

Referentiescenario broeikasgasemissies 2040-2050 ten behoeve van de INEK-rapportage 2023



TNO 2023 P10123 – Februari 2023
Referentiescenario broeikasgasemissies
2040-2050 ten behoeve van de INEK-
rapportage 2023

Auteurs	Martin Scheepers, Joost van Stralen, Juan Giraldo Chavarriaga, Koen Smekens
Rubricering rapport	TNO Publiek Rubricering geclassificeerd door Rubricering datum
Oplage	n.v.t.
Aantal pagina's	27 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	2
Opdrachtgever	Ministerie van Economische Zaken en Klimaat
Projectnaam	Referentiescenario BKG emissies
Projectnummer	060.52019

Alle rechten voorbehouden

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

© 2023 TNO

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave	3
1 Inleiding	4
2 Aanpak	5
2.1 Methodiek	5
2.2 Invoerdata	7
2.3 Aanpassingen invoerdata	9
3 Resultaten	11
3.1 Referentiescenario 2040-2050	11
3.2 BKG-emissies 2045-2050	13
3.3 Onzekerheden	15
4 Conclusies	17
Referenties	18
Bijlagen	
Bijlage A: Energievraag	19
Bijlage B: Minimum en maximum waarden voor technologie-opties	22

1 Inleiding

Het ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK) rapporteert in het voorjaar van 2023 aan de Europese Commissie over de voortgang van het Integraal Nationaal Energie- en Klimaatplan (INEK). In deze tweejaarlijkse rapportage wordt onder meer een projectie van de broeikasgasemissies (BKG-emissies) gepresenteerd tot en met 2050 [1]. Tot 2040 zal deze projectie gebaseerd zijn op de Klimaat- en Energieverkenning (KEV) van 2022 [2]. EZK heeft TNO gevraagd om voor de INEK-rapportage, als aanvulling op de KEV 2022, een referentiescenario te maken van BKG-emissies van 2040 tot en met 2050 dat aansluit op de projecties van de KEV 2022.

In het referentiescenario wordt alleen beleid meegenomen dat in het voorjaar 2022 was vastgesteld (with existing measures – WEM –, conform KEV 2022). Dit referentiescenario voor 2045 en 2050 is berekend met het energiesysteemmodel OPERA. Het model gebruikt als invoerparameters: energievraag, prijzen voor fossiele brandstoffen en CO₂, technoeconomische parameters van technologie-opties en energiegebruik. Het referentiescenario is gekalibreerd op de projectie van de KEV 2022.

Dit rapport presenteert de resultaten van het referentiescenario voor broeikasgasemissies tussen 2040 en 2050. Daarnaast wordt ook de methode beschreven die voor het opstellen van dit referentiescenario is ontwikkeld.

De ontwikkelde methode wordt in Hoofdstuk 2 besproken en de resultaten van de OPERA-berekeningen en de BKG-emissies van het referentiescenario worden gepresenteerd in Hoofdstuk 3. Dit rapport sluit af met enkele conclusies en aanbevelingen in Hoofdstuk 4.

2 Aanpak

2.1 Methodiek

De projecties van de broeikasgasemissies worden voor de KEV berekend met een modelinstrumentarium dat is gebaseerd op simulatie en optimalisatie. De resultaten worden, naast kosten van energie en technologie, in belangrijke mate bepaald door de beleidsmaatregelen die aangrijpen op het keuzegedrag van actoren, bijvoorbeeld keuzes die het gevolg zijn van een economische incentive (subsidie) of verplichting. Op de langere termijn nemen de onzekerheden over het beleid en de effecten daarvan toe. Enerzijds is het niet zeker of bepaalde beleidsmaatregelen op langere termijn ingezet blijven worden en anderzijds is het effect van een beleidsmaatregel op bijvoorbeeld keuzegedrag van energiegebruikers op langere termijn onzeker. Dit legt beperkingen op voor lange termijn projecties.

Voor het berekenen van een referentiescenario voor BKG-emissies na 2040 is het energiesysteemmodel OPERA gebruikt (zie kader). OPERA berekent een energiesysteem met de bijbehorende emissies op basis van een optimalisatie van laagste maatschappelijke kosten. Hierbij zijn technologie-opties voor productie, conversie en gebruik (ook energiebesparingsopties) van energie met elkaar in concurrentie. Er wordt rekening gehouden met technology learning, d.w.z. dat de kosten van innovatieve technieken dalen en de prestaties (waaronder efficiency) verbeteren naarmate een technologie meer wordt toegepast (de kostendaling en technologieverbetering zijn een exogene parameters en zijn voor innovatieve technologieën per optie bepaald). Beleidsmaatregelen worden niet expliciet meegenomen (behalve de CO₂-prijs voor ETS-sector), maar veronderstelde effecten ten aanzien van inzet van technologie-opties kunnen worden meegegeven als randvoorwaarden (d.w.z. een gefixeerde, minimum of maximum inzet). De randvoorwaarden kunnen worden opgelegd aan individuele opties, aan een groep van opties of aan een sector als geheel. Door informatie over inzet van technologie-opties over te nemen uit de KEV 2022 kan voor de projecties van BKG-emissies in 2045 en 2050 een aansluiting worden gemaakt op de KEV 2022 projecties (2030-2040).

De methode kent de volgende 5 stappen¹ (zie **Figuur 2.1**):

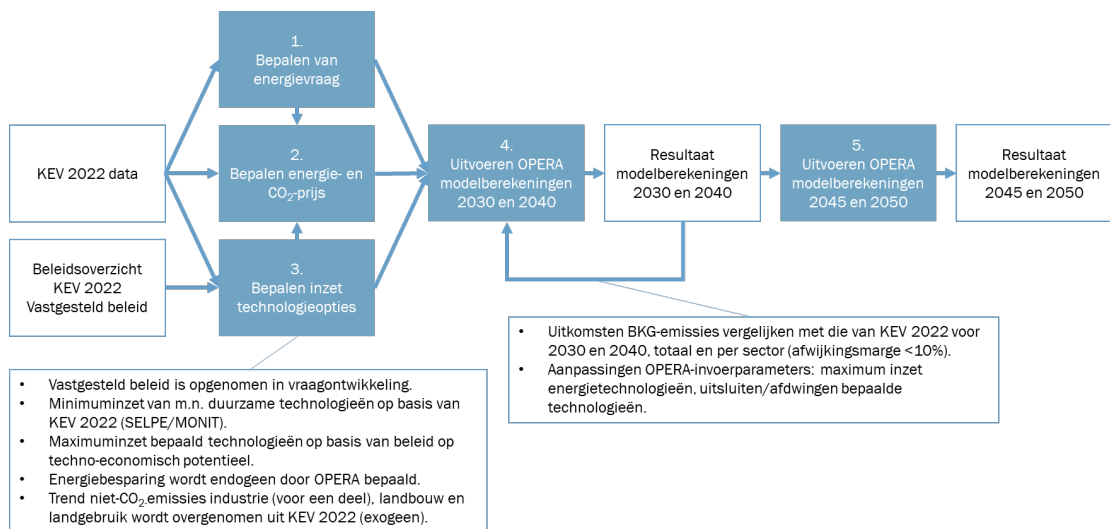
1. Bepalen van energievraag bij eindgebruikers, mobiliteitsvraag en industriële productie.
2. Bepalen van prijzen voor fossiele energie, biomassa en biobrandstoffen, en CO₂-emissierechten.
3. Inzet afleiden van technologie-opties in 2030 en 2040 op basis van de KEV 2022 (vastgesteld beleid).
4. Berekenen van energieproductie en -gebruik en BKG-emissies voor vastgesteld beleid voor de periode 2030-2040 met stappen van 5 jaar². De met het OPERA-model berekende BKG-emissies vergelijken met die van de KEV 2022. Indien nodig aanpassen van de invoerparameters. De OPERA-resultaten in 2040 laten aansluiten op de KEV-resultaten waarbij de BKG-emissies per sector niet meer dan 10% afwijken.

