



Centraal Planbureau
Planbureau voor de Leefomgeving

TOEKOMSTVERKENNING

WLO

EFFICIËNTE
CO₂-PRIJZEN



Colofon

WLO 2025: efficiënte CO₂-prijzen. Geactualiseerde
CO₂-prijzen om effecten van
broeikasgasreductiemaatregelen uit te drukken.
CPB/PBL
Den Haag, 2025

Omslagfoto

Nienke Noorman

Eindverantwoordelijkheid

Centraal Planbureau en Planbureau voor de
Leefomgeving

Contact

Peter Zwaneveld

Hoofdauteurs

Peter Zwaneveld, Joep Tijm, Arjan Trinks

U kunt de publicatie downloaden van de websites van de planbureaus.

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: CPB & PBL (2025), WLO 2025: *Efficiënte CO₂-prijzen. Geactualiseerde CO₂-prijzen om effecten van broeikasgasreductiemaatregelen uit te drukken*, Den Haag: Centraal Planbureau & Planbureau voor de Leefomgeving.

Inhoud

Samenvatting	4
1. Inleiding.....	7
2. WLO 2025 en efficiënte CO₂-prijzen	8
2.1. Opzet WLO-scenario's	8
2.2. Efficiënte prijzen: definitie en interpretatie.....	9
2.3. Hoogte efficiënte CO ₂ -prijzen in de WLO 2025	10
3. Aandachtspunten bij de toepassing van CO₂-prijzen	13
3.1. Luchtkwaliteit.....	13
3.2. Randvoorwaarden voor de efficiënte CO ₂ -prijzen van de WLO-scenario's.....	15
3.3. Efficiënte elektriciteitsprijzen	17
4. Efficiënte CO₂-prijzen afleiden.....	19
4.1. Toelichting bij het bepalen van de efficiënte CO ₂ -prijzen in de WLO 2025	21
4.2. Vergelijking met CO ₂ -waarderingen uit de literatuur	23
4.3. Vergelijking met voorgeschreven CO ₂ -prijzen voor ex-ante beleidsanalyses in andere landen.....	26
4.4. CO ₂ -marktprijzen	27
5. Referenties	30
Bijlage 1: Tabellen met efficiënte CO₂-prijzen.....	34
Bijlage 2: Discontovoet, Hotelling-regel en jaarlijkse prijsstijging van CO₂-prijzen	36
Bijlage 3: Berekening efficiënte CO₂-prijzen op basis van IMAGE-uitkomsten	39

Samenvatting

In deze publicatie staat de actualisatie van de efficiënte CO₂-prijzen uit 2016 voor de Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving 2025 (WLO 2025). Beleidsmakers kunnen de toekomstscenario's uit de WLO 2025 gebruiken voor maatschappelijke kosten-batenanalyses (MKBA's) bij onderzoek naar nieuw beleid. Met deze CO₂-prijzen kunnen ze de uitstoot van broeikasgassen uitdrukken in geldprijzen ('waarderen') in hun beleidsonderzoek vooraf ('ex ante'). De efficiënte CO₂-prijzen drukken voor elk jaar de waardering weer van de doelstelling om broeikasgassen terug te dringen conform het betreffende WLO-scenario. Zo is te zien of een beleidswijziging efficiënt bijdraagt aan het behalen van het broeikasgasreductiedoel in een WLO-scenario. We berekenen de efficiënte CO₂-prijzen via de zogeheten preventiekostenmethode.

De WLO 2025 bevat vier scenario's. Deze scenario's verschillen van elkaar in de mate van technologische, economische en demografische groei in Nederland en de wereld enerzijds (scenario Hoog en Laag) en de snelheid van het internationale klimaatbeleid anderzijds (scenario Snel en scenario Vertraagd). De vier scenario's die daaruit voortvloeien zijn:

- Hoge groei met relatief snelle internationale klimaattransitie (scenario Hoog Snel)
- Hoge groei met vertraagde internationale klimaattransitie (scenario Hoog Vertraagd)
- Lage groei met relatief snelle internationale klimaattransitie (scenario Laag Snel)
- Lage groei met relatief langzame internationale klimaattransitie (scenario Laag Vertraagd)

De verschillende aannames in deze scenario's leiden tot verschillende CO₂-prijzen om het broeikasgasreductiedoel per scenario te realiseren.

De efficiënte CO₂-prijzen staan in tabel S1. In de tabel zijn de efficiënte CO₂-prijzen te zien in euro's per ton CO₂ voor steekjaren. In deze notitie wordt met 'CO₂' bedoeld: de emissies van broeikasgassen, uitgedrukt in CO₂-equivalenten (CO₂e). Dat betekent dat met behulp van omrekenfactoren ook andere broeikasgassen dan CO₂ met deze prijzen gewaardeerd kunnen worden. Voor Nederlandse beleidsevaluaties waarin gebruik gemaakt wordt van de WLO-scenario's, dienen deze CO₂-prijzen gebruikt te worden voor alle broeikasgasuitstoot, ongeacht waar in de wereld die plaatsvindt. In bijlage 1 staan de efficiënte CO₂-prijzen voor tussenliggende jaren.

Tabel S1 Efficiënte CO₂-prijzen behorend bij de WLO-scenario's

WLO-scenario	2025	2040	2050	2060
	euro per ton CO ₂ , prijspeil 2021			
Laag Snel	310	432	540	675
Laag Vertraagd	116	162	202	253
Hoog Snel	132	184	230	287
Hoog Vertraagd	107	149	186	232

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

De CO₂-prijzen lopen op over de tijd met de discontovoet. De discontovoet is het (minimaal) vereiste rendement op een project. Dit zorgt ervoor dat er tijdsconsistentie is. In MKBA's worden kosten en baten in de toekomst immers verdisconteerd met de discontovoet. Als de CO₂-prijzen minder snel zouden oplopen dan de discontovoet, dan zouden investeringen in CO₂-reductie beter uitgesteld kunnen worden. Als prijzen sneller zouden stijgen dan de discontovoet, dan is het rendabeler om investeringen eerder uit te voeren.

Voor toepassing van de WLO-scenario's 2025 voor 'maatschappelijke kosten-batenanalyses adviseren we om in beginsel alle vier de scenario's toe te passen (tenzij scenario's niet-onderscheidend van elkaar zijn in de relevante uitkomstvariabelen). Dit om rekening te houden met toekomstonzekerheid. Als een onderzoeker door gebrek aan tijd of om andere niet-inhoudelijke redenen maar twee scenario's wil gebruiken, is het advies om in elk geval een scenario met relatieve lage groei en een met relatieve hoge groei te kiezen. Het advies is daarbij ook te variëren op de snelheid van de internationale klimaattransitie, zodanig dat de grootste bandbreedte ontstaat. Wat de efficiënte CO₂-prijzen betreft, betekent dit dat beleidsmakers de scenario's Laag Snel en Hoog Vertraagd het beste kunnen toepassen. Hierin staan respectievelijk de hoogste en laagste CO₂-prijzen. Indien de CO₂-effecten in een analyse substantieel zijn, raden we aan binnen elk gehanteerd WLO-scenario via een gevoeligheidsanalyse te variëren in de hoogte van de efficiënte CO₂-prijs. De relevante bandbreedte van de CO₂-prijzen in een dergelijke gevoeligheidsanalyse wordt hierbij gevormd door de gezamenlijke bandbreedte als gevolg van de vier WLO-scenario's.

De gepresenteerde efficiënte CO₂-prijzen zijn robuust om toe te passen, zolang de beschikbaarheid van CO₂-reducerende technologieën en de kosten daarvan in de toekomst niet substantieel anders worden dan we nu aannemen. In het hoofdrapport van de WLO 2025 (PBL, 2025a) staat dat ontwikkelingen die afwijken van de uitgangspunten van de scenario's aanleiding kunnen geven om actualisaties te overwegen. Belangrijk bij de efficiënte CO₂-prijzen is dat de prijzen alleen relevant zijn binnen de aannames en broeikasgasreductiedoelstellingen die horen bij de WLO-scenario's. Een voorbeeld van een mogelijke wijziging van de aannames is het introduceren van aanzienlijk strenger luchtkwaliteitsbeleid. Dit kan een effect hebben op de hoogte van de efficiënte CO₂-prijzen. Ook nieuwe inzichten over externe effecten van bepaalde broeikasgasreducerende technieken, zoals de luchtvervuilingseffecten van biomassacentrales,

kunnen een grote invloed hebben op de mate waarin de technieken worden toegepast, en daarmee op de CO₂-prijzen. Een ander voorbeeld van een substantiële wijziging in de aannames is als nieuwe, goedkopere broeikasgasreducerende technieken ontdekt worden: dit verlaagt vermoedelijk de efficiënte CO₂-prijzen. In dergelijke gevallen die een mogelijk substantieel effect hebben, dienen de gevolgen op de WLO-scenario's te worden onderzocht. Op basis daarvan kan worden overwogen om nieuwe efficiënte CO₂-prijzen te bepalen. In hoofdstuk 3 gaan we hier nader op in.

1. Inleiding

In deze notitie beschrijven we de zogeheten efficiënte CO₂-prijzen waarmee in maatschappelijke kosten-batenanalyses (MKBA's) de uitstoot van broeikasgassen kan worden gewaardeerd. In deze notitie geven we prijzen per ton uitgestoten CO₂. Andere broeikasgassen kunnen ook met deze CO₂-prijzen worden gewaardeerd door ze eerst naar CO₂-equivalenten (CO₂e) om te rekenen.

De efficiënte CO₂-prijzen zijn onderdeel van de Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving (WLO) 2025. In deze scenario's staan de ontwikkelingen van technologie, economie, demografie en internationaal klimaatbeleid. In de WLO-scenario's wordt de onzekerheid rond de toekomstige ontwikkelingen in kaart gebracht. De WLO-scenario's zijn uitgewerkt door het PBL, in samenwerking met het CPB.

In deze notitie beschrijven we ook hoe we de efficiënte CO₂-prijzen hebben bepaald en hoe ze zich verhouden tot bijvoorbeeld de marktprijzen van CO₂ op het emissiehandelssysteem (EU-ETS). De efficiënte CO₂-prijzen zijn gebaseerd op de zogeheten preventiekostenbenadering. Conceptueel geven preventiekosten voor elk jaar de waardering (schaduw prijzen) weer van de doelstelling om broeikasgassen kostenefficiënt terug te dringen conform het betreffende WLO-scenario. Anders gezegd geven de efficiënte CO₂-prijzen de prijs weer van de broeikasgasreductiedoelstellingen.

Leeswijzer

De opbouw van dit document is als volgt. In hoofdstuk 2 geven we nadere informatie over de opzet van de WLO-scenario's, de definitie en interpretatie van efficiënte CO₂-prijzen en de hoogte van de efficiënte CO₂-prijzen. In hoofdstuk 3 bespreken we een aantal aspecten die belangrijk zijn bij toepassing van de prijzen: luchtkwaliteit, randvoorwaarden voor het gebruik van de prijzen en efficiënte elektriciteitsprijzen. Tot slot staat in hoofdstuk 4 achtergrondinformatie over de wijze waarop de efficiënte CO₂-prijzen zijn bepaald in de WLO-scenario's. Daarnaast vergelijken we de efficiënte CO₂-prijzen met CO₂-prijzen uit de literatuur en met CO₂-prijzen die in andere landen worden voorgeschreven in maatschappelijke kosten-batenanalyses. Tot slot bespreken we CO₂-marktprijzen. In bijlage 1 staan meer gedetailleerde tabellen met de efficiënte CO₂-prijzen.

2. WLO 2025 en efficiënte CO₂-prijzen

In dit hoofdstuk presenteren we de efficiënte CO₂-prijzen voor het waarderen van broeikasgassen in MKBA's met gebruik van de WLO-scenario's. In paragraaf 2.1 geven we op hoofdlijnen inzicht in de opzet van de WLO-scenario's. In paragraaf 2.2 leggen we het concept van efficiënte prijzen uit en leggen we uit waarom gekozen is voor het gebruik van preventiekosten om deze prijzen te bepalen. De efficiënte CO₂-prijzen voor de WLO 2025 worden gepresenteerd in paragraaf 2.3.

2.1. Opzet WLO-scenario's

De WLO 2025 bestaat uit vier toekomstscenario's.¹ Deze vier scenario's variëren op twee assen, waarbij er per as twee mogelijkheden zijn. De eerste as ('groeias') betreft de mate van technologische ontwikkeling en economische en demografische groei. De twee mogelijkheden op de groeias betreffen een relatief 'hoge groei' en een relatief 'lage groei'. De tweede as ('klimaatas') betreft het ambitieniveau van het internationale klimaatbeleid. De twee mogelijkheden op de klimaatas betreffen 'snelle klimaattransitie' en 'vertraagde klimaattransitie'. Aansluitend bij de ontwikkeling van het mondiale klimaatbeleid in de afgelopen decennia, is het klimaatbeleid in Europa in alle WLO-scenario's ambitieuzer dan elders in de wereld. De namen van de vier scenario's zijn:

- Hoge groei met relatief snelle internationale klimaattransitie (scenario Hoog Snel)
- Hoge groei met vertraagde internationale klimaattransitie (scenario Hoog Vertraagd)
- Lage groei met relatief snelle internationale klimaattransitie (scenario Laag Snel)
- Lage groei met relatief langzame internationale klimaattransitie (scenario Laag Vertraagd)

De kenmerken van beide mogelijkheden op de 'groeias' kunnen als volgt worden beschreven. Bij de (relatief) hoge groei leiden technologische ontwikkelingen en internationale handel tot een relatief sterke groei van de arbeidsproductiviteit van 1,5 procent (zie PBL 2025a en CPB & PBL 2025). Wereldwijd groeit de bevolking relatief beperkt, maar arbeids- en studiemigratie naar Europa en andere OECD-landen neemt toe. Dit leidt tot 22 miljoen inwoners in Nederland in 2060 (zie PBL 2025a en PBL 2025b). Bij de lage groei gaat de economische ontwikkeling relatief langzaam doordat grote technologische doorbraken uitblijven. Om nieuwe afhankelijkheden van andere mogendheden te voorkomen, is er een voorkeur voor kortere handelsroutes. De bevolkingsgroei blijft mondiaal hoog, maar door relatief weinig migratie blijft de bevolking van Nederland min of meer constant rond de 18 miljoen mensen.

Een snelle transitie leidt rond 2050 tot een broeikasgasneutrale economie in Nederland en Europa. Na

¹ Voor meer informatie over de opzet en invulling van de WLO-scenario's verwijzen we naar PBL-rapporten (PBL 2025a).

