



# PARIJSAKKOORD EN LUCHTVAART

Mogelijke gevolgen van het Parijse klimaatakkoord  
voor de omvang van de luchtvaart via Nederland

## **Notitie**

**Gabrielle Uitbeijerse, Jan Schuur, Hans Hilbers en  
Gerben Geilenkirchen**

**23 mei 2019**

PBL

## **Colofon**

### **Parijsakkoord en luchtvaart Mogelijke gevolgen van het Parijse klimaatakkoord voor de omvang van de luchtvaart via Nederland**

© PBL Planbureau voor de Leefomgeving

Den Haag, 2019

PBL-publicatienummer: 3040

#### **Contact**

Gabrielle Uitbeijerse [gabrielle.uitbeijerse@pbl.nl]

#### **Auteurs**

Gabrielle Uitbeijerse, Jan Schuur, Hans Hilbers en Gerben Geilenkirchen

#### **Met dank aan**

Wim Blom (PBL), Paul Peeters (Breda University), Toon Zijlstra (KiM), Linda Sibbes (IenW), Jeroen van Bochove (IenW), Rob Euwals (CPB), aanwezig bij bijeenkomsten rondom deze studie en interne reviewers van het PBL.

#### **Redactie figuren**

Marnix Breedijk

#### **Eindredactie en productie**

Uitgeverij PBL

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: Uitbeijerse, G.C.M., J. Schuur, H.D. Hilbers & G. Geilenkirchen (2019), *Parijsakkoord en luchtvaart. Mogelijke gevolgen van het Parijse klimaatakkoord voor de omvang van de luchtvaart via Nederland*. Den Haag: PBL.

Het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) is het nationale instituut voor strategische beleidsanalyses op het gebied van milieu, natuur en ruimte. Het PBL draagt bij aan de kwaliteit van de politiek-bestuurlijke afweging door het verrichten van verkenningen, analyses en evaluaties waarbij een integrale benadering vooropstaat. Het PBL is voor alles beleidsgericht. Het verricht zijn onderzoek gevraagd en ongevraagd, onafhankelijk en wetenschappelijk gefundeerd.

# Inhoud

	SAMENVATTING	4
1	Inleiding	8
2	Ontwikkeling luchtvaart zonder Parijsakkoord	9
3	De klimaateffecten van luchtvaart	14
4	Klimaatbeleid voor de luchtvaart	16
5	De gevolgen van het Parijsakkoord	19
6	Gevolgen voor prijzen, passagiers en vluchten in Nederland	23
6.1	Parijs 1: Hoge CO <sub>2</sub> -prijs bij hoge economische groei	25
6.2	Parijs 2: Matige CO <sub>2</sub> -prijs bij hoge economische groei	28
6.3	Parijs 3: Hogere jaarlijkse verbetering van energie-efficiëntie	28
6.4	Parijs 4 en 5: Lagere economische ontwikkeling en internationale handel	29
7	Conclusies voor de Luchtvaartnota	30
8	Reflectie op de verkenning	31
	Literatuur	33
	BIJLAGEN	36
A.	Uitgangspunten WLO-scenario's	36
B.	AEOLUS invoerparameters en model	37
C.	Klimaatimpact luchtvaart is meer dan CO <sub>2</sub> -emissies	43

# SAMENVATTING

In Parijs is in 2015 een internationaal klimaatakkoord gesloten met als doel de opwarming van de aarde te beperken tot ruim onder twee graden. Nederland is een van de ondertekenaars van dit akkoord en heeft inmiddels een klimaatwet voorbereid om in 2030 49 procent minder CO<sub>2</sub> uit te stoten dan in 1990.

Een forse beperking van de uitstoot van broeikasgassen zal ook gevolgen hebben voor de omvang van de Nederlandse luchtvaart. *Welke* gevolgen is onzeker en hangt af van de wijze waarop de mondiale samenleving en economie zullen veranderen, als de Parijse afspraken worden vertaald naar concreet beleid. In 2019 is het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW) bezig met de voorbereiding van de Luchtvaartnota 2020-2050. Die nota legt in grote lijnen het rijksbeleid voor de luchtvaart vast voor de periode waarin ook gevolg moet worden gegeven aan het Parijse klimaatakkoord. Wat zijn de gevolgen van dit akkoord voor de toekomst van de Nederlandse luchtvaartvolumes, en hoe kan het Rijk daar in de Luchtvaartnota op voorsorteren?

## ***Klimaatambities luchtvaart***

De nationale doelen die landen hebben geformuleerd bij het klimaatakkoord van Parijs hebben alleen betrekking op binnenlandse luchtvaart en grondgebonden activiteiten. De grensoverschrijdende luchtvaart telt dus in de nationale doelen niet mee. Voor het reduceren van de emissies van de internationale luchtvaart verwijst Parijs naar de internationale burgerluchtvaartorganisatie van de Verenigde Naties (ICAO). ICAO stelt zich ten doel de mondiale uitstoot van CO<sub>2</sub> door de internationale luchtvaart tussen 2005 en 2050 te halveren. Nederlandse organisaties – waaronder IenW, luchthavens, luchtvaartmaatschappijen, kennisinstellingen en brancheorganisaties – hebben in het Ontwerpakkkoord Duurzame Luchtvaart onlangs doelstellingen uitgesproken die aansluiten bij die van de ICAO. Voor Nederland zou dat kunnen inhouden dat de CO<sub>2</sub>-uitstoot van de luchtvaart in 2050 ongeveer op het niveau van 1990 komt, terwijl de Nederlandse klimaatwet als doel heeft de uitstoot van andere economische sectoren in die periode juist met 95 procent te verminderen.

## ***Meerdere Parijsscenario's***

In deze studie maken wij schetsmatige berekeningen met behulp van scenario's van wat het voor de omvang van de Nederlandse luchtvaart kan betekenen als het klimaatverdrag van Parijs uitgevoerd gaat worden. Dit onderzoek ziet luchtvaart als onderdeel van een wereldwijd economisch systeem dat aan de afspraken uit het klimaatakkoord van Parijs moet voldoen. Daarbij gaan we in dit onderzoek niet specifiek in op beleid voor de luchtvaart, zoals de bijmenging van biobrandstof in kerosine, maar nemen we aan dat landen gevolg geven aan de Parijsafspraken om CO<sub>2</sub> te reduceren.

Bij de berekeningen richten we ons op het jaar 2050, op het belangrijkste broeikasgas CO<sub>2</sub> en op het vervoer van passagiers (er is niet naar vrachtvervoer gekeken). Daarbij maken we gebruik van het AEOLUS-rekenmodel en van de uitwerking van de geactualiseerde luchtvaartprognoses voor de bestaande scenario's Hoog en Laag van de toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving (WLO). We beschrijven een wereld die via een mondiaal systeem voor emissiehandel succesvol uitvoering geeft aan het Parijsakkoord, zodat de opwarming van de aarde beperkt blijft tot ruim onder twee graden. Welke gevolgen het klimaatakkoord van Parijs voor de luchtvaartvolumes van, naar en binnen Nederland heeft, hangt immers af van allerlei factoren. Daarom bekijken we niet één, maar meerdere 'Parijsscenario's'.

Hogere economische en bevolkingsgroei verhogen de passagiersvraag, omdat meer mensen meer te besteden hebben. De afspraak om de uitstoot terug te dringen zal leiden tot een mondiale zoektocht naar oplossingen, die steeds kostbaarder worden naarmate de

eenvoudige en voor de hand liggende opties zijn benut. De prijs van CO<sub>2</sub> zal naar verwachting toenemen naar 200 tot 1.000 euro per ton. Hierdoor zullen de kosten van het vliegen ook stijgen. Een hogere energie-efficiëntieverbetering verlaagt deze kosten juist iets. In de verschillende Parijsscenario's liggen de ticketprijzen in 2050 circa anderhalf tot twee keer zo hoog als in 2017 in prijzen van nu. Hoe hoger de prijs, hoe minder mensen zullen vliegen.

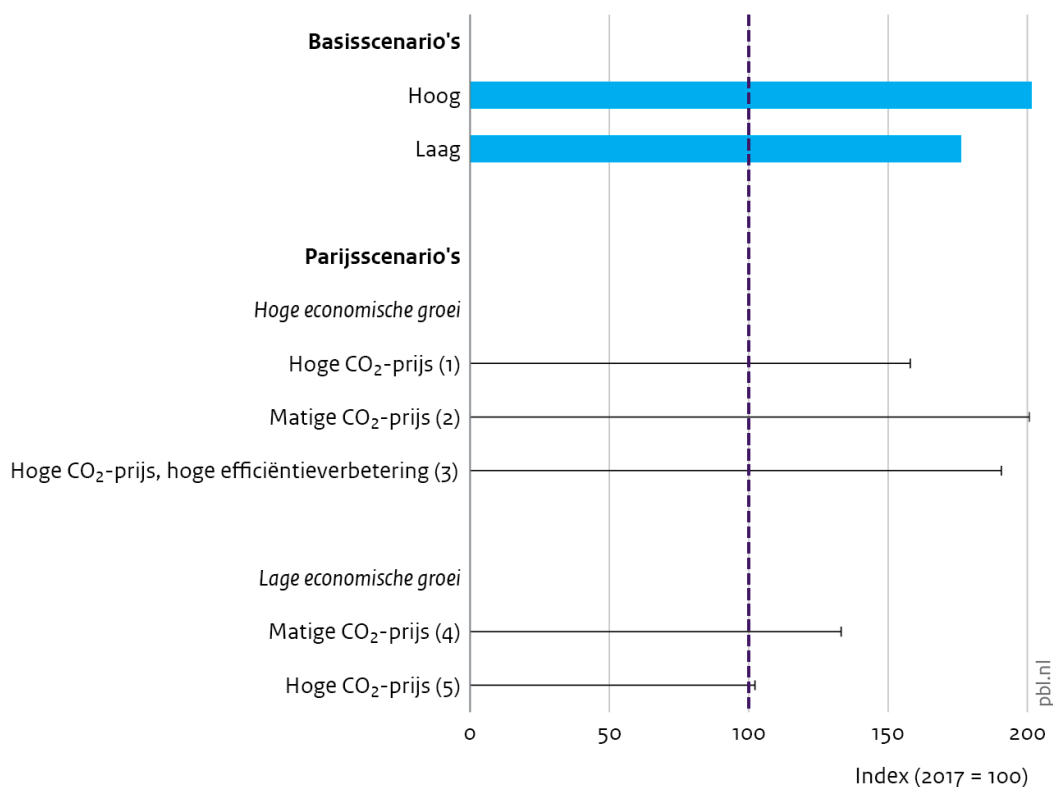
### Luchtvaartvolumes groeien minder snel

Onze conclusie is dat de luchtvaart via Nederland in de meeste Parijsscenario's waarschijnlijk verder zal groeien, maar minder hard dan in beide basisscenario's voor de luchtvaart (figuur 1). In de basisscenario's, met klimaatbeleid dat leidt tot wereldwijde temperatuurstijging van 2,5 tot 4 graden, stijgt het aantal passagiers op Nederlandse luchthavens met driekwart of kan het zelfs verdubbelen – afhankelijk van de economische groei en de mate van internationale samenwerking. Het aantal vluchten neemt dan met de helft tot twee derde toe. Daarbij is rekening gehouden met restricties op de baancapaciteit en de geluidsbelasting van de luchthavens, die we voor de luchthavens aannemen.

De Parijsscenario's laten daarentegen een bandbreedte zien tussen nulgroei en een verdubbeling van het aantal passagiers in 2050. De groei kan dus veel lager zijn dan in de basisscenario's. In de meeste Parijsscenario's blijft de groei van de vraag binnen de grenzen van de beperkingen op de luchthavencapaciteit. In de scenario's met lage economische groei of met hoge CO<sub>2</sub>-prijzen van 1.000 euro per ton wordt de groei zo sterk afgeremd dat bijna alle passagiers die via Schiphol willen reizen (de vraag) ook vervoerd kunnen worden, binnen de geldende capaciteitsrestricties.

**Figuur 1.**

### Aantal passagiers via Nederlandse luchthavens in 2050



Bron: PBL

**Tabel 1 Aannames Parijsscenario's en aantal passagiers in 2050**

	Korte omschrijving	CO <sub>2</sub> -prijs in 2050	Jaarlijkse energie-efficiëntie-verbetering	Passagiers via Nederlandse luchthavens (Index 2017 = 100)
	<b>Basisscenario's</b>			
	Hoog	160 euro per ton	1%	202
	Laag	40 euro per ton	0,6%	176
	<b>Parijsscenario's</b>			
1	Hoge CO <sub>2</sub> -prijs bij hoge economische en bevolkingsgroei	1.000 euro per ton	1%	158
2	Matige CO <sub>2</sub> -prijs bij hoge economische en bevolkingsgroei	200 euro per ton	1%	201
3	Hoge CO <sub>2</sub> -prijs en hoge efficiëntieverbetering bij hoge economische en bevolkingsgroei	1.000 euro per ton	2%	191
4	Lage economische groei en matige CO <sub>2</sub> -prijs	200 euro per ton	0,6%	133
5	Lage economische groei en hoge CO <sub>2</sub> -prijs	1.000 euro per ton	0,6%	102

De set van Parijsscenario's geeft een bandbreedte van het verwachte aantal passagiers (figuur 1). We vatten de scenario's hieronder kort samen.

In Parijsscenario 1, met een hoge economische groei en een prijs van 1.000 euro per ton CO<sub>2</sub>, groeit het aantal passagiers met gemiddeld 1,5 procent per jaar. Het aandeel recreatieve reizigers zal afnemen vanwege hun grote prijsgevoeligheid. Waar in het basisscenario Hoog door de capaciteitsrestricties het aandeel transferpassagiers daalde zal het aandeel transferpassagiers in Nederland in Parijsscenario 1 waarschijnlijk niet veel verschillen van nu. Door de mondiale CO<sub>2</sub>-prijzen zullen tickets via andere hubs in gelijke mate duurder worden en door de lagere groei zijn de capaciteitsrestricties minder knellend.

Scenario 2 kent een matige CO<sub>2</sub>-prijs van 200 euro per ton en een hoge economische groei. De passagiersvraag past in eerste instantie niet binnen de capaciteitsrestricties, dus die blijven relevant voor de bescherming van de lokale leefomgeving. De omvang van de luchtvaart (na restricties) in dit scenario lijkt op de omvang in basisscenario Hoog, maar de mondiale CO<sub>2</sub>-reductie die bij deze combinatie van klimaatbeleid en CO<sub>2</sub>-prijs hoort is veel hoger.

Scenario 3 verkent het effect van een hogere energie-efficiëntieverbetering van 2 procent (door kortere vliegroutes of door zuinigere motoren) in combinatie met een CO<sub>2</sub>-prijs van 1.000 euro per ton. De ticketprijzen worden in dat geval iets lager door minder CO<sub>2</sub>-kosten en minder brandstofkosten, want minder brandstofverbruik, en dat leidt tot hogere passagiersvolumes dan in het eerste scenario, maar nog steeds lager dan in het basisscenario Hoog.

Scenario 4 gaat uit van een lagere economische groei en een CO<sub>2</sub>-prijs van 200 euro per ton. Hierbij groeit het aantal passagiers met 0,9 procent per jaar. Alleen als er een hoge CO<sub>2</sub>-prijs van 1.000 euro per ton CO<sub>2</sub> wordt gecombineerd met de demografie en economie van Laag –

scenario 5 – is het aantal passagiers in 2050 naar verwachting ongeveer even groot als in 2017.

### ***Interpretatie van de verkenning***

Door de grote onzekerheden in relevante factoren moeten de resultaten voorzichtig geïnterpreteerd worden. De aannames bij onze berekeningen horen bij een mondiale temperatuurstijging lager dan twee graden. We zijn er daarbij van uitgegaan dat er geen veranderingen optreden in de preferenties van reizigers, dat er op korte termijn tot actie wordt overgegaan en dat er internationaal wordt samengewerkt om de ambities van het Parijsakkoord te realiseren. De groei van de luchtvaart via Nederland kan verder onder druk komen te staan en lager uitvallen als men, naar aanleiding van het klimaatakkoord in Parijs, naar een maximale temperatuurstijging van anderhalve graad streeft. Dit zal ook het geval zijn als de internationale samenwerking stagneert of als men de vereiste beleidsmaatregelen uitstelt; in die situaties kan op termijn de CO<sub>2</sub>-prijs nog hoger uitvallen. Ten slotte zou, ook zonder specifiek beleid, de belangstelling voor luchtvaart kunnen afnemen, bijvoorbeeld als de attitude van de burger als gevolg van de internationale aandacht voor het klimaat verandert.

# 1 Inleiding

Afgelopen jaren is de internationale luchtvaart sterk gegroeid en zij blijft naar verwachting ook in de toekomst groeien. Op Schiphol is het aantal reizigers toegenomen van 31 miljoen in 1997 naar 68,5 miljoen in 2017 (Schiphol 2018). Langetermijnsscenario's geven aan dat de vraag naar luchtvaart vanaf Schiphol kan doorgroeien naar 118 tot 123 miljoen passagiers in 2050 (Significance & To70 2019). Ook op de vijf regionale luchthavens groeit de vraag fors door. Naar verwachting neemt de efficiëntie van het brandstofgebruik minder snel toe dan het aantal passagiers, waardoor het energiegebruik door de luchtvaart ook stijgt. De impact van luchtvaart op het klimaat neemt hierdoor waarschijnlijk toe (ICAO 2016).