¹ OPERA bevat dezelfde technologieopties als die in de KEV-modellen worden gebruikt met vergelijkbare technoeconomische data die regelmatig worden geactualiseerd.

² De OPERA-berekeningen starten in 2020 om een goede startsituatie voor 2030 te creëren.

5. Berekenen van het referentiescenario voor de periode 2040-2050 en de BKG-emissies voor 2045 en 2050.

De gebruikte invoerparameters zoals genoemd in bovengenoemde stappen 1, 2 en 3 worden toegelicht in paragraaf 2.2. Paragraaf 2.3 bespreekt de aanpassing van invoerparameters m.b.t. technologie-inzet om de KEV 2022 projecties met OPERA te reproduceren (stap 4). De resultaten het referentiescenario voor de periode 2040-2050 en de BKG-emissies (stap 5) worden gepresenteerd in Hoofdstuk 3.



Figuur 2.1: Bepalen invoerparameters uit KEV 2022 en iteratie.

OPERA-model

Voor het berekenen van het referentiescenario is gebruik gemaakt van het OPERA-model. Het OPERA-model is energiesysteemmodel voor Nederland. Dit model rekent het energiesysteem en de bijbehorende emissies uit gegeven bepaalde doelen en randvoorwaarden, tegen de laagste maatschappelijke kosten. Het OPERA-model bestrijkt het volledige Nederlandse energiesysteem, (d.w.z. de sectoren energieproductie, industrie, transport, gebouwde omgeving, agrarische sector, bunkerbrandstoffen voor internationale lucht- en scheepvaart), het niet-energetisch gebruik van koolwaterstoffen en het gehele broeikasgassysteem (ook niet-CO₂ broeikasgassen*), inclusief de emissies voor landgebruik. Het model houdt rekening met energie-uitwisseling met het buitenland, met pieken en dalen van vraag en aanbod van energie en er wordt rekening gehouden met beperkingen in energietransport tussen verschillende regio's in Nederland. De niet-energetische broeikasgasemissies worden bepaald uit een basispad (input) en reducties die het model berekent aan de hand van reductieopties en -potentiëlen. Zie voor een uitgebreidere beschrijving van het OPERA-model [5].

* Methaan (CH₄), lachgas (N₂O), totaal F-gassen (HFC, PFC, SF₆)

2.2 Invoerdata

Het OPERA-model gebruikt drie typen invoerdata:

- › Energievraag
- › Energie- en CO₂-prijzen
- › Technologiedata.

Hieronder wordt toegelicht welke invoerdata voor deze studie zijn gebruikt.

Energievraag

Voor de verschillende eindgebruikerssectoren wordt de energievraag (warmtevraag, elektriciteitsvraag) als input voor het model gebruikt dan wel een fysieke grootheid die ten grondslag ligt aan deze energievraag, zoals vloeroppervlak van gebouwen, industriële productievolumes en voertuigkilometers. De gebruikte invoerparameters voor 2030 t/m 2040 zijn dezelfde als die gebruikt zijn voor de KEV 2022. Voor de periode 2040 t/m 2050 zijn deze invoerparameters lineair geëxtrapoleerd op basis van de trend 2020-2040. De gebruikte invoerparameters m.b.t. de energievraag staan weergegeven in Bijlage A.

Energie- en CO₂-prijzen

De gebruikte handelsprijzen voor fossiele brandstoffen, biomassa en CO₂-emissierechten zijn dezelfde als die gebruikt zijn voor de KEV 2022. De prijzen voor fossiele brandstoffen zijn gebaseerd op een advies van de Europese Commissie [3], waarbij voor aardgas het middelste prijsscenario is gebruikt. De prijs voor CO₂-emissierechten van 2030 t/m 2040 in de KEV is een inschatting van de ontwikkeling op de CO₂-markt, onder meer als reactie op de Fit-for-55-voorstellen van de Europese Commissie. Na 2040 is de CO₂-prijs het gemiddelde van de twee door de Europese Commissie geadviseerde prijsscenario's [3], in lijn met de aanpak van de KEV voor de prijzen in het voorgaande decennium. De gebruikte prijzen voor biobrandstoffen (biodiesel en bio-ethanol) zijn over de beschouwde periode constant verondersteld en komen overeen met cijfers uit het AdvanceFuel project (<http://www.advancefuel.eu/>).

De elektriciteitsprijs door productiemiddelen in Nederland wordt endogeen door het OPERA-model bepaald. Bij de modellering wordt rekening gehouden met de import en export van elektriciteit op uurbasis. Hiervoor zijn resultaten gebruikt van berekeningen met het Europese elektriciteitsmarktmodel COMPETES die voor de KEV 2022 zijn uitgevoerd.

Tabel 2.1: Energieprijzen (€₂₀₁₅/GJ) en CO₂-prijzen (€₂₀₁₅/ton)

Jaar	Aardgas	Olie	Kolen	Biomassa binneland (houtige)	Import biomassa (houtpellets)	Biodiesel	Bio-ethanol	CO ₂ -prijs
2030	10,69	14,56	2,93	5,4	9,7	35,0	40,0	100,9
2031	10,69	14,56	2,93	5,4	9,7	35,0	40,0	106,0
2032	10,69	14,56	2,93	5,4	9,7	35,0	40,0	111,2
2033	10,69	14,56	2,93	5,4	9,7	35,0	40,0	116,9
2034	10,69	14,56	2,93	5,4	9,7	35,0	40,0	122,7
2035	10,69	14,56	2,93	5,4	9,7	35,0	40,0	128,9
2036	10,69	14,73	2,97	5,4	9,7	35,0	40,0	135,3
2037	10,69	14,90	3,01	5,4	9,7	35,0	40,0	142,1
2038	10,69	15,07	3,04	5,4	9,7	35,0	40,0	149,2
2039	10,69	15,24	3,08	5,4	9,7	35,0	40,0	156,6
2040	10,69	15,41	3,12	5,4	9,7	35,0	40,0	164,4
2041	10,69	15,66	3,16	5,4	9,7	35,0	40,0	174,9
2042	10,69	15,90	3,20	5,4	9,7	35,0	40,0	185,4
2043	10,69	16,15	3,23	5,4	9,7	35,0	40,0	196,0
2044	10,69	16,40	3,27	5,4	9,7	35,0	40,0	206,5
2045	10,69	16,64	3,31	5,4	9,7	35,0	40,0	217,0
2046	10,78	17,04	3,35	5,4	9,7	35,0	40,0	227,5
2047	10,88	17,44	3,38	5,4	9,7	35,0	40,0	238,0
2048	10,97	17,83	3,42	5,4	9,7	35,0	40,0	248,5
2049	11,06	18,23	3,46	5,4	9,7	35,0	40,0	259,0
2050	11,16	18,63	3,50	5,4	9,7	35,0	40,0	269,5