2050 heeft Europa daar bovenop aanvullende klimaatambities om de broeikasgasreductie behorende bij de 1,5-gradendoelstelling van Parijs te halen. Daarom streeft Europa in de periode tot 2060 naar aanvullende negatieve emissies ten opzichte van het jaar 2050. Vanaf dat jaar blijven de jaarlijkse (negatieve) emissiedoelstellingen constant tot het jaar 2100. De rest van de wereld is broeikasgasneutraal rond 2070. Deze inspanning leidt tot een mondiale temperatuurstijging in 2100 van +1,8°C (bandbreedte: +1,3°C à 2,4°C).

Een vertraagde transitie leidt rond 2075 tot een broeikasgasneutrale economie in Nederland en Europa. Na 2075 blijven de jaarlijkse broeikasgasemissies constant. De rest van de wereld is na 2100 broeikasgasneutraal. Deze inspanning leidt tot een mondiale temperatuurstijging in 2100 van +2,7°C (bandbreedte: +2,1°C à +3,5°C).

De verschillen in ambitie op het gebied van klimaat tussen Europa en de rest van de wereld leiden tot hogere CO₂-prijzen in Europa dan elders. Dit betekent voor Europa een concurrentienadeel voor sectoren met veel uitstoot, zoals delen van de industrie. De mate waarin dit nadelig uitpakt voor het concurrentievermogen van de Europese energie-intensieve industrie hangt onder meer af van de kostenstructuur van Europese bedrijven versus bedrijven buiten Europa (zie ook het cahier Economie, Sectorbeeld). In de scenario's met lage groei worden er door de EU CO₂-eisen gesteld aan producten die op de EU-markt mogen worden gebracht. Ook bestaat de mogelijkheid om extra beleid in te zetten om waar nodig de Europese industrie te beschermen.

2.2. Efficiënte prijzen: definitie en interpretatie

De efficiënte CO₂-prijzen geven weer tegen welke prijs de uitstoot van CO₂ in MKBA's gewaardeerd moet worden. Om de gestelde klimaatdoelen in elk WLO-scenario te halen, is er in de EU en wereldwijd beleid nodig. Binnen elk scenario wordt ervan uitgegaan dat dit beleid efficiënt is, zowel in de EU als elders in de wereld. De logica en doel achter de efficiënte CO₂-prijzen zijn dat deze prijzen het prijspad (prijs in elk jaar) weergeven dat nodig is om in een scenario tegen de laagst mogelijke kosten de broeikasgasreductiedoelen te realiseren. De prijzen zijn daarom te typeren als preventiekosten (zie hoofdstuk 4 voor nadere uitleg).

Conceptueel geven de CO₂-prijzen de waardering (schaduw prijzen) weer van de jaarlijkse broeikasgasemissies. Deze horen bij de doelstelling om broeikasgassen terug te dringen conform het betreffende het WLO-scenario. Een MKBA van een project waarbij gebruik wordt gemaakt van de efficiënte CO₂-prijzen voor het waarderen van broeikasgassen, geeft inzicht of die maatregel op een bepaald tijdstip efficiënt bijdraagt aan het halen van de emissiereductiedoelstelling van het beschouwde WLO-scenario. De prijzen worden weergegeven in euro in het jaar 2021 en geven zogeheten factorkosten weer (lees: zonder productgebonden belastingen en subsidies zoals btw).

Indien een MKBA wordt opgesteld in termen van besteedbaar inkomen (lees: marktprijzen inclusief btw), dan moeten de weergegeven efficiënte CO₂-prijzen worden verhoogd met het gemiddelde aandeel productgebonden belastingen (ook wel genaamd: indirecte belastingen). Zie Zwaneveld (2011) voor nadere

informatie.

De bandbreedte van efficiënte CO₂-prijzen van de vier WLO-scenario's bieden gezamenlijk een 'gematigde' weergave van de onzekerheid rondom de hoogte van deze prijzen in elk jaar. De hoogte van de CO₂-prijzen in de verschillende scenario's is onzeker, omdat dit afhankelijk is van vele noodzakelijke aannamen die inherent onzeker zijn. Bijvoorbeeld economische en demografische ontwikkelingen, de mogelijkheden rondom internationale handel en samenwerking, de kosten van broeikasgasreducerende technieken en de beschikbaarheid ervan (bijv. de hoeveelheid biomassa). Ook technologische vooruitgang is onzeker. Dit bepaalt zowel de kostenreductie van bestaande broeikasgasreductietechnieken als het ontstaan van nieuwe technieken, die ook weer van invloed zijn op de CO₂-prijzen.

Meer in het algemeen bestaat er aanzienlijke onzekerheid rondom de hoogte van (efficiënte) CO₂-prijzen. In de literatuur is dan ook een grote bandbreedte te zien van de verwachte toekomstige CO₂-prijzen. Aansluitend bij de opzet van de WLO werken we daarom een 'gematigde' weergave van onzekerheid uit (zie PBL 2025a). Dit lichten we toe in hoofdstuk 4.

Bij de afweging in een MKBA of een maatregel efficiënt bijdraagt aan het broeikasgasreductiedoel, dient er oog te zijn voor eventuele kostenbesparingen door deze maatregel bij latere broeikasgasreducties. In een sterk vereenvoudigde wereld worden maatregelen in de volgorde van oplopende kosten toegepast (goedkope maatregelen eerst). De efficiënte CO₂-prijzen geven dan een adequate *benchmark* om te bepalen of een techniek efficiënt bijdraagt aan de broeikasgasreductiedoelstelling. De werkelijkheid is echter ingewikkelder. Het kan dus toch kostenefficiënt zijn om te investeren in een broeikasgasreductietechniek waarvan op dat moment de marginale kosten per ton CO₂-reductie hoger zijn dan de efficiënte CO₂-prijs. Een van de redenen hiervoor kan zijn dat er nieuwe kennis wordt opgedaan door deze techniek toe te passen (*learning by doing*). Hierdoor kunnen toekomstige reducties van broeikasgasemissies goedkoper worden. De techniek kan dan, in combinatie met toekomstige CO₂-reducties, wel efficiënt bijdragen aan het behalen van de broeikasgasreductiedoelstelling. Idealiter zouden de techniek én de *bijbehorende* toekomstige emissiereducties worden gecombineerd in één analyse. In de praktijk zal dit vermoedelijk geregeld niet mogelijk zijn omdat toekomstige reducties onvoldoende concreet zijn. Hoe men in de praktijk moet omgaan met dit punt, is nog uit te zoeken.

2.3. Hoogte efficiënte CO₂-prijzen in de WLO 2025

De efficiënte CO₂-prijzen om broeikasgasuitstoot in geld uit te drukken staan in tabel 2.1. De prijspaden voor de WLO-scenario's tot en met 2100 zijn weergegeven in figuur 2.1. Een tabel met prijzen voor meerdere steekjaren voor de periode 2025-2100 kan worden gevonden in bijlage 1. Bij het afleiden van het prijspad hebben we gebruik gemaakt van het IMAGE-model van het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL 2025c). De uitkomsten zijn gebruikt om prijspaden te maken van CO₂-prijzen tot en met 2100. Hierbij is gebruik gemaakt van de Hotelling-regel en de huidige Nederlandse discontovoet van 2,25 procent. Nadere uitleg over de Hotelling-regel en duiding van deze prijzen kan worden gevonden in hoofdstuk 4. Kortgezegd lopen de CO₂-prijzen op over de tijd met de discontovoet. Dit zorgt voor tijdsconsistentie. In MKBA's worden kosten en baten in de toekomst immers verdisconteerd met de discontovoet. Als de CO₂-prijzen minder snel

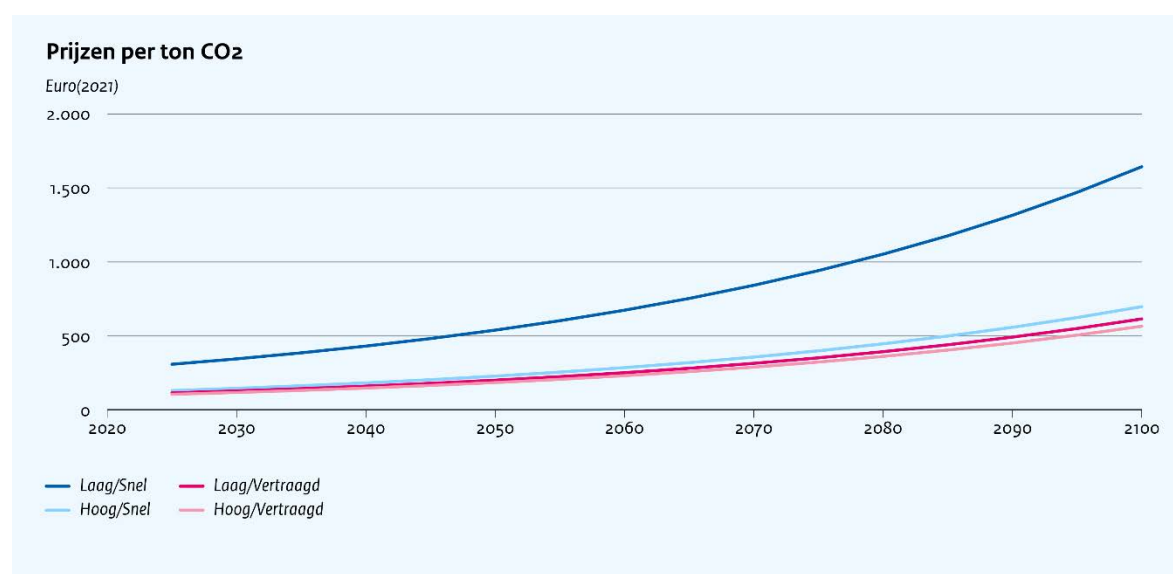
zouden oplopen dan de discontovoet, dan zouden investeringen in CO₂-reductie beter kunnen worden uitgesteld. Als prijzen sneller zouden stijgen dan de discontovoet, dan is het rendabeler om investeringen eerder uit te voeren (zie bijlage 2 voor meer uitleg).

Tabel 2.1 Efficiënte CO₂-prijzen van een ton CO₂ voor de WLO-scenario's.

WLO-scenario	2025	2040	2050	2060
	euro per ton CO ₂ prijspeil 2021			
Laag Snel	310	432	540	675
Laag Vertraagd	116	162	202	253
Hoog Snel	132	184	230	287
Hoog Vertraagd	107	149	186	232

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

Figuur 2.1 Efficiënte CO₂-prijzen van een ton CO₂ voor de WLO-scenario's (prijspeil euro 2021 per ton CO₂)



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

De hierboven gepresenteerde CO₂-prijzen dienen gebruikt te worden om alle broeikasgasemissies als gevolg van Nederlands beleid te waarderen in analyses, met gebruik van de WLO-scenario's. Dit geldt ook als deze emissie(reductie) buiten Nederland of buiten Europa plaatsvindt. Dit punt is relevant voor de WLO-scenario's, aangezien de CO₂-prijzen in de rest van de wereld lager zijn dan in Nederland en Europa (zie paragraaf 2.1). Voor het klimaat maakt het niet uit waar CO₂-reductie plaatsvindt. Daarom maakt het voor de waardering van broeikasgasemissies ook niet uit waar deze uitstoot plaatsvindt. Praktisch heeft dit ook het voordeel dat er geen verschillende prijspaden voor de EU en de rest van de wereld hoeven te worden

gehanteerd. Ook hoeft in MKBA's niet te worden nagegaan of bepaalde broeikasgassen nu betrekking hebben op Europese broeikasgasreductiedoelen of op doelen in de rest van de wereld.

Voor toepassing van de WLO-scenario's in MKBA's geven we het volgende mee. In het toepassingsadvies van de WLO 2025 (zie PBL 2025a) adviseert het PBL om bij analyses, waarin men rekening wil houden met toekomstonzekerheid, in beginsel alle vier de scenario's toe te passen (tenzij scenario's niet-onderscheidend van elkaar zijn in de relevante uitkomstvariabelen). Als een onderzoeker door gebrek aan tijd, of om andere niet-inhoudelijke redenen, maar twee scenario's wil gebruiken, is het advies om in ieder geval een scenario met relatieve lage groei en een met relatieve hoge groei te kiezen. Ook is het advies om daarbij te variëren met de snelheid van de internationale klimaattransitie, zodanig dat de grootste bandbreedte resulteert. Wat de efficiënte CO₂-prijzen betreft, betekent dit toepassing van scenario Laag Snel en scenario Hoog Vertraagd, met respectievelijk de hoogste en laagste CO₂-prijzen. Als de CO₂-effecten in een analyse substantieel zijn, raden we aan binnen elk gehanteerd WLO-scenario via een gevoeligheidsanalyse te variëren in de hoogte van de efficiënte CO₂-prijs. De bandbreedte van de CO₂-prijzen als gevolg van de vier WLO-scenario's geven hierbij de relevante hoogtes voor gevoeligheidsanalyses.

De gepresenteerde efficiënte CO₂-prijzen zijn robuust toepasbaar, zolang de beschikbaarheid van CO₂-reducerende technologieën en de kosten daarvan niet substantieel anders worden dan wat is verondersteld in de WLO 2025. In het hoofdrapport van de WLO 2025 (PBL 2025a) staat dat ontwikkelingen die afwijken van de uitgangspunten van de WLO-scenario's aanleiding kunnen geven om actualisaties te overwegen.

Belangrijk bij de efficiënte CO₂-prijzen is dat de prijzen relevant zijn binnen de aannames en broeikasgasreductiedoelstellingen die horen bij de WLO-scenario's. Een voorbeeld van een mogelijke wijziging is het introduceren van aanzienlijk strenger luchtkwaliteitsbeleid. Dit kan een effect hebben op de hoogte van de efficiënte CO₂-prijzen. Ook nieuwe inzichten rondom externe effecten van bepaalde broeikasgasreducerende technieken kunnen een grote invloed hebben op hun toepassing en daarmee op de CO₂-prijzen. Een andere voorbeeld is het ontdekken van nieuwe goedkope broeikasgasreducerende technieken: dit verlaagt vermoedelijk de efficiënte CO₂-prijzen. In dergelijke gevallen die een mogelijk substantieel effect hebben, dienen de gevolgen te worden onderzocht van de betreffende ontwikkelingen op de WLO-scenario's. Er kan op basis daarvan worden overwogen om nieuwe efficiënte CO₂-prijzen te bepalen. In hoofdstuk 3 gaan we hier nader op in.

