgemeenschap om vergelijkingen mogelijk te maken van berekeningen van effecten van menselijk handelen op, onder andere, het mondiale energiegebruik, landgebruik en emissies van broeikasgassen (Riahi et al. 2017). De scenario's omvatten een ruime bandbreedte in termen van mogelijke ontwikkeling van demografie, opleidingsniveau, urbanisatie, economie, internationale samenwerking en technologische ontwikkeling.

- **SSP1: Duurzaamheid.** In dit scenario verschuift de wereld geleidelijk naar een duurzamere koers. Er is meer aandacht voor inclusieve ontwikkeling met respect voor het milieu. Ongelijkheid neemt af en de nadruk ligt op menselijk welzijn in plaats van puur economische groei.
- **SSP2: Middenweg.** De wereld volgt grotendeels historische patronen zonder grote verschuivingen. Vooruitgang is ongelijk verdeeld tussen landen. Milieusystemen verslechteren enigszins, maar het gebruik van hulpbronnen en energie neemt af.
- **SSP3: Regionale rivaliteit.** Nationalisme en regionale conflicten nemen toe. Landen richten zich vooral op binnenlandse kwesties. Economische ontwikkeling vertraagt en ongelijkheid groeit. Er is weinig aandacht voor milieuproblemen.
- **SSP4: Ongelijkheid.** De kloof tussen arm en rijk groeit, zowel binnen als tussen landen. Een kleine elite profiteert van technologische vooruitgang, terwijl een groot deel van de bevolking achterblijft.
- **SSP5: Groei op basis van fossiele brandstoffen.** Snelle economische groei en technologische vooruitgang, maar met intensief gebruik van fossiele brandstoffen. Leidt tot hoge uitstoot maar ook tot meer middelen voor klimaatadaptatie.

Bijlage 3: Beschrijving COMPETES

COMPETES is een model van de Europese elektriciteitsmarkt.¹⁴ Met het model worden de elektriciteitsproductie, elektriciteitsprijzen, handel in elektriciteit, welvaartseffecten en CO₂-emissies berekend voor de individuele Europese landen. De elektriciteitsprijs in ieder uur wordt in COMPETES bepaald door de optie die aan de marge nodig is om aan de elektriciteitsvraag te voldoen (de zogeheten *merit-order*). De berekeningen zijn gebaseerd op aannames over de vraag naar elektriciteit, de productie van elektriciteit uit zonne- en windenergie en, voor Nederland, de productie van de centrale WKK-eenheden. Andere informatie die nodig is voor de berekeningen zijn verwachtingen over de toekomstige ontwikkeling van de brandstof- en CO₂-prijzen en over de omvang van de netwerkverbindingen tussen de verschillende landen.

COMPETES kan zowel de efficiënte inzet van centrales bepalen door het jaar heen als de optimale investeringen in productiecapaciteit en in netwerkverbindingen tussen landen. Bij het berekenen van de inzet van elektriciteitscentrales wordt rekening gehouden met de flexibiliteit van de centrales, zoals onder andere de snelheid waarmee ze de productie van uur tot uur kunnen aanpassen en de minimale tijdsduur die centrales nodig hebben om op te starten of waarin ze elektriciteit moeten produceren. Dergelijke karakteristieken worden steeds belangrijker naarmate er meer elektriciteit uit zonne- en windenergie wordt opgewekt en centrales meer moeten op- en afregelen.

Het model heeft verschillende modules en varianten waarmee verschillende elektriciteitsmarkten kunnen worden geanalyseerd: de *day-ahead*-markt (de markt voor fysieke levering op enig uur van de volgende dag), de *intraday*-markt voor handel in elektriciteit tot 90 minuten voor levering en de markt voor reservecapaciteit. Daarnaast kan ook vraagrespons worden meegenomen, waarbij het gebruik van elektriciteit afhankelijk is van de prijs, zoals voor de productie van warmte en het moment van laden van elektrische voertuigen. Het model is gecodeerd in AIMMS en gebruikt een CPLEX-oplosser.

