

augustus 2024

Grote kostenverschillen in keuzes klimaatbeleid

Analyse van de verschillen in kosten tussen een
fossielvrij en CO₂-neutraal Nederland in 2050

Dit rapport is geschreven door Publieke Zaken, Energy Research & Strategy en Quo Mare.

Den Haag, augustus 2024

© Copyright Publieke Zaken B.V. & Quo Mare B.V., 2024

De tekst is afgesloten op 01-08-2024

Introductie

Op 12 december 2015 werd tijdens de *Conference of the Parties* (COP21) in Parijs een internationaal klimaatverdrag gesloten: het Klimaatakkoord van Parijs. Met dat verdrag kwamen 195 landen overeen dat zij de opwarming van de aarde willen beperken tot behoorlijk onder (*well below*) de twee graden Celsius, met inspanningen strevend naar anderhalve graad. Hoewel er daarvoor ook al aan energie- en klimaatbeleid werd gedaan door veel landen, kwam de energietransitie na het tekenen van het verdrag in een stroomversnelling.

Bij het maken van klimaatbeleid is het cruciaal om het einddoel van dit beleid – het beperken van de mondiale temperatuurstijging – in gedachten te houden. Veel beleid wordt op dit moment immers gedreven door alternatieve of indirecte doelen die de efficiëntie en doelmatigheid ten aanzien van het halen van het eigenlijke doel niet per se bevorderen. Eén van de afwegingen die een grote impact kan hebben op de hoogte van de investeringen voor het halen van die doelen is de keuze of fossiele brandstoffen volledig moeten worden uitgebannen, of dat het vooral gaat om het uitstootneutraal maken van de energiemix (meestal samengevat als terugdringen van de uitstoot van broeikasgassen, vaak geduid als CO₂-equivalent¹).

In Europa zijn de klimaatdoelen vastgesteld door de Europese Commissie (EC). Deze doelen moeten door de afzonderlijke lidstaten naar rato worden gehaald. Iedere lidstaat heeft daarom ook nationaal beleid dat, geholpen door de kaders die vanuit Europa worden gezet, moet zorgen voor voldoende en tijdige afbouw van de CO₂-uitstoot. De energietransitie is daarmee ook een economische uitdaging. Je vervangt immers een zeer efficiënte, en daarmee goedkope, energiemix voor een andere, vaak minder betrouwbare en/of duurdere mix met een hoger ruimtebeslag. Daarom is het streven om de transitie naar een economie te bewerkstelligen zonder uitstoot richting de atmosfeer en tegen de laagst mogelijke kosten. Hoe hoog deze kosten zullen zijn, hangt af van de beleidskeuzes die bepaalde technologieën al dan niet uitsluiten.

Tijd voor kieskeurigheid is er niet, maar...

Nederland lijkt koploper als het gaat om het stellen van nog ambitieuzere klimaatdoelen dan al voorgeschreven door de EC. Kijkende naar kosteneffectiviteit kan de vraag gesteld worden in hoeverre het wenselijk is om (te) ver voor de rest van de wereld uit te lopen. Daarnaast is er nog een andere afweging te maken, namelijk die van technologiekeuzes.

Het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) liet in een recent onderzoek² zien dat het uitstellen of op voorhand uitsluiten van opties klimaatneutraliteit in Nederland in 2050 bijna of zelfs helemaal onmogelijk maakt. De luxe om te kiezen tussen energiebronnen en technieken is er volgens het PBL niet meer. Dit lijkt haaks te staan op het recente burgerinitiatief³, geïntroduceerd door Triodos Bank en een brede groep organisaties en bedrijven. Dit initiatief zet zich juist in voor een internationaal verdrag dat het gebruik van kolen, olie en gas volledig stopt. Het is juist dat de klimaatdoelen ook gehaald kunnen worden door bepaalde technieken of energiebronnen uit te sluiten. Maar dat gaat dan wel ten koste van de betaalbaarheid en/of de betrouwbaarheid van het energiesysteem. Daarnaast wordt een deel van de CO₂-uitstoot verplaatst naar buiten Europa. Iets dat goed is voor het halen van de eigen doelen, maar voor het tegengaan van mondiale klimaatverandering – en dus het uiteindelijke doel – eerder averechts werkt.

In dit rapport, samengesteld door Publieke Zaken Energy Research & Strategy (PZ ERS) en Quo Mare, vergelijken we twee scenario's voor de transitie naar een energiesysteem in 2050 dat past binnen de gestelde doelen. Vervolgens lichten we de verschillen uit. Er worden twee

¹ Tenzij expliciet vermeld, wordt met CO₂ in dit rapport CO₂-equivalent bedoeld

² PBL (april 2024), <https://www.pbl.nl/actueel/nieuws/ook-controversiele-opties-nodig-voor-klimaatneutraal-nederland-in-2050>

³ Triodos Bank (juli 2024), [Afscheid van fossiel – Afscheid van fossiel](#)

transformatiescenario's gepresenteerd: het Net-Zero - oftewel het CO₂-neutrale - scenario en het fossielvrije scenario. Bij het fossielvrije scenario zal er helemaal geen gebruik meer worden gemaakt van kolen, olie en gas en moet alleen de uitstoot vanuit de landbouwsector worden gecompenseerd. Bij een CO₂-neutrale samenleving kan de CO₂-uitstoot bij het winnen, transporteren, omzetten en verbruiken van deze fossiele energiebronnen worden gecompenseerd met negatieve uitstoot, of worden afgevangen door middel van *Carbon Capture and Storage* (CCS).

Afhankelijk van de beleidskeuzes kunnen er grote kostenverschillen ontstaan tussen de verschillende scenario's. Scenario's die allebei resulteren in het bereiken van het uiteindelijke doel: het stoppen van uitstoot van broeikasgassen richting de atmosfeer in 2050 ten einde de mondiale temperatuurstijging te beperken tot maximaal twee graden Celsius, en zo dicht mogelijk richting de anderhalve graad.

De modelberekening die aan dit rapport ten grondslag ligt gaat enkel uit van directe kosten en - opbrengsten. Daarmee worden eventuele indirecte kosten en opbrengsten die met een bepaald energiesysteem gemoeid zijn buiten deze kwantitatieve analyse gelaten. Als deze wel in ogenschouw zouden worden genomen, zullen de jaarlijkse kostenverschillen tussen de scenario's zelfs nog verder oplopen.

Inhoudsopgave

Introductie	2
Tijd voor kieskeurigheid is er niet, maar.....	2
Huidige situatie.....	5
Huidige energiemix.....	5
Export in de Nederlandse economie	6
Huidig klimaatbeleid richting 2030.....	6
Beleidskeuzes bepalen de richting	7
Toekomstige energiemix.....	8
CO2-neutraal versus fossielvrij	8
Flink deel scenario's kent overlap.....	9
Technieken in het energiesysteem van de toekomst.....	9
De laatste loodjes wegen het zwaarst	9
Inzet van hernieuwbare koolwaterstoffen.....	10
Carbon Capture and Storage (CCS).....	10
Groene en blauwe waterstof.....	11
Staal- en kunstmestindustrie en raffinaderijen	11
Methode kwantitatieve analyse TDES	12
Resultaten.....	14
Sleutelrol voor CCS en waterstof	14
Verschillen in investeringskosten.....	15
Verschillen jaarlijkse kosten.....	17
Conclusie: Keuzes kosten geld	19
Eén doel, twee scenario's	19
Fossielvrij vergt meer investeringen dan CO2-neutraal,	20
... importafhankelijkheid van groene waterstof neemt toe,	20
... en jaarlijkse kosten liggen ook aanzienlijk hoger.....	21
Lijst met afkortingen.....	23
Lijst met chemische verbindingen	23

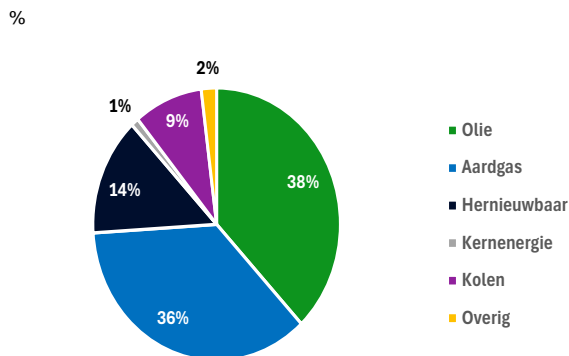
Huidige situatie

Voordat we kijken naar scenario's voor een toekomstig energiesysteem in 2050, geven we eerst inzicht in de huidige situatie. Zo zetten we de huidige energiemix van Nederland uiteen en beschrijven we het gevoerde en voorgenomen klimaatbeleid dat moet leiden tot de toekomstige energiemix.

Huidige energiemix

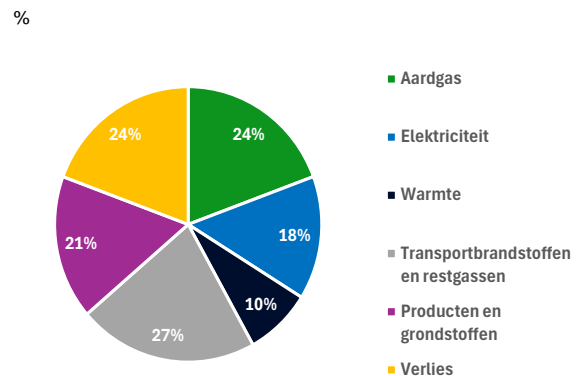
Om van de huidige situatie naar een CO₂-neutrale of fossielvrije samenleving te gaan, moet de energiemix van Nederland sterk veranderen. De meest recente data van het CBS heeft betrekking op 2022. In 2022 werd er in Nederland in totaal 2.712 PJ aan energie verbruikt. Dit is exclusief 15 PJ aan export van elektriciteit. Het grootste deel hiervan bestaat uit aardolie (38%) en aardgas (36%). Het aandeel hernieuwbare energie is gestegen sinds 2021, van 10% naar 14% in 2022.