3. Aandachtspunten bij de toepassing van CO₂-prijzen

Ondanks dat deze notitie niet is bedoeld als werkwijzer² om een MKBA op te stellen, gaan we in op drie aandachtspunten bij de toepassing van efficiënte CO₂-prijzen. Allereerst bespreken we waarom luchtkwaliteitsbeleid in de WLO-scenario's geen effect heeft op de CO₂-prijzen. Daarna gaan we in op de randvoorwaarden bij het toepassen van de efficiënte CO₂-prijzen van de WLO-scenario's. Ook bespreken we het gebruik van efficiënte elektriciteitsprijzen. Deze zijn gebaseerd op de efficiënte CO₂-prijzen. In een werkwijzer Energie of Klimaat kunnen deze punten verder worden uitgewerkt. Daar is de WLO als scenariostudie niet voor bedoeld. Vandaar dat deze aandachtspunten hier alleen beknopt worden toegelicht.

3.1. Luchtkwaliteit

Bij het gebruik van de efficiënte CO₂-prijzen in MKBA's dienen de effecten van een hogere of lagere luchtkwaliteit separaat te worden gewaardeerd. Veranderingen in de uitstoot van CO₂ worden in MKBA's gewaardeerd op basis van de efficiënte CO₂-prijzen die horen bij de WLO-scenario's. Indien een maatregel naast CO₂-effecten ook andere effecten heeft, zoals op de luchtkwaliteit, dan dienen die separaat gewaardeerd te worden. Voor het waarden van luchtvervuiling verwijzen we met name naar het Handboek Milieuprijzen van CE Delft (2023).

De EU normeert luchtvervuiling op drie verschillende manieren: via emissienormen, via concentratienormen en via depositienormen. Emissienormen gaan over de uitstoot die optreedt bij een bepaald proces. Concentratienormen gaan over de luchtkwaliteit in een gebied, en dan vaak de gemiddelde waarde over een bepaalde periode. Depositienormen hebben betrekking op het neerdalen van stoffen op de grond en het opbouwen van stoffen in de bodem. In onderstaande alinea's bespreken we deze drie normeringen.

Binnen de WLO-scenario's worden de drie luchtvervuilingsnormen gehaald met het huidige beleid. Daardoor is er geen interactie tussen CO₂-prijzen en luchtkwaliteitsbeleid. Het bespreken van luchtkwaliteitsbeleid is relevant, omdat dit een effect kan hebben op de benodigde CO₂-prijzen behorend bij klimaatdoelen. Dit kan spelen wanneer er maatregelen worden genomen ten behoeve van een verbetering van de luchtkwaliteit die ook CO₂-uitstoot reduceren. Dergelijke maatregelen kunnen vanuit het perspectief van CO₂-vermindering relatief kostbaar zijn. Vanwege eisen aan de luchtkwaliteit kunnen ze toch al genomen worden onafhankelijk van CO₂-reductiedoelen. In een dergelijk geval hoeven er minder

² Werkwijzers zijn bedoeld als aanvulling op de algemene leidraad voor MKBA's (Romijn & Renes, 2013). Werkwijzers hebben betrekking op een bepaald werkveld. Op dit moment is er nog geen werkwijzer voor het opstellen van MKBA's voor klimaat- en energiebeleid. De voorliggende notitie heeft als doel om de CO₂-prijzen van de WLO-scenario's te presenteren.

‘overige’ maatregelen getroffen te worden om CO₂-uitstoot te reduceren. Dit kan de CO₂-prijzen verlagen. In de huidige WLO-scenario's is dat niet het geval, omdat er geen extra luchtkwaliteitsbeleid nodig is. De doelen worden immers al gehaald met het huidige beleid in de scenario's.

De EU heeft in 2016 de meest recente emissienormen voor de stoffen NO_x, SO₂, NH₃, PM_{2.5} en NMVOS vastgesteld (EU 2016). In tabel 3.1 staat een overzicht van de reductieverplichtingen voor Nederland en voor de EU als geheel. Er wordt onderscheid gemaakt tussen twee perioden, een eerste reductienorm vóór 2030 en een vanaf 2030. De tabel bevat ook de verwachte emissiereducties voor 2030 volgens de meest recente ramingen (PBL & RIVM 2025). Hieruit volgt de conclusie dat deze emissiedoelstellingen voor alle stoffen worden gehaald.

Zoals uit tabel 3.1 valt af te lezen, heeft Nederland in vergelijking met de EU-landen een relatief kleine opgave voor NMVOS en SO₂. Nederland heeft hier voor 2005 al veel in gedaan. Met de emissiereductieverplichtingen voor NO_x, NH₃ en PM_{2.5} volgt Nederland grofweg de gemiddelde reductieafspraken van de EU-landen. Het PBL en RIVM concluderen in de meest recente emissieraming (PBL & RIVM 2025) ook dat ‘de kans heel erg groot [is] dat Europese emissiedoelen voor de luchtverontreinigende stoffen in 2030 worden gehaald’. Het PBL concludeert dat ook de nationale streefdoelen voor emissies van het Schone Lucht Akkoord rondom luchtvervuiling zeer waarschijnlijk gehaald gaan worden voor de meeste sectoren (PBL & RIVM 2025).

Tabel 3.1 Emissiereductie verplichting t.o.v. 2005 voor Nederland en de EU voor en na 2030 voor SO₂, NO_x, NH₃, PM_{2.5} en NMVOS inclusief de verwachte reductie voor Nederland (EU 2016; PBL & RIVM, 2025).

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

Noot: PM= fijnstof, direct uit bronnen geëmitteerd; NMVOS=Niet Methaan Vluchtige Organische Stoffen.

De huidige Europese en Nederlandse luchtkwaliteitsdoelen zijn gericht op 2030 en deze doelen worden in de WLO 2025 vanaf 2030 gehaald. Deze luchtkwaliteitsdoelen betreffen concentratienormen. In februari 2024 zijn deze afgesproken in het EU-actieplan ‘Route naar een gezonde planeet voor iedereen’ (EC 2024). Volgens de impactanalyse van de Europese Commissie zijn deze concentratienormen haalbaar met

het huidige beleid (EC 2021, bijlage, p.5-9; Maas et al. 2023, p.10).

Ook het RIVM (Maas et al. 2023) heeft gekeken naar gevolgen van de concentratienormen voor Nederland. Hieruit bleek dat in 98 procent van Nederland de nieuwe normen voor 2030 met bestaande beleidsmaatregelen worden gehaald. Op enkele plekken zouden extra maatregelen nodig zijn. Die maatregelen zijn vaak zo specifiek en lokaal dat we er geen invloed op de CO₂-prijs van verwachten (zie PBL 2025c voor een nadere bespreking). In de WLO-scenario's gaat het PBL er dan ook vanuit dat er geen extra maatregelen nodig zijn om de doelen voor luchtkwaliteit te halen vanaf 2030. Voor het jaar 2050 heeft de Europese Commissie een ambitieuzere luchtkwaliteitsvisie geformuleerd (EC 2024). De visie is om in 2050 alle verontreiniging in water, water en lucht terug te brengen tot nul.³ Het Europees Parlement heeft echter nog geen wettelijke doelstelling vastgelegd. Ook zijn er nog geen maatregelen voorgesteld om deze visie te realiseren.

Ook beleid met betrekking tot depositienormen voor het beschermen van de natuur in Nederland heeft naar verwachting geen grote gevolgen op de efficiënte CO₂-prijzen. De afgesproken 2030-emissiedoelstellingen voor met name NH₃ en NO_x blijken onvoldoende om de afgesproken vermindering in de Natura 2000-gebieden te realiseren. Op het moment van schrijven is de rijksoverheid nog bezig om het beleid te herijken waarmee ze deze doelen kunnen realiseren. Daarbij is het nog niet duidelijk is of dit vooral volumemaatregelen zal betreffen (waarbij tevens de broeikasgasemissies omlaag gaan) of juist technologische maatregelen (met minder effect op de broeikasgasemissies).

In de WLO-scenario's is geen aanvullend beleid verondersteld voor het realiseren van de natuurdoelstellingen (zie PBL 2025a voor aanvullende informatie hierover). Het is mogelijk dat toekomstig beleid over depositienormen wel een effect heeft op de uitstoot van broeikasgassen. In de WLO 2025 is in dit geval verondersteld dat de resterende broeikasgasemissies uit de landbouw via een Europese pool kunnen worden gecompenseerd. Dit kan door middel van negatieve emissies in de natuur in Europa (bijvoorbeeld extra bossen aanplanten). Aanvullend beleid over depositienormen heeft daarom naar verwachting geen grote gevolgen voor de CO₂-prijzen (zie PBL 2025c).

3.2. Randvoorwaarden voor de efficiënte CO₂-prijzen van de WLO-scenario's

De efficiënte CO₂-prijzen zijn toepasbaar zolang de beschikbaarheid van CO₂-reducerende technologieën en de kosten daarvan niet substantieel wijzigen. Het is hierbij belangrijk om te beseffen dat de CO₂-prijzen alleen geldig zijn binnen de aannames en broeikasgasreductiedoelstellingen in de WLO-scenario's. De beschikbaarheid van de technieken en de kosten bepalen namelijk in aanzienlijke mate de hoogte van de CO₂-prijzen. Met beschikbaarheid bedoelen we zowel of een techniek gebruikt wordt als ook in welke mate hij wordt ingezet.

³ EC (2021, mededeling p. 3) formuleert de visie ook als volgt: 'Lucht-, water- en bodemverontreiniging worden teruggedrongen tot een niveau dat niet langer als schadelijk voor de gezondheid en de natuurlijke ecosystemen wordt beschouwd en dat de grenzen van onze planeet in acht neemt, waardoor een gifvrij milieu wordt gerealiseerd.'

De beschikbaarheid van CO₂-reducerende technologie kan veranderen als gevolg van kostendalingen en -stijgingen, de introductie van nieuwe technologie en veranderende inzichten in externe effecten. Een eerste voorbeeld van een verandering betreft een (veel) sterker dan verwachte daling van de kosten van broeikasgasreducerende technieken. Dit verlaagt vermoedelijk de efficiënte CO₂-prijzen.⁴ Ook nieuwe inzichten rondom externe effecten van bepaalde broeikasgasreducerende technieken kan een grote invloed hebben op (de mate van) hun toepassing en daarmee op de CO₂-prijzen.

In de WLO 2025 veronderstelt het PBL het gebruik van technieken, zoals biomassa, windmolens of kernenergie om de CO₂-uitstoot terug te dringen. Het kan zijn dat deze technieken veel minder kunnen worden toegepast dan verwacht. Biomassa kan leiden tot teveel uitstoot naar de lucht. Voor windmolens en kernenergie kunnen nieuwe inzichten over milieu- of veiligheidseffecten ertoe leiden dat ze minder worden ingezet dan verwacht in de WLO 2025. In dat geval dienen dan er andere, veelal duurere technieken te worden ingezet om de broeikasgasreductiedoelen van de WLO 2025 te halen. Dit vertaalt zich dan mogelijk in hogere efficiënte CO₂-prijzen.

Toekomstig nieuw EU- of Nederlands beleid over de luchtkwaliteit of andere verontreinigingen kan ook leiden tot substantiële wijzigingen in de benodigde inspanningen om broeikasgassen te reduceren. In dat geval ontstaat er mogelijk een verschil met de uitgangspunten van de WLO 2025. Dit vraagt dan mogelijk om het aanpassen van de efficiënte CO₂-prijzen. In de voorgaande paragraaf 3.1 gaan we nader in op de relatie tussen efficiënte CO₂-prijzen en luchtkwaliteitsbeleid. Het PBL zal dit luchtkwaliteitsbeleid monitoren en initiatief nemen voor actie indien daar noodzaak toe is.

Nieuwe efficiënte CO₂-prijzen dienen te worden overwogen als de technologische mogelijkheden aanzienlijk wijzigen. In het hoofdrapport van de WLO 2025 (PBL 2025a) staat dat ontwikkelingen die afwijken van de uitgangspunten van de scenario's van de WLO 2025 aanleiding kunnen geven om actualisaties te overwegen. In de voorgaande alinea's staan hiervan enkele voorbeelden. In dergelijke gevallen dienen de gevolgen te worden onderzocht van de betreffende ontwikkelingen op de WLO-scenario's, om zo te beoordelen of aanpassing van CO₂-prijzen mogelijk op zijn plaats is.

Als verwacht wordt dat een projectalternatief een substantieel effect kan hebben op de efficiënte CO₂- of elektriciteitsprijzen, dan moeten deze opnieuw worden vastgesteld.⁵ Indien bijvoorbeeld een projectalternatief wordt geanalyseerd met veel meer windmolens op zee dan aangenomen in het WLO-scenario, dan kan dit zowel een effect hebben op de CO₂-prijzen als op de elektriciteitsprijzen. In dit alternatief zal, op momenten dat de windmolens veel elektriciteit produceren, de elektriciteitsprijs in Nederland mogelijk lager zijn (door overaanbod) dan de prijs die in de WLO is aangenomen. Hierbij moet rekening worden gehouden met het feit dat de Nederlandse elektriciteitsmarkt is verbonden met de Europese elektriciteitsmarkt. Het effect op prijzen wordt daardoor in dit voorbeeld gedempt.

⁴ We spreken van een vermoedelijke daling van de CO₂-prijzen omdat de CO₂-prijzen wordt bepaald door de *marginale* kosten van het reduceren van broeikasgasemissies. Niet alle technieken hebben een invloed op deze marginale kosten. Een kostenverlaging van bepaalde broeikasgasreducerende techniek zal dus wel zeker een dalend effect hebben op de *gemiddelde* kosten om broeikasgasemissies te verlagen, maar niet noodzakelijk ook op de *marginale* kosten ervan en daarmee op de CO₂-prijzen.

⁵ Zie CPB & PBL (2013, p.41) voor een uitgebreidere beschouwing van een KEA.

Elektriciteitsprijzen uit de WLO-scenario's hanteren kan dan een vertekend beeld (lees: een te rooskleurig beeld) geven van de opbrengsten van deze extra windmolens. Bij een projectalternatief met dermate grote effecten op het energiesysteem dat de prijzen mogelijk veranderen, kunnen de hier gepresenteerde prijzen dus niet zomaar worden gebruikt. In plaats daarvan dient men nieuwe efficiënte CO₂- en elektriciteitsprijzen te bepalen, die voor dat alternatief gebruikt moeten worden in de MKBA.

