

Welk effect heeft internationaal klimaatbeleid op luchtvaart?

G.C.M. Uitbeijerse – PBL – gabrielle.uitbeijerse@pbl.nl

H.D. Hilbers – PBL – hans.hilbers@pbl.nl

Bijdrage aan het Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk 22 en 23 november 2018, Amersfoort

Samenvatting

De luchtvaartvolumes groeien snel, evenals de bijbehorende klimaatimpact. Hoe zou een effectief internationaal klimaatbeleid de luchtvaartvolumes in 2050 beïnvloeden? Deze scenariostudie verkent de effecten van CO₂-prijzen en verbetering van de brandstofefficiëntie op luchtvaartvolumes.

Scenario's variëren in twee kenmerken: de CO₂-prijs in een consistent, economisch efficiënt mondiaal klimaatbeleid en het niveau van technologische innovatie in vliegtuigen. Het niveau van CO₂-prijzen dat past bij het doel van Parijs heeft een grote bandbreedte vanwege de onzekerheid van de ontwikkeling van technologie, kosten en timing. De CO₂-prijzen (160-1000 euro per ton CO₂ in 2050) en brandstofefficiëntie (1-1,3% of 2% jaarlijkse verbetering) resulteren samen per scenario in een nieuwe ticketprijs. Deze ticketprijzen worden toegepast in het model AEOLUS, waar zij de keuzes van reizigers beïnvloeden.

Zonder of met een beperkte CO₂-prijs zou de luchtvaart sterk blijven groeien. Bij een hoge CO₂-prijs wordt de groei geremd, en blijft het binnen de verwachte capaciteitsontwikkeling. Bij sociaal en recreatief reizen is een grotere afname van het aantal reizigers te verwachten dan bij zakenreizen.

Het brandstofverbruik voor passagiers van en naar Nederland blijft rond het niveau van 2017 (stijging van 6%) met een hoge CO₂-prijs en met een hoge efficiëntieverbetering, in andere scenario's stijgt het brandstofverbruik met 23% tot 80%. Het gebruik van biobrandstoffen, synthetische kerosine of compensatie in andere sectoren is nodig om de CO₂-uitstoot tot het gewenste niveau terug te brengen.

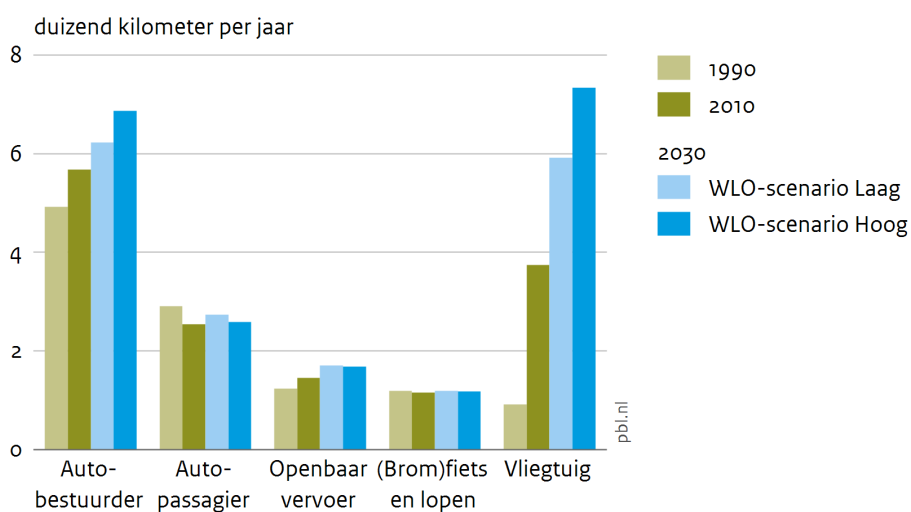
Trefwoorden: Klimaatverandering, Luchtvaart, Internationaal klimaatbeleid, Klimaatakkoord van Parijs, CO₂-prijs, scenariostudie.

1. Inleiding

Afgelopen twintig jaar is de luchtvaart sterk gegroeid. Op Schiphol is het aantal reizigers gegroeid met 120 procent van 31 miljoen reizigers in 1997 naar 68 miljoen in 2017. Langetermijnsenario's geven aan dat luchtvaart vanuit alle luchthavens in Nederland kan doorgroeien naar 110 tot 170 miljoen passagiers in 2050 (CPB/PBL 2015). Deze groei van 110% tot 230% is in lijn met internationale groeiverwachtingen voor de sector. De toename van de luchtvaart is in twintig jaar veel sterker geweest dan de toename bij de andere vervoerwijzen (auto, trein, fiets). De gemiddelde Nederlander legt naar verwachting in 2030 per jaar ongeveer evenveel kilometers af per vliegtuig dan als autobestuurder (zie Figuur 1).

Figuur 1.

Mobiliteit per persoon per vervoerswijze



Bron: PBL (2016), PBL & CPB (2015)

Meer vliegverkeer betekent meer brandstofgebruik en meer emissies van broeikasgassen. Een dergelijke groei van de emissies van broeikasgassen staat op gespannen voet met de afspraken uit het klimaatakkoord van Parijs. Tijdens de klimaatconferentie in Parijs is eind 2015 afgesproken om de opwarming van de aarde te beperken tot ruim onder de 2°C, met een streven naar maximaal 1,5°C. Van Vuuren et al. (2017) beschrijven de maximale cumulatieve emissie van CO₂ die daarbij past. De wereld staat hiermee voor de grote opgave om de emissie van broeikasgassen vergaand terug te brengen. Internationale ambities en afspraken hierover zullen effect hebben op de ontwikkeling van de luchtvaart, ook in Nederland. Het is waarschijnlijk dat vliegen duurder wordt, en duurdere tickets betekenen ook minder groei. Het is van belang zicht te krijgen op de mogelijke omvang van die kostenstijging en de gevolgen daarvan.

Dit artikel beschrijft wat internationaal klimaatbeleid kan gaan betekenen voor de luchtvaart in Nederland en wat Nederland kan bijdragen aan klimaatbeleid voor de luchtvaart. Luchtvaart in Nederland wordt gedefinieerd als vliegverkeer van en naar Nederland¹ (gemeten via verschillende indicatoren als vluchten, passagiers, reizigerskilometers).

¹ Daarbij rekenen we de Nederlandse Antillen niet bij Nederland

1.1 Effecten van beprijzing

Klimaatbeleid dat waarschijnlijk past in de doelstellingen van Parijs heeft een onbekend effect op de luchtvaartvolumes. Verschillende studies evalueren het effect van CO₂-prijzen of ticketbelastingen van minder dan 50 euro per ton op de luchtvaart, zoals de CO₂-heffing in Australië (Markham et al. 2018), het Europese emissiehandelssysteem ETS (Krenek en Schratzenstaller 2017; Scheelhaase et al. 2007; Becken & Mackey 2017) en studies van een nationale ticketbelasting binnen Nederland (Kouwenhoven en Grebe 2018; Kolkman 2010). Peeters (2016) berekende nog twee extreme maatregelen: een CO₂ prijs van \$1000 per ton in combinatie met een 200% ticketbelasting, met een dynamisch model dat het wereldwijde toerismesysteem bestrijkt, maar dan inclusief meerdere vervoerswijzen en alle ketenonderdelen van toerisme (overigens inclusief zakenreizigers), niet alleen luchtvaart. Het effect op de toeristische sector zelf is volgens Peeters wel verandering, maar niet noodzakelijk storend: men gaat niet minder vaak op reis, maar kiest voor bestemmingen dichterbij en vaker voor auto en trein in plaats van het vliegtuig.