Primair energieverbruik 2022 (2.712 PJ)



Bron: CBS, EBN

Eindverbruik energie 2022 (2.064 PJ)

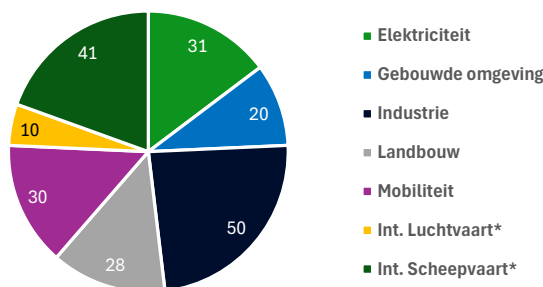


Bron: CBS, EBN

In het eindverbruik is de verdeling verspreid over elektriciteit, aardgas, warmte, transportbrandstoffen en restgassen en producten en grondstoffen. Verder gaat er door omzetting, eigen gebruik en distributie 24% van de energie verloren. Hiermee komt het totale eindverbruik uit op 2.064 PJ. Het verbruik van aardgas is in 2022 gedaald van 40 miljard kubieke meter (bcm) naar 31 miljard bcm (1.090 PJ) ten opzichte van 2021.

CO₂ uitstoot 2022

Mton



Bron: CBS, EBN (* = getankt in Nederland)

Deze daling komt door vervanging van aardgas in elektriciteitscentrales door wind en zon, af- en omschakeling industrie, besparing in de gebouwde omgeving, af- en omschakeling door de glastuinbouw en een milde winter. De belangrijkste drijfveer voor deze plotselinge sterke daling van het gebruik van aardgas heeft vooral te maken met de gestegen energieprijzen. Ook heeft de verhoging van de energiebelasting op gas een negatief effect op het verbruik.

Verder is de verhouding van de CO₂-uitstoot van verschillende sectoren in de bovenstaande figuur te zien. Hieruit is af te lezen dat de industrie met 50 Mton het grootste aandeel heeft in de CO₂-uitstoot. Daarna volgen – binnen Nederland – mobiliteit en elektriciteit met respectievelijk 30 Mton en 31 Mton.

Export in de Nederlandse economie

De export van fossiele grondstoffen en hieruit geraffineerde brandstoffen en chemicaliën vormen een belangrijke spil in de Nederlandse economie. Zo ligt de jaarlijkse Nederlandse export van olie en uit olie geraffineerde producten stabiel ruim boven de 100 Mton⁴, met een uitzondering voor 2020 als gevolg van de Covidpandemie. Hierin zitten zowel de producten uit de Nederlandse raffinaderijen en chemische industrie als de wederuitvoer.

In waarde uitgedrukt exporteerde de aardolie-industrie in 2021 voor EUR 1 miljard. De chemische industrie – waarvoor olie en gas vaak de basisproducten vormen – was goed voor een export van bijna EUR 11 miljard. Daarnaast exporteerde Nederland voor bijna EUR 2 miljard aan basismetalen en EUR 3,5 miljard aan metaalproducten. Ook de kunststofproductie levert met EUR 2,2 miljard een aanzienlijke bijdrage aan de Nederlandse handelsbalans. De totale industriële export was ruim EUR 61 miljard in 2021. De exportwaarde van de sectoren waar fossiele grondstoffen de basis van vormen, leveren hier een significante bijdrage aan.⁵

Huidig klimaatbeleid richting 2030

Het huidige Nederlandse klimaatbeleid vindt zijn wortels in het Energieakkoord van 2013. Dit akkoord, dat tijdens het kabinet-Rutte II werd gesloten, stelde Nederland ten doel om 14% hernieuwbare energie op te wekken in 2020 en een jaarlijkse energiebesparing van 1,5% te bewerkstelligen. Met het wereldwijde Klimaatakkoord van Parijs werd de lat voor het nationale klimaatbeleid nog een stukje hoger gelegd. Zo ging het volgende kabinet (Rutte III) aan de slag met een doorontwikkeling van het gevormde Energieakkoord. Het resultaat hiervan was de totstandkoming van het Klimaatakkoord in 2019. Het belangrijkste doel van dit akkoord was een reductie van de CO₂-uitstoot in 2030 met 49% ten opzichte van 1990.

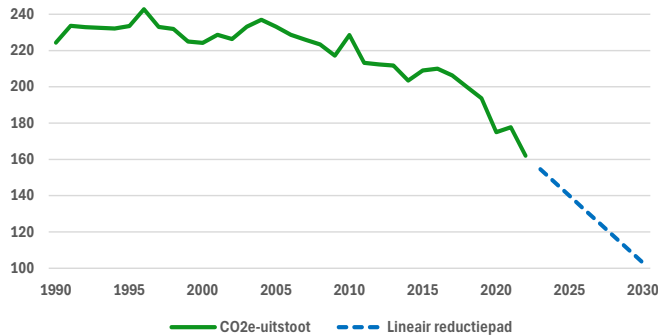
Met de totstandkoming van het Klimaatakkoord werd ook de Klimaatwet aangenomen in 2019. Naast het feit dat deze Klimaatwet voor een juridische basis voor het Klimaatakkoord zorgt, stelt het de regering ook verplicht om jaarlijks een Klimaat- en Energieverkenning (KEV) op te stellen. De door het PBL opgestelde KEV is de belangrijkste monitor die de voortgang van het nationale klimaatbeleid evalueert. Zo kan de regering op basis van deze evaluatie jaarlijks het beleid bijsturen om tot de ten doel gestelde emissiereductie te komen.

Uiteindelijk zijn de nationale doelen uit het Klimaatakkoord van 2019 in 2022 nogmaals verhoogd. Dit volgde op de Europese Klimaatwet die werd aangenomen in 2021. Deze Europese wet schrijft een 55%-uitstootreductie voor de EU voor in 2030. Het kabinet-Rutte IV legde daarop in het coalitieakkoord vast om het nationale doel voor 2030 eveneens op 55% emissiereductie te zetten met een streven tot 60%. Een emissiereductie van 55% komt overeen met een resterend emissieniveau van 103 Mton in 2030.

⁴ Eurostat (2024), <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser>

⁵ CBS (2023), <https://longreads.cbs.nl/nederland-handelsland-2023/nederlandse-verdiensten-aan-de-export/>

Uitstoot CO₂-equivalent NL en benodigde reductie voor 2030 doel



Bron: Our World in Data, PZ ERS

De meest recente KEV, gepubliceerd op 26 oktober 2023, laat zien dat we met het huidige vastgestelde en voorgenomen beleid afstevenden op een emissiereductie van 46% tot 57%. Daarmee was deze KEV eveneens de eerste editie waarin het doel voor 2030 binnen de reikwijdte ligt om gehaald te worden. Tegelijkertijd is de bandbreedte relatief groot als gevolg van verschillende factoren, zoals het weer, energieprijzen en het beleid in omliggende landen.

Een belangrijk kenmerk van het Nederlandse klimaatbeleid is de sectorale benadering ervan. Zo is de opgave voor uitstootvermindering opgedeeld per sector. Deze sectoren zijn (1) elektriciteit, (2) gebouwde omgeving, (3) industrie, (4) mobiliteit en (5) landbouw en landgebruik. De reductiedoelen voor de uitstoot verschillen dus ook daadwerkelijk per sector. In de tabel hieronder zijn de reductiedoelen en restemissies voor 2030 per sector weergegeven.

Reductiedoelen voor 2030 per sector

Sector	Ten doel gestelde emissiereductie	Emissie in 1990 (in Mt)	Indicatieve restemissie (in Mt)
Elektriciteit	77%	56	13,0
Gebouwde omgeving	58%	31	13,2
Industrie	59%	71	29,1
Mobiliteit	16%	25	21,0
Landbouw en Landgebruik	38%	32	19,7

Bron: KEV 2023

Om de gestelde doelen te halen, zijn er door de jaren heen door verschillende kabinetten al heel wat beleidskeuzes gemaakt. Een overzicht van alle genomen beleidsmaatregelen in het kader van klimaatbeleid gaat voor de scope van dit rapport te ver. In plaats daarvan gaan we met name in op het klimaatbeleid in de industriële sector, in lijn met de toespitsing van het model op die sector.

Beleidskeuzes bepalen de richting

Een hoeksteen van het Nederlandse klimaatbeleid is de Stimulering Duurzame Energieproductie en Klimaattransitie (SDE++). Deze subsidieregeling is in het leven geroepen om koolstofarme technieken met behulp van subsidie te laten concurreren met fossiele alternatieven. De regeling keert geld uit aan een variatie van technieken. De lijst met technieken is in de loop der jaren steeds groter geworden. Aanvankelijk vormden vooral technieken zoals windenergie en zon-PV de lijst. De uitrol van productiecapaciteit van deze technieken is dan ook mede door dit subsidiebeleid voortvarend tot stand gekomen. De elektriciteitsproductie is inmiddels voor zo'n 50% hernieuwbaar en dit percentage blijft onder andere door de plannen voor wind op zee de komende jaren nog flink groeien.