Gezien de uitgangspunten van de WLO 2025 zou een ex-ante analyse naar broeikasgasreducerende maatregelen op basis van de WLO-scenario's getypeerd kunnen worden als een KostenEffectiviteitsAnalyse (KEA). Bij een KEA staat het bereiken van een effect (hier de gestelde reductie van broeikasgassen) centraal: alternatieve projecten om dit doel te bereiken worden dan onderling vergeleken op hun brede maatschappelijke effecten. Het is niet mogelijk om op basis van de WLO 2025 een MKBA te maken van klimaatdoelstellingen. Een KEA lijkt in de uitvoering sterk op een MKBA. Een KEA is daarmee op te vatten als een MKBA met een gegeven, vast doelbereik.⁶

3.3. Efficiënte elektriciteitsprijzen

Om het meer of minder gebruik en productie van elektriciteit adequaat te waarderen in MKBA's, zijn zogeheten efficiënte elektriciteitsprijzen op uurbasis nodig. Voor een uitleg over efficiënte elektriciteitsprijzen verwijzen we naar tekstkader 3.1 (Aalbers et al., 2016).

Elektriciteitsprijzen variëren sterk per uur door de variabiliteit van wind en zonne-energie. Het maakt daarom bijvoorbeeld voor het rendement van een project veel uit of de elektriciteit wordt gebruikt of geproduceerd tijdens uren dat elektriciteit relatief goedkoop is, of juist als het duur is. Jaargemiddelde efficiënte elektriciteitsprijzen zullen daarom voor veel projecten niet representatief zijn.

Anders dan bij de vorige publicatie over CO₂-prijzen uit 2016, zijn in deze publicatie de efficiënte elektriciteitsprijzen nog niet bijgewerkt. Voor de WLO 2025 zijn groothandelsprijzen bepaald met behulp van het model COMPETES (zie PBL 2025c). Er is geen garantie dat deze groothandelsprijzen overeenkomen of in de buurt liggen van de efficiënte elektriciteitsprijzen. De reden is dat er niet is gerekend op basis van uitgangspunt iv uit tekstkader 3.1: de investeringen in opwekcapaciteit moeten efficiënt zijn. De veronderstelde investeringen in opwekkingscapaciteit zijn overgenomen uit externe bronnen. De opwekcapaciteit zal dus waarschijnlijk niet efficiënt passend zijn bij de vraag naar elektriciteit in de verschillende WLO-scenario's.

Met de andere genoemde vier uitgangspunten uit tekstkader 3.1 is wel rekening gehouden. Zo is bijvoorbeeld de inzet van de gegeven opwekcapaciteit - uitgangspunt iii - bepaald op basis van de *merit-order*, zonder verstorend overheidsbeleid. Dit is zoals beoogd bij het vaststellen van efficiënte elektriciteitsprijzen.

Voor het vaststellen van efficiënte elektriciteitsprijzen is een vervolgactie nodig. Naast jaargemiddelde

⁶ Zie CPB & PBL (2013, p.41) voor een uitgebreidere beschouwing van een KEA.

efficiënte elektriciteitsprijzen zijn ook efficiënte uursprijzen voor elektriciteit nodig. Dit geldt ook voor luchtemissies die bij de productie van elektriciteit beschikbaar komen.

Tekstkader 3.1: Wat zijn efficiënte elektriciteitsprijzen in theorie?

Efficiënte elektriciteitsprijzen in een bepaald scenario zijn toekomstige elektriciteitsprijzen waarbij rekening is gehouden met de volgende uitgangspunten: (i) de kosten van technologie (opwek en opslag) zoals die in de WLO 2025 voor dat scenario zijn opgenomen; (ii) de uitstoot van CO₂ geprijsd door middel van de efficiënte CO₂-prijzen, opdat de klimaatdoelstelling van dat scenario wordt gehaald; (iii) de inzet van opwekcapaciteit is efficiënt (volgens de merit-order); (iv) de investeringen in opwekcapaciteit zijn efficiënt; (v) met andere (niet CO₂) externe effecten, zoals bijvoorbeeld luchtemissies en inpassing in het landschap, wordt rekening gehouden conform de uitgangspunten van het scenario.

Met efficiënte inzet van opwekkingscapaciteit wordt hierbij bedoeld dat dit geschiedt op basis van de merit-order (in het Nederlands: biedladderprijs) zonder verstorend overheidsbeleid zoals subsidies (zoals SDE++) en zogeheten feed-in tarieven(a). De inzet van de capaciteit is ook efficiënt passend bij de veronderstelde prijzen voor brandstoffen en CO₂ en de vraag naar elektriciteit. Ook de investeringen in de opwekcapaciteit van elektriciteit dient efficiënt bepaald te worden, passend bij de prijzen, kosten en de vraag naar elektriciteit. Dit houdt in dat er geen sprake is van overcapaciteit of ondercapaciteit. Toetreders of uitreders op de markt voor het opwekcapaciteit ervaren daarbij aan de marge geen overwinsten of verliezen en ook geen verstorend overheidsbeleid. Hierbij dient rekening te worden gehouden met de verwachte en onverwachte uitval van opwekcapaciteit

(a) Het feed-in tarief (FiT) is een economisch beleidsmechanisme dat is ontworpen om de adoptie van hernieuwbare energiebronnen te versnellen. Het biedt langdurige prijsgaranties aan producenten van hernieuwbare energie voor de elektriciteit die ze opwekken en aan het net leveren.

Om MKBA's uit te kunnen voeren is ook inzicht nodig in de luchtemissies van de productie van elektriciteit per uur en voor meerdere zichtjaar. Een MKBA dient alle externe effecten van elektriciteitsproductie mee te nemen. Met name de gemonetariseerde luchtemissies blijken van substantiële omvang te zijn in vergelijking met de elektriciteitsprijzen. Dit blijkt uit PBL-berekeningen met IMAGE en COMPETES voor de WLO 2025 (PBL 2025c). Door de voortgaande verduurzaming van de elektriciteitsproductie zijn de luchtemissies sterk afhankelijk van het zichtjaar en het uur waarop elektriciteit wordt afgenomen of geproduceerd. Extra elektriciteitsgebruik op momenten dat er bijvoorbeeld een overaanbod is uit zonnecellen of windmolens, leidt immers niet tot extra luchtemissies.

4. Efficiënte CO₂-prijzen afleiden

In dit hoofdstuk bespreken we hoe we de efficiënte CO₂-prijzen afleiden in de WLO-scenario's. Dit relateren we aan andere vormen van CO₂-prijzen. We bespreken in paragraaf 4.1 de wijze waarop we de efficiënte CO₂-prijzen in de WLO 2025 hebben bepaald. In paragraaf 4.2 bespreken we de waarderingen die in de wetenschappelijke literatuur worden gerapporteerd voor een ton CO₂ bij min of meer vergelijkbare klimaatdoelstellingen als in de WLO 2025. Daarna gaan we in paragraaf 4.3 in op de CO₂-prijzen die in andere landen worden voorgeschreven om in MKBA's de uitstoot van CO₂ te waarderen. Deze prijzen zijn het resultaat van zowel de literatuur als expliciete politieke keuzes.⁷ In paragraaf 4.4 lichten we toe waarom marktprijzen van CO₂-rechten in het huidige Europese emissiehandelssysteem (EU-ETS) niet geschikt zijn om CO₂ te waarderen in MKBA's. In bijlage 2 gaan we dieper in op belangrijke maar technische keuzes bij het bepalen van de hoogte van CO₂-prijzen in verschillende jaren: de discontovoet en de jaarlijkse stijging van CO₂-prijzen (dit gebeurt op basis van de discontovoet).

Preventiekosten en social cost of carbon (SCC)

CO₂-waarderingen zijn veelal gebaseerd op een van de volgende twee benaderingen:

- (1) de preventiekosten⁸
- (2) de *social cost of carbon*⁹ (SCC)

De preventiekosten op tijdstip t geven de extra kosten weer die op dat tijdstip minimaal moeten worden gemaakt (uitgedrukt in euro per ton CO₂) om een gegeven CO₂-reductiedoel tegen minimale kosten te bereiken. Conceptueel zijn de preventiekosten gelijk aan de schaduw prijzen om een gegeven reductiedoelstelling te realiseren. In deze notitie duiden we de preventiekosten aan als de 'efficiënte CO₂-prijs'.

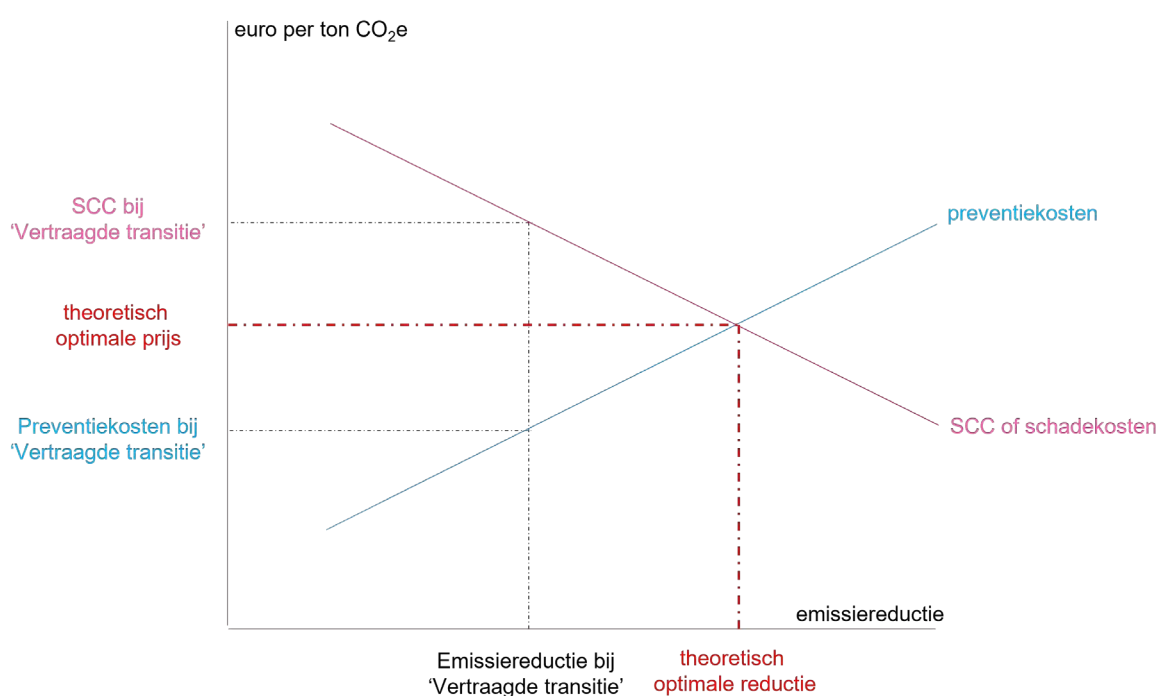
De SCC daarentegen, beoogt de contante waarde van alle schade (fysieke, economische, maatschappelijke, biologische en psychische) weer te geven die vanaf heden wordt veroorzaakt door de uitstoot van een extra ton CO₂. Bij het adequaat waarderen van al deze schades moeten potentiële risico's en onzekerheden worden meegenomen (Olijslagers et al. 2023).

⁷ Een sprekend voorbeeld hiervan zijn de voorgeschreven CO₂-waarderingen in de Verenigde Staten (Vivid Economics 2021). Zowel onder de Obama-, Trump- als Biden-regering zijn de waarderingen gebaseerd op de social costs of carbon. Gedurende de eerste termijn van Trump bedroeg deze \$1 terwijl die onder Biden veel hoger waren.

⁸ Andere in de literatuur gebruikte aanduidingen voor preventiekosten zijn *marginal abatement costs* (MAC), marginale CO₂-reductiekosten of mitigatiekosten.

⁹ De *social cost of carbon* (SCC) wordt ook wel aangeduid als schadekosten of betalingsbereidheid. De afkorting SCC wordt veel in de wetenschappelijke literatuur en Engelstalige publieke media gehanteerd.

Figuur 4.1 Relatie tussen SCC (of schadekosten) en preventiekosten bij CO₂-prijzen



Noot: gestileerde weergave van de emissiereductie.

De verhouding tussen de SCC en preventiekosten geven we schematisch weer in bovenstaande figuur 4.1. In de figuur is te zien dat de preventiekosten vaak toenemen wanneer er meer uitstoot gereduceerd wordt (emissiereductie). De SCC nemen daarentegen veelal af bij meer emissiereductie: de aarde warmt dan minder op en dus zijn de verwachte schadekosten lager.

De optimale mate van emissiereductie is het punt waarop de marginale preventiekosten gelijk zijn aan de SCC of marginale schadekosten. Of om het anders te zeggen: de baten van het reduceren van een extra ton CO₂ zijn daar gelijk aan de kosten om dit te realiseren. In figuur 4.1 wordt dit optimale punt schematisch weergegeven.

Deze theoretische manier van kijken naar de kosten en de baten van CO₂-reductie komt met name voort uit economische literatuur (Olijslagers et al. 2023). In de praktijk is het onzeker waar het punt precies ligt waarop de baten van CO₂-reductie gelijk zijn aan de kosten. Ook weten we niet of de WLO-scenario's zich links of rechts van het optimum bevinden.

De emissiereductie bij een snelle transitie in de WLO-scenario's is niet weergegeven in figuur 4.1. Deze zal zich rechts bevinden van de weergegeven vertraagde transitie, en mogelijk rechts van het optimum. Preventiekosten en SCC zijn verschillende benaderingen die ook tot andere CO₂-prijzen leiden. Wie bij vertraagde transitie de hoogte van de SCC vergelijkt met preventiekosten, ziet dat de SCC hoger is dan de preventiekosten. De conclusie die volgt uit deze observatie is dat het dan optimaal is om meer CO₂ te reduceren en 'naar rechts te gaan in de figuur'. Dit komt omdat de maatschappelijke schade van CO₂-

uitstoot (*social cost of carbon*, SCC) hoger is dan de kosten om dit te reduceren.¹⁰

In de WLO is ervoor gekozen om met preventiekosten te werken, omdat er zo gevarieerd kan worden met prijzen. Daarmee passen die prijzen bij de veronderstellingen in elk scenario.