De voorliggende studie van het PBL verkent de gevolgen voor alleen de luchtvaart van en naar Nederland in scenario's met een vergelijkbaar hoge CO₂-prijsstelling, tot niveaus van 500 euro per ton CO₂ in 2030 en 1000 euro per ton in 2050.

1.2 Leeswijzer

Het eerstvolgende hoofdstuk geeft de achtergrond van de luchtvaartontwikkeling in Nederland van de afgelopen twintig jaar in volumes, CO₂-emissies en technologie. Ook schetst het de klimaatopgave en de complexiteit van klimaatimpact. Hoofdstuk 3 bouwt de scenario's op. De resultaten van de modelberekeningen, de conclusies en discussies naar aanleiding hiervan zijn te vinden in respectievelijk de hoofdstukken 4, 5 en 6.

2. Achtergrond

Dit hoofdstuk schetst de huidige stand van zaken van luchtvaart en de ontwikkeling hiervan in de afgelopen twintig jaar in de paragrafen 2.1 en 2.2. Paragraaf 2.3 geeft aan dat voor de werkelijke klimaatimpact van luchtvaart naast CO₂-emissies ook niet-CO₂-emissies van belang zijn; desondanks ligt de focus in deze studie toch op CO₂.

2.1 Huidige emissies van luchtvaart

De CO₂-emissies van luchtvaart zijn af te leiden uit het aantal afgelegde kilometers en het brandstofverbruik per kilometer. Volgens ICCT (2015) stootten alle nieuwe vliegtuigen in 2008 gemiddeld 88 gram CO₂ uit per passagierskilometer². Ter vergelijking, de gemiddelde Nederlandse personenauto stootte 174 gram CO₂ per kilometer uit in 2016 (CBS). Door de hoge snelheid legt een reiziger echter per vliegtuig veel kilometers af, waardoor de totale CO₂-emissies van een reis veel groter zijn. Het verbruik per reizigerskilometer is bij korte vluchten duidelijk hoger dan bij lange vluchten.

De hoeveelheid getankte brandstof (brandstofafzet/verkoop) in Nederland wordt gebruikt voor zowel nationale als internationale vluchten en geeft een goede indicatie voor de

² Omgerekend van 28 g brandstof/passagierskilometer met de factor 3,157 kg CO₂ per kg kerosine.

ontwikkeling van het brandstofverbruik en bijbehorende CO₂-emissie. In Nederland kan bijna alle emissie van luchtvaart (99,8 procent) worden toebedeeld aan de internationale vluchten. Nationaal verkeer via de lucht – dus alleen binnenlandse vluchten – was in 2016 verantwoordelijk voor de overige 0,2 procent: 30.000 ton CO₂ (0,03 megaton). Het gebruik van interne transportmiddelen op vliegvelden valt hier ook onder (CLO 2018).

CO₂-emissies van luchtvaart van en naar Nederland

In twintig jaar is de hoeveelheid getankte vliegtuigkerosine gestegen met 33 procent. De CO₂-emissies die vrijkomen bij de verbranding van deze brandstof is daarmee evenredig toegenomen van 9,1 megaton CO₂ in 1997, via 11,3 in 2007 tot 12,1 megaton CO₂ in 2017³. Om een idee te geven van de orde van grootte: dit is gelijk aan een derde van de uitstoot van broeikasgassen door binnenlands verkeer en vervoer (totaal 35,5 megaton CO₂-equivalenten in 2016 (Schoots et al. 2017)). De nationale broeikasgasemissies voor alle sectoren samen worden in 2016 geraamd op 197 megaton CO₂-equivalenten.

2.2 Ontwikkeling luchtvaartvolume en brandstofafzet

De sterke groei in aantal passagiers en hoeveelheid vracht in de afgelopen 20 jaar was groter dan de groei in de brandstofverkoop. In het volgende 0 zijn luchtvaartvolume en brandstofafzet naast elkaar gezet om de ontwikkeling hierin te vergelijken. De eenheid bij luchtvaartvolume is gelijk aan één passagier of 100 kilogram vracht. Op basis van het aantal passagiers en het vrachtvolume per bestemming en een schatting van de afstand op basis van de vliegtijden is een raming gemaakt van de ontwikkeling van de totaal afgelegde afstand (Uitbeijerse & Hilbers 2018).

Het luchtvaartvolume groeide met 115 procent, de totaal afgelegde afstand met 85 procent en de brandstofafzet met 33 procent. Het hoeveelheid getankte brandstof per volume-eenheid is met 38 procent gedaald van 2,9 petajoule in 1997 tot 1,8 petajoule in 2017. Het verschil in de ontwikkeling van volume en brandstofafzet is toe te schrijven aan een kleinere gemiddelde vliegafstand, verbeterde bezettingsgraad en brandstofefficiëntieverbetering van vliegtuigen.

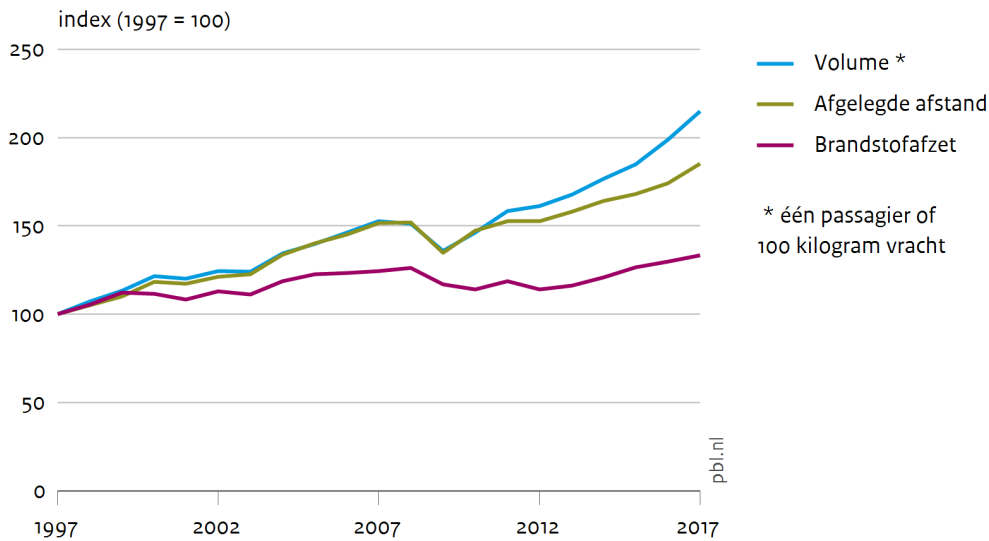
De ICCT schetst een mondiaal gemiddelde over 1968 tot 2014 van 1,3 procent efficiëntieverbetering per jaar bij nieuwe vliegtuigen (2015). Vanaf 2010 is de gemiddelde verbetering 1,1 procent geweest. Door de groei van luchtvaart (vraag) is er sprake van een versnelling van de vernieuwing van het vliegtuigpark, waardoor de gemiddelde CO₂-emissies per passagierskilometer nog sterker dalen.