Naast de inzet op elektriciteit uit zon en wind, is in de elektriciteitssector ook gekozen voor een uitfasering van kolencentrales. Zo mogen kolen per 2030 niet meer gebruikt worden om elektriciteit mee op te wekken. Tegelijkertijd is afgesproken om kerncentrale Borssele langer open te houden, wordt er werk gemaakt van de voorbereidingen voor de bouw van twee nieuwe kerncentrales en is er sinds het nieuwe kabinet de intentie om nog eens twee kerncentrales bij te bouwen. Hoewel de daadwerkelijke productie van deze centrales nog minimaal tien jaar op zich laat wachten, wordt het een belangrijk onderdeel van het toekomstige elektriciteitssysteem in Nederland.

De elektriciteitssector is 'slechts' goed voor 18% van de finale energievraag. De uitdaging zit daarmee met name in de verduurzaming van de overige 82% van ons energieverbruik. De sector industrie is daar het grootste onderdeel van. Een belangrijke rol in de verduurzaming in die sector is weggelegd voor *Carbon Capture and Storage* (CCS). Het is dan ook niet vreemd dat het grootste deel van het totale subsidiebudget van de SDE++ inmiddels gereserveerd is voor CCS. Naast CCS, spelen het EU ETS en voor Nederland in het bijzonder de nationale minimum CO₂-prijs een belangrijke rol in het reduceren van de broeikasemissies van de industrie.

Met de afname van het aantal beschikbare emissierechten binnen het ETS en de jaarlijkse stapsgewijze verhoging van de minimum CO₂-prijs, zijn Nederlandse entiteiten ervan verzekerd dat uitstoot duurder wordt. Verduurzaming zal daarom lonen. In de sector industrie wordt voorzichtig ingezet op waterstof ter vervanging van de huidige fossiele moleculen. Zo moet in 2030 42% groene waterstof in de industrie worden gebruikt en is er een doel gesteld van acht gigawatt elektrolysecapaciteit in 2032.

Door het vastgestelde klimaatbeleid zijn we als land een weg ingeslagen naar een nieuw energiesysteem. Nog lang niet alle definitieve beleidskeuzes zijn gemaakt, maar we kunnen al wel vooruitkijken naar het toekomstige energiesysteem.

Toekomstige energiemix

CO₂-neutraal versus fossielvrij

Om een beter beeld te krijgen bij dit mogelijke toekomstige energiesysteem zijn we in deze studie uitgegaan van twee scenario's, oftewel twee transitiepaden, met als doel de (Nederlandse) klimaatdoelstellingen voor 2050 te halen. Deze twee scenario's zijn een CO₂-neutraal energiesysteem en een fossielvrij energiesysteem in 2050.

Bij een CO₂-neutrale samenleving kan CO₂-uitstoot bij het winnen, transporteren, omzetten en verbruiken van fossiele energiebronnen worden afgevangen door middel van CCS, of worden gecompenseerd met negatieve uitstoot. Met andere woorden, fossiele brandstoffen (olie en gas) kunnen in 2050 nog worden gebruikt, zolang CO₂-emissies netto nul zijn (afgevangen of gecompenseerd). Hierdoor kan een deel van de fossiele energiebronnen dus een rol blijven spelen in de energiemix, waarbij – door het verbod op de verbranding van steenkool in elektriciteitscentrales tegen 2030 – ervan wordt uitgegaan dat kolen geen rol meer zullen spelen in de elektriciteitsmix vanaf 2030.

Bij het fossielvrije scenario zal er helemaal geen gebruik meer worden gemaakt van kolen, olie en gas in 2050. Moleculen blijven echter nodig om allerlei materialen te produceren. Er zal daarom een grotere rol komen voor hernieuwbare koolstof (zoals biomassa en waterstof) en hernieuwbare energie. Het gaat hierbij dus niet alleen om een decarbonisatie – het verminderen van de CO₂-uitstoot in combinatie met afvangen – van de energiemix, maar om een volledige recarbonisatie – het vervangen van de CO₂-uitstotende methodes door CO₂-neutrale oplossingen.

In beide scenario's zal nog wel 18 Mton aan CO₂-equivalente emissies moeten worden gecompenseerd als gevolg van de methaan- en lachgasuitstoot door de landbouwsector. In beide scenario's wordt uitgegaan van het gelijk blijven van de omvang van deze sector. Om deze uitstoot te compenseren, moeten er negatieve emissies worden geïdentificeerd in beide scenario's. De meest waarschijnlijke optie hiervoor is biomassavergassing in combinatie met CCS (BECCS), wat negatieve CO₂-emissies oplevert en zo dus de uitstoot van de landbouwsector compenseert.

Bij de aannames ten aanzien van de investeringen is uitgegaan van de investeringsbereidheid tegen de hoogste marges en/of laagste kosten op netto-contante waarde basis over de gehele looptijd tot 2060. Als gevolg hiervan berekent het model dat de investeringen worden gedaan in die technologieën die het meest opbrengen, of het minst kosten. En dan op dát moment dat de contante waarde – oftewel de huidige waarde van de toekomstige investering – van deze kosten het laagst zijn. Het gevolg hiervan is dat de meeste kosten vallen tegen het einde van de investeringshorizon (2045-2050), wanneer de beleidsdoelen dermate dichtbij komen dat duurzame investeringen niet langer kunnen worden uitgesteld.

Flink deel scenario's kent overlap

Een belangrijk deel van deze transitiepaden is in beide scenario's gelijk. Simpelweg omdat investeringen en besluitvorming plaatsvinden op basis van de economisch haalbare en best betaalbare alternatieven. Zo zal een aanzienlijk aandeel van de vervanging van fossiele brandstoffen ten behoeve van het opwekken van elektriciteit worden ingevuld door investeringen in zon- en windenergie. Tegelijkertijd zal de transitie naar het verbruik van lage-temperatuur warmte (exclusief industrie) worden gerealiseerd door de ontwikkeling van stadsverwarmingsnetwerken en de installatie van warmtepompen. Deze investeringen in de opwek van hernieuwbare elektriciteit en warmte zullen naar verwachting zo'n 76 Mton aan CO₂-uitstoot kunnen terugbrengen in de komende 26 jaar, voornamelijk in de gebouwde omgeving, de landbouw en de energiesectoren.

In de industrie moet zo'n 50 Mton aan CO₂-equivalent worden teruggedrongen. Een groot deel daarvan komt van de hoge temperatuur warmte die nodig is bij industriële processen in bijvoorbeeld raffinaderijen. Daarnaast komt er uitstoot vrij bij het maken van staal of het produceren van kunstmest. De verwachting is dat hiervan zo'n 28 Mton kan worden teruggedrongen door het gebruik van waterstof en elektrificatie van processen.

De resterende opgave is het terugdringen van de overige CO₂-uitstoot van de industrie (22 Mton), aangevuld met de uitstoot van de Nederlandse scope-3 emissies van kerosine en gasolie door de lucht- en scheepvaartsector van ongeveer 14 Mton. Tot slot komt daar de resterende 18 Mton CO₂-equivalentemissies door de landbouwsector bij. Dit brengt de totale resterende CO₂-uitstoot op zo'n 54 Mton CO₂ per jaar. De twee scenario's laten verschillende invullingen ten behoeve van deze resterende uitstoot zien om het einddoel te halen in 2050.

Technieken in het energiesysteem van de toekomst

De laatste loodjes wegen het zwaarst

Om de bovenstaande verduurzaming van het Nederlandse energiesysteem te bewerkstelligen, kunnen er verschillende technieken ingezet worden. In dit hoofdstuk worden de productietechnieken van hernieuwbare koolwaterstoffen en blauwe of groene waterstof kort uiteengezet. De opties hiervoor zijn koolwaterstoffen uit fossiele bronnen in combinatie met CCS of hernieuwbare koolstofproductie, al dan niet met CCS om negatieve emissies te bewerkstelligen. Het gebruik hiervan verschilt afhankelijk van de kosten en het scenario.

Tot slot gaat het hoofdstuk in op de meest voor de hand liggende verduurzamingsopties voor de staal- en kunstmestindustrie. Om in 2050 netto geen CO₂ meer uit te stoten, is het noodzakelijk om ook deze koolwaterstoffen te vervangen voor een alternatief met een netto uitstoot van nul, al dan niet op

een fossielvrije manier. Bovendien moet er extra waterstof geproduceerd worden om de zware vervoerssector te verduurzamen en in de warmtevraag van de staal- en kunstmestfabrieken en de chemische industrie te voorzien. Hierdoor komt de toekomstige vraag naar waterstof in veel scenario's bij volledige verduurzaming op 5 Mton of meer te liggen.

Inzet van hernieuwbare koolwaterstoffen

Zowel in het fossielvrije als het CO₂-neutrale scenario zijn hernieuwbare koolwaterstoffen onmisbaar. *Biomass to Liquids (BTL)* is een voorbeeld van een proces waarbij biomassa wordt omgezet naar vloeibare brandstoffen, bijvoorbeeld biodiesel. In het BTL-proces speelt de Fischer-Tropsch (FT) synthese een belangrijke rol. Dit is een chemisch proces waarbij vloeibare koolwaterstoffen geproduceerd kunnen worden uit synthese gas, in dit geval met biomassa als koolstofbron. Hier kan ook *Sustainable Aviation Fuel (SAF)* mee geproduceerd worden, hoewel dit ook via andere technieken zoals *Hydrotreated Vegetable Oil (HVO)* mogelijk is.

