

# KLIMAATNEUTRALE LUCHTVAART IN 2050

Een verkenning van beelden en paden daar naartoe

**I. Davydenko, H. Hilbers, H. de Wilde**

26-03-2024

PBL

## Colofon

### Klimaatneutrale Luchtvaart in 2050. Een verkenning van beelden en paden daar naartoe

© PBL Planbureau voor de Leefomgeving  
Den Haag, 2024  
PBL-publicatienummer: 5227  
TNO nummer: TNO 2024 P10092

## Contact

Igor.davydenko@pbl.nl

## Auteurs

I. Davydenko, H. Hilbers, H. de Wilde (TNO)

## Met dank aan

De auteurs zijn dank verschuldigd aan Paul Peeters (BUas), Joris Melkert (TU Delft), Richard Smokers en Ayla Uslu (beiden TNO), Bart Strengers en Gerben Geilenkirchen (beiden PBL) voor het reviewen van eerdere versies van dit rapport.

## Redactie figuren

Beeldredactie PBL

## Toegankelijkheid

Het PBL hecht veel waarde aan de toegankelijkheid van zijn producten. Mocht u problemen ervaren bij het lezen ervan, dan kunt u contact opnemen via [info@pbl.nl](mailto:info@pbl.nl). Vermeld daarbij s.v.p. de naam van de publicatie en het probleem waar u tegenaan loopt.

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: Davydenko, I., H. Hilbers & H. de Wilde (2024), Klimaatneutrale Luchtvaart in 2050. Een verkenning van beelden en paden daar naartoe, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving & TNO.

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 vóór alles beleidsgericht. Het verricht zijn onderzoek gevraagd en ongevraagd, onafhankelijk en wetenschappelijk gefundeerd.

TNO is een onafhankelijke onderzoeksorganisatie. Wij verbinden mensen en kennis om innovaties te creëren die de concurrentiekracht van bedrijven en het welzijn van de samenleving duurzaam versterken. Hiertoe zijn wij bij wet opgericht als publiekrechtelijke rechtspersoon. Deze TNO-wet geeft ons een aantal bijzondere taken en kaders en verbindt daaraan specifieke voorwaarden waaronder wij ons werk moeten uitvoeren. Het doel daarvan is dat wij onafhankelijk en betrouwbaar oplossingen kunnen blijven creëren voor de uitdagingen die de samenleving ons stelt.

# Contents

<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
Het decarbonisatiepad	5
Handelingsperspectieven voor beleid	6
<b>1 Inleiding</b>	<b>9</b>
<b>2 De opgave</b>	<b>13</b>
2.1 Huidige staat van luchtvaart in Nederland	13
2.2 Vooruitblik	14
2.2.1 Beperkingen	15
2.2.2 Verwachte ontwikkelingen	16
2.3 Niet-CO <sub>2</sub> klimaatimpact	17
<b>3 Het speelveld in beleid</b>	<b>19</b>
3.1.1 Internationaal beleid	19
3.1.2 Europees beleid	20
3.1.3 Nationaal beleid	21
<b>4 De opties</b>	<b>23</b>
4.1 Inzet van duurzame Energiedragers	23
4.1.1 Algemeen	23
4.1.2 Biobrandstoffen	26
4.1.3 Synthetische brandstoffen voor de luchtvaart	29
4.1.4 Waterstof en batterij-elektrisch	33
4.1.5 Infrastructuur	35
4.2 Efficiëntieverbetering	36
4.3 Verminderen van de omvang van de luchtvaart	38
4.4 Verminderen niet-CO <sub>2</sub> -klimaateffecten	41
4.5 Compenseren (offsets)	42
<b>5 Beelden voor en paden richting 2050</b>	<b>44</b>
5.1 Volumeontwikkeling	44
5.2 Energiebehoefte en inzet van energiedragers	45
5.3 Impact van duurzame energiedragers op volume	47
<b>6 Handelingsperspectieven voor beleid</b>	<b>51</b>
6.1 Beleid rond productie en inzet van SAF	53
6.2 Beleid rond niet-CO <sub>2</sub> klimaateffecten	54
6.3 Beleidsopties die verder wetenschappelijk onderzoek vereisen	54
<b>Referenties</b>	<b>55</b>