Technologiedata

Met het OPERA-model wordt niet het beleid zelf (d.w.z. het keuzegedrag op basis van beleidsmaatregelen en -instrumenten) maar de fysieke inzet van technologie-opties gemodelleerd op basis van kosteneffectiviteit. Met beleid dat is gericht op de toepassing van specifieke technologieën wordt rekening gehouden door voor deze technologie-opties minimum en maximum grenzen te hanteren. De technologieën waarvoor deze grenzen moeten worden gebruikt zijn afgeleid uit het beleidsoverzicht dat is opgeteld voor de KEV 2022 [4] voor vastgesteld beleid. Voor de minimuminzet van deze technologieën is de inzet voor 2030 t/m 2040 overgenomen uit de MONIT- en SELPE-bestanden van KEV 2022. De maximuminzet is bepaald uit beleidsplannen (zoals voor wind op zee, CO₂-opslag, kolencentrales en kernenergie) of op basis van techno-economische potentiëlen (zoals voor biomassa en geothermie). De tabel in Bijlage B toont een overzicht van de technologie-opties waarvoor een minimum en maximum inzet is gehanteerd.

Voor alle technologieën die in het OPERA-model zijn opgenomen worden techno-economische parameters gebruikt. Er zijn meer dan 600 technologieën waaruit het model kan kiezen. Voor een groot aantal van deze technologieën zijn datasheets opgesteld die te vinden zijn op <https://energy.nl/datasheets/>.

2.3 Aanpassingen invoerdata

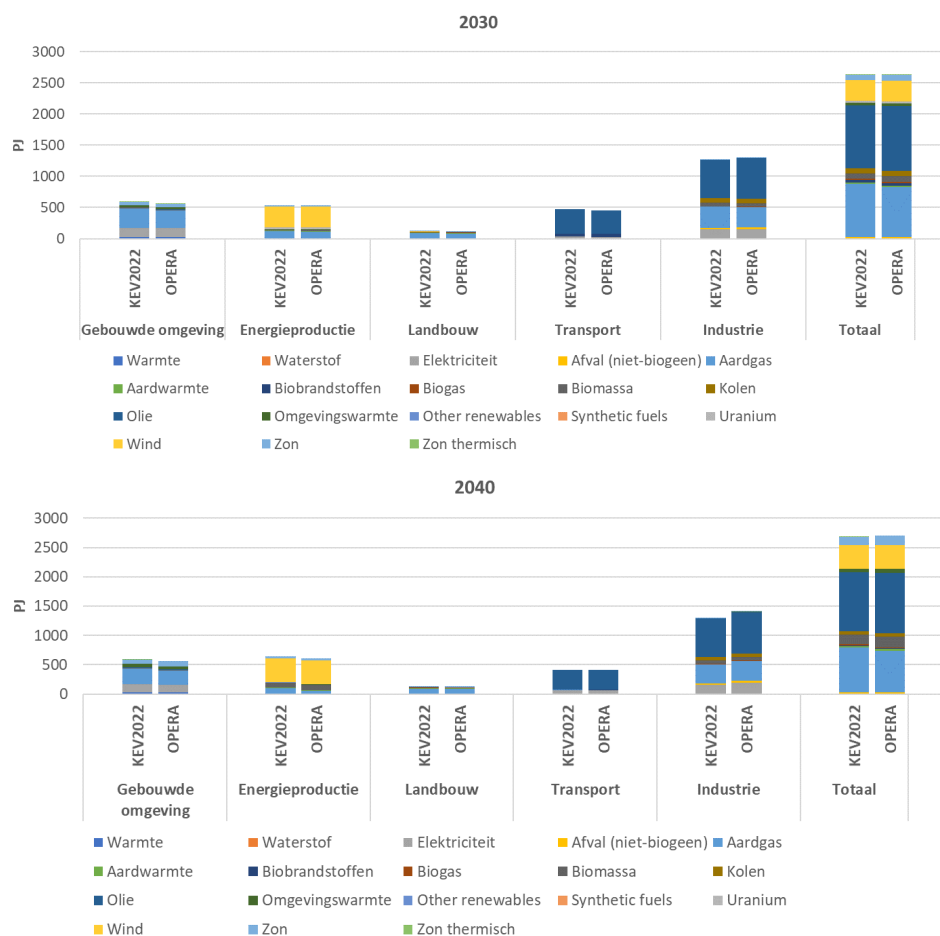
In stap 4 zijn eerst de door OPERA berekende resultaten voor energiegebruik per sector en energiedrager voor 2030 en 2040 vergeleken met die van de KEV 2022. Hieruit kon worden opgemaakt dat de inzet van sommige technologieën verschilden. Zo was de inzet van biomassa in de industrie, offshore wind, geothermie, zon-PV in de gebouwde omgeving, isolatie van gebouwen in de dienstensector en elektrische voertuigen in OPERA hoger dan in de KEV. Dit is aangepast door voor deze technologieën en technologiegroepen een maximum inzet toe te passen of, als er al een maximumgrens was toegepast, deze te verlagen.

Daarnaast lieten de initiële OPERA-uitkomsten zien dat alle in Nederland benodigde biobrandstoffen ook in Nederland worden geproduceerd en dat staalproductie plaatsvindt met gebruik van kolen en toepassing van CO₂-afvang en -opslag (CCS). De KEV gaat echter uit van import van biobrandstoffen en staalproductie dat voor een deel plaatsvindt op basis van direct reduced iron (DRI) met gebruik van aardgas. Door toepassen van extra randvoorwaarden ten aanzien van import en technologiegebruik, is er voor gezorgd dat het OPERA-model dezelfde keuzes maakt als de KEV.