De kortere gemiddelde afstand komt doordat het vervoer naar Europese bestemmingen duidelijk sterker is toegenomen dan het intercontinentale vervoer. 0 laat zien dat met name vanaf 2010 de afgelegde afstand minder snel toeneemt dan het volume. De gemiddelde reisafstand is afgenomen met 14 procent.

³ 72 kg CO₂ per GJ brandstof volgens de Nederlandse lijst van energiedragers en standaard CO₂-emissiefactoren (RVO 2017).

Figuur 2.

Volume, afgelegde afstand en brandstofafzet luchtvaart in Nederland



Bron: CBS, bewerking PBL

2.3 Klimaatimpact luchtvaart is meer dan CO₂-emissies

De impact van luchtvaartemissies op het broeikaseffect, en daarmee op de opwarming van de aarde, is groter dan alleen de reguliere effecten van CO₂ in de lucht. Naast CO₂ veroorzaakt luchtvaart andere emissies, namelijk waterdamp, roetdeeltjes, stikstofoxiden (NO_x), koolwaterstoffen (HC) en zwaveloxiden (SO_x). De laatste dragen bij aan de vorming van roetdeeltjes in de atmosfeer. De combinatie van waterdamp en roetdeeltjes leidt tot de vorming van condenssporen (contrails). De waterdamp condenseert door de lage temperaturen op de grote hoogte, waardoor kunstmatige wolken ontstaan. Dit kan het broeikaseffect versterken. De uitstoot van stikstofoxiden (NO_x) door de luchtvaart beïnvloedt de concentraties van ozon (O₃) en methaan (CH₄).

Doordat de uitstoot van alle emissies hoog in de lucht plaatsvindt is de impact van de emissies op het broeikaseffect groter. De grootte van het effect is echter onzeker en ook afhankelijk van de andere emissies die door andere processen in de atmosfeer terechtkomen. Vanwege de variatie in levensduur van de verschillende emissies in de atmosfeer en lokale samenstelling van de lucht zijn de klimaateffecten van andere emissies niet proportioneel met CO₂-emissie. Daardoor is er geen eenduidige factor die gebruikt kan worden als multiplier op CO₂-emissies in de toekomst (Lee et al 2009; Scheelhaase et al. 2016). Studies ramen de totale impact tussen een factor 1,3 tot een factor 5 hoger (EP 2015). De niet-CO₂-impacts vinden overigens ook plaats bij toepassing van biobrandstof.

Het is belangrijk om de extra impact van alle emissies op grote hoogte in gedachten te houden als bijdrage van luchtvaart in het kader van klimaatverandering. In deze studie worden, gezien de grote wetenschappelijke onzekerheid, wel alleen de CO₂-emissies aangegeven.

3. Internationaal klimaatbeleid scenario's

Om inzicht te krijgen in het luchtvaarteffect van effectief internationaal klimaatbeleid zijn scenario's geconstrueerd met behulp van twee hoofdvariabelen: de CO₂-prijs in een consistent, economisch efficiënt mondiaal klimaatbeleid en het niveau van technologische innovatie in vliegtuigen. Beide worden in het volgende gedeelte apart beschreven (paragrafen 3.2 en 3.3). Het basisscenario Hoog van de WLO voorziet in andere variabelen (zoals demografische ontwikkeling en economische ontwikkeling) die nodig zijn voor de berekening en biedt een basislijn voor de analyse (zie paragraaf 3.1).

3.1 Basisscenario's

De CPB/PBL Toekomstverkenning van de Welvaart en Leefomgeving (WLO) uit 2015 leverde de basisscenario's voor de scenariostudie. De WLO wordt gebruikt als startpunt voor veel beleidsbeslissingen die betrekking hebben op de fysieke leefomgeving.

- Scenario Hoog combineert een relatief hoge demografische groei met een hoge economische groei van circa 2% per jaar. Het komt overeen met een wereldwijde temperatuurstijging van 2,5 tot 3 °C tegen het einde van de eeuw.
- In scenario Laag gaat beperkte demografische ontwikkeling samen met een gematigde economische groei van ongeveer 1% per jaar. Dit scenario zal resulteren in een wereldwijde temperatuurstijging van 3,5 tot 4 °C.

De combinatie van demografie, economie, beschikbaar technologieniveau en de implementatiegraad verklaart het verschil tussen de scenario's in de resulterende temperatuurstijging. De WLO werd gepubliceerd voordat het Klimaatakkoord van Parijs in 2015 in werking trad. De scenario's hielden rekening met het beleid dat operationeel of voorgesteld was op het moment dat het onderzoek werd uitgevoerd.

3.2 Internationaal klimaatbeleid: CO₂-prijs

Deze studie gaat uit van een strikt beleid dat gericht is op het bereiken van de klimaatdoelen van Parijs en de efficiënte wereldwijde CO₂-prijzen die passen in een dergelijk beleid. Als dit veronderstelde strenge beleid wereldwijd zou worden toegepast, wat zou dan het effect zijn? Het wereldwijde klimaatbeleid is geoperationaliseerd als een wereldwijd emissiehandelssysteem, wat gebruikt maakt van een wereldwijde CO₂-prijs.

De monetaire waarde van CO₂-emissie, de zogenoemde CO₂-prijs, toont de inspanningen (investeringen) die nodig zijn om de uitstoot te verminderen. CPB/PBL (2015) berekende efficiënte koolstofprijzen in een verondersteld wereldwijd emissiehandelssysteem voor de basisscenario's én voor een tweegraden klimaatbeleid passend bij maximale opwarming tot 1,5 – 2°C. Hiervoor pasten onderzoekers de onderliggende dynamische rekenmodellen TIMER/FAIR en MERGE toe. Het gaat voor dit artikel te ver om in te gaan op deze modellen, meer informatie is te vinden in Aalbers et al. (2015) en Van Vuuren et al. (2017) (of IMAGE documentatie). Beide modellen berekenen de wereldwijde CO₂-prijzen, uitgaande van temperatuurdoelen of koolstofbudgetten.

De berekende CO₂-prijzen kunnen worden geïnterpreteerd als de marginale kosten van maatregelen die nodig zijn om de veronderstelde doelen te bereiken. Ze vertegenwoordigen minimale maatschappelijke kosten, omdat de door het model toegepaste technologie het meest kostenefficiënt is voor de samenleving als geheel.

Natuurlijk kunnen mensen of politici de voorkeur kiezen voor andere maatregelen die misschien duurder zijn, waardoor de totale kosten ook hoger uitvallen.