# Samenvatting

De luchtvaart vormt binnen de klimaatopgave een belangrijke uitdaging. De CO<sub>2</sub>-uitstoot van de luchtvaart vanuit Nederland was in 2019, het laatste jaar voor de coronapandemie, ca. 12 megaton op de basis van getankte brandstof<sup>1</sup>. Daarnaast hebben ook de niet-CO<sub>2</sub>-effecten van luchtvaart, in de vorm van waterdamp, condenssporen en stikstofoxiden, een negatieve klimaatimpact. Nu de coronacrisis voorbij is zou het vervoersvolume, en daarmee ook het brandstofverbruik, weer sneller kunnen gaan groeien dan gecompenseerd kan worden door de efficiëntieverbetering van nieuwe vliegtuigen. De luchtvaart is sterk internationaal: de concurrentie is stevig. Stringent nationaal beleid kan leiden tot uitwijkgedrag naar andere landen, waardoor de CO<sub>2</sub>-uitstoot vooral verschuift en dit maar beperkt leidt tot mondiale afname. Dat versterkt het belang van ambitieus Europees en mondiaal klimaatbeleid voor de luchtvaart.

Nederland en de EU hebben zichzelf ten doel gesteld om uiterlijk in 2050 klimaatneutraal te zijn (*European Green Deal*). Dit is een grote opgave die veel veranderingen met zich meebrengt. Om de implicaties van deze opgave voor de mobiliteit in, van en naar Nederland in kaart te brengen, verkennen PBL en TNO in een gezamenlijke set rapporten hoe paden naar klimaatneutrale mobiliteit in 2050 eruit kunnen zien. Dit is gedaan voor vier vervoerswijzen: het wegverkeer, de luchtvaart, de binnenvaart en de zeescheepvaart. Op basis van de paden is per vervoerswijze onderzocht welke kansen, uitdagingen en handelingsperspectieven daaruit voortvloeien voor het Nederlandse beleid. Het voorliggende rapport schetst de opgave en de resultaten voor de luchtvaart.

Het uitgangspunt voor deze studie is klimaatneutraliteit in 2050. Dit uitgangspunt is gebruikt voor iedere vervoerswijze. Het is niet gezegd dat iedere vervoerswijze ook daadwerkelijk klimaatneutraal moet zijn in 2050 om het Nederlandse en Europese doel van een klimaatneutrale samenleving in uiterlijk 2050 te realiseren<sup>2</sup>. Dit rapport beschrijft het luchtvaartsysteem en laat mogelijke paden naar een CO<sub>2</sub>-vrije luchtvaart in 2050 zien. De beelden voor 2050 en de paden daarnaartoe zijn een combinatie van verdedigbare aannames over vervoersvolumes, efficiëntieverbetering en bijbehorende inzet van technologieën en energiedragers. De paden naar CO<sub>2</sub>-vrije luchtvaart moeten niet als meest waarschijnlijke uitkomst gezien worden, het is een schets van het speelveld inclusief de uitdagingen die de transitie met zich meebrengt.

Het doel van dit rapport is om te laten zien dat rond 2050 de Nederlandse luchtvaart volledig CO<sub>2</sub>-vrij zou kunnen worden. Het rapport schetst een decarbonisatiepad dat gebaseerd is op een snelle groei van productie en gebruik van hernieuwbare kerosine (SAF, *Sustainable Aviation Fuel*). Op de kortere termijn zal de nadruk liggen op SAF gebaseerd op biobrandstoffen; in de periode 2035-2050 kan synthetische SAF (e-fuel) een snelle groei laten zien. In diezelfde periode is een beperkte vooruitgang in commercialisatie van waterstofvliegtuigen mogelijk. Om de luchtvaart vanuit Nederland volledig CO<sub>2</sub>-vrij te maken zal rond 2050 waarschijnlijk 150 tot 200 PJ aan SAF nodig zijn.

---

<sup>1</sup> Tijdens de coronacrisis was de uitstoot 7,6 en 8,0 megaton in 2020 en 2021 respectievelijk.

<sup>2</sup> Ook is niet gezegd dat klimaatneutrale mobiliteit in 2050 in Nederland in lijn is met de klimaatafspraken van Parijs. Welke emissiereductie in Nederland gerealiseerd moet worden om in lijn met Parijs te handelen valt buiten de scope van deze studie. In PBL (2021) wordt daar wel op gereflecteerd.