Eind 2015 hielden de Verenigde Naties een klimaatconferentie in Parijs: de Conference of Parties (COP21). Bijna 200 landen hebben toen een klimaatakkoord ondertekend en zich verplicht om gezamenlijk hun CO<sub>2</sub>-uitstoot zodanig te beperken dat de mondiale temperatuur ruim onder de twee graden Celsius zal blijven (UNFCCC 2015). Ook streeft men ernaar om de opwarming te beperken tot anderhalve graad. Nederland en de andere landen van de EU hebben het akkoord geratificeerd (IenW 2015). Stel dat de afspraken in Parijs worden omgezet in stringent wereldwijd klimaatbeleid, welk gevolgen heeft dit dan voor de luchtvaart via Nederland<sup>1</sup>?

Op dit moment werkt het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat aan de Luchtvaartnota 2020-2050. Deze nota legt in grote lijnen het rijksbeleid voor de luchtvaart vast voor dezelfde periode waarin ook gevolg gegeven moet worden aan het Parijse klimaatakkoord. Het is dus van belang om te verkennen wat de consequenties van dit akkoord kunnen zijn voor de toekomst van de Nederlandse luchtvaart<sup>1</sup>, zodat het Rijk daar in de Luchtvaartnota op kan voorsorteren.

## Leeswijzer

Voordat we ingaan op het effect van het klimaatakkoord van Parijs, bespreken we eerst hoe de Nederlandse luchtvaartvolumes zich *zonder* dit akkoord zouden ontwikkelen (hoofdstuk 2). Dat vergelijken we uiteindelijk met wat er met het aantal passagiers, de vluchten en het energiegebruik zou gebeuren bij uitvoering van het Parijsakkoord, in hoofdstuk 6.

De stand van zaken van de huidige emissies van de luchtvaart, ook andere dan CO<sub>2</sub>, komt aan bod in hoofdstuk 3. In daaropvolgende hoofdstukken laten we zien wat bestaande doelstellingen zijn om emissies te reduceren (4) en hoe we de vertaalslag hebben gemaakt van het Parijsakkoord naar de Parijsscenario's (5).

Na de presentatie van de resultaten in hoofdstuk 6, trekken we in hoofdstuk 7 conclusies uit deze verkenning voor de luchtvaartnota. In deze studie zijn veel onzekere factoren vertaald naar aannames over hoe klimaatbeleid passend bij Parijs er in de praktijk uit zal zien en hoe markten op dit beleid reageren. Daarom geven we in het laatste hoofdstuk (8) een reflectie op onze aannames.

---

<sup>1</sup> Onder de Nederlandse luchtvaart verstaan we alle commerciële vliegbewegingen en luchtreizigers op de vijf luchthavens van nationale betekenis: Schiphol, Rotterdam/The Hague, Maastricht, Groningen en in de toekomst Lelystad. Via Nederland betekent van, naar en via de Nederlandse luchthavens.



## 2 Ontwikkeling luchtvaart zonder Parijsakkoord

In dit hoofdstuk bespreken we eerst hoe de Nederlandse luchtvaart zich *zonder* het Parijsakkoord naar verwachting zou ontwikkelen. Dat vergelijken we in hoofdstuk 6 met wat er zou gebeuren bij uitvoering van het klimaatakkoord. Op die manier kunnen we het verschil laten zien tussen de Nederlandse luchtvaartontwikkeling met en zonder 'Parijs'.

Hoe de luchtvaart zich op lange termijn ontwikkelt is onderhevig aan allerlei factoren die onzeker zijn. Daarom hanteren we twee scenario's die in combinatie een bandbreedte geven van de mogelijke toekomstige ontwikkelingen. We gebruiken de scenario's Hoog en Laag van de toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving (WLO) van het PBL en CPB (CPB & PBL 2015a). Elk scenario bundelt een groot aantal mogelijke ontwikkelingen tot een samenhangend toekomstbeeld en ondersteunt dit met cijfers die een orde van grootte aan deze ontwikkelingen geven. De kans dat een van beide scenario's zich precies zó voordoet is theoretisch nihil, maar de bandbreedte tussen beide scenario's geeft een redelijk beeld van wat waarschijnlijk zou kunnen zijn.

- Scenario Hoog combineert een relatief sterke demografische groei van 0,4 procent per jaar met een sterke economische groei van circa 2 procent per jaar. Ook de technologie ontwikkelt zich relatief snel. In reactie op de grote druk die dit groeiscenario op het klimaat legt en dankzij internationale samenwerking, wordt er ook een mondiaal klimaatbeleid gevoerd (maar lang nog niet conform Parijs<sup>2</sup>). Het resultaat is een wereldwijde temperatuurstijging van 2,5 tot 3°C tegen het einde van de eeuw.
- In scenario Laag gaat een stagnerende demografische ontwikkeling samen met een gematigde economische groei van ongeveer 1 procent per jaar. Door de achterblijvende economische groei en mondiaal protectionisme blijft het klimaatbeleid zeer bescheiden. Dit scenario zal resulteren in een wereldwijde temperatuurstijging van 3,5 tot 4°C.

De WLO-scenario's worden vaak gebruikt als kader voor de onzekere toekomst waarin de langetermijngevolgen van beleid worden verkend. Voor meer informatie over de inhoud en achtergrond van beide scenario's verwijzen we naar de hoofdpublicatie over de WLO van het PBL en CPB (2015a).

### **Klimaatbeleid in de WLO-scenario's**

De uitstoot van broeikasgassen in de atmosfeer leidt tot een ongewenste stijging van de temperatuur op de aarde. Het belangrijkste broeikasgas is CO<sub>2</sub>; dit heeft het grootste aandeel in de uitstoot, heeft een zeer langdurig effect en de uitstoot van CO<sub>2</sub> daalt langzamer dan die van andere gassen (Van Vuuren et al. 2017). In Nederland bestaat 85 procent van de uitstoot van broeikasgassen uit CO<sub>2</sub> (Van Vuuren et al. 2017). Daarom concentreert het klimaatbeleid in de WLO zich op het terugdringen van CO<sub>2</sub>-uitstoot (zie ook hoofdstuk 3 en 4). De overige broeikasgassen blijven dus buiten beschouwing.

In de beide WLO-scenario's is wel toekomstig klimaatbeleid verondersteld, maar niet het stringente tweegradenbeleid dat de landen zich in Parijs hebben voorgenomen. Het klimaatbeleid verschilt tussen de scenario's, omdat het meebeweegt met de omstandigheden van ieder scenario. Zo leidt de internationale samenwerking die in Hoog is verondersteld zowel tot een hogere economische groei als tot een meer succesvol klimaatbeleid dan in Laag.

Het klimaatbeleid in de WLO-scenario's heeft als doel om tot een zekere reductie van de mondiale CO<sub>2</sub>-uitstoot te komen. In het hoge WLO-scenario gaat men ervan uit dat hiervoor

---

<sup>2</sup> De WLO-scenario's werden gepubliceerd voordat het Klimaatakkoord van Parijs in 2015 in werking trad. Hoewel er in de WLO-studie wel een onzekerheidsverkenning naar tweegradenbeleid is gedaan, is deze niet kwantitatief uitgewerkt.

een emissiehandelssysteem wordt opgetuigd waar wereldwijd alle sectoren van de economie onder komen te vallen. Dit beleid stuwt de prijs van een ton CO<sub>2</sub>-uitstoot omhoog tot het niveau dat nodig is om het klimaatbeleid tegen de minste maatschappelijke kosten te realiseren: de *efficiënte CO<sub>2</sub>-prijs*. Dat stimuleert productie, consumptie en innovatie in de richting van producten en diensten die slechts weinig CO<sub>2</sub> 'kosten'. Koolstofarme producten en ondernemingen met koolstofarme productiewijzen worden door marktwerking gestimuleerd en krijgen concurrentievoordeel. Elke afwijking van het hieruit resulterende CO<sub>2</sub>-prijspad leidt tot hogere kosten om de CO<sub>2</sub>-uitstootdoelstelling te bereiken (Aalbers et al. 2016). De efficiënte CO<sub>2</sub>-prijs weerspiegelt wat het op dat moment kost om wereldwijd op de goedkoopste manier een ton CO<sub>2</sub> te besparen (de marginale preventiekosten). In het scenario Laag verloopt internationale samenwerking stroever, met als gevolg dat landen minder bereid zijn hun klimaatbeleid aan te scherpen.

Hoe deze mondiale CO<sub>2</sub>-prijs zich zal ontwikkelen is globaal af te leiden. In scenario Hoog, met veel economische groei maar ook met goede internationale samenwerking, bestaat efficiënt klimaatbeleid in ieder geval uit een mondiale koolstofbelasting of een mondiaal emissiehandelssysteem. Ook innovatiesubsidies die emissiereductie stimuleren, passen in dat beleid (Aalbers et al. 2016). In 2050 bedragen de efficiënte CO<sub>2</sub>-prijzen 160 euro voor Hoog en 40 euro voor Laag. Ook voor tussenjaren zijn prijzen geschat (CPB & PBL 2015b).

### **Ontwikkeling luchtvaart in WLO-scenario's**

De WLO-scenario's Hoog en Laag zijn nader uitgewerkt voor de luchtvaart (CPB & PBL 2016a); de drijfveren en aannames zijn opgenomen in bijlage A. Daarbij is bijvoorbeeld gekeken naar de mate waarin de wereldwijde groei in de vraag naar luchtvaart van de afgelopen decennia doorzet en naar de mate waarin Noordwest-Europa en Nederland daarin een rol spelen als bestemming en als overstappunt. Binnen Europa speelt de concurrentie tussen vliegen, (hogesnelheids)treinen en de auto een rol. Ontwikkeling van een steeds beter net van hogesnelheids-treinverbindingen en autowegen betekent concurrentie voor de luchtvaart en leidt ook tot toenemende concurrentie tussen luchthavens, omdat hun markten geografisch steeds verder overlappen. Maar ook de luchtvaartsector ontwikkelt zich: hoe gaan netwerken, frequenties en ticketprijzen veranderen? Daarbij speelt de verdere liberalisering van de wereldwijde luchtvaart een rol, maar ook plaatselijke restricties op de ontwikkeling van luchthavens vanwege geluidshinder of capaciteit.

Vliegen is in Nederland onderhevig aan beperkingen die zijn opgelegd om de belasting van dit verkeer binnen vooraf vastgestelde grenzen te houden. Luchthavens kennen daarom verschillende restricties. Of dezelfde restricties zullen gelden in de toekomst, zal samenhangen met de beleidskeuzes die nog gemaakt moeten worden. Om scenario's voor de luchtvaart door te rekenen voor 2050, moeten er aannames worden gedaan over dat toekomstige beleid. De WLO-scenario's zijn zo ingevuld ('beleidsarm') dat het beleid meebeweegt met de omvang van de maatschappelijke knelpunten die men ervaart, globaal op de manier waarop dat in het verleden gebeurde. Nieuw beleid is zoveel mogelijk buiten beschouwing gelaten in de WLO (CPB & PBL 2015a). De uitwerking van de (toekomstige) regelgeving voor de beperkingen van baangebruik en geluidsbelasting wordt in het tekstkader over AEOLUS verder toegelicht. Dit is het model van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW) dat gebruikt wordt voor (middel)langetermijnramingen van het luchtverkeer (Significance & To70 2019) en ook gebruikt is bij de WLO in 2015.

## Rekenmodel AEOLUS

Het strategische luchtvaartprognosemodel AEOLUS is eigendom van het ministerie van IenW. Het wordt gebruikt om met scenario's mogelijke toekomst te verkennen. De aannames die bij de scenario's zijn gedaan, worden omgezet in waarden voor de parameters van het rekenmodel. Hieronder lichten we toe hoe AEOLUS omgaat met aannames over de economie, inkomensgroei, ticketprijzen, het bestemmingennetwerk, technologische vernieuwing en beleid. Meer toelichting is te vinden in bijlage B.

Aannames over de macro-economische ontwikkeling vertalen zich in twee modelparameters: het bbp per hoofd van de bevolking en de omvang van de wereldhandel. De bbp-groei per hoofd heeft effect op de passagiersvraag; die neemt toe. Daarbij geldt dat naarmate mensen rijker worden, zij minder gevoelig zijn voor de ticketprijs.

Strategische beslissingen van luchtvaartmaatschappijen bepalen het aanbod van bestemmingen en bijbehorende frequenties: de luchtzijdige 'level-of-service'. Het netwerk voor 2030 en 2050 is een extrapolatie van het netwerk in het basisjaar (2017), waarbij de groei vooral wordt bepaald door de ontwikkeling van de kosten en de vraag.

Een belangrijke aanbodparameter is de ticketprijs. In de ticketprijs zijn de kosten van brandstof en CO<sub>2</sub>-uitstoot opgenomen. Veranderingen in ticketprijs, frequentie en reisduur hebben effect op de vraag naar luchtvaart. Reizigers kiezen een andere vertrekluchthaven, een extra overstap, een ander vervoermiddel of zien bijvoorbeeld af van de reis.

Een andere parameter in AEOLUS is de ontwikkeling van de technologieklasse van vliegtuigen. AEOLUS berekent hoe lang een vliegtuig van een bepaald type meegaat en welk nieuw type vliegtuig bij vervanging of uitbreiding wordt toegevoegd aan de vloot. Bij vernieuwing van een vliegtuig zal de uitstoot per ton gewicht en per kilometer naar verwachting verminderen, en zal het vliegtuig stiller zijn.

Ten slotte is de uitwerking van de toekomstige beperkingen van baangebruik en geluidsbelasting bepalend voor de uitkomsten van het model. Bij de berekening van de geactualiseerde luchtvaartprognoses is deze regelgeving onder meer op de volgende manier concreet gemaakt:

- vanaf 2030 is er geen vierdebaanregel meer op Schiphol (nog wel 2+1 baangebruik);
- de 50/50-regel bij Schiphol blijft tot 2050 bestaan, dat betekent dat de helft van de geluidswinst mag worden ingezet voor extra vluchten boven de huidige limiet van 500.000. Er is ingeschat dat dit leidt tot een plafond van 645.000 vluchten in 2030 en 731.000 in 2050 in scenario Hoog;
- het aantal nachtvluchten Schiphol blijft gelijk tot 2050;
- routes en start- en landingsprocedures wijzigen niet;
- uitplaatsing van vluchten naar Lelystad tot maximaal 45.000 vluchten in 2050 in scenario Hoog en 25.000 in Laag;
- op andere regionale luchthavens is er na 2030 geen jaarlimiet meer.

Deze en andere aannames over toekomstig beleid zijn in overleg met het ministerie van IenW gebruikt voor de studie naar een nationale vliegbelasting en worden toegelicht in Significance & To70 (2019). Alternatieve aannames over deze restricties in het luchtvaartbeleid van de komende decennia zullen tot andere modelresultaten leiden. In basisscenario Hoog is de berekende passagiersvraag hoger dan de capaciteit van de luchthavens. In dat geval past het model op basis van hun keuzegedrag in het verleden de keuzes van passagiers en luchtvaartmaatschappijen zodanig aan dat het aantal vluchten binnen de capaciteitsplafonds past.

De berekeningen voor de WLO-studie hadden als basisjaar 2013. In het huidige onderzoek zijn de ontwikkelingen in de luchtvaart tussen 2013 en 2017 ook meegenomen. Daartoe is het rekenmodel AEOLUS geactualiseerd. Het model is bij deze actualisatie ook verbeterd, onder meer wat betreft de berekening van de uitstoot van CO<sub>2</sub>. Deze versie van het model heeft het ministerie van Financiën gebruikt voor het doorrekenen van nieuwe varianten van de voorgenomen vliegbelasting (als vervolg op Kouwenhoven & Grebe 2018). Het model is in 2006 en 2009 gevalideerd door het CPB. In 2015 heeft Significance deze tests herhaald (Kouwenhoven & Grebe 2015).

### **Basisscenario's Hoog en Laag**

Hierna beschrijven we de geactualiseerde luchtvaartvolumes van de scenario's Hoog en Laag zoals berekend met AEOLUS (zie tekstkader). In het vervolg noemen we dit **de basisscenario's**, om ze te onderscheiden van de originele luchtvaartprognoses voor de WLO-scenario's uit 2015. Het aantal passagiers geeft een indicatie van de druk die de luchtvaart legt op de infrastructuur van de luchthaven en zijn landzijdige ontsluiting, terwijl het aantal vluchten een idee geeft van de drukte in het luchtruim en de belasting voor de leefomgeving.

Rekening houdend met de beperkingen op baangebruik en geluidsbelasting groeit het aantal passagiers op Schiphol tot 2050 in het scenario Laag met zo'n 1,7 procent per jaar. In Hoog gaat het om 1,8 procent per jaar. Het verschil is klein als gevolg van de capaciteitsrestricties die in het hoge scenario gaan knellen. Het aantal vluchten van Schiphol groeit minder dan het aantal passagiers, met een jaarlijks gemiddelde van 1,1 procent in Laag en 1,2 procent in Hoog. In het hoge scenario gaat de technologische ontwikkeling sneller en zijn de restricties op het aantal vluchten knellender. Daardoor zullen luchtvaartmaatschappijen eerder grotere vliegtuigen inzetten en streven naar een betere stoelbezetting (bezettingsgraad).