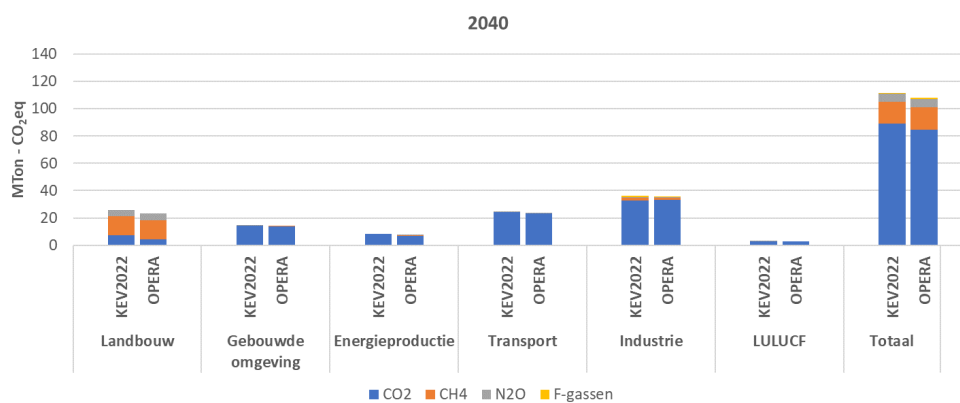
Nadat opnieuw modelberekening zijn uitgevoerd zijn de totale BKG-emissies voor 2040 per sector vergeleken. Het verschil tussen totale BKG-emissies in 2040 per sector is kleiner dan 10%³. De vergelijking van de definitieve OPERA-resultaten voor energieproductie en -gebruik met die van de KEV worden getoond in **Figuur 2.2** en de vergelijking voor de BKG-emissies in **Figuur 2.3**.

Deze aanpak zorgt voor een goede aansluiting van het referentiescenario voor 2040-2050 op de KEV-projecties tot 2040. De resultaten van het referentiescenario worden gepresenteerd en toegelicht in het volgende hoofdstuk.

³ Ten opzichte van KEV 2022 zijn de afwijkingen qua BKG-emissies in de OPERA-berekening: landbouw -9%, gebouwde omgeving -2%, energieproductie -6%, industrie -1%, transport -2% en LULUCF +4%. In totaal zijn de BKG-emissies in 2040 bij de OPERA-berekening 3% lager dan in de KEV.



Figuur 2.2: Vergelijking van OPERA-resultaten en KEV-projecties voor 2030 en 2040 voor energie per sector.

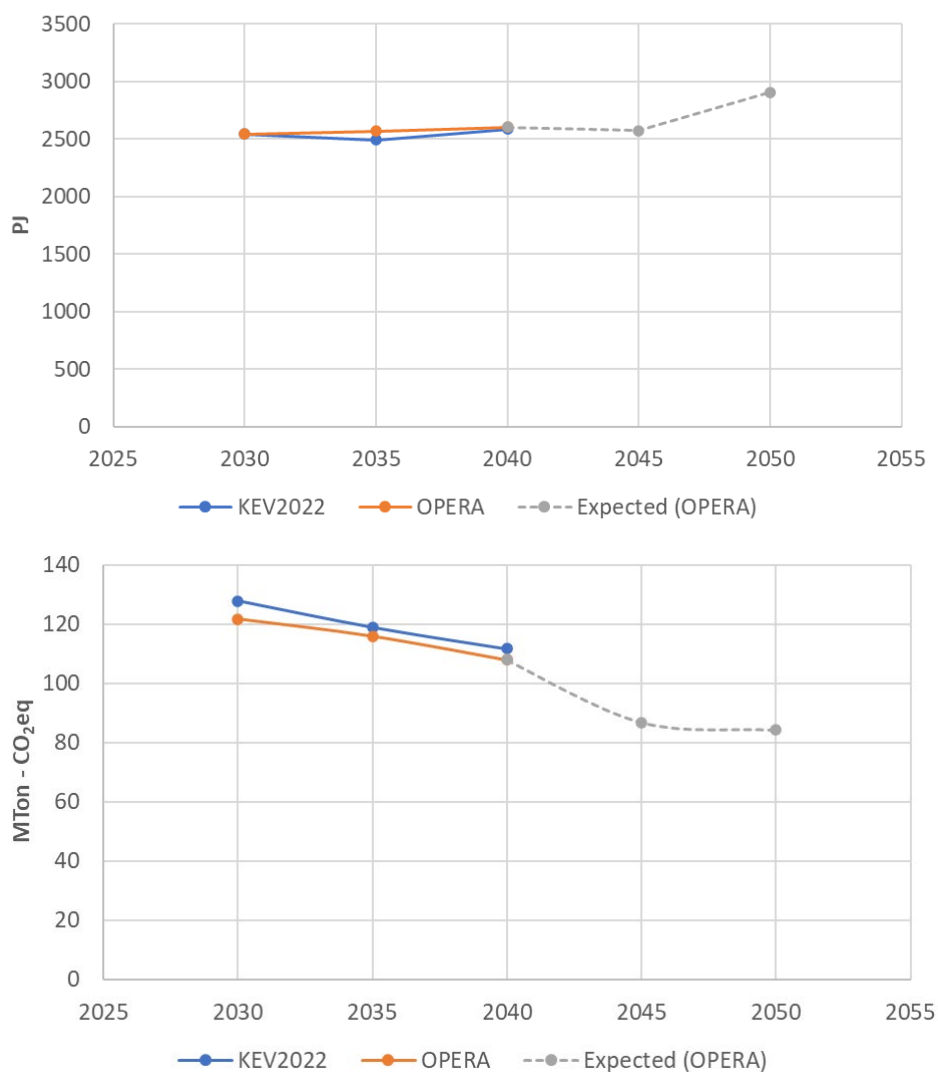


Figuur 2.3: Vergelijking van OPERA-resultaten en KEV-projecties voor 2040 voor BKG-emissies per sector.

3 Resultaten

3.1 Referentiescenario 2040-2050

Figuur 3.1 toont de ontwikkeling van de primaire energie en de BKG-emissies voor de periode 2030-2040 volgens de KEV 2022 en OPERA en het met OPERA berekende referentiescenario voor de periode 2040-2050. Het energiegebruik en de BKG-emissies die met het OPERA-model zijn berekend zijn in **Figuur 3.2** per sector weergegeven voor 2040, 2045 en 2050.



Figuur 3.1: Primaire energie, inclusief bunkerbrandstoffen een niet-energetisch gebruik (boven) en BKG-emissies (onder) volgens KEV 2022 en het referentiescenario.



Figuur 3.2: Energiegebruik (boven) en BKG-emissies (onder) voor de verschillende sectoren in 2040, 2045 en 2050 op basis van de OPERA-berekeningen.

Figuur 3.1 laat zien dat de BKG-projecties van het referentiescenario geen voortzetting is van de trend 2030-2040. De BKG-emissies dalen, maar vertonen een afvlakking tussen 2045 en 2050. Gelijktijdig stijgt het primaire energieverbruik. Uit **Figuur 3.2** kan worden opgemaakt dat de afvlakking van de emissies het gevolg is van enerzijds dalende BKG-emissies in de sectoren gebouwde omgeving en transport, maar een toename in de sectoren energie en industrie in 2050. Na een aanvankelijke daling van de BKG-emissies in de industrie in 2045, stijgen die weer in 2050, maar blijven wel lager dan in 2040.