Hoewel de luchtvaart wél CO<sub>2</sub>-vrij gemaakt kan worden, zullen de niet-CO<sub>2</sub> klimaateffecten tenminste deels blijven bestaan. Met name de condenssporen (*contrails*) lijken een groot klimaateffect te hebben. Er zijn echter wel mogelijkheden om de vorming van langdurige *contrails* te vermijden. De andere (van de bovengenoemde) niet-CO<sub>2</sub> klimaateffecten blijven helaas bestaan zolang vliegtuigen nog door verbrandingsmotoren aangedreven worden.

## Het decarbonisatiepad

Het decarbonisatiepad van de luchtvaart wordt voornamelijk bepaald door: (1) de toekomstige **volumeontwikkeling**, (2) de ingezette typen (hernieuwbare) **energiedragers**, en (3) de **efficiëntieontwikkeling** van vliegtuigtechniek en routeplanning.

### 1) Volumeontwikkeling:

De volumeontwikkeling is lastig in te schatten vanwege onzekerheden in de markt en politiek. De verwachting is dat rond 2024 de luchtvaart weer op het niveau van 2019 zal zijn. Op basis van de verwachte vraagontwikkeling zou de mondiale luchtvaart de komende decennia met 1,5 tot 5% per jaar kunnen groeien<sup>3</sup>. Als we de verwachting uit de Klimaat- en Energieverkenning 2022 doortrekken naar 2050 zou de vervoersvraag vanaf Nederlandse luchthavens tussen 2024 en 2050 gemiddeld met 1,4% tot 2,7% per jaar kunnen toenemen. Een inschatting gebaseerd op de toepassing van prijselasticiteiten laat zien dat de groei met ruim 0,6% per jaar wordt verlaagd, als het ingroeipad voor de inzet van duurzame energiedragers wordt aangescherpt om tot 100% inzet van duurzame energiedragers in 2050 te komen en de hogere kostprijs van SAF ten opzichte van fossiele kerosine in de ticketprijs wordt doorberekend.

In de Nederlandse context zijn ook de problematiek rond geluidsoverlast, stikstofuitstoot en benodigde natuurvergunningen een remmende factor voor de groei van de luchtvaart. Welke groei van de luchtvaart in deze context mogelijk is, is nog onduidelijk. Ook bij een beperkt maximum aan vliegbewegingen kan toch groei van het aantal reizigers optreden, door de inzet van grotere vliegtuigen. De combinatie van gematigde groei als gevolg van stijgende ticketprijzen en de efficiëntieverbetering betekent dat de jaarlijkse energiebehoefte voor de luchtvaart in Nederland binnen een bandbreedte van 150 tot 200 PJ blijft, een vergelijkbare orde van grootte als de 166 PJ die in 2019 in Nederland is afgezet.

### 2) Energiedragers:

Bijna alle *stakeholders* (waaronder de EU) zijn het er over eens dat het verduurzamen van de luchtvaart tot 2050 in zeer belangrijke mate gestoeld zal zijn op de inzet van SAF. SAF beslaat zowel biokerosine gemaakt uit biomassa, als e-kerosine gemaakt uit hernieuwbare elektriciteit en CO<sub>2</sub>.

Op dit moment wordt de meeste biobrandstof ingezet in het wegverkeer. Naarmate het wegverkeer verder elektrificeert of met hernieuwbare waterstof aangedreven wordt, zal er steeds meer biobrandstof (biodiesel en bio-ethanol) vrijkomen voor andere vervoermodaliteiten. Een deel van de biodiesel is van zodanige (*drop-in*) kwaliteit dat zij relatief eenvoudig opgewerkt kan worden tot biokerosine. Er zijn ook nieuwe routes voor productie van biokerosine mogelijk, in het bijzonder FTJ (*Fischer-Tropsch Jet*) en ATJ (*Alcohol-To-Jet*). Met het FTJ proces is het mogelijk om uit houtachtige

---

<sup>3</sup> Zie o.a. [Global Services Forecast \(GSF\) | 2022-2041 | Airbus Aircraft](#) en [Long Term Market \(boeing.com\)](#)

biomassa, die nu onder andere bijgestookt wordt in kolencentrales, hernieuwbare kerosine te maken. Deze technologieën zijn echter nog niet op commerciële schaal beschikbaar, terwijl er ook nog technische barrières moeten worden overwonnen.