**Tabel 2.1 Basisscenario's Laag en Hoog in 2050**

	<b>Basisscenario Laag</b>		<b>Basisscenario Hoog</b>	
	<b>Prognose</b>	<b>Index 2017=100</b>	<b>Prognose</b>	<b>Index 2017=100</b>
<b>Schiphol</b>				
Passagiers	119 mln	173	123 mln	180
Passagiersvluchten	692.000	144	724.000	151
<b>Regionale luchthavens</b>				
Passagiers	16 mln	201	30 mln	388
Passagiersvluchten	101.000	181	193.000	347
<b>Totaal van alle Nederlandse luchthavens</b>				
Passagiers	134 mln	176	153 mln	202
Passagiersvluchten	793.000	148	916.000	171

Binnen de beperkingen die de luchthavens hebben groeit het aantal passagiers via de Nederlandse luchthavens samen per jaar met 1,7 procent in basisscenario Laag en 2,1 procent in Hoog. Het aantal passagiers komt dan uit op 134 tot 153 miljoen in 2050 (zie

tabel 2.1). Het aantal passagiersvluchten groeit minder hard doordat er meer passagiers per vlucht worden vervoerd, en komt op ongeveer 793.000 tot 916.000. Dit betreft naast Schiphol ook de regionale luchthavens Rotterdam-The-Hague, Eindhoven, Groningen, Maastricht en Lelystad. Bij de regionale luchthavens is geen limiet gesteld op het aantal vluchten na 2030 (zie tekstkader). Alleen Lelystad kan tot maximaal 45.000 vluchten verwerken. Het aantal vluchten op Eindhoven zal doorgroeien tot 98.000 en Rotterdam tot ongeveer 37.000 vluchten in 2050.

### 3 De klimaateffecten van luchtvaart

Door de verbranding van fossiele brandstof komen emissies in de atmosfeer die warmte vasthouden ('broeikasgassen'). De aarde warmt door dit broeikaseffect op, en dat heeft klimaatverandering tot gevolg. Door deze klimaatverandering is er onder andere een verhoogde kans op extreme weersomstandigheden en een hogere zeewaterspiegel (IPCC 2018). De belangrijkste broeikasgassen die door luchtvaart in de lucht komen, zijn CO<sub>2</sub> en waterdamp (ICAO 2016). CO<sub>2</sub> heeft een groot effect en blijft langere tijd (rond de 100 jaar) in de atmosfeer hangen. De hoeveelheid CO<sub>2</sub> die vrijkomt bij de verbranding van fossiele brandstoffen zoals kerosine, heeft een lineair verband met de hoeveelheid verstookte brandstof.

Naast CO<sub>2</sub> komen er bij de verbranding van brandstof ook andere stoffen vrij. Deze zogenoemde niet-CO<sub>2</sub>-emissies in de atmosfeer leiden tot verschillende fysische en chemische processen (zie ook bijlage C). Stikstofoxiden, zwaveloxiden en waterdamp beïnvloeden de opwarming van de aarde. Als ook deze niet-CO<sub>2</sub>-emissies worden meegenomen, zou volgens schattingen het totale effect van de emissies in 2005 ongeveer 1,3 tot 4,8 maal zo groot zijn geweest als alleen dat van CO<sub>2</sub> (Lee et al. 2010), afhankelijk van de tijdsperiode waarover het opwarmingseffect wordt opgeteld en van het onzekere effect van wolkenvorming. Zonder wolkenvorming zou het effect van alle emissies 1,3 tot 2,6 maal zo groot als dat van CO<sub>2</sub> kunnen zijn (Lee et al. 2010). Omdat er nog aanzienlijke wetenschappelijke onzekerheid is over het effect van niet-CO<sub>2</sub>-emissies (Lee 2018), is er geen consensus over de vraag of en hoe dit effect kan worden verlaagd. Daarom blijft de focus op het verlagen van de CO<sub>2</sub>-uitstoot, waarbij sommige maatregelen om dit te bereiken ook enkele van de andere emissies kunnen verminderen of juist niet (Lee 2018). Het verlagen van brandstofverbruik door een motor met hogere verbrandingstemperaturen leidt bijvoorbeeld tot een afname in de CO<sub>2</sub>-uitstoot, maar een toename in de uitstoot van stikstofoxiden. Ook hebben andere omstandigheden een effect op de verschillende emissies, zoals de hoogte waarop wordt gevlogen en de atmosferische samenstelling en temperatuur (Lee 2018). Bovendien is het effect van andere emissies dan CO<sub>2</sub> niet altijd evenredig met het brandstofverbruik. Bij condenssporen is het effect bijvoorbeeld soms beter af te leiden van de afgelegde afstand (Lee 2018). CO<sub>2</sub> is echter het belangrijkste broeikasgas met het meest langdurige klimaateffect (Van Vuuren et al 2017). Daarom beperken we ons verder tot CO<sub>2</sub>.

Internationale afspraken voor de luchtvaart zijn vooral gericht op het terugdringen van de CO<sub>2</sub>-emissies. De CO<sub>2</sub>-emissie die samenhangt met de in Nederland getankte jet-kerosine bedroeg in 2017 12,1 megaton (CBS Statline 2018; RVO 2017). Ongeveer twee derde hiervan kan worden toegerekend aan passagiers en een derde aan vrachtvervoer (Uitbeijerse & Hilbers 2018). Deze emissies worden beleidsmatig niet aan een land toegerekend, en worden apart gerapporteerd (IPCC 2006). Ter vergelijking: de CO<sub>2</sub>-uitstoot van de in Nederland getankte brandstof voor internationale scheepvaart is bijna vier keer zo groot. De totale CO<sub>2</sub>-uitstoot van het binnenlandse verkeer en vervoer in Nederland was 35,5 megaton en het totaal aan broeikasgasemissies (inclusief CO<sub>2</sub>) was 197 megaton CO<sub>2</sub>-equivalenten in 2016 (ECN & PBL 2017).

#### ***Emissies van alternatieve brandstoffen***

De energie om een vliegtuig in de lucht te brengen en houden, wordt nu bijna compleet opgebracht door verbranding van fossiele kerosine. Wanneer (een deel van) de kerosine wordt vervangen door alternatieve brandstoffen, zoals synthetische kerosine of biobrandstoffen, dan kan dat in de brandstofketen tot een lagere CO<sub>2</sub>-emissie leiden. De doorlooptijd van de CO<sub>2</sub>-cyclus bij biomassa is relatief kort vergeleken met de cyclus bij fossiele brandstoffen (miljoenen jaren). De Europese regelgeving voor hernieuwbare energie

schrijft voor dat alleen biomassa mag worden ingezet die de broeikasgassen over de gehele productieketen vermindert. De uitstoot van CO<sub>2</sub> uit biobrandstof wordt altijd berekend en gerapporteerd, maar hoeft niet door landen te worden meegeteld in hun nationale totalen (IPCC 2006).

Bij de verbranding van een alternatieve brandstof – zoals biobrandstof of synthetische brandstof – komen in de lucht evenwel broeikasgassen en luchtverontreinigende stoffen<sup>3</sup> vrij, net als bij fossiele kerosine. Alleen als het vliegtuig elektrisch is aangedreven en door een accu of brandstofcel van energie wordt voorzien, zijn er geen CO<sub>2</sub>-emissies in de lucht. Bij conventionele fossiele motoren wordt tussen de 30 en 40 procent van de toegevoerde energie (uit brandstof) daadwerkelijk omgezet in de vliegbeweging. Voor elektrische motoren ligt het rendement een stuk hoger, namelijk ongeveer op 85 tot 90 procent (NLR 2019). Het rendement en de energiebron van de productie van brandstof zijn ook van belang, ook bij zogenoemde e-fuels<sup>4</sup> die worden gemaakt uit waterstof. Waterstof kan direct in een brandstofcel worden toegepast of worden gebruikt om samen met (afgevangen) CO<sub>2</sub> te worden omgezet in synthetische kerosine.

Het toekomstige luchtvaartvolume in Nederland en de bijbehorende CO<sub>2</sub>-uitstoot hangen samen met allerlei factoren, bijvoorbeeld met de economie, de energie-efficiëntie, vliegroutes, het type brandstof of de energiebron en de aandrijving. Al deze factoren kunnen aangrijpingspunten zijn voor beleid dat beoogt om de emissies van luchtvaart te beperken.

---

<sup>3</sup> Toepassing van synthetische en biobrandstoffen geeft wel een iets andere samenstelling van het verbrandingsproduct (CE Delft et al. 2017; Ecofys 2013). Dat lijkt vooral in de directe omgeving een effect te hebben op de luchtkwaliteit.

<sup>4</sup> Wanneer synthetische brandstoffen worden gemaakt met stroom uit hernieuwbare bronnen als zon en wind, wordt er ook wel naar verwezen met 'Power-to-Liquid (PtL)' of e-fuels. De opgewekte stroom wordt daarbij gebruikt om waterstof te produceren door middel van elektrolyse. De waterstof wordt gecombineerd met CO<sub>2</sub> (uit de lucht of opslag) om daar koolwaterstoffen uit te synthetiseren. Er zijn ook andere manieren om synthetische kerosine te maken, zoals uit aardgas of kolen (NLR 2019).

## 4 Klimaatbeleid voor de luchtvaart

Eind 2015 hebben bijna 200 landen in Parijs het klimaatakkoord van de Verenigde Naties ondertekend (UNFCCC 2015). Ook Nederland en de andere landen van de Europese Unie hebben het akkoord geratificeerd (IenW 2015). Zowel op mondiaal, Europees als nationaal schaalniveau onderneemt de luchtvaartsector maatregelen om de emissie van broeikasgassen verregaand terug te brengen. In dit hoofdstuk geven we een indicatie van hoe de ambities zich verhouden tot elkaar en tot de historische ontwikkeling van CO<sub>2</sub>-uitstoot, door ze in één grafiek naast elkaar te zetten.

### **Internationaal beleid**

De luchtvaart is bij uitstek een grensoverschrijdende markt, zodat nationaal beleid en nationale belastingen voor deze sector al snel leiden tot een concurrentienadeel van de eigen luchthavens en luchtvaartmaatschappijen. Daarom wordt geprobeerd dit beleid internationaal af te stemmen. In internationale afspraken is vastgelegd dat er in de luchtvaart geen accijns wordt geheven op brandstof en dat bij internationale vluchten geen btw op tickets of milieuheffingen in rekening worden gebracht. Voor vluchten binnen de Europese Unie betalen luchtvaartmaatschappijen wel voor emissies die boven het afgesproken plafond in het Europese Emissiehandelssysteem (ETS) vallen. Verder betaalt een Nederlander voor vliegen nog geen prijs waar prikkels tot verduurzaming van uitgaan (Raad voor de leefomgeving en infrastructuur 2019).

In het klimaatakkoord van Parijs wordt anders omgegaan met de luchtvaart dan bijvoorbeeld met de industrie en het wegverkeer. Alleen emissies van de binnenlandse luchtvaart en van de grondgebonden luchtvaartactiviteiten maken deel uit van de nationale bijdrage aan het akkoord. De vluchten binnen Nederland veroorzaken slechts 0,2 procent van de totale emissies van de Nederlandse luchtvaart (Uitbeijerse & Hilbers 2018). Voor het reduceren van de emissies van de internationale luchtvaart verwijst Parijs naar de internationale burgerluchtvaartorganisatie van de Verenigde Naties (ICAO). Ook het internationale maritieme transport hebben de lidstaten 'uitbesteed' aan de internationale maritieme organisatie (IMO). Het verwijzen naar een aanpak door ICAO is daarmee consistent met vergelijkbare UNFCCC-besluiten. ICAO zet in op een pakket van maatregelen<sup>5</sup>, waaronder een systeem voor het compenseren en reduceren van CO<sub>2</sub>-emissies (CORSIA) en een CO<sub>2</sub>-emissie certificeringsnorm voor nieuwe en bestaande vliegtuigtypen<sup>6</sup> (ICAO 2016).

### **Europees beleid**

Hoewel oorspronkelijk de intercontinentale vluchten van en naar Europa ook binnen het Europese Emissiehandelssysteem zouden worden behandeld, zijn deze vluchten hiervan tot 31 december 2023 vrijgesteld (EC 2017). De Europese Commissie plaatst het plafond nu alleen op emissies van intra-Europese vluchten. Het emissieplafond binnen het Emissiehandelssysteem neemt af met 2,2 procent per jaar in de periode van 2021 tot 2030 (EC 2017).

### **Nationaal beleid**

Het ministerie van IenW bereidt op dit moment de Luchtvaartnota 2020-2050 voor, waarin 'slim' en 'duurzaam' de kernbegrippen zijn (IenW 2019a). Het recente Ontwerpakkkoord

---

<sup>5</sup> In eerdere publicaties wordt overheidsbeleid in de luchtvaart besproken, zoals in Uitbeijerse en Hilbers (2018) of Schuur et al. (2018).

<sup>6</sup> De norm bevat twee segmenten van regelgeving: vliegtuigen die nu al in productie zijn, en nieuwe ontwerpen. Vliegtuigen die vanaf 2023 worden geproduceerd, moeten voldoen aan een specifiek wijzigingscriterium. Daarnaast zullen nieuwe ontwerpen voor vliegtuigtypen vanaf 2020 gecertificeerd worden. Vliegtuigen die niet aan de norm voldoen, kunnen na 2028 niet langer worden geproduceerd, tenzij de ontwerpen worden aangepast.



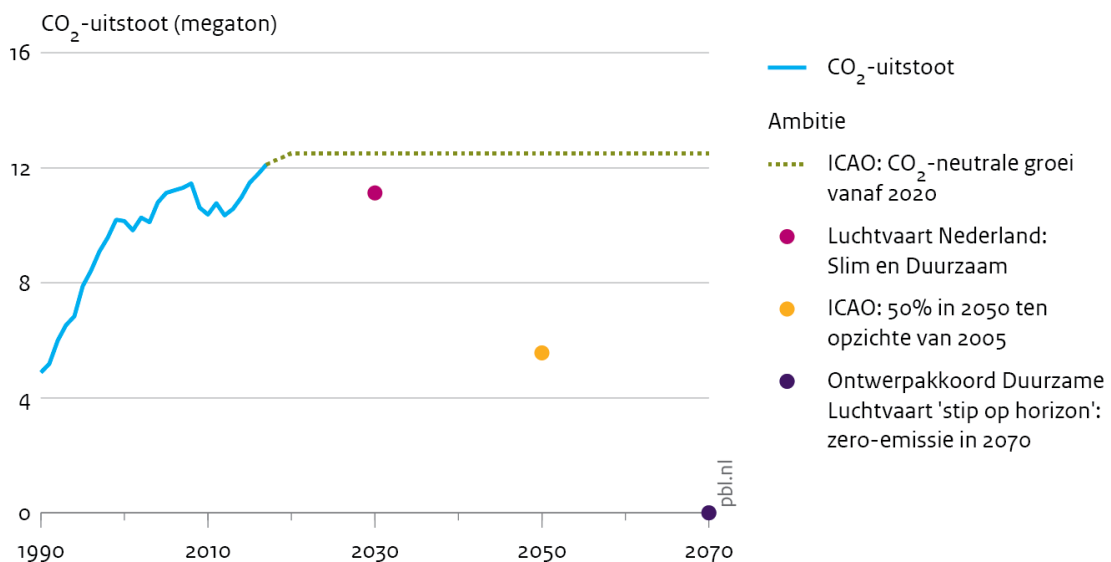
Duurzame Luchtvaart, dat door veel bij de Nederlandse luchtvaart betrokken partijen<sup>7</sup> is overeengekomen, formuleert ambities en afspraken voor zowel de internationale luchtvaart in Nederland als voor de binnenlandse luchtvaart en de grondgebonden luchtvaartactiviteiten (IenW 2019b).

De partijen die zich hebben aangesloten bij het Nederlandse Ontwerpakkoord Duurzame Luchtvaart maken onderscheid tussen concrete, gekwantificeerde CO<sub>2</sub>-reductiedoelstellingen uit het actieplan 'Slim en Duurzaam', waar partijen zich aan willen committeren, en ambities met een inspanningsverplichting. Zo willen de partijen afspreken om in 2030 de CO<sub>2</sub>-emissie van de internationale luchtvaart tot het niveau van 2005 terug te brengen. Daarnaast zijn de partijen een inspanningsverplichting aangegaan om de ICAO-doelstellingen te realiseren, namelijk CO<sub>2</sub>-neutrale groei vanaf 2020 en 50 procent CO<sub>2</sub>-emissiereductie in 2050 ten opzichte van 2005. Ten slotte wordt in het Ontwerpakkoord gestreefd naar een visie voor de lange termijn, waarin luchtvaartactiviteiten geen CO<sub>2</sub> meer produceren.

Figuur 4.1 geeft een indicatie van wat de ambities uit het Ontwerpakkoord voor de emissies van de luchtvaart vanuit Nederland zouden inhouden. Daarbij rekenen we met de CO<sub>2</sub>-uitstoot van de in Nederland getankte kerosine (CBS 2018) en bijbehorende CO<sub>2</sub>-emissiefactor per liter kerosine (RVO 2017). De grafiek laat zien dat de ambities op de lange termijn een forse reductie van de huidige uitstoot vergen.<sup>8</sup> Voor Nederland zouden de ambities inhouden dat de CO<sub>2</sub>-uitstoot van de luchtvaart in 2050 ongeveer op het niveau van 1990 komt, terwijl de Nederlandse klimaatwet tot doel heeft de uitstoot van andere economische sectoren in die periode juist met 95 procent te verminderen.