De stijging van het energiegebruik in de energiesector kan verklaard worden uit de toename van de primaire energievraag, mede als gevolg van toepassen van elektroyzers (toename conversieverliezen). De toename van de BKG-emissies in de industrie in 2050 vindt onder meer plaats in de chemie als gevolg van een verandering in de ethyleenproductie. Daarbij vindt een verschuiving plaats van naftakraken (op basis van olie) naar methanol-to-olefins (op basis van aardgas) en een andere invulling van de warmteproductie. Naast de stijging in de energievraag veroorzaakt de toename van de non-energetische toepassing van aardgas (voor ethyleenproductie) ook een stijging van het primaire energiegebruik. De verschuivingen

in de technologie-inzet is het gevolg van een verdere stijging van de CO₂-prijs (zie **Tabel 3.2**) en een daling van de technologiekosten.

3.2 BKG-emissies 2045-2050

Op basis van het referentiescenario zijn BKG-emissies berekend voor 2045 en 2050. De resultaten van deze projecties worden ten behoeve van de INEK-rapportage in **Tabel 3.1** tot en met **Tabel 3.6** weergegeven. De emissies van F-gassen (SF₆, NF₃, HFC en PFC) worden alleen weergegeven in kton CO₂eq, aangezien het OPERA-model geen onderscheid maakt tussen deze verschillende gassen. In **Tabel 3.1** staan de BKG-emissies voor alle sectoren, inclusief internationale luchtvaart en **Tabel 3.2** geeft ook de totale BKG-emissies, maar dan exclusief internationale luchtvaart. **Tabel 3.3** en **Tabel 3.4** geven de resultaten voor respectievelijk de ETS- en de ESR-sector. De verdeling van de emissies tussen deze sectoren is op dezelfde manier gedaan als in de KEV 2022. De BKG-emissies van de LULUCF-sector is een extrapolatie van de BKG-emissies uit de KEV 2022⁴.

Tabel 3.1: BKG-emissies inclusief indirecte emissies inclusief niet-energetisch gebruik, LULUCF en internationale luchtvaart.

Broeikasgas	Eenheid	2045	2050
CO ₂ *	kton	75500	72254
CH ₄	kton	560	560
N ₂ O	kton	25	25
CO ₂ *	kton CO ₂ eq	75500	72254
CH ₄	kton CO ₂ eq	15683	15683
N ₂ O	kton CO ₂ eq	6552	6552
F-gassen	kton CO ₂ eq	657	582
Totaal	kton CO ₂ eq	98393	95072

* Na aftrek van CO₂-opslag

Tabel 3.2: Totale BKG-emissies inclusief indirecte emissies inclusief niet-energetisch gebruik en LULUCF, exclusief internationale luchtvaart.

Broeikasgas	Eenheid	2045	2050
CO ₂ *	kton	63552	60306
CH ₄	kton	560	560
N ₂ O	kton	24	24
CO ₂ *	kton CO ₂ eq	63552	60306
CH ₄	kton CO ₂ eq	15681	15681
N ₂ O	kton CO ₂ eq	6462	6462
F-gassen	kton CO ₂ eq	657	582
Totaal	kton CO ₂ eq	86352	83032

* Na aftrek van CO₂-opslag

⁴ De trend voor CO₂-emissies is logaritmisch geëxtrapoleerd. De projectie van CH₄-emissies is nul, omdat de KEV geen CH₄-emissies rapporteert. De trend voor N₂O emissies is constant vanaf 2035; deze trend is doorgetrokken naar 2045 en 2050.

Tabel 3.3: BKG-emissies ETS-sectoren, inclusief niet-energetisch gebruik.

Broeikasgas	Eenheid	2045	2050
CO ₂ *	kton	24513	23058
CH ₄	kton	8	11
N ₂ O	kton	0,8	0,8
CO ₂ *	kton CO ₂ eq	24513	23058
CH ₄	kton CO ₂ eq	217	320
N ₂ O	kton CO ₂ eq	207	207
F-gassen	kton CO ₂ eq	15	13
Totaal	kton CO ₂ eq	24952	23599

* Na aftrek van CO₂-opslag

Tabel 3.4: BKG-emissies ESR-sectoren

Broeikasgas	Eenheid	2045	2050
CO ₂	kton	36322	34667
CH ₄	kton	552	549
N ₂ O	kton	23	23
CO ₂	kton CO ₂ eq	36322	34667
CH ₄	kton CO ₂ eq	15464	15361
N ₂ O	kton CO ₂ eq	6175	6175
F-gassen	kton CO ₂ eq	642	569
Totaal	kton CO ₂ eq	58603	56771

Tabel 3.5: BKG-emissies LULUCF-sector

Broeikasgas	Eenheid	2045	2050
CO ₂ *	kton	2717	2581
CH ₄	kton	0	0
N ₂ O	kton	0,3	0,3
CO ₂ *	kton CO ₂ eq	2717	2581
CH ₄	kton CO ₂ eq	0	0
N ₂ O	kton CO ₂ eq	80	80
F-gassen	kton CO ₂ eq	0	0
Totaal	kton CO ₂ eq	2797	2661

* Netto, na aftrek van CO₂-vastlegging

De BKG-emissies volgens de Common Reporting Format (CRF) categorieën worden weergegeven in **Tabel 3.6**. De BKG-emissies in de categorie ‘energie’ betreffen alle BKG-emissies die te maken hebben met het energetisch gebruik van brandstoffen en de emissies die ontstaan bij transport en opslag van deze brandstoffen⁵, en de CO₂ die, volgens de modelanalyse, worden afgevangen en opgeslagen.

⁵ De CO₂- en CH₄-emissies van kolenomzetting, olieraffinage, gaswinning en -transport en afblazen en affakkelen (vluchtige gassen) zijn overgenomen uit de KEV 2022 en voor 2045 en 2050 aangepast, proportioneel met de energierelevante grootheden (cokes productie, olie-inzet raffinaderijen en hoeveelheid getransporteerd aardgas).

De BGK-emissies voor de andere categorieën komen niet uit de modelberekeningen, maar zijn geëxtrapoleerd uit de KEV 2022 projecties⁶. Dit is gedaan omdat het OPERA-model niet alle onderliggende emissiebronnen bevat.