Efficiënte CO₂-prijzen om de klimaatdoelen van Parijs te halen gaan verder dan de prijzen in de basisscenario's, en worden in een onzekerheidsverkenning geschat op 200 tot 1.000 euro per ton CO₂ in 2050 (CPB/PBL 2015). In 2030 zouden de overeenkomstige CO₂-prijzen 100 en 500 euro per ton bedragen. De hoge prijzen in grote bandbreedte komen overeen met een CO₂-reductie van ongeveer 95%; de lagere met 80% reductie. De snelheid van de CO₂-reductie zal afhangen van de verandering in de vraag (bijvoorbeeld passagiersgedrag en vrachtvraag) en het aanbod (bijvoorbeeld beschikbare vliegtuigtechnologie), die beide worden beïnvloed door tarieven en kosten. Hogere CO₂-prijzen weerspiegelen hogere kosten voor brandstofefficiënte vliegtuigen en/of hogere kosten voor compensatie door besparingen in andere sectoren.

3.3 Innovatie: brandstofefficiëntieverbetering

De tweede variabele in de scenario's, de snelheid van technologische innovatie in vliegtuigen, wordt geoperationaliseerd door de verwachte verbetering in de brandstofefficiëntie tot 2050. Een grote bandbreedte in deze verbetering is te vinden in literatuur: langzame, stapsgewijze ontwikkeling wordt gemiddeld een jaarlijkse verbetering van 0,6%; ontwrichtende innovatie kan leiden tot een hoge gemiddelde efficiëntieverbetering van 1,5% per jaar tot 2050 (ICAO 2016, IATA 2018). Wij beschouwen dit laatste als vrij optimistisch, gezien de recente vliegtuigefficiëntieverbetering van 1,1% tussen 2010 en 2014 (ICCT 2015) en de noties dat de technologische verbeteringen steeds duurder, complexer en tijdrovender worden om te produceren: de tijd tussen releases van nieuwe vliegtuiggeneraties groeit (Peeters et al. 2016; Peeters & Middel 2007). ICAO streeft naar 2% van de jaarlijkse technologische verbetering, wat behoorlijk ambitieus is gezien de scenario's van de Commissie Aviation Environmental Protection (CAEP) in het ICAO milieuraapport, waarin het meest optimistische scenario uitgaat van een technische verbetering van 1,5% (ICAO 2016).

Een hoge efficiëntieverbetering van 2% wordt gebruikt als bovengrens in de klimaatscenario's, omdat de zeer hoge CO₂-prijs waarschijnlijk meer inspanning zal oproepen om de efficiëntie te verhogen. De andere grens in deze variabele is een efficiëntieverbetering van 1% tot 2030 en 1,3% na 2030, die zou kunnen passen in het optimistische WLO Hoog-scenario.

Efficiëntieontwikkeling richt zich op het brandstofverbruik van het vliegtuig zelf, en neemt ook operationele verbetering mee. Mogelijke technologische verbeteringen die de vliegtuigefficiëntie verbeteren zijn de motortechnologie (bijvoorbeeld open rotor), verbeterde aerodynamica (zoals 'winglets', vleugeltips, 'blended wing body') en andere vliegtuigstructuren (configuratie), met uitzondering van elektrische voortstuwing. CO₂-reductie door toepassing van alternatieve brandstoffen is niet meegenomen in de efficiëntieontwikkeling die gaat over benodigd energiegebruik, ongeacht de brandstof.

3.4 Ticketprijzen in de scenario's

Verschillende waarden van CO₂-prijzen en efficiëntieverbetering worden in scenario's met elkaar gecombineerd. Hierdoor ontstaan de volgende drie extra scenario's (zie Tabel 1):

- Matige CO₂-prijs: lage bandbreedte van de CO₂-prijzen die passen bij streng internationaal klimaatbeleid (100 euro per ton in 2030 en 200 euro per ton in 2050), gecombineerd met de efficiëntieontwikkeling van WLO Hoog (tot 1,3%).
- Hoge CO₂-prijs: hoge bandbreedte van de CO₂-prijzen die passen bij streng internationaal klimaatbeleid (500 euro per ton in 2030 en 1000 euro per ton in 2050), gecombineerd met de efficiëntieontwikkeling van WLO Hoog (tot 1,3%).
- Hoge CO₂-prijs en efficiëntie: dezelfde hoge CO₂-prijs gecombineerd met een zeer ambitieuze efficiëntieverbetering van 2% per jaar.

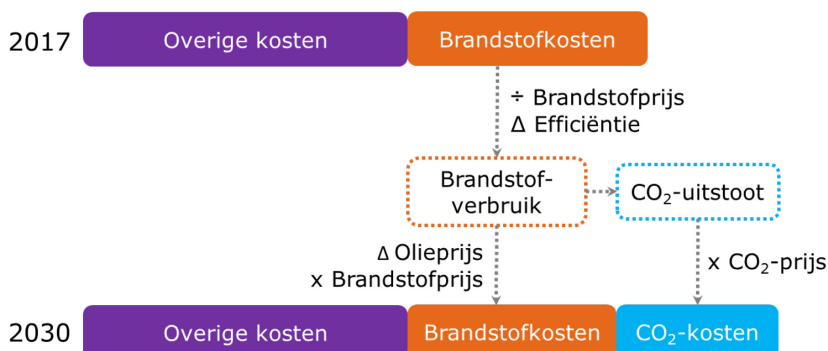
Tabel 1. Internationaal klimaatbeleid scenario's

| Scenario | Efficiëntie verbetering (jaarlijks) | CO ₂ -prijs in 2030 | CO ₂ -prijs in 2050 |
|--|-------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| WLO Hoog | 1% tot 2030, 1,3% na 2030 | 40 euro/ton | 160 euro/ton |
| Matige CO ₂ -prijs | 1% tot 2030, 1,3% na 2030 | 100 euro/ton | 200 euro/ton |
| Hoge CO ₂ -prijs | 1% tot 2030, 1,3% na 2030 | 500 euro/ton | 1000 euro/ton |
| Hoge CO ₂ -prijs en efficiëntie | 2% | 500 euro/ton | 1000 euro/ton |

Uitgangspunt is dat de kosten die voortvloeien uit de CO₂-prijs worden doorberekend in de ticketprijzen voor passagiers en in prijzen voor vracht. Door dit mechanisme te volgen, zal de vraag naar en het aanbod van vluchten verminderen. Het kan ook bijdragen tot het maximaliseren van de vliegtuigbezettingsgraad. Als luchtvaartmaatschappijen niet in staat zijn of bereid zijn om de CO₂-kosten aan passagiers door te berekenen, zal de CO₂-prijs geen invloed hebben op de volumes. De prijselasticiteiten die in het model worden gebruikt zijn -1,0 voor recreatiereizen en -0,5 voor dienstreizen.