**Figuur 4.1**

### CO<sub>2</sub>-uitstoot van vluchten vanuit Nederland en indicatie bij bereiken van ambities



Bron: Brandstofafzet (CBS 2018); CO<sub>2</sub>-emissiefactor (RVO 2017); ambities (IenW 2019)

<sup>7</sup> De partijen die mee hebben gewerkt aan het Ontwerpakkoord Duurzame Luchtvaart zijn: de minister van IenW, luchthavens Schiphol Group en Eindhoven Airport, luchtvaartmaatschappijen Corendon, easyJet, KLM, Transavia en TUI, grondafhandelaar Dnata, kennisinstellingen TU Delft en NLR, brancheorganisaties ACN, AOPA, BARIN, evofenedex, KNVvL, LRN, NACA en NVL en overige organisaties Fokker, LVNL, PwC, SkyNRG en VNO-NCW.

<sup>8</sup> De toekomstige CO<sub>2</sub>-emissies van alle vertrekkende vliegtuigen vanuit Nederlandse luchthavens in de WLO-scenario's zijn niet op basis van huidige beschikbare data te bepalen.

In Parijs zijn alleen doelen geformuleerd over de te beperken temperatuurstijging, maar zonder deze te vertalen in een CO<sub>2</sub>-reductie voor landen of economische sectoren (Van Vuuren et al 2016). Landen hebben zelf hun nationale bijdrage geformuleerd en er is een mechanisme afgesproken om regelmatig te beoordelen of de landen zo gezamenlijk goed op weg zijn om het doel te halen, of dat dat tot aanscherpingen zou moeten leiden. De organisatie ICAO ziet de doelstellingen die zij in 2013 heeft geformuleerd voorlopig als de bijdrage van de internationale luchtvaart aan de ambitieuze doelstellingen van het Parijsakkoord (ICAO 2016).

## 5 De gevolgen van het Parijsakkoord

Welk effect zal het hebben op de omvang van de Nederlandse luchtvaart als het klimaatakkoord van Parijs succesvol wordt uitgevoerd en de temperatuurstijging inderdaad tot twee graden Celsius beperkt blijft? In hoofdstuk 2 hebben we weergegeven hoe de luchtvaart via Nederland er in 2030 en 2050 uit kan zien *zonder* het klimaatakkoord van Parijs. We weten dat het klimaatakkoord een ingrijpende, mondiale structuurverandering zal vergen van de economie en van het consumptiegedrag van burgers (Van Vuuren et al. 2016). Hoe de luchtvaart zich in een wereld met stringent klimaatbeleid ontwikkelt, kunnen we alleen indicatief verkennen, voortbouwend op de bestaande omgevingsscenario's van de WLO.

Van Vuuren et al. (2017) stellen dat de mondiale temperatuurstijging alleen met waarschijnlijkheid kan worden beperkt tot twee graden als de uitstoot van CO<sub>2</sub> in 2050 ten opzichte van 1990 geleidelijk wordt gereduceerd met 90-100 procent, en met meer dan 100 procent als de stijging slechts anderhalve graad mag zijn. Ter vergelijking: in Nederland zijn de jaarlijkse CO<sub>2</sub>-emissies tussen 1990 en 2015 ongeveer constant gebleven. Daarbij geven Van Vuuren et al. wel aan dat het om een indicatieve schatting gaat. In het vervolg gaan we ervan uit dat bij het Parijse klimaatakkoord tussen 1990 en 2050 een CO<sub>2</sub>-reductie van 90-100 procent nodig is.

---

### Het klimaatakkoord van Parijs

We veronderstellen in deze verkenning dat de wereld de klimaatafspraken van Parijs nakomt en alle landen zodanig beleid voeren dat de temperatuurstijging onder de twee graden blijft. Dat is niet vanzelfsprekend. Zo zijn het ambitieniveau en internationale samenwerking van groot belang voor de ontwikkeling van het Nederlandse energiesysteem en de Nederlandse broeikasgasemissies (CPB & PBL 2016). De bij het Parijsakkoord aangesloten landen, waaronder Nederland, hebben de internationale klimaatafspraken nog maar in beperkte mate in concrete maatregelen omgezet. In veel sectoren vergt dit beleid een flinke omslag (Van Vuuren et al. 2017). Bij de verdere uitwerking van het klimaatakkoord liggen ook internationale verdelingsvraagstukken voor. Moeten alle landen evenveel aan de maatschappelijke kosten bijdragen? Met andere woorden, moeten zich ontwikkelende landen, waar de uitstoot het meest groeit omdat zij hun ontwikkelingsachterstand aan het inhalen zijn, evenveel inspanning leveren als welvarende landen, die het broeikaseffect hebben doen groeien tot het huidige, problematische niveau (Van Vuuren et al. 2017)?

Bij de schatting van de effecten van het klimaatakkoord van Parijs moeten we rekening houden met allerlei onzekerheden. Hierbij gaat het om het klimaatdoel zelf (ruim onder de twee of anderhalve graad), onzekerheden in het klimaatsysteem (en daarmee de mondiale opgave) en de verdeling van de opgave, maar ook om omstandigheden zoals de economische groei en specifiek de groei van de luchtvaart. Een hogere ambitie, een gevoelig klimaat, sterke groei van economische activiteit, lagere technologische ontwikkeling en minder samenwerking in klimaatbeleid zijn omstandigheden die het moeilijker maken (en dus duurder) om aan het klimaatakkoord te voldoen. Terwijl de omgekeerde omstandigheden het juist makkelijker (en goedkoper) maken).

Eerder is in de WLO onder verschillende omstandigheden bepaald dat de efficiënte CO<sub>2</sub>-prijzen voor een Parijsscenario kunnen liggen tussen 200 en 1.000 euro per ton in 2050 (CPB & PBL 2016b). In het laatste IPCC Assessment (IPCC 2014) worden voor scenario's – overeenkomstig het 'tweegradendoel' – een vergelijkbare kostenrange getoond van circa 100

tot 1.000 euro per ton. Omdat vertraging van het bij Parijs behorende klimaatbeleid de opgave groter maakt en de CO<sub>2</sub>-prijs nog verder doet stijgen, en de meeste scenario's in het IPCC-rapport uitgaan van optimaal klimaatbeleid vanaf 2010, kan worden aangenomen dat de in de WLO genoemde waarden van 200 en vooral 1.000 euro per ton nog steeds indicatief zijn voor het Parijsakkoord.

Daarom zijn deze CO<sub>2</sub>-prijzen hier gebruikt om de effecten op de Nederlandse luchtvaart te berekenen. Hoge CO<sub>2</sub>-prijzen<sup>9</sup> drijven onder andere de kosten van het vliegen en de ticketprijzen op, maar prikkelen ook de richting waarin de innovatie van vliegtuig- en brandstoftechniek zich beweegt. Op hun beurt drukken hogere kosten en prijzen weer de vraag naar luchtvaart en naar bestemmingen, afhankelijk van de prijsgevoeligheid van de reiziger en zijn reismotief. Luchthavens en luchtvaartmaatschappijen zullen op deze veranderingen in de markt reageren door te innoveren en hun netwerk van verbindingen aan te passen.

In een scenario waarin de wereld werkt aan realisatie van de doelen van 'Parijs' kunnen duurzame brandstoffen in een deel van de energievraag van de luchtvaart voorzien. Bij het bepalen van de efficiënte CO<sub>2</sub>-prijzen zijn namelijk kosten voor onbekende toekomstige vliegtuigtechnologie en alternatieve vloeibare brandstoffen meegenomen. Hoeveel en welke van deze technologie wordt ingezet in de CO<sub>2</sub>-prijs van 200 of 1.000 euro per ton is niet vast te stellen. De luchtvaart zal net als de andere sectoren bij elke stijging van de CO<sub>2</sub>-prijs een afweging maken tussen de inzet van duurzame brandstoffen, compensatie (door de financiering van emissiereductie in andere sectoren of projecten elders) of aankoop van emissierechten, waardoor de CO<sub>2</sub>-prijs een afspiegeling vormt van de meerprijs van alternatieve brandstoffen ten opzichte van de prijs voor fossiele kerosine. De kosten daarvan worden via de ticketprijs door de reiziger betaald. Als de luchtvaart de CO<sub>2</sub>-reductie niet zelf realiseert, zullen de luchtvaartmaatschappijen de reductie in andere economische sectoren realiseren door compensatie of aankoop van emissierechten.

Om recht te doen aan de onzekerheden, bespreken we in het volgende hoofdstuk een aantal 'Parijsscenario's', steeds bij andere omstandigheden. De wijzigende omstandigheden beschrijven we aan de hand van drie variabelen: de efficiënte CO<sub>2</sub>-prijs in 2050, de toename van de energie-efficiëntieverbetering (zie tekstkader) en de groei van bevolking en economie. De eerste twee variabelen komen samen in de ticketprijs (zie bijlage B). Hogere economische en bevolkingsgroei verhogen de passagiersvraag, omdat meer mensen meer te besteden hebben. Een hogere CO<sub>2</sub>-prijs wordt geheel verrekend in de ticketprijs, waardoor de vraag kleiner wordt. Hogere energie-efficiëntie verlaagt het brandstofverbruik. De lagere kosten voor brandstof en CO<sub>2</sub>-uitstoot maken vliegen weer goedkoper.

Bij al deze scenario's is het uitgangspunt dat de temperatuur in ieder geval niet meer dan twee graden stijgt. De bandbreedte tussen de scenario's omvat globaal de onzekerheid over de gevolgen van het Parijsakkoord voor de Nederlandse luchtvaartvolumes.

---

<sup>9</sup> Uitgangspunt is dat de kosten die voortvloeien uit de CO<sub>2</sub>-prijs volledig worden doorberekend in de ticketprijzen voor passagiers. Als luchtvaartmaatschappijen niet in staat of bereid zijn om de CO<sub>2</sub>-kosten aan passagiers door te berekenen, zou de CO<sub>2</sub>-prijs geen invloed hebben op de volumes. De toename van ticketprijzen door de CO<sub>2</sub>-prijzen wordt gedempt door een snellere ontwikkeling van de brandstofefficiëntie en een kleinere stijging van de olieprijs.

## Verbetering van de energie-efficiëntie van vliegen

Technologische ontwikkeling in duurzame technologie kan zich manifesteren in de luchtvaart, net als in andere sectoren. Het is bijvoorbeeld mogelijk dat vliegtuigen minder energie nodig hebben voor het bereiken van dezelfde bestemmingen. Dat kan door kortere routes te vliegen of met andere operationele maatregelen, vliegtuigmotoren kunnen zuiniger worden en een structureel ander ontwerp van het vliegtuig kan het aerodynamischer maken (NLR 2019). Dat levert een besparing op op de benodigde energie voor het vliegen (joule per passagierskilometer). De meeste vliegtuigen vliegen op fossiele brandstof, maar in de toekomst zijn meer elektrische vliegtuigen of vliegtuigen met andere energiebronnen als waterstof mogelijk. Daarom spreken we van *energiegebruik* en van *energie-efficiëntieverbetering* als er minder energie per reizigerskilometer nodig is om het vliegtuig voort te sturen.

Voor de bandbreedte van deze parameter<sup>10</sup> hebben we een paar overwegingen. De gemiddelde mondiale energie-efficiëntieverbetering over 1968 tot 2014 was volgens het ICCT 1,3 procent per jaar bij nieuwe vliegtuigen (2015). Door de groei van de luchtvaart versnelt de vernieuwing van het vliegtuigpark, waardoor de gemiddelde CO<sub>2</sub>-uitstoot per passagierskilometer daalt. De toekomstige innovatiesnelheid en de verlaging van het energiegebruik zijn onzeker. De literatuur laat een grote bandbreedte zien: langzame, stapsgewijze ontwikkeling van de vloot komt neer op gemiddeld 0,6 procent zuiniger per jaar, maar radicale innovatie kan leiden tot een gemiddelde efficiëntieverbetering van 1,5 procent per jaar tot 2050 (ICAO 2016; IATA 2018). De lidstaten binnen de VN-burgerluchtvaartorganisatie ICAO streven zelfs naar een verbetering van 2 procent per jaar (ICAO 2016). Basisscenario Hoog rekent met 1 procent jaarlijkse energie-efficiëntieverbetering van de vloot, terwijl scenario Laag uitgaat van een gematigde verbetering met 0,6 procent.

**Tabel 5.1** Verschillende Parijsscenario's

	Korte omschrijving	CO <sub>2</sub> -prijs in 2050	Jaarlijkse energie-efficiëntieverbetering	Economische en bevolkingsontwikkeling (basisscenario)	Paragraaf
1	Hoge CO <sub>2</sub> -prijs in hoge economische en bevolkingsgroei	1.000 euro per ton	1%	Hoog	6.1
2	Matige CO <sub>2</sub> -prijs in hoge economische en bevolkingsgroei	200 euro per ton	1%	Hoog	6.2
3	Hoge CO <sub>2</sub> -prijs en hoge efficiëntieverbetering in hoge economische en bevolkingsgroei	1.000 euro per ton	2%	Hoog	6.3
4	Lage economische groei en matige CO <sub>2</sub> -prijs	200 euro per ton	0,6%	Laag	6.4
5	Lage economische groei en hoge CO <sub>2</sub> -prijs	1.000 euro per ton	0,6%	Laag	6.4

<sup>10</sup> Bij de verschillende Parijsscenario's is de snelheid van vlootvernieuwing niet gewijzigd. Aannames over de verbetering van de energie-efficiëntie van vliegtuigen zijn verwerkt in de brandstofcomponent van de ticketprijzen en achteraf in de berekening van de energiegebruiken (zie bijlage B).

Niet alle gevolgen van de klimaatscenario's zijn doorgerekend. Zo zullen wellicht verschuivingen in internationale handelsnetwerken optreden die het vliegverkeer beïnvloeden, kan het consumptiepatroon verschuiven met gevolgen voor de luchtvracht (streekproducten, minder vlees) of kan de algemene attitude jegens vliegreizen veranderen. Zulke effecten zijn niet meegenomen. De effecten op de luchtvracht presenteren we niet, omdat die juist sterk zou reageren op geografische verschuivingen in de internationale handel en veranderingen in inkomen.

## 6 Gevolgen voor prijzen, passagiers en vluchten in Nederland

Wat zou dit stringente internationale klimaatbeleid voor effect hebben op factoren die relevant zijn voor de personenluchtvaart? We laten dat in paragraaf 6.1 zien in Parijsscenario 1 met een succesvol mondiaal 'tweegradenbeleid', met een hoge economische groei, een hoge CO<sub>2</sub>-prijs en matige technologische ontwikkeling. Daarna worden andere omstandigheden besproken in scenario's 2 tot en met 5: met een andere CO<sub>2</sub>-prijs, een hogere jaarlijkse brandstofefficiëntieverbetering en/of met een lagere economische groei (paragraaf 6.2 tot en met 6.4). We vergelijken steeds het zichtjaar 2050 met het basisjaar 2017, tenzij anders vermeld.

### **Ticketprijzen anderhalf tot twee keer zo hoog in 2050**

In basisscenario Hoog, dus zonder Parijs, maar wel met klimaatbeleid (zie hoofdstuk 2), blijft de ticketprijs in 2050 ongeveer gelijk aan die in 2017 (tabel 6.1). In basisscenario Laag is de ticketprijs ongeveer 23 procent hoger, vanwege de hoge brandstofkosten (zie bijlage B voor de gemiddelde ticketprijzen). Met Parijs liggen de ticketprijzen in 2050 circa anderhalf tot twee keer zo hoog als in 2017. Dit komt door de verrekening van de hoge CO<sub>2</sub>-prijs in de ticketprijzen. Bedenk hierbij wel dat alle prijsverhoudingen in 2050 zullen wijzigen en dus moeilijk vergelijkbaar zijn met het heden. Fossiel-intensieve producten zullen duur worden in verhouding tot diensten en goederen waarbij tijdens de productie geen of weinig broeikasgassen vrijkomen.