Tabel 3.6: BKG-emissies per Common Reporting Format (CRF) categorie

Broeikasgas	Eenheid	2045	2050
Energie			
CO ₂	kton	62846,83	59716,90
CH ₄	kton	71,22	80,36
N ₂ O	kton	4,43	4,70
Totaal	kton CO ₂ eq	66014,73	63211,73
Procesemissies			
CO ₂	kton	6546,75	6546,75
CH ₄	kton	15,05	15,05
N ₂ O	kton	1,86	1,86
F-gassen	kton	656,98	582,11
Totaal	kton CO ₂ eq	8118,14	8043,27
Landbouw			
CO ₂	kton	71,60	70,27
CH ₄	kton	445,91	443,56
N ₂ O	kton	16,81	16,54
Totaal	kton CO ₂ eq	17012,10	16873,84
LULUCF			
CO ₂	kton	2717,00	2580,86
CH ₄	kton	0,00	0,00
N ₂ O	kton	0,30	0,30
Totaal	kton CO ₂ eq	2797,40	2661,26
Afvalsector			
CO ₂	kton	0,00	0,00
CH ₄	kton	28,01	21,00
N ₂ O	kton	0,98	0,98
Totaal	kton CO ₂ eq	1043,00	847,00

3.3 Onzekerheden

Bij de KEV nemen de onzekerheden over het beleid op de langere termijn en de effecten daarvan op energiegebruik en -productie, en de daaraan gerelateerde emissies toe. Ook bij het opstellen van lange termijn projecties voor energie en emissies met het OPERA-model zijn er onzekerheden. Maatschappelijke en economische ontwikkelingen die bepalend zijn voor de energie- en mobiliteitsvraag en industriële productie kunnen anders verlopen dan in

⁶ Voor de procesemissies zijn de waarden voor CO₂- en N₂O-emissies, afhankelijk van het proces, voor 2045 en 2050 gelijk gehouden met die van 2040 of bepaald op basis van een meerjarig gemiddelde (2020-2040). Voor de CH₄-emissies is de 2040-waarde aangehouden.

Voor de landbouwemissies zijn de CO₂- en N₂O-emissies lineair geëxtrapoleerd naar 2045 en 2050 op basis van de 2020-2040 tijdsreeks. De CH₄-emissies vertonen een logaritmische afnemende trend over 2020-2040 en deze is doorgetrokken naar 2045 en 2050.

Zie voor LULUCF-emissies voetnoot 5

De emissies uit de afvalsector betreffen CH₄-emissies uit stortplaatsen: afnemende trend over 2020-2040 is logaritmische doorgetrokken naar 2045 en 2050. De CH₄- en N₂O-emissies uit biobehandeling van vast afval- en afvalwaterbehandeling zijn constant gehouden na 2040.

de KEV en het referentiescenario is verondersteld. Ook de ontwikkeling van energie- en CO₂-prijzen en kosten en prestaties van technologie kan afwijken van wat voor het referentiescenario is aangenomen. Daarnaast wordt bij het OPERA-model verondersteld dat investerings- en operationele keuzes worden gemaakt die leiden tot de laagste kosten voor het gehele energiesysteem (d.w.z. laagste nationale kosten). Deze keuzes hangen echter ook af van de verdeling van kosten en opbrengsten tussen de verschillende actoren in het energiesysteem, d.w.z. van de marktinrichting en van beleid- en regulering. Omdat in de praktijk geen sprake is van een perfect functionerende markt en beleid- en regulering niet optimaal hoeft te zijn, zullen investerings- en operationele keuzes afwijken van wat het model verondersteld. Ook hoeven actoren niet te handelen op grond van laagste kosten: zij kunnen bijvoorbeeld eerder overschakelen op hernieuwbare energietechnologieën of juist langer gebruik blijven maken van fossiele technologieën terwijl dit duurder is dan het duurzame alternatief. Door deze onzekerheden kunnen de BKG-emissies afwijken van de hier gepresenteerde projecties. Deze mogelijke afwijkingen zijn niet verder onderzocht.

4 Conclusies

Conclusies

- › In dit onderzoek is een methode ontwikkeld en toegepast om projecties van BKG-emissies met het OPERA-model te laten aansluiten op projecties van de KEV voor vastgesteld beleid. Met deze methode blijkt het mogelijk BKG-emissies te berekenen die per sector binnen een afwijking van 10% blijven. De totale afwijking is kleiner en bedraagt 3%.
- › Met het gekalibreerde OPERA-model is voor een referentiescenario een projectie gemaakt van de BKG-emissies voor 2045 en 2050. Deze projecties laten zien dat het verloop van primaire energie en BKG-emissies niet een voortzetting is van de trend van de KEV. Het is daarom zinvol om het OPERA-model te gebruiken in aanvulling op de berekeningsmethodiek van de KEV.
- › Het referentiescenario laat zien dat de primaire energie na 2040 toeneemt. Dit komt door een stijging van de energievraag. Naast een generieke vraaggroei stijgt de energievraag ook door toepassing van electrolyzers en CCS.
- › In het referentiescenario dalen de BKG-emissies na 2040, maar vertonen een afvlakking tussen 2045 en 2050. De afvlakking is het gevolg van enerzijds dalende BKG-emissies bij gebouwde omgeving en transport en anderzijds een toename in de sectoren energieproductie en industrieën. De toename van de BKG-emissies in de industrie is het gevolg van technologische veranderingen in 2050.
- › Veranderingen in energiegebruik en BKG-emissies worden, naast ontwikkeling van de energie- en mobiliteitsvraag en industriële productie, veroorzaakt door andere technologie-inzet onder invloed van stijging van de CO₂-prijs en daling van de technologiekosten.

Aanbevelingen

- › Aanbevolen wordt de in dit project ontwikkelde methodiek, waarbij voor de langere termijn een referentiescenario wordt doorgerekend met het OPERA-model, te gebruiken in aanvulling op de KEV. Daarbij dient het OPERA-model te worden gekalibreerd aan de hand van gegevens over technologie-inzet uit de KEV.
- › De methodiek kan mogelijk op enkele punten worden verbeterd:
 - Een koppeling aanbrengen tussen MONIT en OPERA, zodat data over energie- en mobiliteitsvraag en industriële productie automatisch kan worden ingelezen. Dit geldt ook voor de energiegebruiken die de KEV projecteert en als randvoorwaarde door OPERA worden gebruikt. Dit vergroot de betrouwbaarheid en efficiëntie, omdat handmatige handelingen worden verminderd.
 - Het OPERA-model kan worden verbeterd, c.q. uitgebreid ten aanzien van berekening van BKG-emissies voor procesemissies en vluchtige gassen die in het energiesysteem ontstaan. Deze emissies zijn gerelateerd aan energie- en productieketens die in het model zijn opgenomen. Projecties van BKG-emissies buiten het energiesysteem (LULUCF, landbouw, afval) kunnen bepaald blijven worden door extrapolatie van de KEV-projecties of door gebruik te maken van een andere methodiek.

Referenties

- [1] EC, *Implementing Regulation (EU) 2020/1208*, 2020.
- [2] PBL, TNO, CBS en RIVM, “Klimaat en Energieverkenning (KEV),” Planbureau voor de Leefomgeving, Den Haag, 2022.
- [3] EC, “Recommended parameters for reporting on GHG projections in 2023, unpublished document shared with the Member States,” Brussel, 2022.
- [4] PBL, “Beleidsoverzicht en factsheets beleidsinstrumenten - Achtergronddocument bij de Klimaat- en Energieverkenning 2022,” Planbureau voor de Leefomgeving, Den Haag, 2022.
- [5] M. Scheepers, S. Gamboa Palacios, E. Jegu, L. Pupo Nogueira, L. Rutten, J. v. Stralen, K. Smekens and W. K.J., “Towards a sustainable energy system for the Netherlands in 2050,” TNO 2020 P10338, 2020.