De nieuwe ticketprijzen zijn berekend voor 4918 combinaties van herkomst en bestemming (origin-destination, OD) in alle scenario's voor de jaren 2017, 2030 en 2050. Figuur 3 geeft een overzicht van de opbouw van de nieuwe ticketprijzen in de scenario's. Het aandeel brandstofkosten in voorlopige ticketprijzen (van het WLO Hoog basisscenario) wordt per combinatie berekend op basis van de gemiddelde CO₂-uitstoot per passagier. De resterende kosten worden niet beïnvloed door de scenario's. Efficiëntieverbetering varieert per scenario en beïnvloedt het brandstofverbruik en de bijbehorende brandstofkosten. Met minder brandstofverbruik wordt er minder CO₂ uitgestoten per passagier, en samen met de variërende CO₂-prijzen per scenario, zijn de CO₂-kosten voor elk ticket berekend. De zojuist genoemde drie componenten van de ticketprijs (brandstofkosten, de CO₂-kosten en de overige kosten) tellen op tot de nieuwe ticketprijzen.

Figuur 3. Opbouw ticketprijs in scenario's



De gemiddelde gecombineerde ticketprijzen en indices zijn weergegeven in 0, voor OD-passagiers van en naar Nederland, de verdeling per locatie (Europa of Intercontinentaal (ICA)) en motief (recreatie- of zakenreizen).

De geografische spreiding van passagiers en het aandeel van recreatie in motief verschilt per scenario, wat ook direct invloed heeft op de gemiddelde ticketprijzen per passagier. Daarom kunnen tarieven niet worden vergeleken met de scenario's in andere jaren, en zijn in de tabel de prijzen in de index vergeleken met andere scenario's in hetzelfde zichtjaar. Intercontinentaal gereisde afstanden van zakenreizigers zijn groter, wat uiteraard ook meer kost per passagier (let op: niet per kilometer). Dat is de reden dat de gemiddelde ticketprijzen voor zakelijke ICA-vluchten hoger zijn dan voor Europese herkomst of bestemmingen. De ticketprijzen van vrijetijdsreizigers laten een lagere stijging zien dan die van zakelijke passagiers.

De ticketprijzen in het Matige CO₂-prijs-scenario zijn redelijk vergelijkbaar met de tarieven in WLO Hoog, maar wijken meer af in 2030 (7%) dan in het jaar 2050 (3%), omdat de gerelateerde CO₂-prijzen ook relatief meer verschillen van elkaar in 2030 dan in 2050. De ticketprijzen in de twee scenario's met hoge CO₂-prijs verschillen meer van het WLO Hoog basisscenario. Voor Europese vrijetijdsreizigers zouden de tarieven 40% tot 49% hoger zijn dan in het basisscenario in 2030; en 48% tot 60% in 2050. Het grootste effect wordt gevonden bij recreatieve ICA-passagiers in het scenario met hoge CO₂-prijzen: voor hen zou de prijs van het ticket in 2050 meer dan verdubbelen.

Tabel 2. Ticketprijzen in internationaal klimaatbeleid scenario's

| Jaar | Scenario | Europa | | | | Intercontinentaal (ICA) | | | | Totaal | |
|------|--|------------|--------------------|----------|--------------------|-------------------------|--------------------|----------|--------------------|----------|--------------------|
| | | Recreatief | | Zakelijk | | Recreatief | | Zakelijk | | | |
| | | Euro/Pax | Index ⁴ | Euro/Pax | Index ⁴ | Euro/Pax | Index ⁴ | Euro/Pax | Index ⁴ | Euro/Pax | Index ⁴ |
| 2017 | WLO Hoog | € 124 | | € 130 | | € 311 | 0 | € 497 | | € 179 | |
| 2030 | WLO Hoog | € 116 | 100 | € 119 | 100 | € 274 | 100 | € 423 | 100 | € 167 | 100 |
| | Matige CO ₂ -prijs | € 123 | 107 | € 126 | 106 | € 301 | 110 | € 451 | 107 | € 179 | 108 |
| | Hoge CO ₂ -prijs | € 172 | 149 | € 170 | 143 | € 474 | 173 | € 623 | 147 | € 259 | 155 |
| | Hoge CO ₂ -prijs en efficiëntie | € 162 | 140 | € 161 | 135 | € 437 | 160 | € 586 | 138 | € 242 | 145 |
| 2050 | WLO Hoog | € 140 | 100 | € 142 | 100 | € 276 | 100 | € 439 | 100 | € 192 | 100 |
| | Matige CO ₂ -prijs | € 144 | 103 | € 145 | 103 | € 291 | 106 | € 455 | 104 | € 199 | 104 |
| | Hoge CO ₂ -prijs | € 222 | 158 | € 216 | 153 | € 583 | 211 | € 746 | 170 | € 338 | 176 |
| | Hoge CO ₂ -prijs en efficiëntie | € 187 | 133 | € 184 | 130 | € 452 | 164 | € 615 | 140 | € 275 | 144 |

Ticketprijzen voor alle OD-combinaties in de drie internationaal klimaatbeleidscenario's worden gebruikt als invoer in het Aeolus-model, waarbij de modelberekeningen door het bureau Significance zijn gemaakt. Het nationale kwantitatieve model Aeolus wordt door het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat gebruikt om de beleidseffecten voor de

⁴ Voor alle scenario's in 2030 geldt 2030 WLO Hoog = 100; voor alle scenario's in 2050 geldt 2050 WLO Hoog = 100

Nederlandse luchtvaartsector te berekenen en ontwikkelingen op de lange termijn te verkennen.

4. Resultaten

Deze paragraaf presenteert de berekende effecten op het aantal passagiers, verdeeld over OD- en transferpassagiers, recreatieve reizigers en zakenreizigers, binnen Europa en intercontinentaal.