4.1. Toelichting bij het bepalen van de efficiënte CO₂-prijzen in de WLO 2025

De opbouw van deze paragraaf is als volgt. Allereerst bespreken we hoe de CO₂-prijzen concreet zijn bepaald vanuit de uitkomsten van het IMAGE-model¹¹. IMAGE is een ecologisch-milieumodel dat de milieugevolgen van menselijke activiteiten wereldwijd simuleert. Het geeft onder andere indicaties over de hoogte van de CO₂-prijzen. Vervolgens bespreken we de argumenten en keuzes die hebben geleid tot de gekozen aanpak. Daarna gaan we in enkele consequenties van de theoretische en conceptuele interpretatie van de CO₂-prijzen. Dit betreft de schaduw prijzen (waardering) van de doelstelling om broeikasgassen terug te dringen in lijn met het betreffende het WLO-scenario.

De efficiënte CO₂-prijzen zijn afgeleid van drie steekjaren met bruikbare IMAGE-uitkomsten: 2040, 2050 en 2060. We zoeken naar een prijspad dat de IMAGE-uitkomsten goed weergeeft. Ook moet de jaarlijkse prijsstijging voldoen aan de zogeheten Hotelling-regel die we in bijlage 2 toelichten. De efficiënte CO₂-prijzen zijn een gewogen gemiddelde van de onaangepaste CO₂-prijzen die uit IMAGE komen voor de jaren 2040, 2050 en 2060. De efficiënte CO₂-prijzen zijn zodanig gekozen dat de gemiddelde prijsprikkel¹² die producenten ervaren, in de drie steekjaren (2040, 2050 en 2060) gelijk is bij zowel de efficiënte CO₂-prijzen als de oorspronkelijke prijzen uit IMAGE. Gedetailleerde uitleg over de berekening staat in bijlage 3. De efficiënte CO₂-prijzen in de periodes voor 2040 en na 2060 worden afgeleid van de CO₂-prijzen uit de periode tussen 2040-2060. Dit doen we door middel van het toepassen van de Hotelling-regel (met een discontovoet van 2,25 procent).

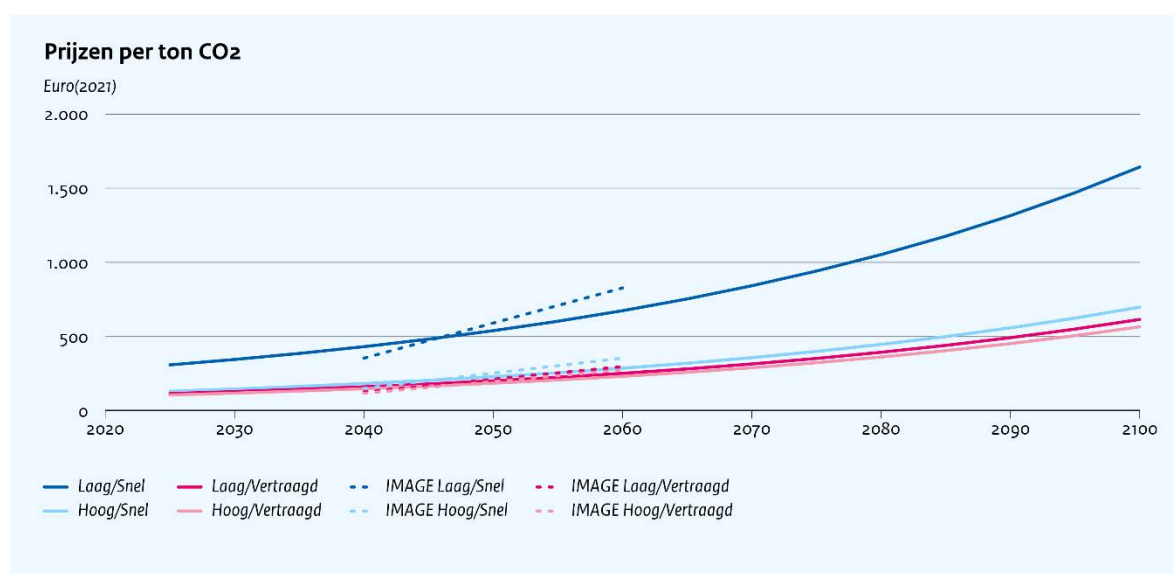
De efficiënte CO₂-prijzen en de oorspronkelijke IMAGE-uitkomsten staan weergegeven in figuur 4.2. De stippellijnen geven de oorspronkelijke IMAGE-uitkomsten weer voor de jaren 2040-2060. De ononderbroken lijnen representeren de efficiënte CO₂-prijzen die we hieruit hebben afgeleid. Zie PBL (2025c) voor een uitgebreidere duiding van de IMAGE-cijfers en de verschillen tussen de WLO-scenario's. Merk op dat de efficiënte CO₂-prijzen in 2040 iets hoger liggen dan de IMAGE-prijzen. Een hogere prijs zal leiden tot minder CO₂-uitstoot. Bij een hogere CO₂-prijs zijn broeikasgasreducerende technieken immers vaker rendabel. Dit maakt het logisch om in latere jaren tot lagere prijzen te komen dan de oorspronkelijke IMAGE-uitkomsten, om zo in die jaren minder CO₂ te hoeven reduceren. De reden hiervoor is dat de totale reductie over de periode 2040-2060 globaal gelijk blijft bij zowel de efficiënte CO₂-prijzen als bij de IMAGE-prijzen. De efficiënte CO₂-prijzen in 2060 liggen dan ook lager dan de IMAGE-prijzen.

¹⁰ Omgekeerd geldt dat als de SCC lager is dan de preventiekosten het optimaal is om dan minder broeikasgassen te reduceren.

¹¹ Zie IMAGE - Integrated Model to Assess the Global Environment, [link](#).

¹² Deze prijsprikkel bestaat uit de uitstoot van CO₂ maal de CO₂-prijs plus het misgelopen producentensurplus door toepassing van de emissiereducerende technieken. Dit laatste wordt benaderd door toepassen van de 'rule of half' om dit te berekenen.

Figuur 4.2 CO₂-prijzen in de WLO-scenario's (prijspeil euro 2021 per ton CO₂e)



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

Het gebruik van de Hotelling-regel bij het afleiden van de CO₂-prijzen is gebaseerd op de volgende argumenten. Een belangrijk voordeel van het gebruik van de Hotelling-regel voor het bepalen van de jaarlijkse stijging van de efficiënte CO₂-prijzen is dat dit een tijdsconsistent prijspad oplevert voor investeringen in duurzame technologie. ¹³ Deze (reële) prijsstijging is gelijk aan de standaardwaarde van de huidige geldende (reële) discontovoet in MKBA's. Die bedraagt op moment van schrijven van 2,25 procent. In bijlage 1 staan ook de efficiënte CO₂-prijzen bij een discontovoet van 3,0 procent. De Hotelling-regel is gebaseerd op economische theorie. Zie bijlage 2 voor nadere uitleg van de discontovoet en de Hotelling-regel. De Hotelling-regel is ook gehanteerd voor het bepalen van het prijsverloop bij de vorige WLO (Aalbers et al. 2016).

De IMAGE-uitkomsten zijn getoetst aan de bandbreedte uit de wetenschappelijke literatuur. In dit model (en soortgelijke Integrated Assessment Modellen, IAM, Volgt-Schilb et al., 2018) is een veelheid aan inputgegevens nodig en zijn een veelheid aan complexe interacties tussen economie, samenleving, natuur en klimaat gemodelleerd. Omdat deze inputgegevens en de interacties onzeker zijn, zijn dus ook de uitkomsten van het IMAGE-model onzeker. Bij het bepalen van de uiteindelijke hoogte van efficiënte CO₂-prijzen is dan ook nadrukkelijk getoetst of de efficiënte CO₂-prijzen in de WLO 2025 in lijn liggen met de bandbreedte van CO₂-prijzen uit de internationale wetenschappelijke literatuur (zie paragraaf 4.2). Het is hierbij uiteraard van belang prijzen te vergelijken uit de wetenschappelijke literatuur die passen bij de uitgangspunten van het betreffende WLO-scenario. De wetenschappelijke literatuur geeft de best mogelijk inschatting van de bandbreedte voor de CO₂-prijzen. De CO₂-prijzen uit de wetenschappelijke literatuur

¹³ De wens tot het verkrijgen van een tijdsconsistent tijdspad leidt tot het toepassen van de zogeheten Hotelling-regel (zie ook bijlage 2). Het achterliggende argument is dat een optimale investering in duurzame technologie niet rendabeler kan worden door deze uit te stellen of juist eerder te plegen. Voor een optimale investering zijn de baten van uitstel in een theoretische setting gelijk aan de discontovoet. Dat is immers het rendement dat men 'elders' kan halen. De kosten van uitstel moeten dan dus ook zo hoog zijn: anders was de investering niet optimaal. Daarom dient de CO₂-prijs dus ook te stijgen met de discontovoet.

vormen daarmee een belangrijke onderbouwing voor de hoogte van efficiënte CO₂-prijzen in de WLO-scenario's.

De marginale abatementkosten in een sector kunnen afwijken van de efficiënte CO₂-prijzen. De marginale abatementkosten in een sector betreffen de marginale kosten van een investering om een ton CO₂ te reduceren in een sector. In een optimale strategie kunnen die in bepaalde sectoren in bepaalde jaren hoger liggen dan de efficiënte CO₂-prijs omdat er in de praktijk restricties zijn hoeveel broeikasgasreducties je kunt realiseren in een jaar (Vogt-Schilb et al, 2018). Daarnaast zorgen bepaalde investeringen ervoor dat er zowel direct broeikasgasreducties plaatsvinden als dat het hierdoor mogelijk wordt om later aanvullende broeikasgasreducties relatief goedkoop te realiseren. Dit heeft als consequentie dat de marginale abatementkosten die uit modellen (zoals IMAGE-model of het MERGE-model dat bij de vorige WLO-scenario's is gebruikt) komt niet gelijk hoeven zijn aan de schaduw prijzen van CO₂-uitstoot (lees: de efficiënte CO₂-prijzen). Dit pleit er dus voor deze prijzen per jaar niet een-op-een over te nemen, maar om ze gewogen over meerdere jaren mee te nemen zoals we hierboven beschrijven. Ook bij toepassing van de efficiënte CO₂-prijzen in MKBA's vraagt de genoemde afwijking extra aandacht. Dit bespreken we in paragraaf 2.2.

4.2. Vergelijking met CO₂-waarderingen uit de literatuur

Preventiekosten worden gegeven een bepaalde broeikasgasreductiedoelstelling, bepaald op basis van inschattingen over de kosten en mogelijkheden van technologieën en inschattingen over de economie als geheel. Uit modellen wordt op basis van deze inschattingen afgeleid wat de marginale CO₂-reductiekosten zijn, veelal op basis van gedetailleerde gegevens en toekomstramingen daarvan.¹⁴

De preventiekosten-literatuur komt op een mediane¹⁵ schatting van de CO₂-prijs in de orde van 100 à 150 euro per ton voor het jaar 2030. De CO₂-prijs is bij de preventiekostenbenadering sterk afhankelijk van het gestelde CO₂-reductiedoel. Hoe strenger de reductiedoelstelling, hoe hoger de preventiekosten. Het IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) presenteert in zijn meest recente modelanalyses (IPCC, 2022) preventiekosten voor uiteenlopende reductiedoelstellingen. Wij geven in tabel 4.1 de CO₂-prijzen weer die horen bij een 2°C-scenario (>67 procent¹⁶) in 2100 (aangeduid door IPCC als 'C3'), dat ongeveer overeenkomt met de WLO-scenario's met een snelle transitie (scenario Snel) en een 3°C-scenario in 2100 (>50 procent) (aangeduid door IPCC als 'C6'), dat ongeveer overeenkomt met de WLO -scenario's met een vertraagde transitie (scenario Vertraagd).

¹⁴ Wiskundig verwoord zijn de preventiekosten de duaal van de CO₂-budget restricties in een optimalisatieprogramma. Men kan daarom preventiekosten bepalen op diverse aggregatieniveaus. Recente voorbeelden zijn Kuosmanen et al. (2020), Quinn et al. (2023) en Rekker et al. (2023). Voor een overzicht van toepassingen en modellen, zie Zhou et al. (2014).

¹⁵ Merk op dat de gemiddelde CO₂-prijzen boven de door IPCC-gerapporteerde mediane CO₂-prijzen liggen, vanwege de rechts-scheve en dik-gestaarte verdeling van CO₂-prijzen.

¹⁶ De aanduiding '>67%' heeft betrekking dat op kans dat de beoogde globale temperatuurstijging wordt behaald. Het 2°C-scenario (>67%) in 2100 betreft dus een kans van minimaal 67% dat de opwarming van de aarde in 2100 beperkt blijft tot maximaal 2°C.

Uit het in de economische literatuur veel gebruikte DICE-model¹⁷ is ook de hoogte van de preventiekosten bij een gegeven temperatuurdoel af te leiden. Hier bekijken we de temperatuurdoelen die ongeveer overeenkomen met de WLO-scenario's met een snelle transitie (circa 2°C opwarming in 2100) en het scenario Vertraagd (circa 3°C opwarming). Beiden zijn weergegeven in tabel 4.1. Ook de IEA (International Energy Agency) rapporteert elk jaar in haar World Energy Outlook (WEO) preventiekosten voor de elektriciteitsproductie, industrie en energieproductie op basis van een gedetailleerde analyse van het wereldwijde energiesysteem.¹⁸ In tabel 4.1 presenteren we ook de schattingen uit het WEO-rapport uit 2023 (IEA, 2023) en wel voor een scenario met netto nul emissies in 2050 wereldwijd.¹⁹

De jaarlijkse groeisnelheid van de CO₂-prijzen in de jaren 2030-2050 verschilt aanzienlijk. Zie de laatste kolom van tabel 4.1. De groei van de prijzen in DICE ligt rond de 2 procent per jaar. De IEA-cijfers kennen een jaarlijks groeipercentage van 3 procent en de IPCC-cijfers hebben een jaarlijkse groei van tussen de 4,3 en 5,5 procent. Voor het beoordelen van de hoogte van de CO₂-prijzen is niet alleen de hoogte in een bepaald steekjaar (bijv. 2050) van belang, maar ook het gehele prijspad. Het jaarlijkse groeipercentage geeft hier zicht op.