Waste to Liquids (WTL) is hetzelfde proces als BTL (eerst vergassing en vervolgens FT-synthese), maar dan met de organische fractie van huishoudelijk afval (MSW) als input. De geëxtraeerde biogene fractie van huishoudelijk afval wordt ook wel aangeduid als *Refuse Derived Fuel (RDF)*. Een andere methode om afval (met name plastics) op te waarderen tot hernieuwbare koolwaterstoffen is chemische recycling. Pyrolyse van plastics is een van de opties. Uit afvalplastics wordt pyrolyse-olie geproduceerd die als voeding voor de naftakrakers kan worden ingezet. Hierbij wordt plastic zonder zuurstof verwarmd tot 300-600 graden Celsius, waardoor het plasticafval wordt opgesplitst in kleinere nafta-achtige moleculen, de pyrolyse-olie. Naast pyrolyse-olie wordt tevens gas en vast residu gemaakt, wat gebruikt kan worden als brandstof voor warmte of elektriciteitsproductie, uiteraard met CO₂-afvang.

Om bovenstaande processen van input te voorzien zijn een aantal grondstoffen van niet-fossiele oorsprong nodig. Zoals genoemd, plastic afval wordt in pyrolyse-olie omgezet om gebruikt te worden als krakervoeding. Daarnaast vormen houtachtige biomassa (lignocellulose) en slachtafval/afgewerkt frituurvet (lipiden) de voeding voor de productie van duurzame brandstoffen om de scope-3 uitstoot van kerosine en gasolie in de lucht- en scheepvaart te verminderen. De overige beschikbare input, zoals houtpellets (bijvoorbeeld opgewerkte houtresten uit bossen) en biogene reststromen uit fermentatieprocessen kunnen worden gebruikt voor elektriciteitsproductie. Hierbij kan de CO₂-uitstoot – net zoals de biogene uitstoot in de eerdergenoemde duurzame processen – worden afgevangen, wat resulteert in negatieve emissies.

Carbon Capture and Storage (CCS)

In een CO₂-neutrale samenleving is CCS onmisbaar om de uitstoot van de benodigde fossiele brandstoffen af te vangen. Bij CCS wordt CO₂-uitstoot, die vrijkomt bij het verbranden van fossiele brandstoffen, afgevangen en opgeslagen in ondergrondse reservoirs (lege gas- en olievelden of zoutcavernes). Hier zijn verschillende methodes voor, waar de CO₂ zowel voor als na het verbrandingsproces kan worden afgevangen. Op deze manier komt de CO₂-uitstoot niet in de atmosfeer terecht. CCS is een kostenefficiënte techniek om processen te verduurzamen waarbij het kostbaar is om de fossiele energie-input te vervangen door hernieuwbare bronnen. Dit geldt zowel voor de directe verbranding van olie, gas en steenkool in het productieproces, als bijvoorbeeld voor de productie van blauwe waterstof.

CCS zal in het netto-nul scenario gebruikt worden om CO₂ die vrijkomt bij de verbranding van fossiele brandstoffen direct op te vangen en op te slaan. Op deze manier worden CO₂-emissies naar de atmosfeer voorkomen. In het netto-nul scenario zal CCS ook gebruikt worden bij de waterstofproductie. Daarnaast kan CCS in het fossielvrije scenario ingezet worden om negatieve CO₂-uitstoot te bewerkstelligen. Dit betekent dat er CO₂ wordt afgevangen die afkomstig is uit de omzetting of verbranding van biomassa (BECCS). Deze afvang compenseert dan CO₂-uitstoot elders. In de praktijk zal dit de methaan- en lachgasuitstoot uit de landbouwsector kunnen compenseren.

In Nederland zijn er momenteel twee CCS-projecten in ontwikkeling, namelijk Porthos en Aramis. Wanneer beide volledig operationeel zijn, is de totale opslagcapaciteit in Nederland 27,5 Mton CO₂ per jaar. Daarnaast zal er naar verwachting ook gebruik gemaakt gaan worden van CO₂-opslagcapaciteit in het buitenland, met name in Noorwegen (zoals het Northern Lights-project). Naast Porthos en Aramis staan er in Nederland geen CCS-projecten op de planning, maar is er nog wel uitbreiding mogelijk. Dit maakt de ontwikkeling van de CCS-capaciteit vanaf 2035 lastig in te schatten. Wel is het zeker dat er voldoende lege gasvelden beschikbaar zijn. Daarnaast is het aannemelijk dat de EU ETS-prijs verder stijgt, wat een goede business case vormt voor toekomstige projecten. Het belangrijkste risico voor toekomstige capaciteitsuitbreiding is gebrek aan maatschappelijk draagvlak voor de afvang en opslag van CO₂.

Groene en blauwe waterstof

De productie van waterstof gaat in 2050 volgens vier mogelijke productiemethodes. De elektrolysetechniek produceert groene waterstof zonder emissies, mits er gebruik wordt gemaakt van hernieuwbare elektriciteit. In het elektrolyseproces wordt water door middel van elektriciteit opgesplitst in waterstof en zuurstof. Deze productiemethode is dus ook geschikt voor het fossielvrije scenario.

Men spreekt van blauwe waterstof als bij het productieproces aardgas gebruikt wordt, gecombineerd met CCS. Blauwe waterstof kan alleen in het CO₂-neutrale scenario ingezet worden. Gangbare technieken hiervoor zijn *Steam Methane Reforming (SMR)* en *Autothermal Reforming (ATR)*. Voor beide technieken is aardgas de meest gangbare input, maar kunnen ook andere koolwaterstofbronnen voor gebruikt worden, zoals biogas. ATR is over het algemeen meer energie-efficiënt dan SMR (geen externe energiebron nodig), maar ook complexer (vereist pure zuurstof). Daarnaast is CCS makkelijker te integreren in het ATR-proces. Hoewel de SMR-technologie momenteel nog dominant is, maakt dit dat – met de toenemende nadruk op duurzame waterstofproductie – het ATR-proces naar alle waarschijnlijk de meest gangbare productietechnologie wordt in de toekomst.

Tot slot is er nog de methode die gebruik maakt van biomassavergassing, die ook inzetbaar is in het fossielvrije scenario. In combinatie met CCS kan dit zelfs voor negatieve emissies zorgen. Allereerst wordt biomassa met hulp van zuurstof omgezet in synthesegas. Dit is een mengsel van koolmonoxide (CO) en waterstof. Vervolgens wordt CO met stoom (H₂O) omgezet in waterstof en CO₂ via de zogenaamde water-gas-shift (WGS) reactie. Daarna wordt met behulp van het PSA (Pressure Swing-Absorptie) proces de CO₂ van de H₂ gescheiden en kan de CO₂ vervolgens worden opgeslagen.

Staal- en kunstmestindustrie en raffinaderijen

De staal- en kunstmestindustrie behoren met een jaarlijkse CO₂-uitstoot van ieder 6 Mton tot de meest vervuilende sectoren in de huidige Nederlandse economie. Verduurzaming voor beide sectoren vereist een grote hoeveelheid groene of blauwe waterstof. Daarnaast zullen voor verdere verduurzaming in de kunstmestindustrie investeringen in de *Air Separation Unit (ASU)* gedaan moeten worden. Integratie van deze installaties met CCS is hierin een belangrijke stap, samen met de aandrijving van ASU's door hernieuwbare elektriciteit.

Deze investeringen kunnen omzeild worden door alle ammoniak als grondstof voor de kunstmestproductie te importeren, in plaats van zelf te produceren. Verduurzaming in de staalindustrie betekent in de praktijk een overstap van hoogovens op steenkool naar elektrische boogovens of hoogovens met *Direct Reduced Iron (DRI)*, middels waterstof. DRI maakt het productieproces van staal energie-efficiënter, wat samen met het gebruik van groene of blauwe waterstof en CCS de staalproductie CO₂-neutraal kan maken.

De productie van transportbrandstoffen en chemicaliën in raffinaderijen en naftakrakers stoot momenteel ongeveer 22 Mton CO₂ uit per jaar. Elektrische stoomkrakers vormen een belangrijke technologie om deze uitstoot terug te dringen. Waar de hoge temperaturen in het kraakproces in conventionele krakers bereikt wordt door de verbranding van aardgas, kan dit proces verduurzaamd

worden door het gebruik van elektrische verwarmingselementen. Deze technologie staat echter nog in de kinderschoenen en zal naar verwachting pas na 2040 commercieel op industriële schaal toegepast gaan worden.

Methode kwantitatieve analyse TDES

Dit hoofdstuk zet de methodische keuzes uiteen die gemaakt zijn voor de modelberekening die ten grondslag ligt aan dit themarapport. We beperken ons tot de meest cruciale input voor het model. We beschrijven de functionaliteit en werking van het onderliggende model, de gebruikte data en gaan ten slotte in op de meest relevante algemene aannames die zijn gemaakt.

Het model omvat een aantal beleidsmaatregelen. Het meest omvangrijke en van invloed zijnde beleid is het EU ETS. Door het Europese emissiehandelssysteem zullen er per 2050 geen scope 1 en 2 emissies meer zijn in de relevante sectoren.

TDES: Transition of Dutch Energy System

Dit themarapport is gebaseerd op de kwantitatieve berekeningen van TDES: een techno-economisch optimalisatiemodel ontworpen door Quo Mare. Het doel van het model is om de meest kostenefficiënte manier te vinden om het Nederlandse energiesysteem anno 2022 te veranderen naar een CO₂-neutraal, dan wel fossielvrij energiesysteem in 2050. Het model produceert output voor ieder jaar tussen 2020 en 2050.