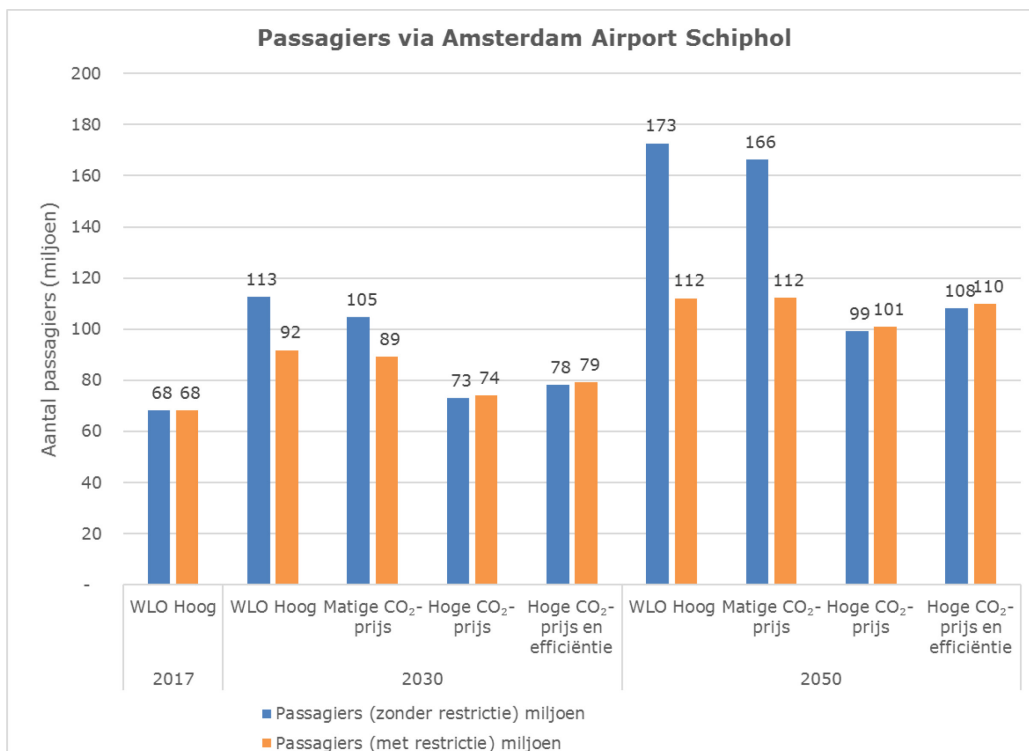
4.1 Luchtvaart volumes

In het basisscenario WLO Hoog zou de vraag op de Nederlandse hoofdluchthaven Amsterdam Schiphol stijgen van 68 miljoen in 2017 naar 113 miljoen in 2030 en 173 miljoen in 2050. Vanwege beperkte capaciteit en beleidsbeperkingen voor het aantal vluchten, kan niet alle vraag worden opgevangen en beperkt de groei zich tot 92 miljoen passagiers in 2030 en 112 miljoen in 2050 (zie Figuur 4).

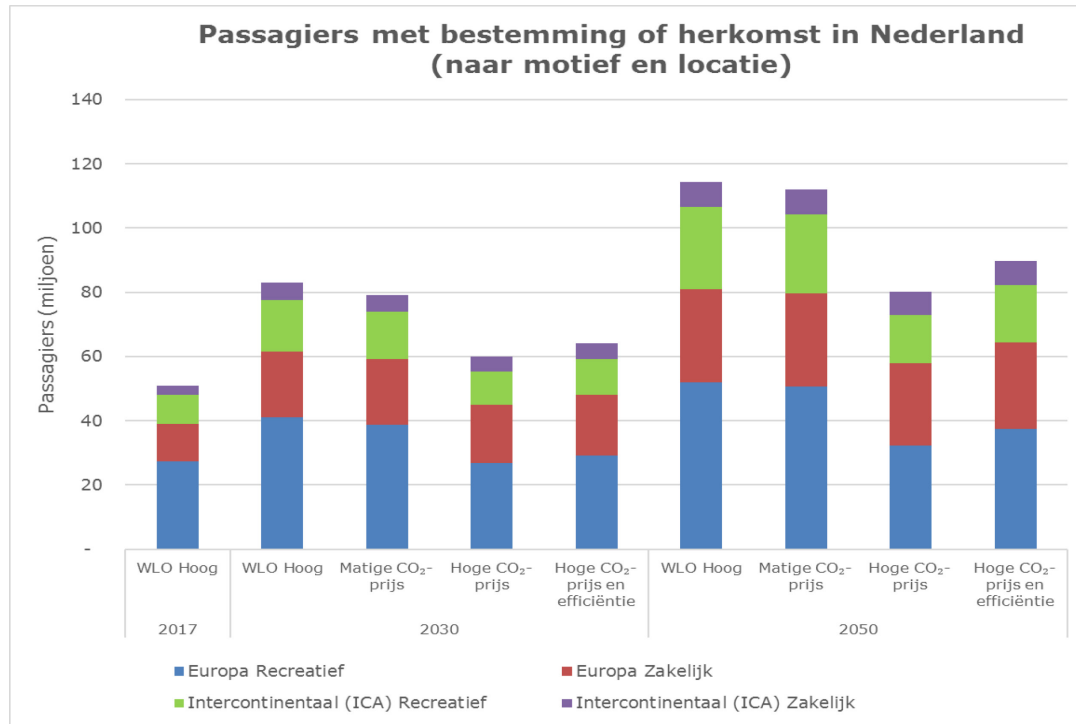
Een matige CO₂-prijs heeft een beperkte invloed op de groei van passagiersaantallen. De vraag daalt licht in 2030 van 113 naar 105 miljoen en in 2050 van 173 miljoen naar 166 miljoen. Omdat de vraag nog steeds boven de capaciteit ligt, zijn capaciteitsbeperkingen nog steeds bepalend voor het aantal passagiers en vluchten.

Hoge wereldwijde CO₂-prijzen tot 1000 euro per ton CO₂ kunnen resulteren in een veel lagere groei van het luchtvaartvolume. Het aantal passagiers in de scenario's Hoge CO₂-prijs en Hoge CO₂-prijs & Efficiëntie zou toenemen tot 73 miljoen of 78 miljoen in 2030 en 99 of 112 miljoen in 2050. Dat past binnen de capaciteitsrestricties. Het effect van een hogere efficiëntieverbetering wordt getoond in de verschillen tussen de scenario's Hoge CO₂-prijs en Hoge CO₂-prijs & Efficiëntie: hogere efficiëntiepercentages zorgen voor meer groei (69% in plaats van 45% in 2050).

Figuur 4.



Figuur 5.



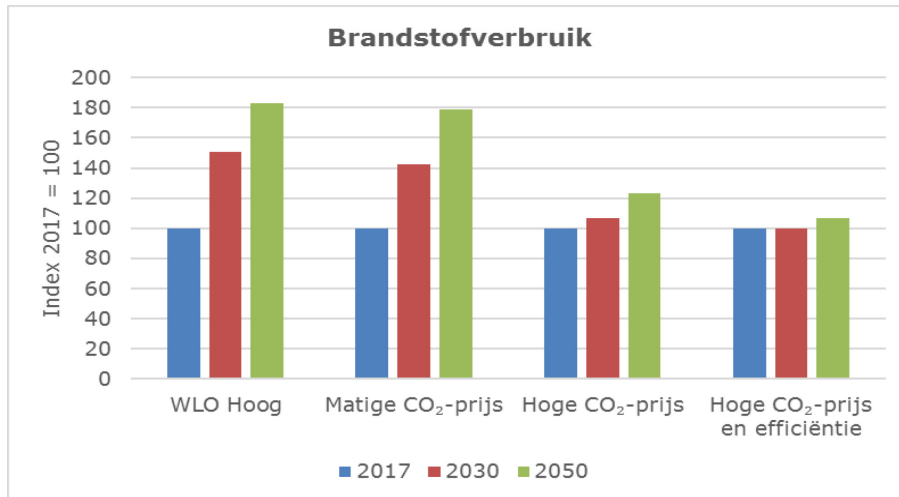
Verdere analyse toont een verschillend aandeel transferpassagiers in het totale volume tussen scenario's. Restricties op luchthavens hebben tot gevolg dat de vraag groter is dan kan worden opgevangen, resulterend in schaarste (latente vraag) en hogere prijzen. Dit duwt voornamelijk transferpassagiers weg van de Nederlandse luchthavens. Wanneer de vraag door CO₂-prijzen hard daalt, zijn er geen capaciteitsproblemen en wordt het oorspronkelijke aandeel transferpassagiers hersteld.