Ook de productie van e-kerosine is nog niet op commerciële schaal beschikbaar. Het proces vraagt veel hernieuwbare elektriciteit<sup>4</sup> en een koolstofbron (bijna altijd CO<sub>2</sub>). In eerste instantie kunnen hiervoor geconcentreerde CO<sub>2</sub>-puntbronnen worden gebruikt, maar deze zullen steeds schaarser worden naarmate de energietransitie verder is gevorderd. Op termijn zal de rol van *Direct Air Capture* (DAC, technologie die CO<sub>2</sub> uit de lucht haalt) belangrijker kunnen worden.

Inzet in de luchtvaart van de hernieuwbare energiedragers waterstof en elektriciteit kent veel onzekerheden en zal in 2050 nog (zeer) bescheiden zijn. De inzet van elektriciteit (uit batterijen) zal in 2050 naar verwachting nog verwaarloosbaar zijn (<1%) en zal daarna bescheiden blijven (tenzij de opslagcapaciteit van batterijen een ordegrrootte beter zou worden). De inzet van elektriciteit die aan boord gemaakt wordt uit waterstof in brandstofcellen wordt onderzocht, maar is nog onzeker. De rol van waterstof blijft tot 2050 in ieder geval beperkt tot een deel van de kortere vluchten. Deze kortere vluchten (<2000 km) beslaan nu samen ca. 20% van de kerosinevraag in Nederland. Inzet van waterstof vergt ook complexe nieuwe bunkerinfrastructuur op vertrek- én aankomstluchthavens op heel veel plekken in de wereld tegelijkertijd. Vanwege traagheden in het systeem verwachten wij daarom dat waterstof in 2050 minder dan 10% van de kerosinevraag zal kunnen vervangen.

### 3) Efficiëntieverbeteringen:

De combinatie van zuinigere vliegtuigen en efficiëntere routeplanning zal waarschijnlijk de komende decennia nog leiden tot jaarlijkse verbeteringen van het brandstofverbruik per passagierskilometer met 1 à 1,5%. Het doorvoeren van efficiëntieverbeteringen zal op termijn echter steeds lastiger worden, tenzij radicale ontwerpveranderingen worden doorgevoerd. Het versneld invoeren van nieuwe vliegtuigen en het tegelijkertijd uitfaseren van oude vliegtuigen kan de efficiëntieverbeteringen wel versnellen.

## Handelingsperspectieven voor beleid

De EU heeft in haar *Fit-for-55* programma een *ReFuel EU Aviation* voorstel<sup>5</sup> gedaan (nog in bindende wetgeving om te zetten<sup>6</sup>) dat brandstofleveranciers zal verplichten tot het bijmengen van SAF op alle vluchten vertrekkend van luchthavens in de EU. De voorgestelde SAF-bijmengverplichting (*blending mandate*) loopt op tot 70% in 2050, waarvan minimaal 35% e-kerosine. Om CO<sub>2</sub>-vrije luchtvaart vanuit Nederland te realiseren in 2050, is het nodig om het SAF bijmengpercentage te verhogen

---

<sup>4</sup> Als de voor 2050 beoogde 200PJ SAF volledig wordt voorzien door e-kerosine gemaakt uit Nederlandse hernieuwbare elektriciteit, vergt dit zo'n 40% van de maximaal realiseerbare 70GW capaciteit wind op zee.

<sup>5</sup> European Commission, "Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on ensuring a level playing field for sustainable air transport," (2021, July 14), [https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal\\_en](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_en).

<sup>6</sup> European Parliament, "Amendments adopted by the European Parliament on 7 July 2022 on the proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council on ensuring a level playing field for sustainable air transport," (2022, July 7), [https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2022-0297\\_EN.html](https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2022-0297_EN.html); Council of Ministers, "Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on ensuring a level playing field for sustainable air transport," (2022, June 2), <https://www.consilium.europa.eu/media/56725/st09805-xx22.pdf>

naar 100% en ook te zorgen dat er voldoende SAF in de markt beschikbaar is. Voor de klimaatneutraliteit van vliegen is het ook belangrijk om condenssporen te verminderen. Deze twee maatregelen zijn het belangrijkste voor de vermindering van klimaatimpact van vliegen. Bovendien zullen duurere vliegtickets wegens inzet van SAF de verwachte groei van de vraag dempen. Verder kunnen andere modaliteiten zoals spoorvervoer een deel van korte afstand vliegtrips vervangen en verandering in het gedrag van reizigers kan zorgen voor verdere afname van het vliegvolume.