Het model omvat het gehele Nederlandse energiesysteem, maar focust op de sector industrie qua detailniveau. Er wordt een variëteit aan randvoorwaarden aan het model gegeven, zoals verschillende beleidsmaatregelen, beschikbaarheid van grondstoffen en de vraag naar eindproducten. Daarnaast is er een aantal aannames gemaakt over de ontwikkeling van variabelen zoals grondstofprijzen. Deze zijn voornamelijk gebaseerd op het rapport: "Het energiesysteem van de toekomst: de I13050-scenario's" van Netbeheer Nederland.

Het model dient als een tool om de kostenoptimalisatie van een regelgevingskader te berekenen. Dat wil zeggen dat het model nu uitgaat van het vastgestelde en voorgenomen klimaatbeleid van de Nederlandse overheid. Het model is dus ook in staat om potentiële beleidswijzigingen door te berekenen en te vergelijken met het baseline scenario van het huidige beleid.

Naast het reguliere EU ETS, houdt het model ook rekening met de invoering van ETS II. Deze wordt in het model vanaf 2026 van toepassing op alle sectoren en op huishoudens. Voor dit tweede ETS-systeem wordt de marktprijs lineair verhoogd van 0 bij aanvang van het systeem tot en met dezelfde prijs als die voor het huidige EU ETS is verondersteld in 2034 (EUR 166/ton). Naast het EU ETS, wordt ook het effect van het *Carbon Border Adjustment Mechanism* (CBAM) meegenomen in het model. Het CBAM is van invloed op de import van fossiele waterstof en ammoniak van buiten Europa. Bovendien wordt de aanname gedaan dat het bereik van CBAM uitgebreid zal worden tot andere raffinageproducten, zoals motorbenzine. De gefaseerde invoering van CBAM tussen 2026 en 2034 is eveneens in het model opgenomen.

Naast dit overkoepelende Europese industriebeleid, is er nog een tweetal nationale beleidsmaatregelen opgenomen in het model. Allereerst is er rekening gehouden met het verbod op inzet van steenkool voor elektriciteitsopwekking per 2030. Daarnaast zijn scope 3 emissies door het model in 2050 gelimiteerd tot netto nul. Dit wordt bewerkstelligd door een lineaire afname van export van fossiele brandstoffen van 2035 tot en met 2050.

Wat betreft de economische vraag naar en aanbod van producten en (dus) energie, veronderstelt het model dat de vraag naar goederen en diensten afhankelijk is van de economische haalbaarheid. Met andere woorden, de totale productie en exportvraag wordt in 2050 bepaald door de vraag of productie economisch zinvol is, of dat import een logischere optie is. Er kunnen dus verschillen ontstaan (bijvoorbeeld gebaseerd op gemaakte beleidskeuzes of grondstofprijzen) in de manier waarop er qua energie-input wordt voldaan aan de vraag naar goederen en diensten. Hierdoor is de energievraag in de mobiliteits- en industriesector variabel. De energievraag in de gebouwde omgeving en de landbouw wordt constant verondersteld.

Tot slot is er nog een aantal overige aannames gemaakt die een relevant inzicht geven in de werking van het model. Zo neemt het model bijvoorbeeld wel globaal de kosten mee van de benodigde energie-infrastructuur, maar maakt het hierbij geen specifieke aannames over bijbehorende locatie of bedrijven. Daarnaast worden technologieën die nog te veel in de kinderschoenen staan niet meegenomen in het model. Kostenverminderingen van nieuwe technieken door middel van technologische ontwikkeling en schaalvoordelen worden eveneens niet meegenomen in het model. Zo zijn de CAPEX-kosten van elektrolyzers constant verondersteld. Ook gaat het model uit van een 'Homo Economicus' benadering. Dat wil zeggen dat het model de gemaakte keuzes louter baseert op een financieel-economische afweging.

De verschillende scenario's leiden uiteindelijk in 2050 tot verschillende energiesystemen en op het pad daar naartoe tot verschillende investeringskosten. De modelberekening die aan dit rapport ten grondslag ligt gaat uit van directe investeringskosten. Daarmee worden eventuele indirecte kosten en opbrengsten die met een bepaald energiesysteem gemoeid zijn buiten deze kwantitatieve analyse gelaten. Een voorbeeld hiervan zou zijn het wegvallen van een aanzienlijk deel van de producten die nu nog in de Nederlandse raffinaderijen worden gemaakt, maar na de transitie waarschijnlijk niet meer. Denk hierbij aan bouwstoffen voor antibiotica, kunstmest en plastics. Iets waar we na 2050 ook niet zonder kunnen, en dus importafhankelijk van worden. Tegelijkertijd zullen er nieuwe industrieën ontstaan, die juist weer een positieve bijdrage aan de Nederlandse economie kunnen leveren.

Resultaten

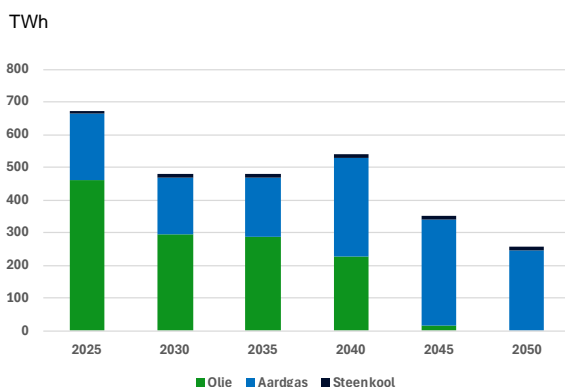
Dit hoofdstuk licht de resultaten van de TDES-modelberekening uit. Achtereenvolgens wordt ingegaan op de resultaten ten aanzien van twee sleuteltechnieken, namelijk CCS en waterstofproductie via elektrolyse. Vervolgens worden de verschillen in investeringskosten en de jaarlijkse kostenverschillen tussen de twee scenario's toegelicht.

Sleutelrol voor CCS en waterstof

In de periode tussen nu en 2040 vindt in beide scenario's een geleidelijke verduurzaming van het Nederlandse energiesysteem plaats. Een van de grote drijfveren hierachter is het EU ETS. Dit maakt bijvoorbeeld het gebruik van steenkool voor elektriciteitsproductie in beide scenario's al vóór 2025 economisch onrendabel.

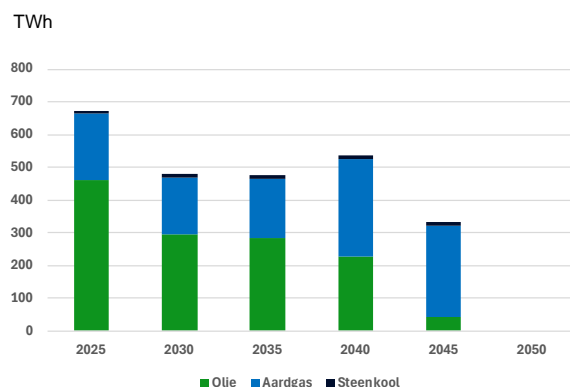
Vanaf 2045 zijn er grote verschillen zichtbaar tussen beide scenario's in de consumptie van fossiele grondstoffen. In onderstaande grafieken is de input aan steenkool (voor gebruik van staalproductie), ruwe aardolie en aardgas in de energiesystemen van de toekomst per scenario weergegeven.

Input fossiel in het energiesysteem, CO2-neutraal scenario



Bron: Quo Mare

Input fossiel in het energiesysteem, fossielvrij scenario



Bron: Quo Mare

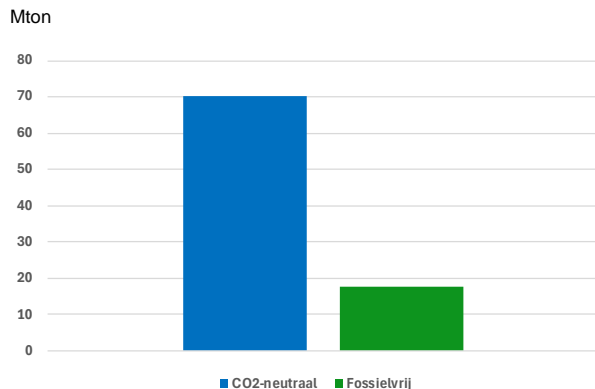
Omdat in een CO2-neutraal scenario emissies naar de atmosfeer worden voorkomen, moeten de emissies die gepaard gaan met de verbranding van fossiele brandstoffen worden afgevangen. Dat leidt ertoe dat een van de grootste verschillen tussen de twee scenario's de mate van het gebruik van CCS is. Omdat de verschillen in het gebruik van fossiele brandstoffen zich pas beginnen voor te doen vanaf 2045, zijn ook de verschillen in CCS pas significant richting 2050, zoals te zien op de grafiek op de volgende pagina.

In het fossielvrije scenario is de afvang en opslag van bijna 18 Mton CO₂ nog steeds noodzakelijk. Deze emissies zijn dus ook zonder het verbruik van fossiele brandstoffen niet te voorkomen. Er worden weliswaar geen fossiele brandstoffen meer verbrand in dit scenario, maar de veestapel produceert nog steeds een significante hoeveelheid methaan- en lachgasemissies. Deze uitstoot wordt gecompenseerd met het afvangen van CO₂ bij de verbranding van biogeen materiaal (BECCS), wat negatieve emissies veroorzaakt. De landbouwsector stoot dezelfde hoeveelheid broeikasgassen in het CO₂-neutrale scenario uit.