Figuur 5 toont voor de OD-passagiers van en naar Nederland het aandeel van Europese en intercontinentale (ICA) reizigers; en recreatiereizen en zakenreizen. De sterkere reactie van sociale en recreatieve passagiers op hogere ticketprijzen verklaart de daling van het aantal reizigers grotendeels. In 2030 betekent een hoge CO₂-prijs een vermindering van 36 procent van sociale en recreatieve reizen en 11 procent vermindering van zakenreizen. In 2050 zorgt een hoge CO₂-prijs voor een vermindering van 42 procent van sociale en recreatieve reizen en 10 procent van zakenreizen.

4.2 Brandstofverbruik van OD-passagiers van en naar Nederland

In het scenario met een hoge CO₂-prijs en een hoge efficiëntieverbetering, blijft het brandstofverbruik voor passagiers van en naar Nederland rond het niveau van 2017 (stijging van 6%). In de andere scenario's neemt het brandstofverbruik toe (zie Figuur 5). Het scenario Hoge CO₂-prijs geeft een grotere toename van het brandstofverbruik (23% in vergelijking met 2017), hoewel het aantal passagiers wel lager is dan in het scenario Hoge CO₂-prijs en Efficiëntie. In de streefjaren 2030 en 2050 is het brandstofverbruik niet direct om te rekenen in daadwerkelijke CO₂-emissies, omdat het gebruik van biobrandstoffen of synthetische kerosine niet is opgenomen in de output van het model. Merk op dat het gebruik van deze brandstoffen of compensatie in andere sectoren nodig is om de CO₂-uitstoot tot het gewenste niveau terug te brengen. De inkomsten van de CO₂-prijzen kunnen helpen om de kosten te financieren.

Figuur 6.



5. Conclusie

Hoofddoel van deze PBL-studie was om het effect van een stringent internationaal klimaatbeleid op volumes in de luchtvaart van en naar Nederland te verkennen. Hoge CO₂-prijzen kunnen de verwachte groei van de luchtvaartvolumes vertragen. De bandbreedte in een CO₂-prijs die past bij de doelstellingen van Parijs wordt geschat op 200 tot 1000 euro per ton in 2050, wat de grote onzekerheid weerspiegelt die voortkomt uit de onzekerheid van de ontwikkeling van technologie, de kosten en de timing van implementatie.

Restricties aan het aantal vluchten op de luchthavens spelen een grote rol bij het terugdringen van het aantal passagiers en vracht in het WLO Hoog-scenario, wat resulteert in een latente vraag die niet op de luchthaven wordt ondergebracht. Wanneer de CO₂-prijs onder de 200 euro per ton blijft, is het effect op de luchtvaartvolumes beperkt. De vraag blijft uitstijgen boven de capaciteitsgrenzen. Wanneer de CO₂-prijs stijgt tot 1000 euro per ton, zal de vraag naar vlieguren aanzienlijk verminderen en zal de vraag binnen de verwachte capaciteit passen. Het reductie-effect is sterker bij sociaal en recreatief reizen dan bij zakenreizen.

In het scenario met een hoge koolstofprijs en een hoge efficiëntieverbetering blijft het brandstofverbruik voor passagiers van en naar Nederland rond het niveau van 2017 (een stijging van 6%). In de andere scenario's zal het brandstofverbruik veel meer toenemen, met 23% tot 80%. Het gebruik van biobrandstoffen, synthetische kerosine of compensatie in andere sectoren is nodig om de CO₂-uitstoot te verminderen. De inkomsten van een heffing ter hoogte van de CO₂-prijs kunnen helpen om de benodigde investeringen en kredietkosten te financieren.

6. Discussie

6.1 Grote bandbreedte in CO₂-prijzen

De grote onzekerheid over de ontwikkeling van de wereldwijde CO₂-prijs maakt het moeilijk om de impact ervan op de luchtvaart te voorspellen. Na de implementatie van de

momenteel beschikbare maatregelen zijn meer uitgewerkte maatregelen vereist om de uitstoot van broeikasgassen verder terug te dringen. Die maatregelen zijn nog niet volledig ontwikkeld en mede daardoor zijn hun kosten onzeker. Ook de timing van het klimaatbeleid is een onzekere factor. Hoe sneller klimaatbeleid wordt aangescherpt, hoe efficiënter. CO₂-emissies die vroegtijdig worden vermeden, hebben meer effect op het totale CO₂-budget voor de volgende jaren.

Hogere ticketprijzen beïnvloeden passagiers in hun mobiliteitskeuze: het verminderen van de reisafstand, het nemen van een andere vervoersmodus of het verlaten van de reis. Veranderende mobiliteitsbehoeften en -gedrag van reizigers zijn nodig om de absolute uitstoot van de luchtvaart te verminderen. Na 2050 kan een verdere groei van de CO₂-prijs worden verwacht, waardoor vliegtickets nog duurder zouden kunnen worden. Luchtvaart zou daarom een oplossing moeten vinden voor het vermijden van CO₂-emissie op de lange termijn.

6.2 Invulling van internationaal klimaatbeleid

De invulling van toekomstig internationaal klimaatbeleid is natuurlijk nog niet bekend. In de praktijk zal de CO₂-prijs zich niet ontwikkelen volgens het optimale, economisch meest efficiënte berekende pad. Voor het optimale pad zou de CO₂-prijs nu al op de waarde van 60 euro per ton CO₂ moeten liggen, maar in werkelijkheid is deze in september 2018 nog maar 21 euro per ton in de EU-ETS (Business Insiders 2018). Dit kan betekenen dat de CO₂-prijzen in de toekomst nog hoger moeten zijn om alsnog de ambitie van Parijs te kunnen behalen. Als de CO₂-prijzen gematigd of laag blijven, moeten andere beleidsinstrumenten extra worden geïmplementeerd om een vergelijkbaar effect te bereiken bij het terugdringen van luchtvaartemissies.

Becken en Mackey (2017) benadrukken dat de meest gunstige technologie, plus vermindering van de vraag beide noodzakelijk zijn. Hun artikel richt zich op de complexiteit van CO₂-compensatie in verschillende regelingen, en compensatie moet een tweede of derde keus blijven. De inkomsten uit de beschreven CO₂-heffingen moeten daarom in de eerste plaats worden gebruikt om de vraag te verminderen, zoals in dit document is doorgerekend; en ten tweede gebruikt om technologische ontwikkeling te creëren.

6.3 Urgentie

Onze studie geeft de urgentie aan voor een snelle implementatie van wereldwijd klimaatbeleid, en de daarbij te verwachte effecten in de luchtvaart. Alleen effectieve internationale samenwerking en onderhandelingen kunnen leiden tot de realisatie van de beschreven scenario's. De Nederlandse invloed op de internationale verplichtingen is echter beperkt en andere (Europese) landen moeten worden geïnformeerd over mogelijke gevolgen en acties die nodig zijn om het Parijs-akkoord te bereiken.