Het COMPETES-model wordt gebruikt voor de Klimaat- en Energieverkenning (KEV), voor beleidsanalyses zoals minimumprijzen voor CO₂, sluiting van kolencentrales en het Klimaatakkoord en voor elektriciteitsmarktstudies, bijvoorbeeld naar de kosten van het inpassen van elektriciteitsproductie uit zonne- en windenergie, het effect op de markt van vergoedingen voor productiecapaciteit en de optimale verdeling van hernieuwbare elektriciteitsproductie over Europa. Voor een gedetailleerde beschrijving van het model, zie Özdemir et al. (2020).

¹⁴ <https://www.pbl.nl/modellen/nev-rekensysteem-competes>

Bijlage 4: OPERA

Algemene beschrijving

OPERA is een dynamisch optimalisatiemodel dat binnen bepaalde randvoorwaarden de meest kosteneffectieve manier berekent om het Nederlandse energiesysteem – en een aantal andere activiteiten die broeikasgasemissies veroorzaken – vorm te geven.¹⁵ Het model kan werken met een hoge tijdsresolutie, meerdere zichtjaren en een ruimtelijke differentiatie naar meerdere regio's. Het bevat een database met

- a) een breed palet aan technieken voor gebruik, winning en productie, omzetting en opslag van energie,
- b) een breed palet aan fossiele en alternatieve energiebronnen en energiedragers, en
- c) 'doelthema's' (bijvoorbeeld emissies) waaraan een grens (op basis van beleidsdoelen) of een prijs (als weergave van bijvoorbeeld een emissiehandelssysteem) gekoppeld kunnen worden.

De dynamische versie die in de WLO is gebruikt kan scenario's of trajecten over meerdere jaren in samenhang doorrekenen.

Randvoorwaarden

De randvoorwaarden waarbinnen het model optimaliseert, zijn voor een deel inherent aan de eigenschappen van het energiesysteem en de technieken daarbinnen. Zo moeten het gebruik en de productie van energie op elk moment in evenwicht zijn en hebben technieken een bepaalde efficiëntie, opslagcapaciteit en operationele flexibiliteit. Zo kunnen warmte-krachtingstallaties (WKK's) de verhouding tussen de productie van warmte en elektriciteit regelen, kunnen hybride warmtepompen schakelen tussen warmtepompen en ketel, en kunnen Fischer-Tropsch-installaties binnen een bepaalde bandbreedte de verhoudingen tussen verschillende producten bijsturen.

Daarnaast kunnen er randvoorwaarden zijn die te maken hebben met specifieke eisen aan het systeem, of bepaalde veronderstellingen over wat wel en niet haalbaar is. Voorbeelden van zulke eisen in deze studie zijn limieten op broeikasgasemissies, primair energiegebruik of het gebruik van fossiele brandstoffen en limieten aan de beschikbaarheid en ingroei- of opschalingssnelheid van technieken en energiebronnen.

Beschikbaarheid van technieken en innovatie

De beschikbaarheid van technieken, de kostendaling en de verbetering van efficiëntie en andere aspecten van de technische performance zijn allemaal exogeen. Er is dus geen terugkoppeling tussen meer of minder toepassing en meer of minder kostendaling. Technieken worden opgenomen in de database van het OPERA-model als ze een TRL-niveau hebben van 6 of hoger. Voor technieken die nu nog niet op de markt zijn, maar die binnen de zichtperiode van de berekening waarschijnlijk wel op de markt komen is exogeen een jaar van introductie gespecificeerd.

¹⁵ <https://www.pbl.nl/modellen/opera>

Kosten

De optimalisatie door OPERA is gericht op de laagste kosten voor Nederland als geheel. Hierbij gaat het om het nationale kostensaldo zoals beschreven in Hof et al. (2020) en CE Delft (2023b). Wanneer kosten op verschillende momenten in de tijd optreden, verrekent het model dat met een maatschappelijke discontovoet van 2,25 procent. Als het model rekent voor een enkel zichtjaar berekent het model voor dat jaar de kosten inclusief de geannuïseerde investeringskosten, en als het model rekent voor een periode van meerdere jaren, dan berekent het de netto contante waarde voor die hele periode.

Ruimtelijke en temporele resolutie

OPERA kan op verschillende manieren ingezet worden, met een aantal regio's naar keuze en een instelbare tijdsresolutie, en voor één of meerdere jaren, maar de rekentijd neemt in het algemeen meer dan lineair toe met de grootte van het op te lossen probleem. De versie van OPERA die is gebruikt voor deze studie is gericht op het tijdspad van 2030 tot 2060 in stappen van 5 jaar, onderscheidt binnen Nederland geen regio's, en verdeelt de 8.760 uren van een jaar in 16 tijdvakken, waarbij binnen de tijdvakken de uren zijn opgenomen met een relatief dicht bij elkaar liggende vraag naar en aanbod van elektriciteit.