Daarbovenop wordt in het CO₂-neutrale scenario nog ruim 50 Mton CO₂ afgevangen als gevolg van de verbranding van fossiele brandstoffen, waarmee het model er vanuit gaat dat de CCS-capaciteit na de ontwikkeling van Porthos en Aramis extra opgeschaald zal worden. Het grootschalig afvangen van

deze uitstoot is namelijk kostenefficiënter dan het afbouwen van input van fossiele brandstoffen. Daarmee komt de totale CO₂-afvang in het CO₂-neutrale scenario op ruim 70 Mton CO₂ in 2050. Deze CO₂-afvang vindt volledig plaats bij de waterstofproductie via het ATR-proces en bij de verbranding van bio-energie.

Vershil in gebruik van CCS in 2050



Bron: Quo Mare

In de verduurzaming van het Nederlandse energiesysteem speelt in beide scenario's waterstof een sleutelrol. In het CO₂-neutrale scenario wordt deze behoefte voor een groot deel ingevuld met de productie van blauwe waterstof via het ATR-proces, in totaal goed voor 7,7 Mton. Hier komt nog een kleine hoeveelheid groene waterstofproductie uit elektrolyzers (0,8 Mton) en import (1,2 Mton) bij.

In het fossielvrije scenario daarentegen is blauwe waterstof geen optie, en zal er dus stevig geïnvesteerd moeten worden in elektrolysecapaciteit. Hierdoor komt de productie van groene waterstof in 2050 op 1,5 Mton. Aangezien de potentiële elektrolysecapaciteit niet voldoende is om in de waterstofvraag te voldoen, zal er in dit scenario ook 3,5 Mton aan groene waterstof geïmporteerd worden.

Verschillen in investeringskosten

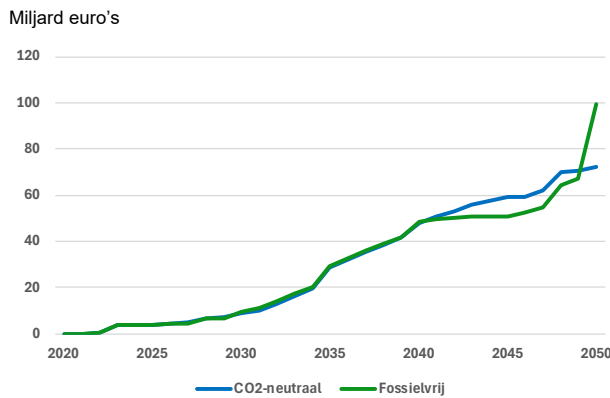
Uit de modelberekening blijkt dat de investeringskosten in het CO₂-neutrale scenario tot 2050 in totaal uitkomen op EUR 72,1 miljard. Met een fossielvrij energiesysteem in 2050 zijn investeringen van in totaal EUR 99,7 miljard gemoeid. Waar de investeringskosten tot 2045 vergelijkbaar zijn, lopen de verschillen in de laatste vijf jaar tussen de scenario's hard op. Dit heeft te maken met het feit dat investeringen in verduurzamingstechnieken ook met name pas in de laatste vijf jaar plaatsvinden. Zo is het totale verschil in investeringskosten in 2050 zelfs EUR 27,6 miljard.

Het verschil in investeringskosten tussen beide scenario's is met name terug te vinden in de investeringen in de hernieuwbare koolwaterstof-industrie, de waterstofproductie en de staalindustrie. In het CO₂-neutrale scenario ligt de druk op hernieuwbare koolstof-routes lager omdat er nog brandstoffen geproduceerd worden uit fossiele bronnen (aardgas), gecombineerd met CCS. Hierdoor wordt alleen geïnvesteerd in kosteneffectieve duurzame productieroutes, wat de investeringskosten hiervoor in totaal op EUR 10,1 miljard brengt.

In het fossielvrije scenario moeten hernieuwbare koolwaterstoffen de gehele eindvraag dekken, waardoor ook in duurdere processen wordt geïnvesteerd, wat de kosten hiervoor omhoog duwt naar EUR 16,4 miljard. Naast hogere investeringskosten, is hiermee ook het resultaat dat de export wegvalt. Het op peil houden van de export zou betekenen dat er geïnvesteerd moet worden in kapitaalintensieve processen zoals *Power-to-Methanol*, gebaseerd op syngas-productie uit

afgevangen biogene CO2 met groene waterstof, wat een forse kostenpost met zich mee brengt en daarmee geen winstgevend exportproduct oplevert.

Tijdslijn voor investeringskosten in beide scenario's (cumulatief)

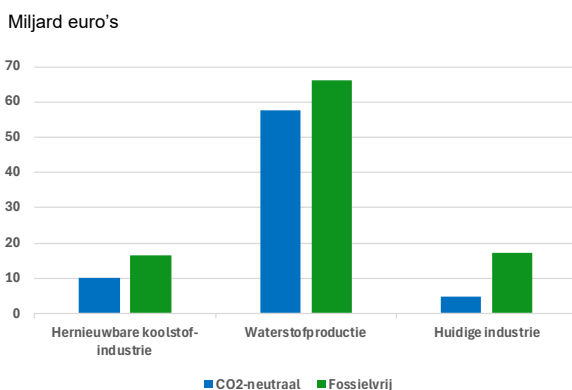


Bron: Quo Mare

Wat betreft de waterstofproductie worden de totale investeringskosten in het CO2-neutrale scenario gemodelleerd op EUR 57,5 miljard, waar dit in het fossielvrije scenario EUR 66 miljard is. Dit heeft met name te maken met de investeringen in de elektrolysecapaciteit. Deze liggen in het CO2-neutrale scenario op EUR 13,3 miljard, terwijl deze op EUR 30,1 miljard staan in het fossielvrije scenario. Met deze extra investering van EUR 17 miljard groeit de groene waterstofproductie in 2050 van 0,8 Mton naar 1,5 Mton. Dit is bij lange na niet voldoende om aan de Nederlandse vraag naar groene waterstof te voldoen in het fossielvrije scenario. Hierdoor ontstaat er vanaf 2050 een importbehoefte van 3,5 Mton groene waterstof per jaar.

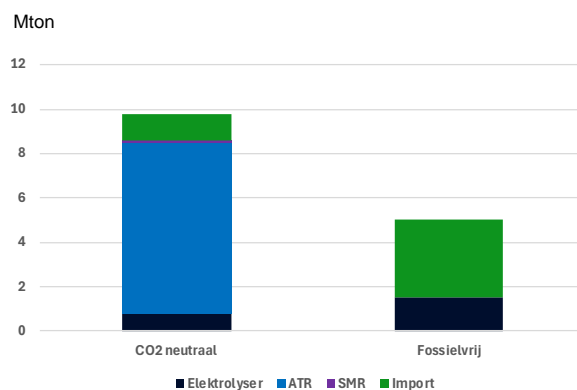
In het CO2-neutrale scenario nemen de kosten voor de waterstofproductie ook toe door de extra productie van blauwe waterstof (ATR-proces met CCS). De investeringskosten in het ATR-proces liggen in het CO2-neutrale scenario hierdoor EUR 8,5 miljard hoger. Dit is echter minder dan de investeringen in groene waterstof in het fossielvrije scenario, wat het verschil in kosten wat betreft waterstofproductie tussen beide scenario's verklaart.

Investeringskosten tot 2050 per categorie



Bron: Quo Mare

Invulling waterstofvraag per scenario



Bron: Quo Mare

Grote kostenverschillen in keuzes klimaatbeleid

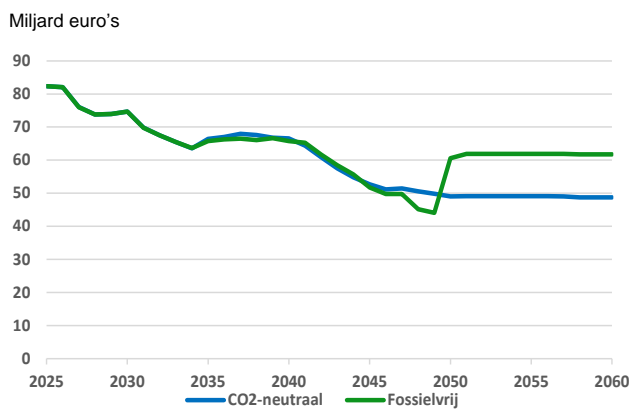
Tot slot de huidige industrie, waar de kunstmestproductie, de staalindustrie en raffinaderijen in Nederland momenteel de grootste uitstoters zijn. In totaal lopen de investeringskosten in het fossielvrije scenario op tot EUR 17,3 miljard, ruim boven de EUR 4,6 miljard in het CO₂-neutrale scenario. Dit heeft met name te maken met de forse investeringen in de staalindustrie die nodig zijn om de sector fossielvrij te maken. In het CO₂-neutrale scenario daarentegen wordt er niet in het DRI-proces geïnvesteerd. Dit komt omdat het gebruik van kolen in combinatie met CCS in dit geval het meest rendabel is.

Voor het mogelijk maken van export zowel in het CO₂-neutrale als in het fossielvrije scenario moeten er grote jaarlijkse investeringen gedaan worden. In beide gevallen is het de vraag of dit economisch haalbaar is, en of Nederland dan nog exporteur blijft van bijvoorbeeld veel geraffineerde producten of dat het vooral productie is voor eigen gebruik. Voor fossielvrij zijn die investeringen aanzienlijk hoger dan voor CO₂-neutraal, en daarmee lijkt export in het fossielvrije scenario nagenoeg onmogelijk. In beide scenario's zakken de investeringen in de kunstmestindustrie naar nul, wat de export van kunstmest vanaf 2050 aan banden legt en Nederland volledig afhankelijk maakt van import. Ook wordt er in beide scenario's een vergelijkbaar bedrag geïnvesteerd in het elektrificeren van stoomkrakers voor de productie van basischemicaliën, zoals etheen, propeen en aromaten (benzeen, toluen, xyleen)

Verschillen jaarlijkse kosten

Naast het gegeven dat er verschillen zijn in de hoeveelheid investeringskosten, zijn er ook aanzienlijke verschillen in de jaarlijkse kosten per scenario. Zoals te zien is in onderstaande grafiek valt op dat, net als bij de investeringskosten, de grote verschillen pas vanaf 2045 echt zichtbaar worden. Door de keuze om het model te laten berekenen wat de economische gevolgen zouden zijn van bepaalde beleidskeuzes, en deze af te zetten tegen de – economisch – gunstigste tijd van investeren, zien we dat het kostenverloop van de beide scenario's nagenoeg gelijk is voor de komende twintig jaar.