De IPCC-prijzen behorende bij een 2 en 3 gradenpad zijn in het jaar 2030 lager dan in de WLO 2025, maar hoger na 2050 door een hogere jaarlijkse prijsstijging. De IPCC-bandbreedte bij 2 graden van tussen de 59 en 588 euro voor het jaar 2050 komt redelijk overeen met de bandbreedte uit de WLO-scenario's. Daarvoor liggen de IPCC-cijfers onder de WLO 2025. Na 2050 overstijgen de IPCC-cijfers die van de WLO 2025. De IEA-cijfers voor netto nul emissies in 2050 komen in de gehele periode overeen met het WLO-scenario Hoog Snel. De DICE-cijfers liggen onder of aan de onderkant van de vergelijkbare WLO-scenario's.

De CO₂-prijzen uit de preventiekostenbenadering kennen een grote bandbreedte (zie Kesicki en Ekins, 2012; Aldy et al., 2021; Fischer en Morgenstern, 2006; Van Vuuren et al., 2020; Gillingham en Stock, 2018; Fuss et al., 2018). Voor het bepalen van CO₂-prijzen op basis van de preventiekostenmethode moeten namelijk inschattingen en aannames worden gemaakt van bijvoorbeeld technologiekosten, socio-economische condities, politieke en maatschappelijke acceptatie en het CO₂-reductiedoel (zie bijv. IPCC, 2018).

¹⁷ Het Dynamic Integrated Climate-Economy model (DICE-model) is een neoklassiek energie-economie-klimaat model. Het model is ontwikkeld door William Nordhaus (winnaar Nobelprijs voor Economie 2018). Het model wordt door de US EPA gebruikt voor het berekenen van de social cost of carbon (SCC). [Link](#).

¹⁸ De OECD zelf geeft in een recente scenariostudie ook aan wat voor CO₂-prijzen ze nodig achten om klimaatverandering te beperken. In hun 1,5-graden scenario, schatten zij dat een wereldwijde prijs van 200 euro per ton nodig is in 2026. Dit loopt op tot 600 euro per ton in 2050 (OECD, 2023).

¹⁹ De prijzen gelden voor vrijwel alle OECD-landen waaronder Nederland en heeft betrekking op de sectoren elektriciteit, industrie en energieproductie¹⁹. Dit zijn tevens de hoogste gerapporteerde CO₂-prijzen in alle WEO 2023-scenario's voor Nederland en de genoemde sectoren.

Tabel 4.1 Overzicht van CO₂-prijzen in de wetenschappelijke literatuur (euro per ton CO₂-eq., prijspeil 2021)

Bron	Benadering	2030	2040	2050	2060	Jaarlijkse groei 2030-2050
DICE-2023 (Nordhaus en Barrage, 2023); 2°C scenario	preventie-kosten	139	170	210	262	2,1%
DICE-2023 (Nordhaus en Barrage, 2023); 3°C scenario	preventie-kosten	62	75	91	112	1,9%
IPCC (2022) – scenario C1 (1,5°C, >50%, no or limited overshoot)	preventie-kosten	223 (30 – 446)	n.v.t.	649 (132 – 1522)	n.v.t.	5,5%
IPCC (2022) – scenario C3 (2°C, >67%)	preventie-kosten	91 (9 – 243)	n.v.t.	213 (59 – 588)	n.v.t.	4,3%
IPCC (2022) – scenario C6 (3°C, >50%)	preventie-kosten	8 (6 – 39)	n.v.t.	19 (17 – 25)	n.v.t.	4,4%
IEA (2023) – scenario ‘netto nul emissies in 2050’	preventie-kosten	139	204	249	n.v.t.	3,0%

De CO₂-prijzen volgens de preventiekostenbenadering uit DICE-2023 en IPCC (2022, p.300 en p.360 figuur 3.32) zijn opgesplitst naar scenario's uit beide bronnen die het beste (en redelijk goed) bij de WLO-scenario's Snel (+1,8°C in 2100)' en Vertraagd (+2,7°C in 2100).

In **vetgedrukt** weergegeven de centrale schatting, dit betreft het gemiddelde (de verwachtingswaarde) bij DICE-2023; bij de IPCC betreft de centrale waarde de mediaan. De bandbreedte rondom deze centrale schatting bij IPCC (2022) betreft het minimum en maximum exclusief 'outliers'. De IEA-prijzen hebben betrekking op vrijwel alle OECD-landen en de sectoren elektriciteit, industrie en energie productie. De gemiddelde jaarlijkse groei is berekend op basis van de periode 2030 – 2050. Alle CO₂-prijzen zijn omgerekend naar euro-prijspeil 2021. Allereerst zijn ze omgerekend van een andere valuta naar euro op basis van de wisselkoers in het oorspronkelijke prijspeiljaar. Daarna zijn de euro bedragen vertaald naar prijspeil 2021 met behulp van de bbp-prijsinflatie zoals door het CPB gepubliceerd in de bijlage van cMEV in augustus 2023 ([link](#)).

4.3. Vergelijking met voorgeschreven CO₂-prijzen voor ex-ante beleidsanalyses in andere landen

De CO₂-prijs wordt in de meeste landen gebaseerd op de preventiekosten van CO₂-reductie consistent met een 1,5°C tot 2°C opwarming; schattingen van de bandbreedte lopen van minimaal 73 tot maximaal 896 euro in 2050, zie tabel 4.2.²⁰ Vrijwel alle landen met een preventiekostenbenadering benoemen dat zij de preventiekosten volledig of mede baseren op een doelstelling van klimaatneutraliteit in 2050, consistent met een 1,5°C doelstelling. Een uitzondering betreft Nieuw Zeeland, dat zich baseert op een 2°C doelstelling. Dit verklaart de relatief lage CO₂-prijzen van Nieuw Zeeland ten opzichte van de Europese landen die preventiekosten gebruiken. De WLO-scenario's met een snelle internationale klimaattransitie (scenario Snel) gaan uit van klimaatneutraliteit van de Nederland en de EU in 2050 en van een verwachte temperatuurstijging van 1,8°C in 2100. Dit uitgangspunt past dus redelijk goed bij die van andere landen met een preventiekostenbenadering. Voor de WLO-scenario's die uitgaan van een vertraagde internationale klimaattransitie (scenario Vertraagd) daarentegen, wordt uitgegaan van een verwachte temperatuurstijging van 2,7°C in 2100. In andere landen zijn we een dergelijk uitgangspunt niet tegengekomen. Merk op dat de CO₂-prijzen in Nieuw-Zeeland bij een doelstelling van 2°C in 2100 lager zijn dan de WLO-scenario's met een doelstelling van 2,7°C. Dit weerspiegelt de onzekerheid rondom de hoogte van de CO₂-prijzen.

De jaarlijkse groei van de CO₂-prijzen verschilt aanzienlijk tussen landen en soms tussen perioden per land. Nieuw Zeeland en het Verenigd Koninkrijk kennen een relatief laag groeipercentage en een uniform groeipercentage voor alle jaren. Voor Nieuw Zeeland is dit 2,2 procent, voor het Verenigd Koninkrijk is dit 1,5 procent. Frankrijk en de EIB hanteren aanzienlijk hogere jaarlijkse groeipercentages en deze groeipercentages verschillen ook tussen perioden. Voor beide geldt een ruime 9 procent per jaar in de periode 2020 tot 2040 en ongeveer 4,5 procent per jaar in het decennium tot 2050.

De WLO-prijzen in alle scenario's zijn in de gehele periode tot 2050 globaal in lijn met de CO₂-prijzen die in MKBA's in andere landen bij vergelijkbare klimaatambities worden voorgeschreven. Dit blijkt uit de vergelijking tussen de bandbreedte uit de WLO 2025 met de CO₂-prijzen uit tabel 4.2. De WLO-bandbreedte van tussen de 186 en 540 euro voor 2050 past binnen de bandbreedte van tussen de 73 en 986 euro door landen en instanties die ook de preventiekostenbenadering toepassen. In de eerdere jaren (2025) zitten met name Frankrijk en de EIB lager, maar doordat zij van een hogere jaarlijkse groei uitgaan, komen zij in de 2050 duidelijk hoger uit. De bandbreedte in de verschillende steekjaren uit het Verenigd Koninkrijk komt vrijwel overeen met de bandbreedte uit de WLO-scenario's. Het gehele prijspad van Nieuw Zeeland zit duidelijk onder het prijspad van de WLO 2025 wat logisch is gezien hun afwijkende tweegradendoelstelling.

²⁰ De VS en Duitsland baseren de hoogte van de CO₂-prijzen op de SCC. Omdat we in deze paragraaf alleen CO₂-prijzen weergeven op basis van preventiekosten Deze zijn daarom deze landen niet meegenomen in dit overzicht. In de VS liggen de prijzen in 2020 tussen de 16 en 178 euro (centrale waarde van 60 euro). In 2050 betreft dit tussen de 38 en 305 euro (centrale waarde van 100 euro). In Duitsland betreft dit in 2020 tussen de 210 en 727 euro en in 2050 tussen de 269 en 818 euro.

Tabel 4.2 Overzicht van voorgeschreven CO₂-prijzen in andere landen voor ex-ante beleidsanalyses (o.a. MKBA's)

Land/regio	Benadering	2020	2040	2050	Jaarlijkse groei 2020-2050
		euro per ton CO ₂ (prijspeil 2021)			
Frankrijk	preventie	94	540	837	7.6%
Nieuw Zeeland	preventie	57 37 – 75	89 59 – 120	110 73 – 147	2.2%
Verenigd Koninkrijk	preventie	276 138 – 414	374 187 – 560	433 217 – 651	1.5%
European Investment Bank (EIB)	preventie	90	588	896	8.0%

Weergegeven is de 'centrale' waardering (vetgedrukt) en de 'lage' en 'hoge' waardering (bandbreedte), voor zover deze worden toegepast in de betreffende landen/regio's. Alle CO₂-prijzen in euro en prijspeil 2021 op basis van de volgende methode: valuta omgerekend naar euro op basis van de wisselkoers in het oorspronkelijke prijspeiljaar, en vervolgens eurobedragen vertaald naar prijspeil 2021 met behulp van de bbp-prijsinflatie zoals door het CPB gepubliceerd in de bijlage van cMEV in augustus 2023 ([link](#)).

Bronnen: Frankrijk: France Stratégie (2019); Nieuw Zeeland: The Treasury New Zealand (2021); Verenigd Koninkrijk: GOV.UK (2021); European Investment Bank (EIB): European Investment Bank (2023); In Nederland publiceert onderzoeksbureau CE Delft ook CO₂-prijzen, deze kunnen worden gebruikt voor beleidsevaluatie anders dan MKBA's. De prijzen in hun handboek lopen op van 125 (48 – 151) euro per ton in 2020 tot 437 (200 – 819) euro per ton in 2050 (CE Delft, 2023).

De CO₂-prijzen in de WLO-scenario's 2025 zijn duidelijk hoger dan de WLO-prijzen 2015 door aanmerkelijk ambitieuzer Europees en Nederlands klimaatbeleid. De WLO-bandbreedte 2015 voor het 'hoge' en het 'lage' scenario bedroeg tussen de 46 en 182 euro in 2050 (prijspeil 2021). De huidige bandbreedte van de WLO-scenario's 2025 voor dit jaar is tussen de 186 en 540 euro. Dit is met name een gevolg van de beduidend ambitieuzere reductiedoelstellingen in de nieuwe WLO-scenario's ten opzichte van de oude WLO-scenario's. De huidige bandbreedte past binnen de onderste helft van de bandbreedte van het CO₂-prijzen uit de twee graden-onzekerheidsverkenning uit de WLO 2015. Die bedroeg destijds tussen de 228 en 1138 euro voor 2050. Dit is vooral het gevolg van snellere technologische ontwikkelingen dan destijds verondersteld en de gedaalde discontovoet.

4.4. CO₂-marktprijzen

CO₂-marktprijzen, zoals die in het EU-ETS, zijn niet geschikt als schatting voor toekomstige economiebrede preventiekosten. In deze paragraaf leggen we eerst kort het Europese emissiehandelssysteem (EU ETS) uit. Daarna bespreken we drie redenen waarom het EU ETS systeem niet geschikt is als schatting voor toekomstige preventiekosten. Voor zover wij hebben kunnen nagaan, worden CO₂-marktprijzen nergens voorgeschreven in ex-ante beleidsanalyses voor het maatschappelijk waarderen van CO₂-uitstoot.

Het bekendste voorbeeld van CO₂-marktprijzen betreffen de EU-ETS prijzen. Het huidige Europese beleid beperkt het jaarlijks aantal uit te geven CO₂-emissierechten voor alle sectoren in het emissiehandelssysteem (ETS): de energie-intensieve industrie, elektriciteitssector en delen van de luchtvaart en zeevaart. Het jaar 2030 is hierbij politiek een belangrijk ijkpunt, want de uitstoot van deze Europese sectoren moet dan 62 procent lager zijn dan in 2005. Bij voortzetting van het huidige ETS-beleid worden vanaf 2040 er nul nieuwe uitstootrechten uitgegeven. Bedrijven onder het EU ETS dienen emissierechten (EU Allowances: EUAs) te overhandigen voor elke ton CO₂ die zij uitstoten en zij kunnen deze rechten onderling verhandelen. Figuur 4.3 geeft CO₂-marktprijzen weer zoals deze tot stand komen in het EU-ETS. De figuur geeft spotprijzen en futureprijzen van emissierechten weer. Een future betreft hier een contract om op een bepaalde datum in de toekomst een ETS-emissierecht voor een x-bedrag te kopen.

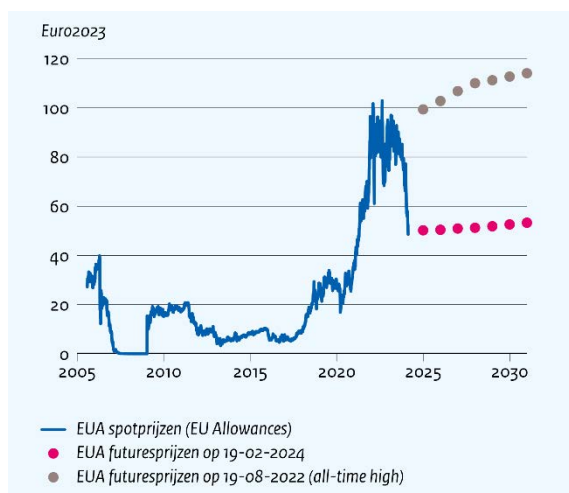
De eerste reden betreft het gegeven dat de EU-ETS-prijs een indicatie geeft voor specifieke bedrijfstakken en dit betreft geen economie brede prijs. Dit heeft tot gevolg dat EU-ETS-prijzen zowel een onderschatting als een overschatting kunnen zijn van de maatschappelijke, economie-brede preventiekosten. Zo kunnen de CO₂-reductiekosten in de EU-ETS-sectoren lager liggen dan in niet-EU-ETS-sectoren, zoals mobiliteit, gebouwde omgeving, en landbouw. In lijn hiermee zien we dat de maatschappelijke preventiekosten in de literatuur (tabel 4.1) en beleidspraktijk (tabel 4.2) doorgaans hoger liggen dan de EU-ETS-prijzen (figuur 4.3).²¹ Ook zullen private CO₂-reductiekosten lager uitvallen dan de maatschappelijke CO₂-reductiekosten als bedrijven hun CO₂-reductie-investeringen deels gefinancierd krijgen met overheidssubsidies. Hogere rendementseisen van bedrijven kunnen leiden tot hogere private kosten.