Dynamische versie

In de WLO richten we ons op de periode tussen 2040 en 2060. Daarvoor gebruiken we de dynamische versie van OPERA, die over meerdere jaren tegelijk de kosten optimaliseert. Voor de afzonderlijke zichtjaren zijn er limieten aan de toepassing van technieken en de beschikbaarheid van energiebronnen en voor opeenvolgende jaren zijn er beperkingen aan de opschalingssnelheid van technieken. Het model kan hiermee bij bijvoorbeeld de invulling voor het jaar 2040 al rekening houden met wat er in 2060 nodig is, gegeven wat tussen 2040 en 2060 de beperkingen zijn ten aanzien van de ingroeisnelheid van technieken.

Elektriciteitsmarkt

De elektriciteitsmarkt is bij uitstek een Europese markt, en laat zich daarom niet goed modelleren op alleen het Nederlandse niveau. In de berekeningen is daarom uitgegaan van resultaten van het COMPETES-model (Özdemir et al 2020; zie bijlage 3). Het in OPERA gebruikte COMPETES-scenario is afkomstig uit de KEV2022 en is gebaseerd op het 'National Trends scenario' uit Kättlitz et al. (2022). Het gaat uit van vergaande verduurzaming op Europees niveau, en gaat voor de weerpatronen en vraagpatronen net als OPERA uit van het jaar 2015. OPERA gebruikt – op uurbasis – de elektriciteitsprijzen en import- en exportvolumes uit COMPETES als invoer. De uitkomsten van OPERA voor het Nederlandse energiesysteem kunnen vervolgens weer aanleiding geven tot afwijkende import- en exportvolumes. OPERA kan binnen een beperkte absolute bandbreedte afwijken van deze volumes, die ook worden beperkt door de interconnectiecapaciteit.

Toepassing van OPERA in de WLO

Rol van beleid in OPERA-berekeningen

Aan het model kunnen randvoorwaarden worden opgelegd, waaronder het maximale niveau van de broeikasgasemissies voor Nederland als geheel per zichtjaar (paragraaf 3.2). Ook kunnen randvoorwaarden worden opgelegd ten aanzien van de mate van inzet van technologieën en hulpbronnen.

Beleidsinstrumenten worden niet gemodelleerd in OPERA. Het effect van beleid kan wel via

randvoorwaarden omtrent de inzet van technologie worden meegegeven, zoals een minimaal toe te passen aandeel biobrandstoffen in transport. Beleid is alleen vooraf expliciet meegegeven aan de OPERA-berekeningen voor de WLO indien als het beleid direct relevant is binnen de verhaallijn van het scenario. Maar in het algemeen is beleid niet expliciet voorgeschreven. Zo is het naar nul aflopen van het aantal emissierechten in het EU-ETS niet expliciet voorgeschreven, maar is het aan OPERA overgelaten om te bezien in welk tempo per sector emissies worden verminderd, gegeven het overkoepelende emissiebudget voor Nederland als geheel. In de scenario's met een snelle klimaat-transitie leidt dat er overigens wel toe dat de emissies van ETS-sectoren rond 2040 nul is. In de scenario's met een vertraagde klimaattransitie is dat rond 2060 pas het geval. Dit past bij de verhaallijn van een afzwakking van het klimaatbeleid na 2030 in deze scenario's.

We hebben vier verschillende ontwikkelingen geconstrueerd van het toekomstige Nederlandse energiesysteem en bijbehorende emissie van broeikasgassen, waarbij de verschillen tussen scenario's voortkomen uit het te bereiken emissieniveau voor Nederland als geheel, verschil in de omvang van activiteitsniveaus en randvoorwaarden ten aanzien van de technologie-inzet.