Tijdslijn voor jaarlijkse kosten per scenario



Bron: Quo Mare

Pas na die twintig jaar komen de verschillen in jaarlijkse kosten duidelijk naar voren. Deze kosten bestaan uit operationele kosten, transportkosten, de (inkoop)kosten van de grondstof en vaste operationele kosten van lopende projecten. De afschrijvingskosten van de eerdergenoemde investeringen kunnen worden afgeschreven over meerdere jaren. Deze kosten nemen we in bovenstaande grafiek niet mee om dubbeltelling ten opzichte van onze analyse over de verschillen in investeringskosten te voorkomen.

In het CO₂-neutrale scenario stabiliseren de kosten van de Nederlandse industrie rond de EUR 50 miljard per jaar vanaf eind jaren 2040. In het fossielvrije scenario daarentegen lopen de kosten op naar ruim EUR 61 miljard per jaar. De voornaamste reden hiervan is de inkoop van groene waterstof.

Grote kostenverschillen in keuzes klimaatbeleid

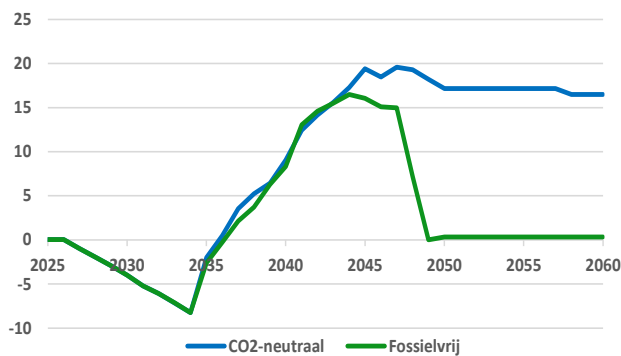
Aangezien Nederland in dit scenario voor zo'n 70% afhankelijk is van import van groene waterstof, zal de jaarlijkse rekening, met een kostenverschil oplopend van EUR 11,5 miljard in 2050 tot EUR 13 miljard in 2060, significant zijn.

De overige kostenverschillen zijn overigens ook aanzienlijk. Hierbij liggen de jaarlijkse kosten voor de transport/infrastructuur bijna EUR 2,3 miljard hoger in een CO2-neutraal scenario. Toch valt dat in het niet ten opzichte van het complete kostenplaatje.

Door de keuze voor bepaalde investeringskosten – die leiden tot verschillen in de jaarlijkse kosten – zijn er in het verlengde hiervan ook jaarlijkse verschillen in opbrengsten. Waar Nederland nu nog veel geraffineerde producten exporteert, zal deze export in het CO2-neutrale scenario verschuiven naar de export van vooral overtollige waterstof en/of groene elektriciteit. Dit levert een toegevoegde waarde van ruim EUR 17 miljard per jaar. In een fossielvrij scenario daarentegen is Nederland importafhankelijk en zullen de opbrengsten slechts enkele honderden miljoenen euro's zijn.

Tijdslijn voor jaarlijkse (waterstof)opbrengsten

Miljard euro's



Bron: Quo Mare

Conclusie: Keuzes kosten geld

Bij het maken van klimaatbeleid is het cruciaal om het einddoel van dit beleid – het beperken van de mondiale temperatuurstijging – in gedachten te houden. Veel beleid wordt op dit moment gedreven door alternatieve of indirecte doelen die de efficiëntie en doelmatigheid ten aanzien van het halen van het eigenlijke doel niet per se bevorderen. Eén van de afwegingen die een grote impact kan hebben op de hoogte van de investeringen voor het halen van die doelen is de keuze of fossiele brandstoffen volledig moeten worden uitgebannen, of dat het gaat om het uitstootneutraal maken van de energiemix om de klimaatdoelen van Parijs te halen.

Veelal wordt het middel om dit doel te bereiken een doel op zich. Een middel om de CO₂-uitstoot te verlagen, en daarmee het klimaatdoel te halen, is het niet meer gebruiken van fossiele brandstoffen. Toch is het uitbannen van fossiele brandstoffen niet het initiële doel van ons klimaatbeleid. Door de vertroebeling van de doelen, kan de energietransitie aanzienlijk duurder uitpakken dan eigenlijk noodzakelijk is. Dit kostennadeel komt voor het grootste gedeelte te liggen op het bordje van het bedrijfsleven. Zij moeten de energietransitie in ons land grotendeels bewerkstelligen, en opereren tegelijkertijd in een internationaal speelveld. Dit houdt tevens in dat extra gemaakte kosten zoveel mogelijk doorbelast zullen worden en daarmee indirect terechtkomen bij de consument, lees burger, of kiezer.

Iedere lidstaat van de Europese Unie heeft zijn eigen doelen die worden ingevuld door nationaal beleid. Dit beleid wordt ondersteund door de kaders die zijn en worden gezet door de Europese Commissie (EC). Nederland had onder Rutte IV ambitieuzere doelen gesteld dan vanuit Brussel werd opgelegd. Het kiezen voor een koplopersrol past bij de wens om vooruitstrevend en toonzettend te zijn ten opzichte van de omringende landen. Dat tegelijkertijd diverse methodes werden uitgesloten, ontmoedigd of vertraagd, leidt tot een transitiepad dat voor de komende jaren redelijk vast lijkt te liggen. Toch zijn er nog veel keuzes te maken, zeker voor de periode 2030-2050. Het kabinet Schoof I zal aan de basis staan van deze belangrijke keuzes.

Dat het maken van bepaalde keuzes door nationale overheden leidt tot verschillende economische consequenties is onvermijdelijk. Op het moment dat overheden keuzes maken voor technieken of methodes die inzetten op bepaalde middelen om de doelen te halen, kan dat zijn uit strategische en/of ideologische overwegingen. Zeker in een tijd waar geopolitieke spanningen opleven, en waarbij goedkope grondstoffen uit bepaalde landen als gevolg van sancties niet meer wenselijk zijn, kan dit een plausibele keuze zijn. Toch is het ook goed om te kijken naar economische gevolgen van ons beleid en om de kostenverschillen tussen verschillende transitiepaden inzichtelijk te maken. Niet per se om een waardeoordeel te vellen over het beleid, maar wel om een open en eerlijk debat over de kosten van de transitie, en – in het verlengde daarvan – de gevolgen voor de Nederlandse industrie, te kunnen voeren.

Eén doel, twee scenario's

In dit rapport hebben we twee mogelijke scenario's tegen elkaar afgezet om de verschillen in investeringskosten en jaarlijkse directe kosten en opbrengsten duidelijk te maken. Deze twee scenario's zijn: CO₂-neutraal en fossielvrij. Bij een CO₂-neutrale samenleving kan CO₂-uitstoot bij het winnen, transporteren, omzetten en verbruiken van fossiele energiebronnen worden afgevangen door middel van CCS, of worden gecompenseerd met negatieve uitstoot. Met andere woorden, fossiele brandstoffen (olie en gas) kunnen in 2050 nog worden gebruikt, zolang de CO₂-emissies naar de lucht vermeden worden.

Bij het fossielvrije scenario zal er geen gebruik meer worden gemaakt van kolen, olie en gas in 2050. Er zal daarom een grotere rol zijn voor hernieuwbare koolstof en hernieuwbare energie. Verder zal er nog wel een deel aan CO₂-equivalente emissies moeten worden gecompenseerd als gevolg van de methaan- en lachgasuitstoot door de landbouwsector.

Voor beide scenario's geldt dat voor de elektriciteitssector er geen fossiele brandstoffen meer nodig zullen zijn op termijn. De grootste uitdaging zit in de overige 82% van ons huidige energieverbruik. In het geval van sturing op puur economische afwegingen, blijkt uit de modelberekeningen dat een groot deel van de huidige raffinagecapaciteit in deze beide scenario's niet meer gebruikt zal worden. Een flink deel van de huidige export van geraffineerde producten zal dan komen te vervallen. Vanuit strategische overwegingen kunnen vanzelfsprekend nog steeds andere keuzes worden gemaakt.

Een belangrijk deel van deze transitiepaden is in beide scenario's gelijk. Simpelweg omdat investeringen en besluitvorming plaatsvinden op basis van de economisch haalbare en best betaalbare alternatieven. De totale resterende – nog in te vullen – CO₂-uitstoot komt uit op zo'n 54 Mton CO₂ per jaar. De twee scenario's laten verschillende invullingen ten behoeve van het terugdringen van deze resterende uitstoot zien om het einddoel te halen in 2050.

Fossielvrij vergt meer investeringen dan CO₂-neutraal, ...

In de periode tussen nu en 2040 vindt in beide scenario's een geleidelijke verduurzaming van het Nederlandse energiesysteem plaats. Een van de grote drijfveren hierachter is het EU ETS. Vanaf 2045 zijn er grote verschillen zichtbaar in de consumptie van fossiele grondstoffen met het oog op de verschillende doelstellingen voor 2050 die in de twee scenario's gelden.