Bijlage A

Energievraag

Sector	Eenheid	2020	2025	2030	2035	2040	2045*	2050*
Industrie								
Staalproductie	Mton	6,10	7,20	7,20	7,20	7,20	7,20	7,20
Primaire aluminiumproductie	Mton	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07
Ammoniakproductie	Mton	2,57	2,75	2,84	2,92	3,01	3,10	3,20
Ethyleenproductie	Mton	4,47	4,47	4,47	4,67	4,93	5,19	5,45
Methanolproductie	Mton	0,46	0,49	0,51	0,53	0,55	0,57	0,59
Chloorproductie	Mton	1,01	1,10	1,14	1,20	1,27	1,34	1,41
Zoutproductie	Mton	7,24	7,90	8,22	8,60	9,09	9,60	10,11
Glasproductie	Mton	0,90	1,04	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30
Keramiekproductie	Mton	2,87	2,86	2,98	3,07	3,19	3,32	3,45
Afvalverbranding	PJ	67,18	62,66	63,03	63,35	63,26	64,39	62,85
Mobiliteit								
Passagier wegverkeer	Miljard voertuigkilometers	104,16	121,81	126,97	126,98	126,98	126,98	126,98
Licht vrachtverkeer	Miljard voertuigkilometers	18,26	20,04	21,21	21,21	21,21	21,21	21,21
Zwaar vrachtverkeer	Miljard voertuigkilometers	7,69	7,94	8,10	8,10	8,10	8,10	8,10
Binnenvaart	Miljard tonkilometers	46,64	52,32	56,23	56,23	56,23	56,23	56,23
Busvervoer	Miljard voertuigkilometers	0,67	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,75
Energievraag mobiele werktuigen								
Landbouw	PJ	17,37	16,56	16,02	15,60	15,19	15,19	15,19
Industrie	PJ	26,52	23,89	21,77	20,38	19,18	19,19	15,83
Dienstensector	PJ	7,23	7,09	7,08	7,09	7,09	7,09	7,09
Internationale luchtvaart	PJ	92,70	154,20	168,60	173,10	171,70	171,70	171,70
Internationale scheepvaart	PJ	493,10	487,10	471,50	471,30	473,00	473,00	473,00

Sector	Eenheid	2020	2025	2030	2035	2040	2045*	2050*
Verwarming huishoudens								
Aantal appartementen	Miljoen	2,97	2,83	2,97	3,09	3,14	3,19	3,23
Aantal rijtjeswoningen	Miljoen	2,43	2,31	2,43	2,53	2,57	2,60	2,64
Aantal andere woningen	Miljoen	2,84	2,70	2,83	2,95	3,00	3,05	3,09
Diensten sector								
Bruto vloeroppervlak onderwijs	Miljoen m ²	33,74	36,17	34,58	33,55	31,95	30,87	29,79
Bruto vloeroppervlak ziekenhuizen	Miljoen m ²	15,15	17,50	19,15	21,13	23,32	25,57	27,82
Bruto vloeroppervlak bedrijfsgebouwen	Miljoen m ²	138,92	153,51	162,13	175,03	189,12	201,19	213,25
Bruto vloeroppervlak kantoren	Miljoen m ²	66,59	71,13	67,83	69,75	70,61	71,42	72,23
Bruto vloeroppervlak overige dienstensector	Miljoen m ²	127,66	126,08	124,11	122,59	116,33	102,29	88,25
Overige warmtevraag								
Landbouw	PJ	87,01	75,07	71,28	66,10	70,45	70,45	70,45
Basismetaleel – ferro	PJ	7,77	3,57	19,12	68,26	68,22	68,07	67,91
Basismetaleel – non-ferro	PJ	2,07	1,68	1,46	1,40	1,45	1,23	1,01
Kunstmestindustrie	PJ	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Chemische industrie	PJ	122,88	133,09	42,91	37,87	40,47	34,97	29,48
Voedsel- en genotmiddelenindustrie	PJ	50,28	48,05	38,61	37,27	38,35	38,72	39,09
Overige industrie	PJ	42,96	40,19	32,28	31,17	32,07	28,02	23,96
Afvalverwerkende industrie	PJ	5,43	6,13	13,24	6,63	6,91	7,29	7,68
Overige brandstofvraag Transport	PJ	19,26	22,62	22,39	22,08	21,75	21,44	21,38
(Overige) elektriciteitsvraag								
Huishoudens	TWh	23,55	20,54	19,68	19,67	19,71	19,73	19,77
Diensten (incl. datacenters)	TWh	32,75	30,96	31,02	33,11	35,88	38,86	41,84
Landbouw	TWh	11,11	9,82	9,83	9,99	10,45	10,45	10,45
Basismetaleel – ferro	TWh	2,24	2,63	4,24	5,23	5,24	6,30	7,36
Basismetaleel – non-ferro	TWh	2,12	2,00	2,01	2,07	2,18	2,22	2,26
Kunstmestindustrie	TWh	0,21	0,39	1,19	0,92	0,74	1,06	1,38
Chemische industrie	TWh	9,71	10,31	12,34	13,00	13,55	14,71	15,87
Voedsel- en genotmiddelenindustrie	TWh	6,69	6,91	7,83	7,94	8,16	8,39	8,61
Overige industrie	TWh	6,37	6,55	7,46	7,55	7,76	8,21	8,66
Afvalverwerkende industrie	TWh	2,44	2,73	1,91	1,95	2,08	1,85	1,62
Transport	TWh	1,34	1,67	1,99	2,09	2,20	2,30	2,41

Bijlage B

Minimum en maximum waarden voor technologie-opties

Onderstaande tabel geeft een overzicht van randvoorwaarden t.a.v. minimale en maximale inzet voor technologie-opties die in de OPERA-berekeningen zijn toegepast. De minimuminzet voor 2030, 2035 en 2040 is overgenomen uit de MONIT- en SELPE-bestanden van KEV 2022 voor vastgesteld beleid. De maximuminzet is bepaald uit beleidsplannen (zoals voor wind op zee, CO₂-opslag, kolencentrales en kernenergie) of op basis van techno-economische potentiëlen (zoals voor biomassa en geothermie). De randvoorwaarden voor het referentiescenario (2045 en 2050) zijn grijs gearceerd.