Ten tweede is de beleidsonzekerheid over toekomstige CO₂-prijzen aanzienlijk en dit kan grote invloed hebben op prijzen. Zo kan het ETS-beleid worden bijgesteld en daarmee de na te streven reductie in broeikasgassen. Verwachting hierover door marktpartijen kunnen leiden tot een forse impact op EU ETS-prijzen. En ook voor marktpartijen is er mogelijk nog onzekerheid over de kosten voor CO₂-reductie voor de komende jaren. Deze en andere onzekerheden bieden een rationele verklaring waarom de uiteindelijke prijzen om de genoemde doelen te halen in 2030 hoger kunnen uitvallen dan de huidige futureprijzen in 'de markt' (Olijslagers et al., 2023).

Ten derde zijn EU-ETS-prijzen erg volatiel (zie figuur 4.3). De prijzen worden sterk beïnvloed door korte-termijn gebeurtenissen, economische ontwikkelingen en gedrag van marktparticipanten. Hierdoor kan niet worden vastgesteld in hoeverre EU-ETS-prijzen een goede indicatie geven van huidige en verwachte toekomstige private preventiekosten (Hintermann et al., 2016; Vivid Economics, 2021).

²¹ In deze vergelijking gaan we uit van een 2°C- of 1,5°C-doelstelling, in lijn met het afnametempo van het EU-ETS emissieplafond.

Figuur 4.3 EU-ETS-prijzen



Bron: Zwaneveld et al. (2024).

Een future betreft hier een contract waarbij afgesproken wordt een ETS-emissierecht (EUA) in de toekomst tegen de futureprijs te kopen. Het historische prijsverloop wordt voor een groot deel bepaald door de inrichting van het handelssysteem, dat in de loop der jaren in verschillende fasen steeds stringenter is geworden (Europese Commissie z.d.). Prijzen in euro per ton CO₂ (prijsspeil 2023). Prijzen zijn omgerekend met de Nederlandse bbp-deflator naar euro's van 2023, zie de bijlage van CPB cMEV in augustus 2023 ([link](#)), na 2028 is gebruikt gemaakt van de waarde van 2028.

5. Referenties

- Aalbers, R. (2015). Een risicogewogen discontovoet voor de Nederlandse economie. CPB Notitie 9 november 2015. <https://www.cpb.nl/publicatie/een-risicogewogen-discontovoet-voor-de-nederlandse-economie>.
- Aalbers R., G. Renes & G. Romijn. (2016). WLO-scenario's en de waardering van CO₂-uitstoot in MKBA's. CPB/PBL Achtergronddocument 23 november 2016. <https://www.cpb.nl/publicatie/wlo-klimaatscenarios-en-de-waardering-van-co2-uitstoot-mkbas>.
- Aldy, J. E., Kotchen, M. J., Stavins, R. N., & Stock, J. H. (2021). Keep climate policy focused on the social cost of carbon. *Science*, 373(6557), 850-852.
- Barrage, L., & Nordhaus, W. D. (2023). Policies, Projections, and the Social Cost of Carbon: Results from the DICE-2023 Model (No. w31112). *National Bureau of Economic Research*. <https://www.nber.org/papers/w31112>.
- Boardman, A, Greenberg D., Vining, A., & Weimer, D., (2018). Cost-Benefit Analysis, Concepts and Practice. Fifth Edition, Cambridge University Press.
- CE Delft (2023). Handboek Milieuprijzen 2023. Versie 1.0. Februari 2023. <https://ce.nl/publicaties/handboek-milieuprijzen-2023/>.
- CPB en PBL (2016). Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving. Achtergrondstudie Klimaat en Energie. <https://media.wlo2015.nl/upload/pbl-2016-wlo-achtergronddocument-klimaat-en-energie-1775.pdf>.
- Drupp, M. A., Freeman, M. C., Groom, B., & Nesje, F. (2018). Discounting disentangled. *American Economic Journal: Economic Policy*, 10(4), 109-134.
- Europese Commissie (EC), (2021). Route naar een gezonde planeet voor iedereen EU-actieplan: Verontreiniging van lucht, water en bodem naar nu, Mededeling en bijlagen. COM (2021) 400 final. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021DCo400>.
- Europese Commissie (EC), (z.d.). *Development of EU ETS (2005-2020)*. Geraadpleegd op 14 november 2023, van https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/development-eu-ets-2005-2020_en.
- Europese Commissie (EC). (2024). European institutions reach agreement on future of air quality laws. <https://eeb.org/european-institutions-reach-agreement-on-future-air-quality-laws/#:~:text=Today%2C%20the%20last%20political%20trilogue,zero%20air%20pollution%20by%202050>.
- European Investment Bank. (2023). The Economic Appraisal of Investment Projects at the EIB - 2nd Edition, March 2023. <https://www.eib.org/en/publications/20220169-the-economic-appraisal-of-investment-projects-at-the-eib>
- Europese Unie. (2016). RICHTLIJN (EU) 2016/2284 VAN HET EUROPEES PARLEMENT EN DE RAAD.
- Fischer, C., & Morgenstern, R. D. (2006). Carbon abatement costs: why the wide range of estimates?. *The Energy Journal*, 27(2).
- France Stratégie. (2019). The value for climate action. A shadow price of carbon for evaluation of investments and public policies. *Report by the Commission chaired by Alain Quinet*. <https://www.strategie.gouv.fr/english-articles/value-climate-action#:~:text=France's%20ambition%20is%20to%20eliminate,carbon%20capture%20and%20storage%20technology..>

- Fuss, S., Lamb, W. F., Callaghan, M. W., Hilaire, J., Creutzig, F., Amann, T., Beringer, T., De Oliveira Garcia, W., Hartmann, J., Khanna, T., Luderer, G., Nemet, G. F., Rogelj, J., Smith, P., Vincente Vincente, J. L., Wilcox, J., Del Mar Zamora Dominguez, M., & Minx, J. C. (2018). Negative emissions—Part 2: Costs, potentials and side effects. *Environmental Research Letters*, 13(6), 063002.
- Gillingham, K., & Stock, J. H. (2018). The cost of reducing greenhouse gas emissions. *Journal of Economic Perspectives*, 32(4), 53-72.
- GOV.UK. (2021). Valuation of greenhouse gas emissions: for policy appraisal and evaluation. *Policy paper 2 September 2021*. <https://www.gov.uk/government/publications/valuing-greenhouse-gas-emissions-in-policy-appraisal/valuation-of-greenhouse-gas-emissions-for-policy-appraisal-and-evaluation>.
- Healy, S., & von Vittorelli L. (2023). CO₂ shadow prices and the social cost of carbon. An analysis of the application in UK, US, France, and Canada. Öko-Institut e.V, Berlin, Germany. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/CO2-shadowprices.pdf>.
- Hintermann, B., Peterson, S., & Rickels, W. (2016). Price and Market Behavior in Phase II of the EU ETS: A Review of the Literature. *Review of Environmental Economics and Policy*, 10(1). <https://doi.org/10.1093/reep/rev015>
- Hoogendoorn, S., G. Romijn. (2018). Discontovoer voor de Nederlandse economie. CPB Notitie november 2020. <https://www.cpb.nl/discontovoet-voor-de-nederlandse-economie>.
- Hotelling, H. (1931). "The Economics of Exhaustible Resources". *Journal of Political Economy*, 39 (2), 137-175. <https://www.jstor.org/stable/1822328>.
- International Energy Agency (IEA). (2023). World Energy Outlook 2023. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2018). Global warming of 1.5°C. IPCC Special report.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2022). Mitigation Pathways Compatible with Long-term Goals. In *IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157926.005>.
- Kuosmanen, T., Zhou, X., & Dai, S. (2020). How much climate policy has cost for OECD countries?. *World Development*, 125, 104681.
- Livernois, J. (2009). On the empirical significance of the Hotelling rule, *Review of Environmental Economics and Policy* 3(1), 22-41. <http://dx.doi.org/10.1093/reep/ren017>.
- Maas R.J.M. et al. (2023). Gevolgen van de voorgestelde Europese luchtkwaliteitsrichtlijn voor Nederland. RIVM-briefrapport 2023-0167.
- Ministerie van Financiën (2020). Kabinetsreactie werkgroep Discontovoet. Tweede Kamer brief 10 november 2020. <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/kamerstukken/2020/11/10/kabinetsreactie-werkgroep-discontovoet>.
- Mot, E., S. Hoogendoorn, G. Romijn, T. Hendrich, A. Verrips & K. Jansema-Hoekstra. (2018). Niet-hernieuwbare grondstoffen voor de circulaire economie. Een economische analyse van de werking en beperking van grondstoffenmarkten. CPB Achtergronddocument. <https://www.cpb.nl/publicatie/circulaire-economie-economie-en-ecologie-in-balans>.
- OECD. (2023). Long-term scenarios: incorporating the energy transition. https://www.oecd-ilibrary.org/economics/long-term-scenarios-incorporating-the-energy-transition_153ab87c-en;jsessionid=tsVCQR7_Y3fFVqkozMEtaeUEwI7IWVxA8fdWofeq.ip-10-240-5-99.

- Olijslagers, S., van der Ploeg, F., & van Wijnbergen, S. (2023). On current and future carbon prices in a risky world. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 146, 104569. <https://doi.org/10.1016/j.jedc.2022.104569>.
- Palao, F., & Pardo, Á. (2021). The inconvenience yield of carbon futures. *Energy Economics*, 101, 105461. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105461>
- PBL (2025a). Toekomstverkenning WLO 2025: Hoofdrapport, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.
- PBL (2025b). Toekomstverkenning WLO 2025: Cahier Demografie, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.
- PBL (2025c). Toekomstverkenning WLO 2025: Cahier Klimaat & Energie, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.
- PBL (2025d). Toekomstverkenning WLO 2025: Cahier Regionale Ontwikkelingen en Ruimtegebruik. Den Haag: PBL.
- PBL (2025e). Toekomstverkenning WLO: Cahier Mobiliteit. Den Haag: PBL.
- PBL & CPB (2025). Toekomstverkenning WLO 2025: Cahier Economie, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.
- PBL & RIVM (2025). Emissieramingen luchtverontreinigende stoffen 2025. Rapportage bij de Klimaat- en Energieverkenning 2024, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.
- Quinn, B., Gallagher, R., & Kuosmanen, T. (2023). Lurking in the shadows: The impact of CO₂ emissions target setting on carbon pricing in the Kyoto agreement period. *Energy Economics*, 118, 106338.
- Rekker, L., Kesina, M., & Mulder, M. (2023). Carbon abatement in the European chemical industry: assessing the feasibility of abatement technologies by estimating firm-level marginal abatement costs. *Energy Economics*, 126, 106889.
- Renes G. & G. Romijn (2020). CO₂-prijzen. *Bijlage 9 in Werkgroep discontovoet 2020 (2020)*. <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/publicaties/2020/11/10/technische-bijlage-advies-werkgroep-discontovoet-2020>.
- Rijkswaterstaat. (2018). Werkwijzer MKBA bij MIRT-verkenningen. <https://www.rwseconomie.nl/documenten/publicaties/2018/juni/08/werkwijzer-mkba-bij-mirt-verkenningen>.
- Romijn G. & G. Renes. (2013). Algemene leidraad voor maatschappelijke kosten-batenanalyse, CPB/PBL, Den Haag. <https://www.cpb.nl/publicatie/algemene-leidraad-voor-maatschappelijke-kosten-batenanalyse>.
- Rennert, K., Errickson, F., Prest, B. C., Rennels, L., Newell, R. G., Pizer, W., ... & Anthoff, D. (2022). Comprehensive evidence implies a higher social cost of CO₂. *Nature*, 610(7933), 687-692.
- Salant, S. W. (2016). What ails the European Union's emissions trading system?. *Journal of Environmental Economics and Management*, 80, 6-19. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2016.06.001>
- Smith S. and N. Braathen. (2015). Monetary carbon values in policy appraisal: an overview of current practice and key issues", *OECD Environment Working Papers, No. 92, OECD Publishing, Paris*. <https://doi.org/10.1787/5jrs8st3ngvh-en>.
- The Treasury New Zealand. (2021). Application of carbon price in analysis. *Official Information Act Response 20210278*. <https://www.treasury.govt.nz/sites/default/files/2022-03/oia-20210278.pdf>.
- Trafikverket (2023). Analysmetod och samhällsekonomiska kalkylvärden för transportsektorn: ASEK 7.1. Kapitel 12 Samhällsekonomisk värdering av klimatutsläpp. Version 2023-02-01. https://bransch.trafikverket.se/contentassets/4b1c1005597d47bda386d81dd3444b24/2023/12_klimat effekter_a71.pdf.