Het verschil in investeringskosten tussen beide scenario's is met name terug te vinden in de investeringen in de hernieuwbare koolwaterstof-industrie en de waterstofproductie. Omdat in een CO₂-neutraal scenario emissies naar de atmosfeer worden voorkomen, moeten de emissies die gepaard gaan met de verbranding van fossiele brandstoffen worden afgevangen. Dat resulteert erin dat de mate van het gebruik van CCS een van de grootste verschillen tussen de twee scenario's is.

In het CO₂-neutrale scenario vormen geïmporteerde nafta, in combinatie met CCS, samen met enkele hernieuwbare koolstofbronnen (zoals pyrolyse olie) input voor de productie van basischemicaliën (zoals etheen, propaan en aromaten). In het fossielvrije scenario is dit niet het geval. In dit scenario worden alleen hernieuwbare koolstofbronnen, inclusief biogene CO₂, ingezet om deze basischemicaliën te maken. Hiervoor zijn duurdere, op synthese gas gebaseerde processen nodig, wat de kosten omhoogduwt. Het verschil is EUR 6,4 miljard aan meer investeringen.

Tot slot de verduurzaming van de huidige industrie, waar de kunstmestproductie en staalindustrie in Nederland de grootste uitstoters zijn. In totaal lopen de investeringskosten in het fossielvrije scenario hier op tot EUR 17,3 miljard, ruim boven de EUR 4,6 miljard in het CO₂-neutrale scenario. Het verschil tussen de scenario's is dus EUR 12,7 miljard.

... importafhankelijkheid van groene waterstof neemt toe, ...

In het fossielvrije scenario neemt de importafhankelijkheid van waterstof sterk toe. Waar in het CO₂-neutrale scenario gebruik kan worden gemaakt van in Nederland geproduceerde blauwe waterstof, wordt dit in een fossielvrij-scenario voor een groot deel vervangen door import van groene waterstof. Dit vervangt een deel van de import van het veel goedkopere aardgas. Beide vallen onder het deel indirecte kosten.

In het CO₂-neutrale scenario wordt 0,8 Mton groene waterstof aan binnenlandse productie gecombineerd met 7,7 Mton aan blauwe waterstof. In het fossielvrije scenario nemen de kosten met EUR 8,5 miljard toe. Dit levert 0,7 Mton aan extra groene waterstof op, maar maakt Nederland dus tegelijkertijd voor ongeveer 70% afhankelijk van de import van de benodigde groene waterstof. Het veelgehoorde argument dat we met (groene) waterstof niet meer, of minder, importafhankelijk zouden zijn, gaat dus niet op.

Uit de modelberekening blijkt daarmee dat de investeringskosten in het CO₂-neutrale scenario tot 2050 in totaal uitkomen op EUR 72,1 miljard. Met een fossielvrij energiesysteem zijn daarentegen

investeringen van in totaal EUR 99,7 miljard gemoeid. Dat maakt dit scenario in totaal EUR 27,6 miljard duurder tot en met 2050.

... en jaarlijkse kosten liggen ook aanzienlijk hoger

Een ander groot verschil tussen de twee scenario's heeft betrekking op de jaarlijkse kosten voor de industrie. Waar in een CO₂-neutraal scenario de kosten vanaf 2045 zullen stabiliseren rond de EUR 50 miljard per jaar, zullen deze vanaf 2050 aanzienlijk hoger liggen in een fossielvrij scenario. Als gevolg van de importafhankelijkheid van groene waterstof, zullen de jaarlijkse kosten stijgen naar ruim EUR 61 miljard per jaar. Dit kostenverschil van EUR 11,5 miljard in 2050, oplopend naar bijna EUR 13 miljard in 2060, komt voor de rekening van het Nederlandse bedrijfsleven. En, na doorberekening, dus voor een groot deel te liggen bij de Nederlandse burger/kiezer.

Door de keuze voor bepaalde investeringskosten – die leiden tot verschillen in de jaarlijkse kosten – zijn er in het verlengde hiervan ook jaarlijkse verschillen in opbrengsten. Naast de hogere kosten als gevolg van de import van groene waterstof in het fossielvrije scenario, zullen de opbrengsten van export beperkt zijn. In een CO₂-neutraal scenario daarentegen zal overtollig geproduceerde waterstof verhandeld kunnen worden op de wereldmarkt, wat naar schatting een opbrengst kan genereren van zo'n EUR 17 miljard per jaar.

Qua economische kosten/baten analyse pakt een CO₂-neutraal scenario dus netto (kosten minus opbrengsten) veel gunstiger uit dan het fossielvrije scenario. Met een nettoverschil van bijna EUR 30 miljard per jaar zijn de kosten plus baten in een fossielvrij scenario aanzienlijk hoger dan in een CO₂-neutraal scenario vanaf 2050.

De verschillende scenario's leiden uiteindelijk in 2050 tot verschillende energiesystemen en op het pad daar naartoe tot verschillende investeringskosten en opbrengsten. Tegelijkertijd bereiken beide scenario's hetzelfde einddoel: geen uitstoot van CO₂ richting de atmosfeer. De modelberekening die aan dit rapport ten grondslag ligt gaat enkel uit van directe kosten en -opbrengsten. Daarmee worden eventuele indirecte kosten en opbrengsten die met een bepaald energiesysteem gemoeid zijn buiten deze kwantitatieve analyse gelaten. Als deze wel in ogenschouw zouden worden genomen, zullen de jaarlijkse kostenverschillen tussen de scenario's zelfs nog verder oplopen.

Voor meer informatie over deze publicatie, of de andere diensten van Publieke Zaken ERS kunt u contact opnemen met:

Hans van Cleef – hans.vancleef@publiekezaken.eu / 0031- 6 30 90 33 76

Bart van der Pas – bart.vanderpas@publiekezaken.eu / 0031-6 36 52 95 51

Fabian Steenbergen – fabian.steenbergen@publiekezaken.eu / 0031-6 18 55 34 46

Guusje Schreurs – guusje.schreurs@publiekezaken.eu

Voor meer informatie over deze publicatie, of over de andere diensten van Quo Mare kunt u contact opnemen met:

Rutger de Mare – rutgerdemare@quomare.com

Gregor Brandt – gregorbrandt@quomare.com

Jan van Schijndel – janvanschijndel@quomare.com

Lijst met afkortingen

ACU	Ammonia Cracking Unit
ATJ	Alcohol to Jet
ASU	Air Separation Unit
ATR	Autothermal Reforming
BCM	Billion Cubic Meter
BECCS	Bioenergy with Carbon Capture and Storage
BTL	Biomass to Liquids
CAPEX	Capital Expenditures
CBAM	Carbon Border Adjustment Mechanism
CCS	Carbon Capture and Storage
CCU	Carbon Capture and Utilization
DRI	Direct Reduced Iron
EU ETS	European Union Emissions Trading System
FT	Fischer-Tropsch
HDV	Heavy Duty Vehicle
HTH	High Temperature Heating
HVO	Hydrotreated Vegetable Oil
KEV	Klimaat- en Energieverkenning
MTO	Methanol to Olefines
MTG	Methanol to Gasoline
MSW	Municipal Solid Waste
PBL	Planbureau voor de Leefomgeving
PJ	Petajoule
PO	Polyolefine
PSA	Pressure Swing-Absorption
PTL	Power to Liquids
PTM	Power to Methanol
RDF	Refuse Derived Fuel
SAF	Sustainable Aviation Fuel
SDE++	Stimulerend Duurzame Energieproductie en Klimaattransitie
SMR	Steam Methane Reforming
TDES	Transformation of the Dutch Energy System
WGS	Water Gas Shift
WTL	Waste to Liquids

Lijst met chemische verbindingen

CO	Koolmonoxide
CO ₂	Kooldioxide
CO ₂ -eq	Kooldioxide-equivalent
H ₂	Waterstof
H ₂ O	Water
NH ₃	Ammoniak

DISCLAIMER

Dit document is samengesteld door Publieke Zaken B.V. ("PZ"), afdeling Energy Research & Strategy ("ERS"). Dit document is uitsluitend bestemd voor degene aan wie het door PZ ERS rechtstreeks is verzonden. Dit document dient uitsluitend ter informatie en vormt geen aanbod van effecten aan het publiek, noch enig advies met betrekking tot de financiële markten, energiemarkten, het doen van beleggingen, kostenbeheer en/of zakelijke activiteiten, noch een uitnodiging tot deze handelingen. Financiële handelingen of transacties kunnen derhalve niet berusten op (de informatie in) dit document. PZ, inclusief ERS, haar bestuurders noch haar werknemers geven enige verklaring of garantie, expliciet of impliciet, omtrent de nauwkeurigheid, volledigheid of juistheid van dit document en de bronnen die hierin worden vermeld en zij aanvaarden geen aansprakelijkheid voor enig verlies of schade, direct of indirect. De opvattingen en meningen in dit document kunnen op elk moment veranderen en PZ (ERS) is niet verplicht de informatie in dit document na de datum ervan bij te werken. De visie van PZ ERS komt tot stand onafhankelijk van de andere bedrijfsactiviteiten van PZ. Dit document mag niet worden verspreid aan personen in de Verenigde Staten of aan "US persons" zoals gedefinieerd in Regulation S van de United States Securities Act van 1933, zoals gewijzigd.

© Copyright Publieke Zaken B.V. 2024. Alle rechten worden voorbehouden. Het is niet toegestaan dit document (geheel of gedeeltelijk) te kopiëren, te verspreiden of door te geven aan derden.