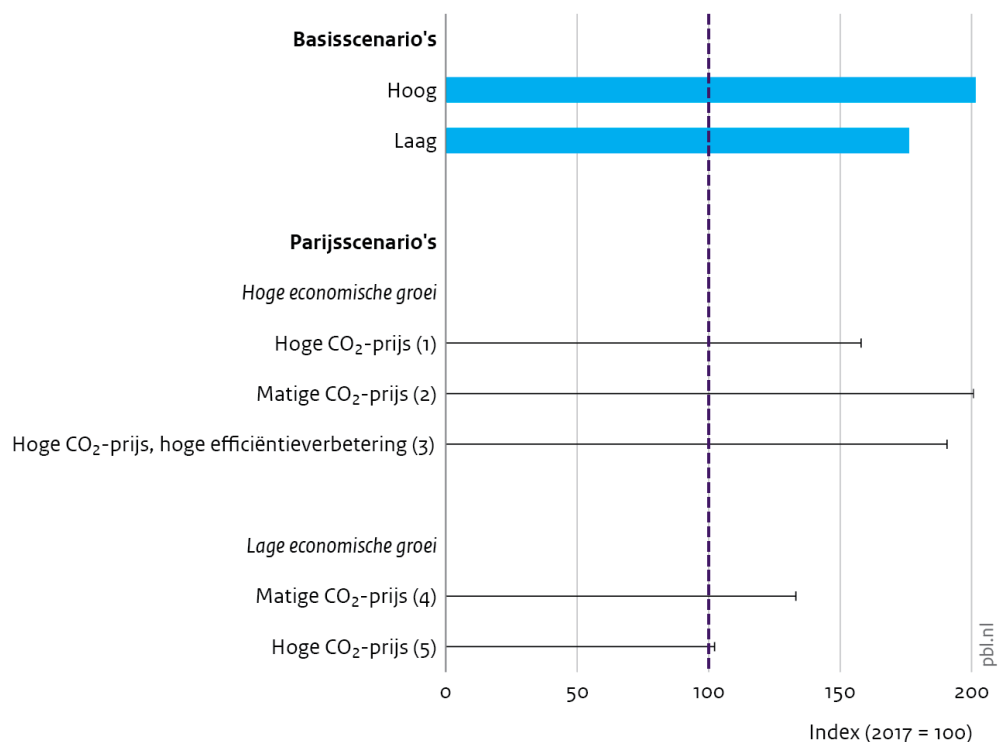
**Tabel 6.1**

**Gemiddelde ticketprijzen in Parijsscenario's (in prijzen van nu, afgerond op 5 euro)**

	Scenario's	Euro per passagier	Index 2017=100
2017		€ 180	100
2050	Basisscenario Hoog	€ 190	107
	Basisscenario Laag	€ 220	123
1	Hoge CO <sub>2</sub> -prijs bij hoge economische en bevolkingsgroei	€ 340	189
2	Matige CO <sub>2</sub> -prijs bij hoge economische en bevolkingsgroei	€ 200	111
3	Hoge CO <sub>2</sub> -prijs en hoge efficiëntieverbetering bij hoge economische en bevolkingsgroei	€ 275	154
4	Lage economische groei en matige CO <sub>2</sub> -prijs	€ 220	123
5	Lage economische groei en hoge CO <sub>2</sub> -prijs	€ 225	127

Tabel 6.2 en figuur 6.1 tonen de gevolgen van de verschillende Parijsscenario's voor het verwachte aantal vluchten en het aantal passagiers dat in 2050 gebruikmaakt van Nederlandse luchthavens. De verschillende Parijsscenario's laten een bandbreedte zien van nulgroei en verdubbeling van het aantal passagiers in 2050. In alle scenario's stijgt het aantal passagiers meer dan het aantal passagiersvluchten door een hogere bezettingsgraad en grotere toestellen. De Parijsscenario's worden hierna besproken in afzonderlijke paragrafen. De set van Parijsscenario's die zo ontstaat, geeft een indruk van de bandbreedte in de verwachte omvang van vluchten en passagiers, als gevolg van de onzekerheid die de toekomst met zich brengt.

**Figuur 6.1**  
**Aantal passagiers via Nederlandse luchthavens in 2050**



Bron: PBL

**Tabel 6.2** **Indicatieve luchtvaartvolumes in 2050**

	Index 2017=100	Passagiersvluchten via Nederlandse luchthavens (na restricties)	Passagiers via Nederlandse luchthavens (na restricties)	Energiegebruik <sup>11</sup> vluchten van passagiers via Nederlandse luchthavens (zie 6.3)
<b>Basisscenario's</b>				
	Hoog	171	202	140
	Laag	148	176	150
<b>Parijsscenario's</b>				
1	Hoge CO <sub>2</sub> -prijs bij hoge economische en bevolkingsgroei	131	158	121
2	Matige CO <sub>2</sub> -prijs bij hoge economische en bevolkingsgroei	170	201	141
3	Hoge CO <sub>2</sub> -prijs en hoge efficiëntieverbetering bij hoge economische en bevolkingsgroei	159	191	106
4	Lage economische groei en matige CO <sub>2</sub> -prijs	111	133	131
5	Lage economische groei en hoge CO <sub>2</sub> -prijs	85	102	87

<sup>11</sup> Onder dit energiegebruik verstaan we de totale energie (joule) die het kost om een vlucht uit te voeren, zonder een uitspraak te doen over de opwekking van deze energie of brandstof.



Het energiegebruik van de luchtvaart zal in drie van de vijf Parijsscenario's toenemen. Duurzame brandstoffen kunnen in een deel van deze energievraag van de luchtvaart voorzien. Welk aandeel duurzame brandstoffen bij de realisatie van de Parijdoelen zou kunnen worden ingezet, kunnen we aan de hand van de CO<sub>2</sub>-prijzen niet laten zien.

### **In de Parijsscenario's blijft de vraag veelal binnen de capaciteitsrestricties**

In basisscenario Hoog is de vraag naar vliegen groter dan de afspraken over de belasting van de omgeving van Schiphol en van de andere regionale luchthavens toestaan. Het aantal passagiers en vluchten wordt daardoor dus beperkt. In de Parijsscenario's blijft de vraag wel binnen de afgesproken capaciteitsrestricties, met uitzondering van Parijsscenario 2 met de matige CO<sub>2</sub>-prijs. Door de hoge ticketprijzen in deze Parijsscenario's daalt de vraag namelijk zo sterk dat bijna alle passagiers die bijvoorbeeld via Schiphol willen reizen dat ook kunnen, terwijl in het basisscenario Hoog bijna aan een derde van de vraag niet voldaan kan worden.

**Tabel 6.3**      **Indicatieve luchtvaartvolumes voor en na restricties in 2050<sup>12</sup>**

	<b>Index 2017=100</b>	<b>Passagiersvraag via Nederlandse luchthavens (voor restricties)</b>	<b>Passagiers via Nederlandse luchthavens (na restricties)</b>
	<b>Basisscenario's</b>		
	Hoog	266	202
	Laag	176	176
	<b>Parijsscenario's</b>		
1	Hoge CO <sub>2</sub> -prijs bij hoge economische en bevolkingsgroei	158	158
2	Matige CO <sub>2</sub> -prijs bij hoge economische en bevolkingsgroei	257	201
3	Hoge CO <sub>2</sub> -prijs en hoge efficiëntieverbetering bij hoge economische en bevolkingsgroei	189	191
4	Lage economische groei en matige CO <sub>2</sub> -prijs	132	133
5	Lage economische groei en hoge CO <sub>2</sub> -prijs	100	102

## **6.1 Parijs 1: Hoge CO<sub>2</sub>-prijs bij hoge economische groei**

In het eerste scenario worden de doelen van Parijs gehaald in een omgeving waarin de economie (met 2 procent per jaar) en bevolking sterk groeien. Ook technologie blijft zich goed ontwikkelen in alle sectoren. Zo komen er zuinigere en schonere vliegtuigen in de vloot, met een gemiddelde energie-efficiëntieverbetering van 1 procent per jaar. Er ontstaat een goedgeorganiseerd luchtruim, waardoor vliegtuigen een optimale route kunnen vliegen. De productie van duurzame brandstoffen komt op gang. De maatregelen die in alle sectoren van de economie worden genomen om emissies te verminderen leiden tot hoge kosten, en dat weerspiegelt zich in de hoge mondiale CO<sub>2</sub>-prijs van 1.000 euro per ton. Deze CO<sub>2</sub>-prijs is

<sup>12</sup> Door de functie van Lelystad als overloopluchthaven van Schiphol, ontstaat een extra keuzemogelijkheid voor passagiers in de situatie ná restrictie, die kan leiden tot een kleine toename van de vraag als restricties net knellend zijn. Hierdoor ontstaan kleine verschillen tussen de passagiersvraag voor restricties en het aantal passagiers na restricties.

verwerkt in de ticketprijs, die daardoor voor de verschillende passagiersgroepen stijgt met ongeveer 50 tot 90 procent.

### **Volume groei wordt gedempt**

In het eerste Parijsscenario blijft de luchtvaart nog groeien, maar de groei wordt wel gedempt. In het basisscenario Hoog zou de gemiddelde jaarlijkse passagiersgroei via Nederlandse luchthavens tot 2050 2,1 procent bedragen. In Parijsscenario 1 met 1.000 euro per ton CO<sub>2</sub> stijgt het aantal passagiers met gemiddeld 1,5 procent per jaar. De totale groei tussen 2017 en 2050 is dan bijna 60 procent (zie ook figuur 6.1). Er zullen minder mensen gaan vliegen en zij zullen duurder uit zijn. Dit leidt wel tot een afname van het energiegebruik ten opzichte van basisscenario Hoog.

Het totale aantal vluchten op Nederlandse luchthavens neemt met het stringente klimaatbeleid toe met circa 33 procent. Dat is een stuk minder dan in de basisscenario's zonder Parijsakkoord (48 tot 71 procent). In de jaren na 2030 worden alleen bij Schiphol en Lelystad capaciteitsrestricties verondersteld, waardoor het aantal vluchten op Schiphol tot 2050 met 51 procent groeit. In het basisscenario stijgt het aantal vluchten van en naar de andere drie regionale luchthavens juist sterk doordat een deel van de passagiers hiernaar uitwijkt (afhankelijk van de luchthaven varieert deze groei tussen de 130 tot 200 procent in Hoog). In het Parijsscenario zijn de verschillen in groei tussen de regionale luchthavens en Schiphol veel kleiner (25 procent bij Schiphol versus 34 tot 74 procent bij regionale luchthavens). Dat komt doordat de hogere prijzen de groei van de passagiersvraag dempen en restricties daardoor minder effect hebben.

**Tabel 6.4 Parijsscenario 1: indicatieve luchtvaartvolumes in 2050**

	<b>Index 2017=100</b>	<b>Passagiersvluchten via Nederlandse luchthavens (na restricties)</b>	<b>Passagiers via Nederlandse luchthavens (na restricties)</b>
	Basisscenario Hoog	171	202
1	Hoge CO <sub>2</sub> -prijs bij hoge economische en bevolkingsgroei	131	158

### **Parijsakkoord beïnvloedt ook type reizigers via Nederlandse luchthavens**

In het Parijsscenario verandert niet alleen het aantal reizigers via Nederlandse luchthavens, maar ook het type reiziger. Zowel de grootte van de reizigerssegmenten als hun onderlinge verhouding verschuift. De segmenten die wij onderscheiden hebben betrekking op de zone van herkomst en bestemming (in Europa of op andere continenten), de reden waarom mensen vliegen (motief), en of het gaat om mensen met een directe vlucht naar de eindbestemming of om overstappers (transferpassagiers).

Het grootste deel van de passagiers (twee derde van het totaal in 2017) zijn mensen die vertrekken of aankomen in Nederland (Origin-destination- of OD-passagiers), de rest stapt via Schiphol over op een ander vliegtuig. In het basisscenario Hoog is de passagiersvraag groter dan past binnen de capaciteitsrestricties van de luchthavens. Transferpassagiers zullen uitwijken naar luchthavens waar de druk op de capaciteit (schaarste) minder snel groeit. Het aandeel OD-passagiers stijgt in dat basisscenario tot driekwart.

Bij het Parijsakkoord zorgt de hoge CO<sub>2</sub>-prijs in scenario 1 voor een forse ticketprijsverhoging. Deze prijsstijging remt de groei van de passagiersvraag op Schiphol zodanig dat alle vraag nu wel binnen de capaciteit past. Omdat de tickets overall in de wereld

duurder worden, hebben transferpassagiers geen reden om via een andere luchthaven over te stappen. Het aandeel transferpassagiers op Schiphol blijft dus globaal gelijk aan 2017. Tenzij bij concurrerende hubluchthavens de druk op de capaciteit relatief minder groeit dan op Schiphol en de kosten daar dalen.

**Tabel 6.5 Parijsscenario's: verhouding passagiers van en naar Nederlandse luchthavens en transferpassagiers na restricties**

	<b>Index totaal aantal passagiers van 2017 = 100</b>	<b>OD-passagiers (passagiers van en naar Nederlandse luchthavens)</b>	<b>Transferpassagiers</b>	<b>Totaal aantal passagiers van, naar en via Nederlandse luchthavens</b>	<b>Aandeel OD-passagiers</b>
2017		67	33	100	67%
	<b>Basisscenario's</b>				
2050	Hoog	155	46	202	77%
	Laag	113	63	176	64%
	<b>Parijsscenario's</b>				
1	Hoge CO <sub>2</sub> -prijs e bij hoge economische en bevolkingsgroei	104	54	158	66%
2	Matige CO <sub>2</sub> -prijs bij hoge economische en bevolkingsgroei	152	49	201	76%
3	Hoge CO <sub>2</sub> -prijs en hoge efficiëntieverbetering bij hoge economische en bevolkingsgroei	126	64	191	66%
4	Lage economische groei en matige CO <sub>2</sub> -prijs	85	48	133	64%
5	Lage economische groei en hoge CO <sub>2</sub> -prijs	65	37	102	63%

Bij OD-passagiers is in dit Parijsscenario een kleine verandering in de verhouding tussen zakelijke en niet-zakelijke reizigers te zien. Het aandeel recreatieve reizigers zakt van bijna driekwart in 2017 naar onder de 60 procent. Reizigers voor een vakantie of familiebezoek zijn gevoeliger voor prijsstijgingen dan zakelijke reizigers. Doordat zakenreizigers doorgaans meer betalen voor hun reis dan recreatieve reizigers, is het aandeel CO<sub>2</sub>-kosten in de ticketprijzen bovendien hoger voor recreatieve reizigers.

De verhouding tussen het aantal Europese passagiers en het aantal intercontinentale passagiers dat naar of uit Nederland vliegt (OD-passagiers) blijft ongeveer gelijk in dit Parijsscenario. Meer dan driekwart van de OD-passagiers vliegt binnen Europa. De bestemmingen worden naar verwachting grotendeels bepaald door algemene omgevingsvariabelen, zoals de wereldhandel en groei van het bruto binnenlands product.

## 6.2 Parijs 2: Matige CO<sub>2</sub>-prijs bij hoge economische groei

Wat als de kosten van de maatregelen die klimaatverandering tegengaan meevallen? Bijvoorbeeld omdat innovatie in duurzame technologie door een technologische doorbraak soepel verloopt, waardoor de mondiale CO<sub>2</sub>-uitstoot per jaar lager is dan in scenario 1 en er meer tijd is om de benodigde CO<sub>2</sub>-reductie te halen? Zo kan het zijn dat de opslag van energie (bijvoorbeeld batterijen) en CO<sub>2</sub> veel goedkoper wordt. Ook zou de opschaling van de productie van alternatieve brandstoffen of biomassa sneller kunnen gaan, waardoor vraag en aanbod in balans komen zonder de prijzen enorm op te stuwen. Bij dit scenario (2) zit de CO<sub>2</sub>-prijs aan de onderkant van de bandbreedte van 200 tot 1.000 euro. De ticketprijzen, de markteffecten en volumes lijken op die in basisscenario Hoog, maar de mondiale CO<sub>2</sub>-reductie die bij deze combinatie van klimaatbeleid en CO<sub>2</sub>-prijs hoort is veel hoger.

**Tabel 6.6 Parijsscenario 2: indicatieve luchtvaartvolumes in 2050**

	<b>Index 2017=100</b>	<b>Passagiersvluchten via Nederlandse luchthavens (na restricties)</b>	<b>Passagiers via Nederlandse luchthavens (na restricties)</b>
	Basisscenario Hoog	171	202
1	Hoge CO <sub>2</sub> -prijs bij hoge economische en bevolkingsgroei	131	158
2	Matige CO <sub>2</sub> -prijs bij hoge economische en bevolkingsgroei	170	201

## 6.3 Parijs 3: Hogere jaarlijkse verbetering van energie-efficiëntie

Een voorspoedige technologische ontwikkeling van duurzame technologie kan in de luchtvaart leiden tot een hoge energie-efficiëntie. Omdat de wereldwijde innovatie in andere duurzame technologieën minder snel gaat en de innovaties hoge investeringen vragen, is de mondiale CO<sub>2</sub>-prijs in het derde scenario nog steeds hoog. Dankzij radicale innovaties, zoals een nieuwe vliegtuigstructuur en grote verbeteringen in het vliegtuigoperaties in het luchtruim en op luchthavens is het denkbaar dat energiebesparingen tot 2 procent per jaar worden behaald tot 2050 (zie het laatste tekstkader in hoofdstuk 5).

Een snelle ontwikkeling van de energie-efficiëntie is niet onwaarschijnlijk in een Parijsscenario. Investeringen in de komende tien jaar bepalen voor een groot deel hoe het Nederlandse energiesysteem er in 2050 uitziet. Het is daarom nodig dat er voldoende wordt geïnvesteerd in innovatieve technieken die op korte termijn nog relatief duur zijn, maar op de lange termijn onmisbaar om het klimaatdoel te kunnen halen. Dit zijn veelal nieuwe technieken, waarbij ook nieuwe infrastructuur, aangepaste regels, andere organisaties en soms zelfs andere gewoonten nodig zijn (Van Vuuren et al. 2016). Zonder krachtig beleid gaat dat niet lukken. Dit blijkt uit eerdere analyses van het PBL, onder andere in het rapport *Opties voor energie- en klimaatbeleid* (PBL 2016).