Aanpak WLO anders dan die van de KEV en TVKN

De manier van het verkennen van de toekomst in de WLO is wezenlijk anders dan die van de Klimaat- en Energieverkenning (KEV). In de WLO zijn vier mogelijke paden geschetst die invulling geven aan een vooraf opgelegd emissieniveau. Dit emissieniveau is in de WLO als uitgangspunt genomen, en wordt in de WLO per definitie gehaald. In de KEV wordt daarentegen geraamd waar de emissies op uitkomen, uitgaande van het huidige beleid. De KEV kan gebruikt worden om vast te stellen of er aanvullende inspanningen nodig zijn om het emissiedoel te kunnen halen. De WLO lijkt met deze aanpak meer op de Trajectverkenning Klimaatneutraal (TVKN) (PBL 2024b). Het verschil met TVKN is dat in TVKN bekeken werd hoe Nederland in 2050 klimaatneutraal kan zijn, terwijl dat doel in de WLO in twee van de vier scenario's wordt opgelegd (de scenario's met een snelle klimaattransitie), maar in twee ook niet. Een ander belangrijk verschil is dat in TVKN bekeken werd hoe netto nul emissie gerealiseerd kon worden zonder sterke krimp van de energie-intensieve industrie, en met behoud van een sterke bunkerpositie (waardoor er in Nederland veel brandstof wordt ingenomen door de internationale lucht- en scheepvaart). In de WLO is uitgegaan van een sterkere afname van energie-intensieve industriële activiteiten en in Nederland getankte bunkerbrandstoffen dan in TVKN, waarbij de mate van afname verschilt tussen de vier scenario's.

Bijlage 5: Efficiënte CO₂-prijzen voor de periode 2025-2100

De Nederlandse overheid stelt periodiek een set maatschappelijke discontovoeten vast voor gebruik in MKBA's

Maatschappelijke discontovoeten worden gebruikt om voorgestelde publieke investeringsprojecten of, meer algemeen, voorgenomen overheidsbeleid van tevoren te waarderen. De discontovoet is het (minimaal) vereiste rendement op een project (of breder: beleid) waarbij de hoogte kan afhangen van het risicoprofiel van de effecten van het project of de aard van het project. De (maatschappelijke) discontovoet wordt gebruikt om de verwachte toekomstige kosten en baten terug te rekenen (disconteren) naar het heden. Bij de kosten en baten gaat het om alle zaken waar burgers waarde aan toekennen, waaronder effecten op inkomen, vrije tijd, leefomgeving, gezondheid, reistijd, natuur en milieu, klimaat en veiligheid.

In tabel B2 staan de efficiënte CO₂-prijzen bij de maatschappelijke discontovoet van 2,25 procent bij gebruik van de WLO 2025-scenario's in ex-ante analyses zoals MKBA's.

Tabel B2

Efficiënte CO₂-prijzen van 2025 tot en met 2100 bij een discontovoet van 2,25%, in euro₂₀₂₁ per ton CO₂-equivalenten

Scenario	Hoog Snel	Laag Snel	Hoog Vertraagd	Laag Vertraagd
2025	132	310	107	116
2030	147	346	119	130
2035	164	387	133	145
2040	184	432	149	162
2045	205	483	166	181
2050	230	540	186	202
2055	257	604	208	226
2060	287	675	232	253
2065	321	754	260	283
2070	358	843	290	316
2075	400	942	325	353
2080	448	1053	363	395
2085	500	1177	405	441
2090	559	1315	453	493
2095	625	1470	506	551
2100	698	1643	566	616

Op dit moment gelden de discontovoeten die het kabinet heeft vastgesteld in 2020 (ministerie van Financiën 2020). Deze discontovoeten zijn gebaseerd op een advies van de Werkgroep discontovoet 2020 (Rijksoverheid 2020). Dit advies is weer gebaseerd op meerdere technische notities waaronder die van het CPB, DNB en PBL. Het kabinet heeft alle adviezen van de Werkgroep

overgenomen. De standaard discontovoet is op dit moment vastgesteld op (reëel) 2,25 procent. Deze waarde is mede gebaseerd op het door het CPB berekende (reëel) geëiste rendement (inclusief risicobeloning) op het eigen vermogen van de Nederlandse huishoudens en het geëiste rendement voor bedrijven op investeringen in Nederland via de gewogen gemiddelde vermogenskostenvoet (*weighted average cost of capital*, WACC) van een gemiddeld, niet-financieel bedrijf (Hoogendoorn en Romijn 2020).