- Van Vuuren, D. P., van der Wijst, K. I., Marsman, S., van den Berg, M., Hof, A. F., & Jones, C. D. (2020). The costs of achieving climate targets and the sources of uncertainty. *Nature Climate Change*, 10(4), 329-334.
- Vivid Economics. (2021). Carbon values literature review. UK Department for Business, Energy & Industrial Strategy, *BEIS research paper number: 2021/049, september 2021*.
<https://www.gov.uk/government/publications/valuing-greenhouse-gas-emissions-in-policy-appraisal/valuation-of-greenhouse-gas-emissions-for-policy-appraisal-and-evaluation>.
- Vogt-Schilb, A., G. Meunier & S. Hallegatte. (2018). When starting with the most expensive option makes sense Optimal timing, cost and sectoral allocation of abatement investment. *JEEM* 88 , pp. 210-233.
<https://doi.org/10.1016/j.jeem.2017.12.001>.
- Werkgroep discontovoet 2020 (2020). Rapport Werkgroep discontovoet 2020. Versie 1.0, 9 oktober 2020.
<https://www.rijksoverheid.nl/documenten/publicaties/2020/11/10/technische-bijlage-advies-werkgroep-discontovoet-2020>.
- Worldbank (2024). The Shadow Price of Carbon in Economic Analysis, 2024 Guidance Note on Shadow Price of Carbon in Economic Analysis.
<https://documents1.worldbank.org/curated/en/099553203142424068/pdf/IDU1c94753bb1819e14c781831215580060675b1.pdf>.
- Zhou, P., Zhou, X., & Fan, L. W. (2014). On estimating shadow prices of undesirable outputs with efficiency models: A literature review. *Applied Energy*, 130, 799-806.
- Zwaneveld, P. (2011). De btw in kosten-batenanalyses. CPB, Den Haag. <https://www.cpb.nl/publicatie/de-btw-in-kosten-batenanalyses>.
- Zwaneveld, P., Trinks, A., & Tijm, J. (2024). ‘Verwachte’ prijs CO₂-uitstoot flink gedaald sinds 2022. *ESB Economisch Statistische Berichten*, 2024/4/20. <https://esb.nu/verwachte-prijs-co2-uitstoot-flink-gedaald-sinds-2022/>

Bijlage 1: Tabellen met efficiënte CO₂-prijzen

Tabel 6.1 geeft de efficiënte CO₂-prijzen bij de maatschappelijke discontovoet van 2,25 procent bij gebruik van de WLO-scenario's in ex-ante analyses zoals MKBA's.

Tabel 6.1 Efficiënte CO₂-prijzen van 2025 tot en met 2100 bij een discontovoet van 2,25 procent

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

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

In tabel 6.2 staat de efficiënte CO₂-prijzen bij een maatschappelijke discontovoet van 3 procent.

Tabel 6.2 Efficiënte CO₂-prijzen van 2025 tot en met 2100 bij een discontovoet van 3 procent

	Laag Snel	Laag Vertraagd	Hoog Snel	Hoog Vertraagd
2025	262	97	112	89
2030	304	112	130	103
2035	353	130	151	120
2040	409	151	175	139
2045	474	175	202	161
2050	550	203	235	187
2055	637	235	272	217
2060	739	272	315	251
2065	856	316	366	291
2070	993	366	424	337
2075	1151	424	491	391
2080	1334	492	570	453
2085	1546	570	660	526
2090	1793	661	765	609
2095	2078	766	887	707
2100	2409	888	1029	819

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

Bijlage 2: Discontovoet, Hotelling-regel en jaarlijkse prijsstijging van CO₂-prijzen

De Nederlandse overheid stelt periodiek een maatschappelijke discontovoet vast voor gebruik in MKBA's. De discontovoet wordt in een MKBA gebruikt om voorgestelde publieke investeringsprojecten of, meer algemeen, voorgenomen overheidsbeleid ex-ante te beoordelen. De discontovoet is het (minimaal) vereiste rendement op een project (of breder: beleid) waarbij de hoogte kan afhangen van het risicoprofiel van de effecten van het project of de aard van het project. De (maatschappelijke) discontovoet wordt gebruikt om de verwachte toekomstige kosten en baten terug te rekenen (disconteren) naar het heden. Bij de kosten en baten in MKBA's gaat het om alle zaken waar burgers waarde aan toekennen, waaronder effecten op inkomen, vrije tijd, leefomgeving, gezondheid, reistijd, natuur en milieu, klimaat, veiligheid, etc.

Op dit moment gelden de discontovoeten die het kabinet heeft vastgesteld in 2020 (ministerie van Financiën, 2020). Deze discontovoeten zijn gebaseerd op een advies van de Werkgroep discontovoet 2020 (2020). Dit advies is weer gebaseerd op meerdere technische notities waaronder die van het CPB, DNB en PBL. Het kabinet heeft alle adviezen van de Werkgroep overgenomen. De standaard discontovoet is op dit moment vastgesteld op (reëel) 2,25 procent. Deze waarde is mede gebaseerd op het door CPB berekende (reëel) geëiste rendement (inclusief risicobeloning) op het eigen vermogen van de Nederlandse huishoudens en het geëiste rendement voor bedrijven op investeringen in Nederland via de gewogen gemiddelde vermogenskostenvoet (*weighted average cost of capital, WACC*)²² van een gemiddeld, niet-financieel bedrijf (Hoogendoorn en Romijn, 2018).

De discontovoet speelt een belangrijke rol in het bepalen van de hoogte van de CO₂-prijzen.²³ De CO₂-prijzen in deze notitie zijn gebaseerd op de preventiekosten. Deze kosten zijn afhankelijk van het rendement dat bedrijven en huishoudens gemiddeld eisen op hun klimaatinvesteringen. Sterk versimpeld gezegd werkt dit als volgt. Een bedrijf zal veelal moeten investeren in een bepaald jaar om CO₂-uitstoot te vermijden: dit zijn de kosten. De baten van deze investering bestaan onder andere uit de vermeden CO₂-uitstoot vermenigvuldigd met de CO₂-prijs en verdisconteerd naar het jaar van investeren gedurende de levensduur van de investering. De gehanteerde discontovoet geeft een rendementseis opdat de 'baten' minimaal even hoog zijn als de 'kosten'. Deze uitleg laat ook zien dat er een directe relatie tussen de hoogte van de discontovoet (rendementseis) en de benodigde hoogte van CO₂-prijs om bepaalde investeringen voor een bedrijf rendabel te maken: een hogere discontovoet reflecteert hogere investeringskosten (hogere

²² Zie Aalbers (2015) voor meer uitleg over de WACC en verdere literatuurverwijzingen.

²³ Bijlage 9 van het rapport van de Werkgroep discontovoet 2020 (2020) gaat hier op in.

kapitaalkosten) en dus dient de CO₂-prijs hoger te zijn. Voor maatschappelijke investeringen geldt hetzelfde.

De regel van Hotelling wordt vaak gebruikt om een begrijpelijk prijspatroon te krijgen. De regel van Hotelling geeft aan dat onder bepaalde voorwaarden de jaarlijkse verandering van een niet-hernieuwbare grondstof (zoals ons resterende koolstofbudget) wordt bepaald door de discontovoet (Hotelling, 1931). De eenvoudigste versie van de Hotelling-regel luidt als volgt: in evenwicht neemt de prijs voortdurend toe met de rente (lees: discontovoet). Als dit niet zo zou zijn, zou het voordeliger zijn om meteen alles uit de grond te halen of juist in de grond te laten zitten.²⁴ Deze regel wordt vaak gehanteerd om de jaarlijkse groeivoet te bepalen voor CO₂-prijzen (zie Aalbers et al., 2016 en de onderliggende rapporten over voorgeschreven prijzen uit andere landen uit tabel 4.2). De regel van Hotelling geldt overigens onder vrij ‘strengere’ voorwaarden²⁵ en empirisch bewijs²⁶ blijkt er amper te zijn. Omdat het exacte prijsverloop uit modellen waarmee CO₂-prijzen worden bepaald worden beïnvloedt door velerlei modelaannamen, hebben de jaarlijkse marginale preventiekosten uit dergelijke modellen geregeld een wat grilliger en daardoor moeilijk uitlegbaar prijspad (zie Vogt-Schilb et al., 2018; Rubin 1996 voor een onderbouwing).²⁷

Het gebruik van Hotelling levert een tijdsconsistent prijspad op voor investeringen in duurzame technologie in MKBA's. Dit is een voordeel bij het uitvoeren van een MKBA. Het achterliggende idee is dat een optimale investering in duurzame technologie niet rendabeler kan worden door deze uit te stellen of juist eerder te plegen. Dan zou die investering immers niet meer optimaal zijn en kun je spreken van een (tijds)inconsistentie. Het teveel vervroegen of juist vertragen van de uitvoering van klimaatinvesteringen leidt daarnaast ook tot praktische problemen. De argumentatie heeft de vorm van een ‘wiskundig bewijs’ en is als volgt. Voor een optimale investering zijn de baten van uitstel - onder zeer versimpelde omstandigheden - gelijk aan de discontovoet: dat is het rendement dat je kunt halen ‘elders’ in de economie. De kosten van uitstel moeten dan dus ook zo hoog zijn: anders was de investering niet optimaal. De kosten betreffen in een versimpelde voorbeeld de stijging van de CO₂-prijs. Dat is de reden waarom volgens dit argument de CO₂-prijs ook dient te stijgen met de discontovoet.

Consistentie tussen de hoogte van de CO₂-prijzen in een bepaald jaar, de jaarlijkse groei en de uitgangspunten van de WLO-scenario's is belangrijk.²⁸ Het prijspad van de preventiekosten uit IMAGE is bedoeld om een bepaalde totale uitstootreductie te realiseren. Een hogere prijs in de eerste jaren zal leiden tot minder CO₂-uitstoot in die jaren. Dit maakt het logisch om in latere jaren tot lagere prijzen te komen

²⁴ Zie Mot et al. 2018 (bijlage 3) voor een uitgebreide uitleg van de Hotelling-regel bij verschillende veronderstellingen.

²⁵ De regel van Hotelling geldt onder de volgende voorwaarden. Zo dient het te gaan over een niet-hernieuwbare, uitputbare hulpbron met volledig bekende voorraden, geen ontdekkingen mogelijkheid, geen alternatieven, geen recycling, particulier eigendom en constante winningskosten. Als aan deze voorwaarden niet wordt voldaan, dan hoeft de regel niet meer te gelden. Een voorbeeld hiervan is dat de technologische ontwikkeling van alternatieve (duurzame) energie zo snel gaat dat het boven een bepaalde CO₂-prijs het hoe dan ook aantrekkelijker is dit alternatief te gebruiken in plaats van CO₂-rechten te kopen. Door voortgaande technologische ontwikkelingen kan die prijs zelfs dalen. Dit is dan ook een reden waarom het prijspad zoals dat uit modellen komt, kan afwijken van het prijspad dat volgt uit de regel van Hotelling.

²⁶ Livernois (2009) bespreekt de brede literatuur en vindt vrijwel geen bewijs voor de Hotelling-regel (Hamilton, 2012).

²⁷ Het WLO 2015-achtergronddocument Klimaat en energie (CPB & PBL, 2016) geeft in Figuur 3.2 (pagina 18) een weergave van de oploop van de CO₂-prijzen in verschillende modellen bij gegeven CO₂-uitstootbudgetten, waaronder het CPB Merge model dat destijds is gebruikt als basis voor de CO₂-prijzen. Daar kan worden gezien dat de oploop van de CO₂-prijs meestal een wat grillig patroon kent.

²⁸ Opvallend is daarbij dat consistentie met de oorspronkelijke prijspaden uit de modellen waarmee de preventiekosten van een bepaald klimaatdoel niet expliciet wordt besproken bij toepassen van Hotelling-regel om de hoogte van CO₂-prijzen te bepalen (Aalbers et al., 2016 en de onderliggende rapporten over voorgeschreven prijzen uit andere landen uit tabel 4.2). Renes & Romijn (2020) benadrukken wel het belang van consistentie tussen de klimaatdoelen, de hoogte van de CO₂-prijzen en de jaarlijkse stijging.

dan uit de oorspronkelijke IMAGE-uitkomsten om zo in die jaren minder CO₂ te reduceren opdat de totale reductie over de periode globaal gelijk blijft. Ergens in de tussenliggende periode is de prijs dan gelijk.

Voor het bepalen van de CO₂-prijzen in de WLO-scenario's lijkt het logisch om uit te gaan van de op moment van schrijven standaard discontovoet van 2,25 procent. De voorgeschreven CO₂-prijzen uit de vorige WLO (WLO 2015, Aalbers et al. 2016) waren ook gebaseerd op de standaard (reële) discontovoet van 3 procent die destijds gold voor Nederland, opgehoogd met een 0,5 procent omdat in de WLO 2015 Europa gemiddeld genomen sneller groeide dan Nederland. Dit kwam vanwege de inhaalgroei in Zuid- en Oost-Europa.²⁹ In de huidige WLO-scenario's (WLO 2025) wordt geen onderscheid in groei tussen delen van Europa gemaakt (CPB & PBL, 2025). Daarom is nu de standaard discontovoet van 2,25 procent het meest geschikt.

²⁹ De Nederlandse economie is verder ontwikkeld dan de economieën in Zuid- en Oost-Europa en in de WLO 2015 werd verondersteld dat die economieën kunnen profiteren van een inhaalslag. Bij een hogere economische groei past een wat hogere discontovoet.

Bijlage 3: Berekening efficiënte CO₂-prijzen op basis van IMAGE-uitkomsten

De efficiënte CO₂-prijzen zijn een gewogen gemiddelde van de prijzen uit IMAGE uit de jaren 2040, 2050 en 2060. Hierbij wordt als restrictie opgelegd dat de prijs stijgt met de discontovoet (2,25 procent) conform de Hotelling-regel. De IMAGE-prijzen voor 2040 en na 2060 zijn niet bruikbaar als CO₂-waardering in ex-ante analyses vanwege modelbeperkingen. De toegepaste weging betreft de prijsprikkel die uitstoters van broeikasgassen ervaren. Deze prijsprikkel is gelijk aan het misgelopen producentensurplus. Deze bestaat uit de uitstoot van CO₂ maal de CO₂-prijs plus de impliciete prijsprikkel (lees: het impliciet verlies aan producentensurplus) door toepassing van de emissiereducerende technieken. Dit laatste wordt benaderd door toepassen van de 'rule of half'. Het prijspad is zodanig gekozen dat de totale prijsprikkel die producenten ervaren in de drie steekjaren (2040, 2050 en 2060) bij de efficiënte CO₂-prijzen gelijk is aan de prijsprikkel uitgaande van de oorspronkelijke prijzen uit IMAGE. Het gelijk maken van eenzelfde totale prijsprikkel die voortkomt uit zowel de efficiënte CO₂-prijzen op basis de Hotelling-regel en als de IMAGE berekeningen is belangrijk om een vergelijkbare emissiereductie te bewerkstelligen. De weging maakt gebruik van de emissies (Q) in elk jaar.³⁰ De formule voor het berekenen van de totale prijsprikkel (P) voor de jaren 2040, 2050 en 2060 is als volgt:

$$P_{2040} \cdot Q_{2040} + \sum_{t \in \{2050, 2060\}} P_t \cdot Q_t + \frac{1}{2} \cdot (Q_{t-1} - Q_t) \cdot (P_t - P_{t-1})$$

³⁰ We kijken alleen naar positieve emissies, niet negatieve. In scenario's met negatieve emissies, normaliseren we de emissies naar 0 in 2060.