De ticketprijzen worden in dat geval iets lager door de lagere kosten van CO<sub>2</sub> en energie. In scenario 3 veronderstellen we een hogere efficiëntieverbetering van 2 procent per jaar. Dit leidt tot hogere passagiersvolumes dan in scenario 1, waar 1 procent groei is verondersteld (zie figuur 6.1). In scenario 3 stijgt het totale energiegebruik van vliegtuigen voor het vervoeren van passagiers via Nederlandse luchthavens tot iets boven het niveau van 2017. In scenario 1 was dat 20 procent meer. Hoeveel CO<sub>2</sub>-emissies dit energiegebruik tot gevolg

heeft, hangt af van welke energiebron of brandstof wordt gebruikt. Bij de aanname over de energie-efficiëntie doen we daarover geen uitspraak.

**Tabel 6.7 Parijsscenario 3: indicatieve luchtvaartvolumes en energiegebruik in 2050**

	<b>Index 2017=100</b>	<b>Passagiersvluchten via Nederlandse luchthavens (na restricties)</b>	<b>Passagiers via Nederlandse luchthavens (na restricties)</b>	<b>Energiegebruik vluchten van passagiers via Nederlandse luchthavens</b>
	Basisscenario Hoog	171	202	140
1	Hoge CO <sub>2</sub> -prijs bij hoge economische en bevolkingsgroei	131	158	121
3	Hoge CO <sub>2</sub> -prijs en hoge efficiëntieverbetering bij hoge economische en bevolkingsgroei	159	191	106

## 6.4 Parijs 4 en 5: Lagere economische ontwikkeling en internationale handel

In de vorige Parijsscenario's zijn de omstandigheden van het basisscenario Hoog verondersteld in combinatie met een emissiehandelssysteem en hoge CO<sub>2</sub>-prijzen. Een lagere economische groei is ook denkbaar. Dat zal effect hebben op de bestedingsruimte van consumenten, en daarmee op de neiging om te vliegen. Het is bijvoorbeeld aannemelijk dat mensen eerder besluiten om niet, minder ver of met een ander vervoermiddel op reis te gaan. We veronderstellen dat de energie-efficiëntieverbetering als gevolg van de algemene trage technologische innovatie dan zeer matig is, namelijk 0,6 procent jaarlijkse verbetering tot en met 2050, zoals in basisscenario Laag.

Voor een scenario met minder gunstige economische omstandigheden dan Hoog is geen aparte CO<sub>2</sub>-prijs berekend die past bij het Parijsakkoord. Daarom nemen we dezelfde range van 200 tot 1.000 euro per ton en schetsen globaal de mogelijke effecten van deze CO<sub>2</sub>-prijzen. Wanneer een CO<sub>2</sub>-prijs van 200 euro per ton wordt aangenomen, dus 160 euro hoger dan in het basisscenario Laag, dan is de passagiersgroei 0,9 procent per jaar in plaats van 1,7 procent, en stijgt het passagiersaantal met 33 procent ten opzichte van 2017.

Alleen als de hoge CO<sub>2</sub>-prijs van 1.000 euro per ton CO<sub>2</sub> wordt gecombineerd met de demografie en economie van basisscenario Laag, is het aantal passagiers in 2050 ongeveer even groot als in 2017 (zie ook figuur 6.1). Net als in alle andere Parijsscenario's stijgt het aantal passagiers per vlucht door een hogere bezettingsgraad en grotere toestellen. Het aantal vliegbewegingen voor passagiers neemt ten opzichte van het basisjaar af met ongeveer 12 procent.

Kanttekening is dat een andere economische ontwikkeling mondiaal verregaande gevolgen kan hebben voor andere invloedrijke variabelen die in deze studie niet zijn meegenomen. Mogelijke verschuivingen in internationale handel en handelsrelaties maken wellicht andere (of minder) bestemmingen aantrekkelijker voor zakenreizigers, waardoor het netwerk kan veranderen. Minder of andere handel heeft grote invloed op de hoeveelheden en type te vervoeren producten. Dat werkt natuurlijk door in het vrachtvervoer via de lucht, waarover

in deze studie geen uitspraken worden gedaan, maar ook in het passagiersvervoer als het om zakenreizen gaat.

**Tabel 6.8 Parijsscenario's 4 en 5: indicatieve luchtvaartvolumes in 2050**

	<b>Index 2017=100</b>	<b>Passagiersvluchten via Nederlandse luchthavens (na restricties)</b>	<b>Passagiers via Nederlandse luchthavens (na restricties)</b>
	Basisscenario Laag	148	176
4	Lage economische groei en matige CO <sub>2</sub> -prijs	111	133
5	Lage economische groei en hoge CO <sub>2</sub> -prijs	85	102

## 7 Conclusies voor de Luchtvaartnota

We hebben geschetst wat het akkoord van Parijs over 30 jaar voor gevolgen zou kunnen hebben voor de omvang van de Nederlandse personenluchtvaart. Door de grote onzekerheden in de relevante factoren moeten de resultaten voorzichtig geïnterpreteerd worden.

Naar verwachting zullen de Nederlandse luchtvaartvolumes ook in een wereld waarin het Parijsakkoord wordt nageleefd tussen 2017 en 2050 blijven groeien. Alleen als de economische, demografische en technologische ontwikkelingen tegenvallen en de geopolitieke samenwerking niet van de grond komt, zou de (efficiënte) prijs van CO<sub>2</sub> dermate kunnen stijgen dat de groei van de Nederlandse luchtvaart stabiliseert. Dit is overigens een wereld waarin het Parijsakkoord alleen met zeer grote inspanning uitgevoerd kan worden.

De passagiersvraag zal waarschijnlijk blijven toenemen, ook al worden de ticketprijzen door de verrekening van de CO<sub>2</sub>-prijs een stuk hoger. De tickets van transferpassagiers worden sneller duurder dan de tickets voor OD-passagiers, omdat de uitstoot van de tussenlanding extra kosten geeft. Vliegtuigmaatschappijen zouden om CO<sub>2</sub>-kosten te besparen een deel van de overstapvluchten kunnen vervangen door directe vluchten. Door hybride toestellen in te zetten om tijdens de starts en landingen elektrisch te vliegen, zouden zij de CO<sub>2</sub>-kosten van de tussenstop van de transferpassagiers ook kunnen verlagen.

Zonder Parijsakkoord zijn er meer mensen die willen vliegen dan past op de luchthavens, waardoor er schaarste ontstaat. Transferpassagiers zijn minder gebonden aan een luchthaven dan OD-passagiers en zullen daardoor eerder uitwijken naar andere luchthavens. In een Parijsscenario met hogere ticketprijzen is de toename van de passagiersvraag zodanig beperkt dat deze past binnen de capaciteitsrestricties.

Voor transferpassagiers heeft uitwijken naar andere hubs dan weinig zin, want ook daar moeten de mondiale CO<sub>2</sub>-prijzen betaald worden. De positie van de hub Schiphol hoeft dus niet direct onder het klimaatverdrag te lijden, en zou zelfs kunnen verbeteren ten opzichte van andere luchthavens die in het algemeen (nu ook al) te maken hebben met capaciteitsrestricties.

## 8 Reflectie op de verkenning

Bij onze berekeningen bouwen we voort op de beperkte kennis die inmiddels over de mogelijke gevolgen van 'Parijs' beschikbaar is. We maken daarbij gebruik van het luchtvaartmodel AEOLUS. Door consistent te redeneren vanuit de systematiek van de WLO-scenario's en het AEOLUS-model komen we, met de best beschikbare kennis op dit moment, tot een bandbreedte die de onzekere effecten voor de Nederlandse luchtvaart beschrijft. We sluiten daarom af met een reflectie op de beperkingen van deze verkenning.

### **Twee graden en CO<sub>2</sub>-reductie**

In deze studie zijn we ervan uitgegaan dat de mondiale temperatuur niet meer dan twee graden mag stijgen. Dat betekende dat we de twee gradenvariant van de WLO als startpunt konden nemen van onze redeneerlijn. Maar de ambitie in het Parijsakkoord gaat verder: het beperken van de temperatuurstijging tot een niveau duidelijk *onder* de twee graden en streven naar een maximale stijging van anderhalve graad (Van Vuuren et al. 2016). Dat kan betekenen dat de CO<sub>2</sub>-uitstoot zelfs met meer dan 95 procent moet afnemen; bij een maximum van 1,5 graden zelfs met meer dan 100 procent (via opslag van CO<sub>2</sub> of extra absorptie). De efficiënte prijs van CO<sub>2</sub> kan dan nog verder stijgen, en zal daardoor waarschijnlijk een extra druk op het volume van de Nederlandse luchtvaart leggen.

### **CO<sub>2</sub>-prijzen**

De invulling van toekomstig internationaal klimaatbeleid is uiteraard nog niet bekend. In de praktijk zal de CO<sub>2</sub>-prijs zich niet ontwikkelen volgens het optimale, economisch meest efficiënte pad. Beleidsmaatregelen worden trager genomen, zijn internationaal nog niet zo afgestemd. Voor het optimale pad zou de CO<sub>2</sub>-prijs nu al op een waarde van 60 euro per ton CO<sub>2</sub> moeten liggen (CPB & PBL 2016). In werkelijkheid is deze in mei 2019 nog maar 26 euro per ton in het Europese Emissiehandelssysteem (EEX 2019). Elke afwijking van het efficiënte CO<sub>2</sub>-prijspad leidt tot hogere kosten om alsnog de ambitie van Parijs te kunnen behalen (Aalbers et al. 2016). Ook in dit geval zullen de CO<sub>2</sub>-prijzen dus hoger uitvallen dan in onze Parijsscenario's.

### **Na 2050**

In deze studie kijken we ver vooruit, naar 2050. Maar wat is te voorzien voor de luchtvaart daarna? Aanname is dat ook na 2050 het mondiale emissiehandelssysteem van het Parijsscenario blijft bestaan. De hogere CO<sub>2</sub>-prijs heeft de innovatie in emissiezuinige luchtvaarttechnologie gestimuleerd en de uitstoot van de sector teruggedrongen. Voor zover de luchtvaart nog CO<sub>2</sub> uitstoot, gebeurt dit tegen kosten waartegen deze CO<sub>2</sub> elders in de wereld en in andere sectoren nog iets goedkoper kan worden verminderd. Gezien de grote onzekerheid, vooral over de energiehuishouding, gaan we verder niet in op deze verre toekomst.

### **Geopolitieke samenwerking**

Elk Parijsscenario veronderstelt dat landen internationaal samenwerken om het afgesproken klimaatbeleid af te stemmen en effectief uit te voeren door een mondiaal emissiehandelssysteem te realiseren. Dat is een optimistische aanname.

### **Rekenmodel**

Het strategische luchtvaartprognosemodel AEOLUS van het ministerie van IenW wordt gebruikt om met scenario's mogelijke toekomst te verkennen. AEOLUS bevat geen optie dat mensen hun bestemming veranderen bij hoge prijzen. Het model biedt alleen andere vervoerswijzen en niet-reizen als alternatieve keuzeopties. Bij hoge ticketprijzen en klimaatbewuste reizigers is een verschuiving van intercontinentale naar Europese

bestemmingen niet onwaarschijnlijk, voor zowel zakenreizigers als toeristen. De vraagverandering wordt geraamd met een prijselasticiteit. Prijselasticiteiten zijn primair bedoeld om de effecten van beperkte prijsveranderingen te ramen. De prijsveranderingen in deze studie zijn echter in een aantal scenario's zo groot (soms een verdubbeling), dat een effectraming op basis van elasticiteiten als indicatief moet worden beschouwd.

### ***Niet-CO<sub>2</sub>-emissies***

In deze studie kijken we alleen naar de invloed van de CO<sub>2</sub>-uitstoot op het klimaat. Maar er zijn ook andere stoffen die bij luchtvaart het broeikas effect vergroten: de niet-CO<sub>2</sub>-emissies (zie hoofdstuk 3). Stoffen als waterdamp en roetdeeltjes zijn hier niet meegenomen, omdat de effecten van deze stoffen nog niet voldoende bekend zijn. Als de niet-CO<sub>2</sub>-klimaat effecten van de luchtvaart ook worden meegenomen, zullen de inspanningen voor het tweegradendoel toenemen, en daarmee ook de druk op de groei van de luchtvaart.

### ***De wereldhandel***

Het is aannemelijk dat een succesvolle uitvoering van het klimaatakkoord van Parijs gevolgen heeft voor de wereldhandel. Door de hoge kosten van CO<sub>2</sub>-emissies en de handel in emissierechten veranderen de bestaande handelsnetwerken. Dat heeft gevolgen voor de luchtvaart. In het model AEOLUS en in de voorafgaande berekeningen van de WLO is daar geen rekening mee gehouden. Om die reden hebben we bijvoorbeeld de luchtvracht buiten beschouwing gelaten.

### ***Vlieggeneigdheid***

Bij een succesvolle uitvoering van het Parijsakkoord zal het klimaatbewustzijn waarschijnlijk toenemen. Alleen al daardoor kan de neiging afnemen om te vliegen met fossiele brandstof. Op dit moment zijn kosten en vlieg angst de belangrijkste redenen voor Nederlanders om niet te vliegen. Een tiende van de groep niet-vliegreizigers maakt deze keuze vanwege milieuoverwegingen (KIM 2018). Als deze groep in omvang zou toenemen, zijn de geschetste volumes in een Parijsscenario een overschatting.



## Literatuur

- Aalbers, R., Renes, G., & Romijn, G. (2016), *WLO-klimaatscenario's en de waardering van CO<sub>2</sub>-uitstoot in MKBA's*. Den Haag: Centraal Planbureau.
- Brasseur, et al. (2015), 'Impact of aviation on climate: FAAs Aviation Climate Change Research Initiative (ACCRI) Phase II', *Bull. Amer. Met. Soc.* 91: 461, zie: doi:10.1175/2009BAMS2850.1.
- CE Delft, TAKS & WUR LEI (2017), *Overheidsmaatregelen Biokerosine. Mogelijkheden om de vraag naar biokerosine te stimuleren en de effecten op de luchtvaart en de economie*. Delft: CE Delft.
- CE Delft & VU (2014), *Externe en infrastructuurkosten. Een overzicht voor Nederland in 2010*, Delft/Amsterdam: CE Delft & VU.
- CBS Statline (2018), *Motorbrandstoffen 1946-2017; afzet in petajoule, gewicht en volume*.
- CPB & PBL (2015a), *Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving. Nederland in 2030 en 2050: twee referentiescenario's*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving/Centraal Planbureau.
- CPB & PBL (2015b), *Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving. Cahier Klimaat en Energie*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving/Centraal Planbureau.
- CPB & PBL (2015c), *Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving. Cahier Mobiliteit*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving/Centraal Planbureau.
- CPB & PBL (2016a), *Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving. Achtergronddocument Mobiliteit - Luchtvaart*, Den Haag: Centraal Planbureau en Planbureau voor de Leefomgeving.
- CPB & PBL (2016b), *Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving. Achtergronddocument Klimaat en energie*, Den Haag: Centraal Planbureau en Planbureau voor de Leefomgeving.
- EEX (2019) Prices of European Emission Allowances (EUA), geraadpleegd op 1 mei 2019 via <https://www.eex.com/en/market-data/environmental-markets/spot-market/european-emission-allowances#!/2019/04/30>.
- Ecofys (2013), *Biofuels for Aviation*.
- European Commission (EC) (2017), *Verordening (EU) 2017/2392 van het Europees Parlement en de Raad van 13 december 2017 tot wijziging van Richtlijn 2003/87/EG om de huidige beperkingen van het toepassingsgebied voor luchtvaartactiviteiten voort te zetten en de tenuitvoerlegging van een wereldwijde marktgebaseerde maatregel vanaf 2021 voor te bereiden*. Geraadpleegd via <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32017R2392>.
- European Parliament (EP) (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.
- ECN & PBL (2017), *Nationale Energieverkenning 2017*. ECN-O--17-018 Petten: Energiecentrum Nederland (ECN) / Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.
- 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).
- ICAO (2017), *ICAO Carbon Emissions Calculator Methodology*. Version 10, June 2017. Gedownload via <https://www.icao.int/environmental-protection/CarbonOffset/Pages/default.aspx>.
- ICCT (2015), *Fuel efficiency trends for new commercial jet aircraft: 1960 to 2014*. Anastasia Kharina, Daniel Rutherford, Ph.D., International Council on Clean Transportation.
- IenW (2015), *Brief van 18 december 2015 van Staatssecretaris Dijksma aan de Tweede Kamer over de uitkomst op hoofdlijnen van de 21<sup>e</sup> Conferentie van Partijen (COP21) bij het VN klimaatverdrag* (Kamerstuk 31 793, nr. 134).