		2030		2035		2040		2045		2050		Bron / opmerking
	Eenheid	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	
Elektriciteitsproductie												
Wind op Zee	GW		14,5		21		21		21		21	Routekaart wind op zee; voor 2030 rekening gehouden met begrenzing netaansluiting
Wind op Zee	PJ	246,3	248,1	326,1	359,3	323,5	359,3	323,5	359,3	323,5	359,3	Voor 2045 en 2050 gebaseerd op 4753 vollasturen
Wind op Land	GW		9		9,5		10		11		12	TNO scenario's 2022 TRANSFORM (TNO P10162)
Wind op Land	PJ	83,7	89,1	82,0	96,2	85,7	103,5	85,7	116,3	85,7	129,6	Voor 2045 en 2050 gebaseerd op 3000 vollasturen
Wind totaal	PJ	330,0	337,2	408,1	455,5	409,2	462,8	409,2	475,7	409,2	488,9	
Zon PV	GW		40,5				78,2				132,1	TNO scenario's 2022 TRANSFORM (TNO P10162); In 2030 geen maximum 35 TWh (want is voorgenomen beleid)
Zon PV (totaal alle sectoren)	PJ	84,4		113,9		142,2		142,2		142,2		
Zon PV energiesector	PJ	24,6		34,2		42,0		42,0		42,0		
Waterkracht	PJ	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
Kernenergie	GW		0,5		0		0	0		0		Borssele sluit in 2033; geen nieuwe kerncentrales
Kolencentrales	GW		0		0		0	0		0		Na 2030 geen kolencentrales

		2030		2035		2040		2045		2050		Bron / opmerking
	Eenheid	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	
Warmteproductie (warmtenetten)												
Geothermie (alle sectoren)			50,0				125,0		162,5		200,0	TNO scenario's 2022 TRANSFORM (TNO P10162)
Geothermie energiesector	PJ	3,7		5,6		7,5		7,5		7,5		
Aquathermie (omgevingswarmte)	PJ	2,0		2,6		3,2		3,2		3,2		
Biomassa (vaste) restwarmte elektriciteitsproductie	PJ	9,2		4,6		0		0		0		
Biomassa (vaste)												
Huishoudens	PJ	15,8		15,8		15,8		15,8		15,8		
Utiliteit	PJ	1,9		1,9		1,9		1,9		1,9		
Landbouw	PJ	4,8		4,8		4,8		4,8		4,8		
Huishoudens, diensten & landbouw	PJ	22,5		22,5		22,5		22,5		22,5		

Groengas productie												
Biomassa (vaste)	PJ	0,0		0,0		86,0		86,0		86,0		
Huishoudens												
Warmtepompen (omgevingswarmte)	PJ	21,2		31,8		37,3		37,3		37,3		
Zon PV	PJ	31,5		39,8		49,7		49,7		49,7		
Zon-thermisch	PJ	0,9		0,9		0,9		0,9		0,9		
Warmtelevering	PJ	16,2		17,1		17,3		17,3		17,3		

Utiliteit										
Warmtepompen (omgevingswarmte)	PJ	12,7		14,9		16,4		16,4	16,4	
Zon PV	PJ	14,4		22,2		29,6		29,6	29,6	
Zon-thermisch	PJ	0,5		0,6		0,8		0,8	0,8	
Warmtelevering (overige warmte)	PJ	8,5		9,2		10,2		10,2	10,2	
Personenauto's										
Elektrisch	PJ	18,6		30,2		43,0		43,0	43,0	
Biodiesel	PJ	1,2		0,2		0,1		0,1	0,1	
Biobenzine	PJ	16,9		6,6		3,5		3,5	3,5	
Waterstof	PJ	0,0		0,0		0,0		0,0	0,0	
Lichte bedrijfswagens										
Elektrisch	PJ	0,8		2,1		3,7		3,7	3,7	
Biodiesel	PJ	6,2		2,3		1,3		1,3	1,3	
Biobenzine	PJ	0,1		0,0		0,0		0,0	0,0	
Waterstof	PJ	0,0		0,0		0,0		0,0	0,0	
Zware bedrijfswagens										
Elektrisch	PJ	2,2		6,5		9,8		9,8	9,8	
Biodiesel	PJ	11,8		4,8		3,1		3,1	3,1	
Biobenzine	PJ	0,0		0,0		0,0		0,0	0,0	
Waterstof	PJ	0,0		0,0		0,0		0,0	0,0	
Autobussen										
Elektrisch	PJ	1,1		1,1		1,1		1,1	1,1	
Biodiesel	PJ	0,4		0,2		0,1		0,1	0,1	
Biobenzine	PJ	0,0		0,0		0,0		0,0	0,0	
Waterstof	PJ	0,1		0,1		0,1		0,1	0,1	

<i>Binnenvaart (samengevoegd)</i>										
Elektrisch	PJ	0,2		0,3		0,3		0,3	0,3	
Biodiesel	PJ	0,4		0,4		0,3		0,3	0,3	
Biobenzine	PJ	0,1		0,0		0,0		0,0	0,0	
Waterstof	PJ	0,0		0,0		0,0		0,0	0,0	
<i>Mobiele werktuigen (samengevoegd)</i>										
Elektrisch	PJ	0,5		1,1		0,7		0,7	0,7	
Biodiesel	PJ	4,8		2,1		1,3		1,3	1,3	
Biobenzine	PJ	0,0		0,0		0,0		0,0	0,0	
Waterstof	PJ	0,0		0,0		0,0		0,0	0,0	
<i>Industrie</i>										
Zon-PV	PJ	6,5		7,7		9,5		9,5	9,5	
Geothermie	PJ	0,4		0,7		1,0		1,0	1,0	
Biogas	PJ	4,5		3,9		3,9		3,9	3,9	
Biomassa (vaste)	PJ	5,9		6,4		6,5		6,5	6,5	
Restwarmte levering	PJ	12,1		12,7		13,2		13,2	13,2	
<i>Landbouw (incl tuinbouw)</i>										
Warmtepompen (omgevingswarmte)	PJ	2,3		3,3		0,5		0,5	0,5	
Geothermie	PJ	11,9		15,8		19,8		19,8	19,8	
Biogas	PJ	9,6		9,6		9,6		9,6	9,6	
Biomassa (vaste)	PJ	4,8		4,8		4,8		4,8	4,8	
Warmtelevering	PJ	3,5		3,9		4,3		4,3	4,3	
<i>CO₂-opslag</i>										
CO ₂ -opslag industrie	Mton/jaar		8,7							2030: Klimaatakkoord plafond 7,2 Mton; ophoging 2022 met 1,5 Mton

CO ₂ -opslag energiesector	Mton/jaar		3							2030: Klimaatakkoord plafond 3 Mton voor elektriciteitsproductie
CO ₂ -opslag industrie	Mton/jaar	4,0		4,0		4,2		4,2	4,2	
CO ₂ -opslag energiesector	Mton/jaar	3,7		3,4		3,4		3,4	3,4	
CO ₂ -opslag overig	Mton/jaar	1,3		1,5		1,5		1,5	1,5	

Biomassa										
Biomassa binnenlands	PJ		146,3		157,9		169,5	181,1	192,7	TNO scenario's 2022 (TNO P10162)
Biomassa import	PJ		155,8		285,6		415,4	545,2	675	TNO scenario's 2022 (TNO P10162)

Energy & Materials Transition

Radarweg 60
1043 NT Amsterdam
www.tno.nl