6.4 Onderzoeksbependingen

De vrachtmodule van het model Aeolus wordt herontwikkeld. De huidige schattingen van vrachtvolumes zijn onzeker en worden niet in dit document gepresenteerd. Toekomstig onderzoek zal naar verwachting licht werpen op dit aandeel in de luchtvaart, dat hoger zou kunnen uitpakken in een scenario met hoge CO₂-prijzen dan in het huidige hoge WLO-scenario.

6.5 Disclaimer

Dit artikel is een voorlopige publicatie van een groter onderzoek dat nog gaande is. Verdere wijzigingen in de berekeningen kunnen optreden, op basis van voortschrijdend inzicht. De resultaten gepresenteerd in het eindrapport van de studie, wanneer verschillend van die in deze voorlopige paper, zijn leidend.

Literatuur

- Aalbers, R., G. Blanford, J. Bollen & K. Folmer (2015) *Technological Uncertainty in Meeting Europe's Decarbonisation Goals*, CPB Discussion Paper 301.
- Becken, S., & Mackey, B. (2017). What role for offsetting aviation greenhouse gas emissions in a deep-cut carbon world? *Journal of Air Transport Management*, 63, 71-83. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2017.05.009>
- Business Insider (2018) [CO₂ European Emission Allowances PRICE Chart](https://markets.businessinsider.com/commodities/co2-emissionsrechte). Retrieved from <https://markets.businessinsider.com/commodities/co2-emissionsrechte>
- CBS Statline (Emissies naar lucht op Nederlands grondgebied; wegverkeer). Den Haag/Heerlen: Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS).
- CE Delft & VU (2014) Externe en infrastructuurkosten, een overzicht voor Nederland in 2010. Delft; Amsterdam: CE Delft; VU.
- CLO: Compendium voor de Leefomgeving. CBS, PBL, RIVM, WUR (2018). Emissies naar lucht door verkeer en vervoer, 2016. Indicator update: 5 april 2018. www.clo.nl. Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS), Den Haag; PBL Planbureau voor de Leefomgeving, Den Haag; RIVM Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven; en Wageningen University and Research, Wageningen.
- CPB/PBL (2015) Toekomstverkenning van Welvaart en Leefomgeving, cahier mobiliteit. Den Haag: Centraal Planbureau/ Planbureau voor de Leefomgeving.
- EP European Parliament (2015) Emission reduction targets for international aviation and shipping. IP/A/ENVI/2015-11 Directorate General for Internal Policies, Policy Department A: Economic and Scientific Policy.
- IATA (2018) *Technology Roadmap Fact Sheet*. Retrieved from <https://www.iata.org/publications/pages/technology-roadmap.aspx>
- ICAO (2016) On board a sustainable future. Environmental report 2016: Aviation and Climate Change. Produced by the Environment Branch of the International Civil Aviation Organization (ICAO).
- ICCT (2015) Fuel efficiency trends for new commercial jet aircraft: 1960 to 2014. Anastasia Kharina, Daniel Rutherford, Ph.D., International Council on Clean Transportation.
- IPCC (2014) Chapter 8 Transport in Climate change 2014, mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (pp. 599–670). Auteurs: Sims R.; R. Schaeffer; F. Creutzig; X. Cruz-Núñez; M. D'Agosto; D. Dimitriu; M. J. Figueroa Meza; L. Fulton; S. Kobayashi; O. Lah; A. McKinnon; P. Newman; M. Ouyang; J. J. Schauer; D. Sperling & G. Tiwari. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.: Cambridge University Press. Available at http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_full.pdf.
- Kolkman, J. (2010) *Belastingen en heffingen in de luchtvaart*. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid: Den Haag. Retrieved from: www.kimnet.nl.

- Kouwenhoven, M. and Grebe, S. (2018) Effect van een vliegbelasting op het vliegverkeer. Kwantitatieve doorrekening. Rapport 18011, in opdracht van het Ministerie van Financiën. Significance: Den Haag.
- Krenek, A., & Schratzenstaller, M. (2017). Sustainability-oriented tax-based own resources for the European Union: a European carbon-based flight ticket tax. *Empirica*, 44(4), 665-686. doi:10.1007/s10663-017-9381-7
- Lee, D.S., et al. (2009) Aviation and global climate change in the 21st century. *Atmospheric Environment*. doi: 10.1016/j.atmosenv.2009.04.024.
- RVO (2017) Nederlandse lijst van energiedragers en standaard CO₂-emissiefactoren, versie januari 2017. Project 109749/BL2017, drs. P.J. Zijlema. Afgestemd met de Emissieregistratie (o.a. RIVM, CBS, PBL, RWS, TNO) en de Nederlandse Emissieautoriteit (NEa) en goedgekeurd door de WEM.
- Markham, F., Young, M., Reis, A., & Higham, J. (2018). Does carbon pricing reduce air travel? Evidence from the Australian 'Clean Energy Future' policy, July 2012 to June 2014. *Journal of Transport Geography*, 70, 206-214. doi:https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2018.06.008
- PBL TIMER/FAIR as part of the IMAGE Model - IMAGE Integrated Model to Assess the Global Environment. PBL themasite. [http://themasites.pbl.nl/models/image/index.php/Welcome to IMAGE 3.0 Documentation](http://themasites.pbl.nl/models/image/index.php/Welcome_to_IMAGE_3.0_Documentation).
- Peeters, P. M., & Middel, J. (2007). *Historical and future development of air transport fuel efficiency*. In R. Sausen, A. Blum, D. S. Lee, & C. Brüning (Eds.), *Proceedings of an International Conference on Transport, Atmosphere and Climate (TAC)*; Oxford, United Kingdom, 26th to 29th June 2006 (pp. 42-47). Oberpfaffenhoven: DLR Institut für Physic der Atmosphäre
- Peeters, P. (2016) Mitigation aviation's long term impact on climate change. Paper presented at the Greener Aviation conference: Achievements and perspectives, Brussels, Belgium.
- Peeters, P., Higham, J., Kutzner, D., Cohen, S., & Gössling, S. (2016). Are technology myths stalling aviation climate policy? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 44, 30-42. doi:https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.02.004
- Scheelhaase, J.D., K. Dahlmann, M. Jung, H. Keimel, H. Nieße, R. Sausen, M. Schaefer & F. Wolters (2016) How to best address aviation's full climate impact from an economic policy point of view? – Main results from AviClim research project. *Transportation Research Part D* 45:112–125.
- Schoots, K.; M. Hekkenberg en P. Hammingh (2017). Nationale Energieverkenning 2017. ECN-O--17-018. Petten: Energieonderzoek Centrum Nederland.
- Van Vuuren, D.P, P.A. Boot, J. Ros, A.F. Hof & M.G.J. den Elzen (2017) The implications of the Paris Climate Agreement for the Dutch climate policy objectives. Netherlands Environmental Assessment Agency, The Hague.
- Uitbeijerse, G.C.M., Hilbers, H.D. (2018) Ontwikkeling luchtvaart en CO₂-emissies in Nederland. Factsheet voor Omgevingsraad Schiphol, Den Haag: PBL