- IenW (2019a), *Notitie Reikwijdte en Detailniveau voor het PlanMER voor de Luchtvaartnota 2020-2050*. Arjen Donkersloot (BCI), Roel Hogenhuis (NLR), Jos de Lange (RHDHV), Paul Eijssen (RHDHV) en Martin Bos (RHDHV). 8 maart 2019,
- IenW (2019b), *Bijlage 2 Ontwerpakoord Duurzame Luchtvaart bij kamerbrief 'Klimaatbeleid voor luchtvaart'*. Kamerstuk met kenmerk IENW/BSK-2019/58890. Versie 21 februari 2019.
- IPCC (2006), *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Te raadplegen via <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>.
- IPCC (2014), *Chapter 6 Assessing Transformation Pathways 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). L. Clarke et al. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Available at [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc\\_wg3\\_ar5\\_full.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_full.pdf).
- IPCC (2018), *Special Report Global Warming of 1,5 °C. Summary for Policy Makers*. Intergovernmental panel on climate change: 6 October 2018. Available at <https://www.ipcc.ch/sr15/>.
- KiM (2018), *Factsheet 'De Vliegende Hollander' Hoeveel Nederlanders vliegen en de keuzes die ze maken bij een vliegreis*. Den Haag: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat / Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid.
- Kouwenhoven, M. & Grebe, S. (2015), *Actualisatie AEOLUS-model. Eindrapport*. 17 juni 2015. Significance: Den Haag.
- Kouwenhoven, M. & Grebe, S. (2018), *Effect van een vliegbelasting op het vliegverkeer. Kwantitatieve doorrekening*. Rapport 18011, in opdracht van het ministerie van Financiën. Significance: Den Haag.
- Lee et al. (2009), 'Aviation and global climate change in the 21st century', *Atmospheric Environment* 43: 3520–3537, zie: doi: 10.1016/j.atmosenv.2009.04.024.
- Lee et al. (2010), 'Transport impacts on atmosphere and climate: Aviation', *Atmospheric Environment* 44: 4678–4734.
- Lee, D.S. (2018), *The current state of scientific understanding of the non-CO<sub>2</sub> effects of aviation on climate*. Notitie in opdracht van het Department for Transport (DfT) (Verenigd Koninkrijk).
- Luchtvaart Nederland (2018), *Slim én duurzaam. Actieplan Luchtvaart Nederland: 30% minder CO<sub>2</sub> in 2030*.
- NLR (2019), *Kennis ten behoeve van de luchtvaartnota*. Januari 2019.
- PBL IMAGE documentation - TIMER/FAIR as part of the IMAGE Model - IMAGE Integrated Model to Assess the Global Environment. PBL theme website. [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).
- PBL (2016), *Opties voor energie- en klimaatbeleid*, Den Haag: PBL
- Raad voor de leefomgeving en infrastructuur (2019), *Luchtvaartbeleid: een nieuwe aanvliegeroute*. Raad voor de leefomgeving en infrastructuur (Rli): Den Haag.
- RVO (2017), *Nederlandse lijst van energiedragers en standaard CO<sub>2</sub>-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.
- Schuur, J., W. Blom & G.C.M. Uit Beijerse (2018), *Kennisscan Luchtvaartnota*. Den Haag: PBL.
- Significance & To70 (2019), *Actualisatie AEOLUS 2018 en geactualiseerde luchtvaartprognoses*. Rapport voor het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.
- Scheelhaase, Dahlmann, Jung, Keimel, Nieße, Sausen, Schaefer & 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.

- Schiphol (2018), *Amsterdam Airport Schiphol Maandelijkse Verkeer- en vervoerscijfers december 2017*. Gedownload 2018 via <https://www.schiphol.nl/nl/schiphol-group/pagina/verkeer-en-vervoer-cijfers/>.
- Uitbeijerse, G.C.M. & Hilbers, H.D. (2018), *Ontwikkeling luchtvaart en CO<sub>2</sub>-emissies in Nederland*. Factsheet voor Omgevingsraad Schiphol, Den Haag: PBL.
- UNFCCC (2015), 2015.FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1: Adoption of the Paris Agreement. Paris, France: UNFCCC.
- Vuuren, D.P. van, P.A. Boot, J. Ros, A.F. Hof & M.G.J. den Elzen (2016), *Wat betekent het Parijsakkoord voor het Nederlandse lange-termijn-klimaatbeleid?* Den Haag: PBL.
- Vuuren, D.P. van, P.A. Boot, J. Ros, A.F. Hof & M.G.J. den Elzen (2017), *The implications of the Paris Climate Agreement for Dutch climate policy objectives*. Den Haag: PBL.

# BIJLAGEN

## A. Uitgangspunten WLO-scenario's

**Tabel A.1**

**Basisaannames basisscenario's Hoog en Laag (CPB & PBL 2015a,c,d)**

<b>Onzekerheid</b>	<b>Hoog</b>	<b>Laag</b>
<b>Demografie</b>	Sterke groei	Stagnatie
<b>Economie</b>	Sterke groei wereldeconomie en internationale handel (2%) Sterke inkomensgroei Behoud concurrentiepositie Nederlandse luchthavens	Beperkte groei wereldeconomie en internationale handel (1%) Beperkte inkomensgroei Behoud concurrentiepositie Nederlandse luchthavens
<b>Klimaat en energie</b>	Substantieel klimaat beleid Lage olieprijs	Beperkt klimaat beleid Hoge olieprijs
<b>Europees transportbeleid</b>	Voornamelijk trendvolgend Single European Sky zet snel door	Voornamelijk trendvolgend Single European Sky zet langzaam door
<b>Buitenlands luchtvaart- en luchthavenbeleid</b>	Sterke verdere liberalisering internationale luchtvaart Sterke toename buitenlands aanbod luchthavencapaciteit	Beperkte verdere liberalisering internationale luchtvaart Sterke toename buitenlands aanbod luchthavencapaciteit
<b>Luchtvaarttechnologie</b>	Snelle ontwikkeling (1%)	Beperkte ontwikkeling (0,6%)
<b>Gedrag luchtvaartsector</b>	Aanbod luchtvaartmaatschappijen neemt snel toe Aandeel LCC stijgt licht verder Hubfunctie Schiphol blijft onaangetast	Aanbod luchtvaartmaatschappijen neemt langzaam toe Aandeel LCC blijft stabiel Hubfunctie Schiphol blijft onaangetast
<b>Gedrag consumenten</b>	Geen fundamentele attitudeverandering (ook niet ten aanzien van vliegen)	
<b>Nederlands beleid</b>	Minimaal gedifferentieerd trendmatig beleid Aldersakkoord	
<b>Temperatuurstijging</b>	2,5-3°C	3,5 - 4°C
<b>Datum mondiale klimaatovereenkomst</b>	±2025	±2030
<b>Emissiereductie NL in 2030</b>	40%	30%
<b>Emissiereductie NL in 2050</b>	65%	45%
<b>Klimaatbeleid</b>	- Mondiaal emissiehandelssysteem na 2030 voor alle sectoren – Aanvullend klimaatbeleid wordt na 2030 afgebouwd en vervangen door mondiaal R&D-beleid	- EU stelt haar 2030doel rond 2025 bij van 40% naar 30% - Het Europese Emissiehandelssysteem wordt niet uitgebreid - Aanvullend klimaatbeleid blijft bestaan
<b>CO<sub>2</sub>-prijs in 2030 in euro per ton CO<sub>2</sub></b>	40 (EU-ETS)	15 (EU-ETS)
<b>CO<sub>2</sub>-prijs in 2050 in euro per ton CO<sub>2</sub></b>	160	40 (EU-ETS)

Bovenstaande tabel geeft een overzicht van de basisaannames die ten grondslag liggen aan de WLO-scenario's. De olieprijsen liggen in scenario Hoog lager dan die in Laag. Dit lijkt contra-intuïtief: hoge groei leidt immers tot grotere vraag naar brandstof en daarmee tot hogere prijzen. De oorzaak ligt in het succesvolle klimaatbeleid in het hoge scenario. Als gevolg van de geopolitieke samenwerking in dit scenario is het mogelijk om de vraag naar fossiele brandstoffen terug te dringen, zodat de prijs daarvan zal dalen (CPB & PBL 2015b).

## B. AEOLUS invoerparameters en model

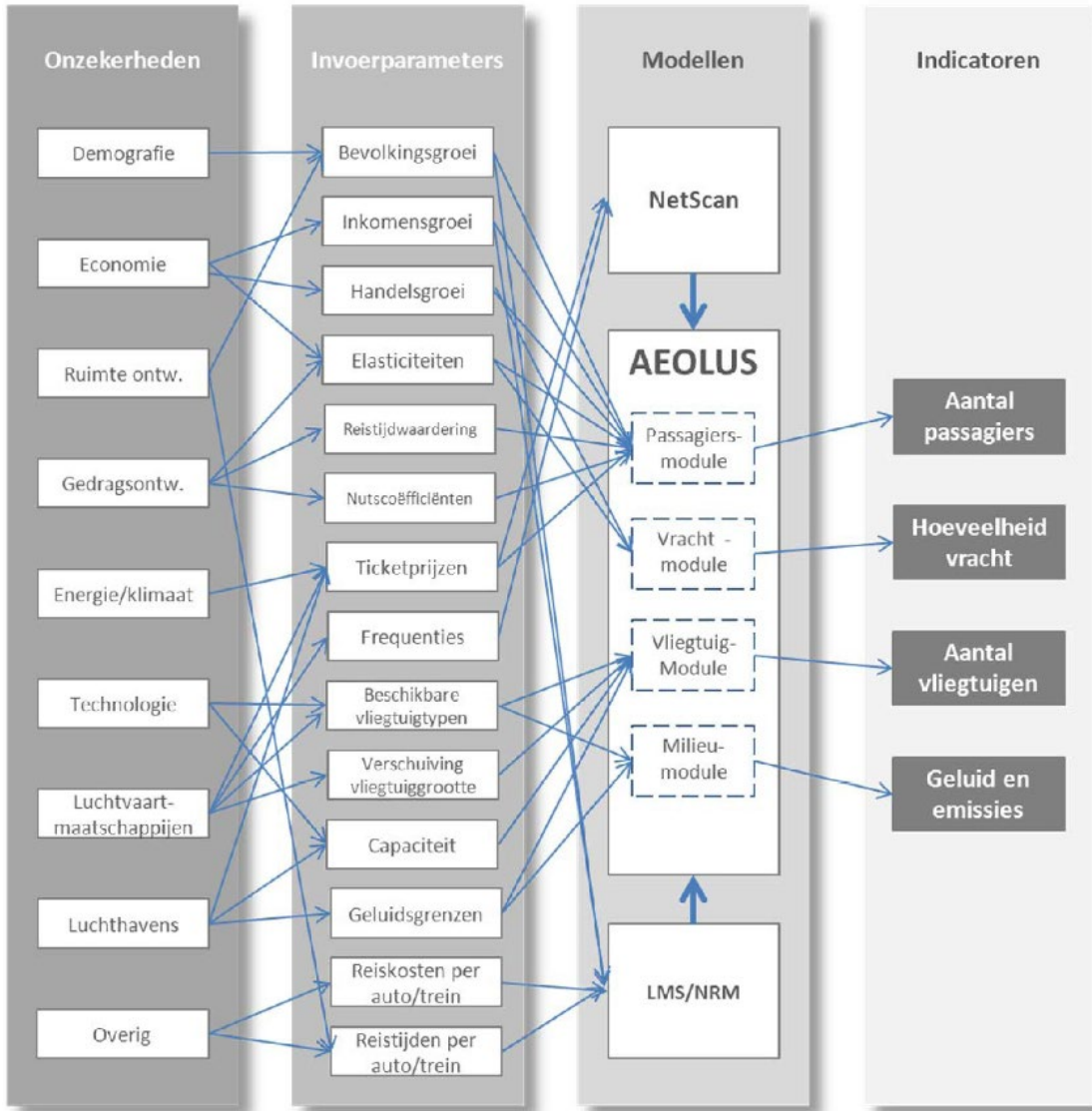
Onderstaande toelichting geeft een introductie in de opbouw van het rekenmodel AEOLUS. Dit is overgenomen uit het *Achtergrondrapport Mobiliteit Luchtvaart (CPB & PBL 2016)*. Het Cahier Mobiliteit van de WLO (CPB & PBL 2015c) en het bijbehorende achtergrondrapport Mobiliteit Luchtvaart (CPB & PBL 2016a) beschrijven de prognoses voor de ontwikkeling van de luchtvaart in Nederland. De actualisatie en verbetering van het rekenmodel zoals in 2018 uitgevoerd in opdracht van het ministerie van IenW is gedocumenteerd in *Significance en To70 (2019)*.

AEOLUS bestaat uit vier modules: een passagiersmodule, een vrachtmodule, een vliegtuigmodule en een milieumodule.

- De passagiersmodule simuleert de vluchten die passagiers maken naar aantal en verdeling over beschikbare alternatieven. Daarbij is ook een keuze mogelijk tussen vliegen of over land (auto of vliegtuig). Belangrijkste determinanten voor deze keuzen zijn: reis- en transfertijden, reiskosten en frequenties van aangeboden reismogelijkheden.
- De vrachtmodule simuleert het aanbod aan vracht en de verdeling over zowel luchtvaartmaatschappijen als over vrachtluchten en combinatie met passagiersvluchten.
- De vliegtuigmodule simuleert de inzet van vliegtuigen om de passagiersvraag die volgt uit de passagiersmodule te verwerken. De module houdt rekening met grootte en technische klasse van de vliegtuigen en vertrek- en aankomsttijden in vier tijdblokken per dag. Al deze mogelijkheden in deze module leiden tot 180 mogelijke combinaties. Wanneer op een of meer luchthavens de capaciteit (fysiek of bepaald door milieueisen) wordt overschreden, start het model een iteratief proces waarin alternatieven worden berekend. Dit kan leiden tot zowel inzet van grotere en/of stille vliegtuigen, maar ook overloop naar andere luchthavens. De iteratie gaat door tot volledig in de vraag is voorzien.
- De milieumodule berekent de emissies van geluid, CO<sub>2</sub> en luchtverontreinigende stoffen.

Onderstaand schema (figuur B.1) laat zien hoe onzekerheden worden vertaald naar invoerparameters voor de modellering, hoe iedere parameter in de modellering aangrijpt en met welke kwantitatieve indicatoren de referentiescenario's ingevuld zullen worden. Er is gewerkt met een bepaling van het level op service (bestemmingen en frequenties vanaf een luchthaven). Deze worden met NetScan bepaald, een "Airport Connectivity Model" van SEO Economisch Onderzoek (Amsterdam), waarmee netwerken van luchtvaartmaatschappijen en luchthavens geanalyseerd worden. Daarnaast is de bereikbaarheid van luchthavens van belang en de aantrekkelijkheid van andere reismodaliteiten dan vliegen. Daarvoor wordt het Landelijk ModelSysteem (LMS, voor doorrekening van gebruik van de nationale hoofdinfrastructuur) gebruikt.

**Figuur B.1 Implementatieschema van scenario's luchtvaart**



## Aannames voor de berekening van ticketprijzen in Parijsscenario's

**Tabel B.1**  
Aannames in de Parijsscenario's

Scenario	Basis	Efficiëntieverbetering (jaarlijks)	CO <sub>2</sub> -prijs in 2030	CO <sub>2</sub> -prijs in 2050
Basisscenario Hoog	Hoog	1%	40 euro/ton <sup>11</sup>	160 euro/ton <sup>12</sup>
Basisscenario Laag	Laag	Tot 2030: 0,8% Na 2030: 0,5% (gemiddelde: 0,6%)	15 euro/ton <sup>13</sup>	40 euro/ton <sup>11</sup>
<i>Hoge economische en demografische groei</i>				
1 Hoge CO <sub>2</sub> -prijs	Hoog	1%	500 euro/ton <sup>12</sup>	1.000 euro/ton <sup>12</sup>
2 Matige CO <sub>2</sub> -prijs	Hoog	1%	100 euro/ton <sup>12</sup>	200 euro/ton <sup>12</sup>
3 Hoge CO <sub>2</sub> -prijs en efficiëntie	Hoog	2%	500 euro/ton <sup>12</sup>	1.000 euro/ton <sup>12</sup>
<i>Lage economische en demografische groei</i>				
4 Matige CO <sub>2</sub> -prijs	Laag	0,6%	100 euro/ton <sup>14</sup>	200 euro/ton <sup>12</sup>
5 Hoge CO <sub>2</sub> -prijs	Laag	0,6%	500 euro/ton <sup>12</sup>	1.000 euro/ton <sup>12</sup>

### Energiegebruik en CO<sub>2</sub>-emissieberekening met behulp van AEOLUS

Bij de actualisatie van AEOLUS is de berekening van de CO<sub>2</sub>-emissies aangepast (Significance & To70 2019). Om de CO<sub>2</sub>-uitstoot te bepalen maakt AEOLUS gebruik van een relatie tussen de CO<sub>2</sub>-uitstoot per passagier en de vliegduur. Voorheen was deze relatie lineair, maar op basis van een steekproef uit de data van de ICAO Carbon Emissions Calculator is een andere formule afgeleid. De Carbon Emissions Calculator geeft de emissies per passagier op basis van het gemiddelde gerapporteerde brandstofgebruik per categorie (ICAO 2017). Door hier gebruik van te maken doet de nieuwe formule (ICAO-curve) meer recht doet aan het totale brandstofgebruik gedurende de hele vlucht, dus ook inclusief de CO<sub>2</sub>-emissies van landen en stijgen. Een aparte opslag voor CO<sub>2</sub>-uitstoot gedurende de Landing and Take off (LTO)-fase is dan niet meer nodig. Daarnaast houdt de ICAO Calculator rekening met de verhouding tussen vracht en passagiers, en bepaalt beter alleen de uitstoot per passagier (ICAO 2017). Op langere afstanden is het aandeel vracht hoger, waardoor een kleiner deel van de uitstoot aan de passagiers moet worden toegerekend. Het effect van de LTO-fase en van de verschillen in aandeel vracht is te zien aan de hogere emissies per passagiers voor de kortere vluchten, en lagere emissies voor de langere vluchten. Deze afvlakkende afstandsafhankelijkheid uit de ICAO Calculator wordt als plausibeler gezien, terwijl het totale niveau zoals berekend met de SEO-systematiek meer betrouwbaar lijkt (Significance & To70 2019). Door de combinatie van de ICAO-curve met de SEO systematiek en totaalniveau te verwerken in AEOLUS zijn CO<sub>2</sub>-berekeningen gemaakt.

Een andere relevante parameter voor de vertaling van energie-efficiëntieverbetering in invoer in AEOLUS is de ontwikkeling van de technologieklasse van vliegtuigen. AEOLUS

<sup>13</sup> Prijzen van het Europese Emissiehandelssysteem, toegepast op alle intra-Europese vluchten.

<sup>14</sup> Deze CO<sub>2</sub>-prijs is toegepast op alle vluchten.

berekent hoe lang een vliegtuig van een bepaald type meegaat en welk nieuw type vliegtuig bij vervanging of uitbreiding wordt toegevoegd aan de vloot. Bij vernieuwing van een vliegtuig zal de uitstoot per ton gewicht en per kilometer verminderen. Afhankelijk van de passagiersvraag en beschikbare vloot bepaalt AEOLUS of er een nieuw vliegtuig wordt toegevoegd. Door de vlootvernieuwing ontstaat binnen het model een endogene energie-efficiëntieverbetering. Voor het basisscenario Laag is dat bijvoorbeeld gemiddeld genomen 0,6 procent per jaar van 2017 tot 2050, maar verschilt het groeipercentage per periode 2017-2030 (0,82 procent per jaar) en 2030-2050 (0,54 procent per jaar).

**Tabel B.2**  
**Nacorrectie energie-efficiëntieontwikkeling**

Jaarlijkse percentages	Scenario-uitgangspunten		Benodigde modelcorrectie	
	Efficiëntieverbetering 2017-2030	Efficiëntieverbetering 2030-2050	Correctie 2017-2030 tov endogeen	Correctie 2030-2050 tov endogeen
Basisscenario Hoog, 1 Hoge CO <sub>2</sub> -prijs, 2 Matige CO <sub>2</sub> -prijs.	1%	1%	-0,19%	-0,30%
3 Hoge CO <sub>2</sub> -prijs en hoge efficiëntieverbetering	2%	2%	-1,19%	-1,30%
Basisscenario Laag, 5 Lage economische groei en hoge CO <sub>2</sub> -prijs, 4 Lage economische groei en matige CO <sub>2</sub> -prijs.	Zoals endogeen: 0,82%	Zoals endogeen: 0,54%	0	0

Om de endogene efficiëntieverbetering om te rekenen naar de aangenomen jaarlijkse percentages is een correctie toegepast. Deze correctie is achteraf toegepast op de AEOLUS-uitkomsten van de CO<sub>2</sub>-emissies. CO<sub>2</sub>-emissies hebben een lineair verband met de verbranding van brandstof. In de uitkomsten van de CO<sub>2</sub>-uitstoot is geen rekening gehouden met de brandstofmix, terwijl het wel aannemelijk is dat er in 2050 gebruik zal worden gemaakt van biobrandstof en synthetische kerosine. Daarom heeft PBL de uitkomsten van de CO<sub>2</sub>-emissies voor de passagiers direct omgerekend naar energiegebruik in Joules, zodat de uitkomst onafhankelijk van de brandstof kan worden gepresenteerd.

De CO<sub>2</sub>-emissies die volgen uit de modelberekeningen zijn in één feedback-loop gebruikt om de CO<sub>2</sub>-kosten in de ticketprijzen te bepalen. Vervolgens zijn deze ticketprijzen gebruikt in de vervolgberekeningen van de omvang van de luchtvaart via Nederlandse luchthavens (zoals bij het tussenkopje 'Ticketprijzen in de Parijsscenario's' hierna in deze bijlage B wordt toegelicht).

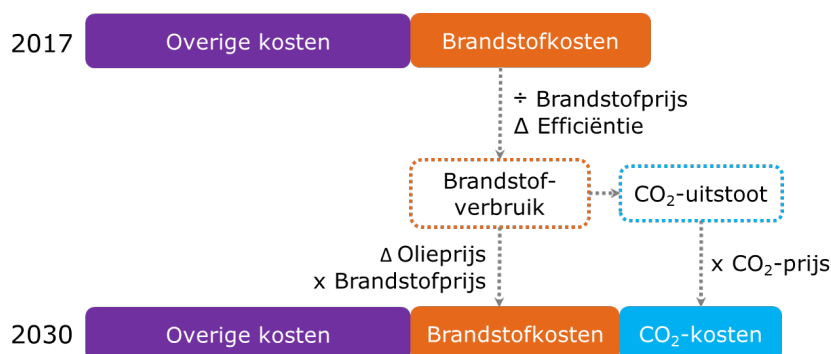
### ***Ticketprijzen in de Parijsscenario's***

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 B.2 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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub> uitgestoten per passagier, en samen met de variërende CO<sub>2</sub>-prijzen per scenario, zijn de CO<sub>2</sub>-kosten voor elk ticket berekend. De zojuist genoemde drie componenten van de ticketprijs (brandstofkosten, de CO<sub>2</sub>-kosten en de overige kosten) tellen op tot de nieuwe ticketprijzen.

**Figuur B.2 Opbouw ticketprijs in scenario's**



De gemiddelde gecombineerde ticketprijzen en indices zijn weergegeven in tabel B.4, 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 CO<sub>2</sub>-prijs-scenario zijn redelijk vergelijkbaar met de tarieven in WLO Hoog, maar wijken meer af in 2030 (7 procent) dan in het jaar 2050 (3 procent), omdat de gerelateerde CO<sub>2</sub>-prijzen ook relatief meer verschillen van elkaar in 2030 dan in 2050. De ticketprijzen in de twee scenario's met hoge CO<sub>2</sub>-prijs verschillen meer van het WLO Hoog basisscenario. Voor Europese vrijetijdsreizigers zouden de tarieven 40 tot 49 procent hoger zijn dan in het basisscenario in 2030; en 48 tot 60 procent in 2050. Het grootste effect wordt gevonden bij recreatieve ICA-passagiers in het scenario met hoge CO<sub>2</sub>-prijzen: voor hen zou de prijs van het ticket in 2050 meer dan verdubbelen.

**Tabel B.3**  
**Vergelijking ticketprijzen transferpassagiers en OD-passagiers**

2050	Gemiddelde prijzen (in prijzen van 2017)		Index ten opzichte van 2050 Basisscenario Hoog (=100)	
	Transfer	OD	Transfer	OD
Basisscenario Hoog	€ 340	€ 161	100	100
Hoge CO <sub>2</sub> -prijs in hoge economische en bevolkingsgroei	€ 657	€ 272	193	169

Ticketprijzen voor alle OD-combinaties in de drie internationaal klimaatbeleidsscenario'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 Nederlandse luchtvaartsector te berekenen en ontwikkelingen op de lange termijn te verkennen.

**Tabel B.4**  
**Gemiddelde ticketprijzen voor passagiersgroepen in Parijsscenario's**

Jaar	Scenario	Europa				Intercontinentaal (ICA)				Totaal		
		Recreatief		Zakelijk		Recreatief		Zakelijk		Euro/ Pax	Index <sup>1</sup> 5	Index tov 2017
		Euro/ Pax	Index <sup>15</sup>	Euro/ Pax	Index <sup>15</sup>	Euro/ Pax	Index <sup>15</sup>	Euro/ Pax	Index <sup>15</sup>			
2017	WLO Hoog	€ 124		€ 130		€ 311	0	€ 497		€ 179		100
2050	Basis Hoog	€ 140	100	€ 142	100	€ 276	100	€ 439	100	€ 192	100	107
	Basis Laag	€ 150	107	€ 158	111	€ 338	122	€ 528	120	€ 220	114	123
1	Hoge CO <sub>2</sub> -prijs in hoge economische en bevolkingsgroei	€ 222	159	€ 216	152	€ 583	211	€ 746	170	€ 338	176	189
2	Matige CO <sub>2</sub> -prijs in hoge economische en bevolkingsgroei	€ 144	103	€ 145	102	€ 291	105	€ 455	104	€ 199	104	111
3	Hoge CO <sub>2</sub> -prijs en hoge efficiëntieverbetering in hoge economische en bevolkingsgroei	€ 187	134	€ 184	130	€ 452	164	€ 615	140	€ 275	143	154
4	Lage economische groei en matige CO <sub>2</sub> -prijs	€ 154	110	€ 161	114	€ 352	128	€ 543	124	€ 226	118	127
5	Lage economische groei en hoge CO <sub>2</sub> -prijs	€ 230	164	€ 230	162	€ 631	229	€ 822	187	€ 356	186	199

<sup>15</sup> Voor alle scenario's in 2030 geldt 2030 WLO Hoog = 100; voor alle scenario's in 2050 geldt 2050 WLO Hoog = 100

## C. Klimaatimpact luchtvaart is meer dan CO<sub>2</sub>-emissies

De impact van luchtvaartemissies op het broeikaseffect, en daarmee op de opwarming van de aarde, is groter dan alleen de reguliere effecten van CO<sub>2</sub> in de lucht. Naast CO<sub>2</sub> veroorzaakt luchtvaart andere emissies. De andere emissies die de luchtvaart veroorzaakt naast CO<sub>2</sub>-emissies zijn waterdamp, roetdeeltjes, stikstofoxiden (NO<sub>x</sub>), koolwaterstoffen (HC) en zwaveloxiden (SO<sub>x</sub>). 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<sub>x</sub>) door de luchtvaart beïnvloedt de concentraties van ozon (O<sub>3</sub>) en methaan (CH<sub>4</sub>).

Niet-CO<sub>2</sub>-emissies hoog in de lucht en de chemische reacties en wolkvorming daarbij, dragen ook bij aan het broeikaseffect (Lee et al. 2009; Van Velthoven 2013). Figuur 7.1 geeft een overzicht van de verschillende mechanismen. Wetenschappers begrijpen de chemische en microfysische processen die in de lucht plaatsvinden steeds beter (Lee 2018; Brasseur et al. 2015; ICAO 2016). Maar de grootte van de versterking van het broeikaseffect ('stralingsforcering') is wetenschappelijk zeer onzeker en ook afhankelijk van andere stoffen in de atmosfeer. Vooral het effect en de grootte van deeltjes, fijnstof (waaronder roet), en het effect op wolkvorming is onzeker. Niet-CO<sub>2</sub>-effecten zijn vooral van kortdurende aard (van uren voor vliegtuigstrepen tot maximaal zo'n tien jaar voor methaan), terwijl CO<sub>2</sub> zeer lang in de atmosfeer blijft (honderden jaren).

Vanwege de variatie in levensduur van de verschillende emissies in de atmosfeer en de lokale samenstelling van de lucht zijn de klimaateffecten van niet-CO<sub>2</sub>-emissies niet proportioneel met de verbranding van brandstof (Lee et al. 2009; Scheelhaase et al. 2016). Verschillende indicatoren<sup>16</sup> kwantificeren de effecten, maar wetenschappers hebben geen keuze gemaakt voor één indicator die de effecten goed weergeeft (Brasseur et al. 2015; ICAO 2016; Lee et al. 2010). Om enigszins grip te krijgen op het effect zijn studies uitgevoerd die met grote onzekerheid voor het jaar 2005 de effecten van alle emissies tezamen hebben geschat. Zij geven een bandbreedte van een opwarmingseffect door alle emissies met een factor 1,3<sup>17</sup> tot 2 hoger dan de impact van alleen de CO<sub>2</sub>-emissies, rekening houdend met een tijdshorizon van 100 jaar (CE Delft & VU 2014; EP 2015; Lee et al. 2010). De ratio van het opwarmingseffect van de totale emissies ten opzichte van CO<sub>2</sub> voor de kortere periode van 20 jaar, geeft een bandbreedte van 2,1 tot 4,8<sup>18</sup> voor 2005, waarbij in het laatste cijfer ook het onzekere effect van wolkvorming is meegenomen (Lee et al. 2010).

Omdat er nog aanzienlijke wetenschappelijke onzekerheid is over het effect van niet-CO<sub>2</sub>-emissies (Lee 2018), is er geen consensus over de vraag of en hoe dit effect kan worden verlaagd. De niet-CO<sub>2</sub>-impacts vinden ook plaats bij toepassing van biobrandstof. Daarom

---

<sup>16</sup> Een maat voor de versterking van het broeikaseffect (radiative forcing, RF) zou rekening moeten houden met effecten op zowel de korte termijn (onzekere effecten van bijvoorbeeld wolkvorming) als met de meer zekere langetermijneffecten van CO<sub>2</sub>. De afweging hiervan is lastig: er moet een keuze worden gemaakt in het gebruik van bijvoorbeeld GWP of GTP, en de tijdshorizon waarvoor dit wordt berekend. GWP staat voor Global Warming Potential, en maakt gebruik van de RF (mW/m<sup>2</sup>) geïntegreerd over een bepaalde tijdshorizon. GTP staat voor Global Temperature change Potential die de RF integreert over de temperatuurverandering van een bepaald jaar. Bovendien doet een wereldwijd gemiddelde geen recht aan de lokale of regionale variabiliteit in de effecten.

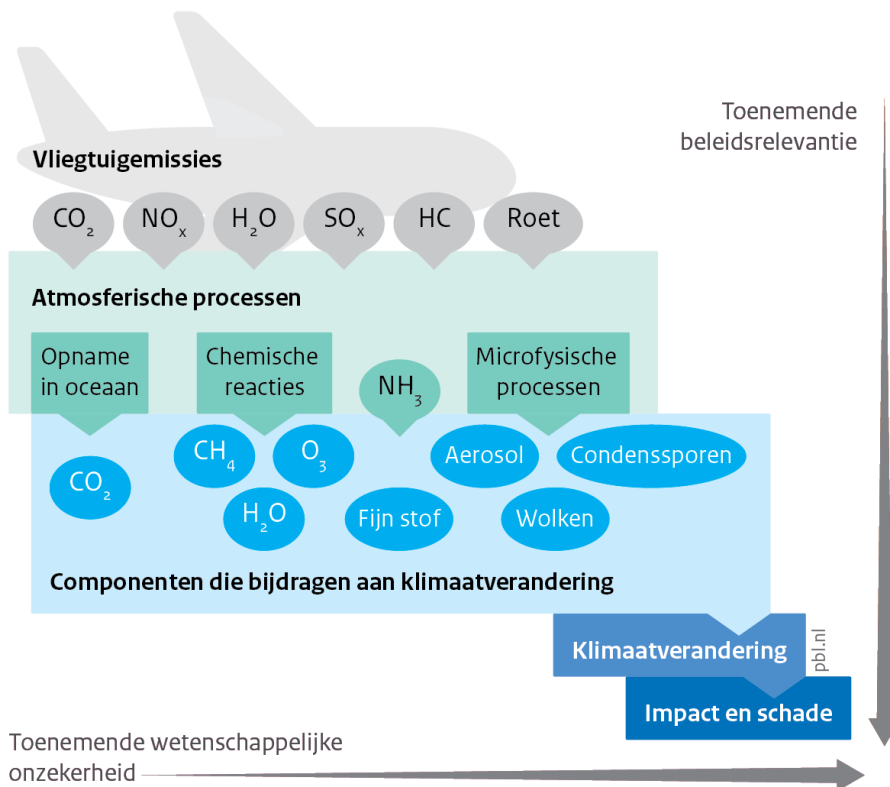
<sup>17</sup> Hierbij gaat het om het Global Warming Potential (GWP), met een tijdshorizon van 100 jaar (zie de vorige voetnoot). Het totale effect van luchtvaart is 1,3 tot 1,4 keer groter dan het effect van CO<sub>2</sub> alleen, zonder het effect op de wolken en condensatiestrepen; en 1,9 tot 2,0 keer groter inclusief wolkvorming (EP 2015; Lee et al. 2010).

<sup>18</sup> Zonder wolkvorming zou het effect van alle emissies op in de GWP met een tijdshorizon van 20 jaar 2,1 tot 2,6 maal zo groot als alleen het opwarmingseffect van CO<sub>2</sub> zijn, en inclusief wolkvorming 4,3 tot 4,8 keer (Lee et al. 2010).

blijft de focus op het verlagen van de CO<sub>2</sub>-uitstoot, waarbij sommige maatregelen om dit te bereiken ook enkele van de andere emissies kunnen verminderen of juist niet. Ook hebben andere omstandigheden een effect op de verschillende emissies, zoals de hoogte waarop wordt gevlogen en de atmosferische samenstelling en temperatuur (Lee 2018). Bovendien is het effect van andere emissies dan CO<sub>2</sub> niet altijd evenredig met het brandstofverbruik. Bij condenssporen is het effect bijvoorbeeld soms beter af te leiden van de afgelegde afstand (Lee 2018). CO<sub>2</sub> is echter het belangrijkste broeikasgas met het meest langdurige klimateffect (zie hoofdstuk 2). 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.

**Figuur C.1**

**Vliegtuigemissies en klimaatverandering**



Bron: Lee et al. 2009; Brasseur et al. 2015; bewerking PBL