### **Productie en inzet van SAF in gang zetten**

Hernieuwbare vliegtuigbrandstoffen (SAF's) zijn nog veel duurder dan conventionele kerosine. Daarom zal zonder concreet beleid de snelheid waarmee de SAF's conventionele kerosine gaan vervangen te traag zijn om in 2050 nul CO<sub>2</sub>-uitstoot te bereiken. Er zijn maatregelen nodig die de vraag naar SAF verhogen en/of de productie van de SAF bevorderen. Conceptueel zijn er twee routes om de productie en gebruik van SAF te versnellen.

#### **1. Subsidies**

Opschalen van productie van duurzame brandstoffen: Subsidies kunnen gebruikt worden om de prijs van geproduceerde SAF vooraf vast te stellen en zo investeringen in productiecapaciteit zeker en rendabel te maken (analogie: vast feed-in tarief voor hernieuwbare elektriciteit). Een alternatieve route is om de meerkosten van SAF t.o.v. fossiel met een subsidie te overbruggen en daardoor de markt voor de SAF te garanderen (analogie: prijsplafond).

Subsidies voor onderzoek en ontwikkeling naar de productie van hernieuwbare brandstoffen uit biomassa die niet met voedselketens concurreert (met name hout- en grasachtige grondstoffen): Hier moeten de combinaties van productiemethode en grondstof geprioriteerd worden die de grootste kans bieden op succesvolle opschaling én voldoende grondstofbeschikbaarheid koppelen aan een geringe negatieve impact op voedselketens en vegetatie/ ontbossing.

#### **2. Bijmengverplichtingen**

Om CO<sub>2</sub>-vrije luchtvaart in 2050 te realiseren moeten SAF-bijmengpercentages worden aangescherpt. Daarom is er een concreet en realistisch tijdspad nodig voor het aanscherpen van bijmengpercentages van SAF. De EU stuurt nu met het ReFuelEU voorstel aan op een bijmenging van SAF oplopend van 2% in 2025 tot 70% in 2050. Ons decarbonisatiepad beoogt nul CO<sub>2</sub>-uitstoot in 2050 door vliegtuigen<sup>7</sup>. Daarvoor gaan wij uit van een scenario waarbij het EU blending mandate aangescherpt wordt van 70% naar 100% SAF in 2050 (ten eerste een lineaire aanscherping van het EU doel met een factor 100/70 tot 100% SAF in 2050, en daarnaast wellicht een variant met een (nog) grotere rol voor e-kerosine). Dit is ook een veel sneller decarbonisatiepad dan zoals vastgesteld voor Nederland in 2020 in 'de luchtvaartnota'<sup>8</sup>. In de luchtvaartnota staat het doel om in 2050 de CO<sub>2</sub> uitstoot slechts te halveren (t.o.v. 2005) en pas in 2070 klimaatneutraal te vliegen vanaf Nederland.

Als dit voorgestelde decarbonisatiepad voor 100% SAF in 2050 bindend zou worden voor de gehele EU, dan weten de marktpartijen waar ze aan toe zijn en kunnen ze capaciteitsplannen ontwikkelen

---

<sup>7</sup> Ook de productie van biobrandstoffen en (fossiele brandstoffen) leidt tot uitstoot van broeikasgassen, die afhankelijk van type biomassa-grondstof en conversieroute, aanzienlijk kan zijn. De EU stelt eisen aan de maximale uitstoot.

<sup>8</sup> [Verantwoord vliegen naar 2050 Luchtvaartnota 2020-2050 | Rapport | Rijksoverheid.nl](#)

en investeringen doen. Een dergelijk ambitieus decarbonisatiepad kan aangejaagd worden door een snelle elektrificatie (en mogelijk het gebruik van waterstof) in het wegvervoer. De hierdoor vrijkomende volumes aan biobrandstoffen kunnen (onder de conditie van geschiktheid<sup>9</sup> en certificering) deels ingezet worden in de luchtvaart.

### **Niet-CO<sub>2</sub> effecten op korte termijn verminderen**

Decarbonisatie van de kerosine (SAF) lost helaas nog niet het probleem op van de niet-CO<sub>2</sub> klimaat-effecten van de luchtvaart. Er zijn wel mogelijkheden voor het aanzienlijk beperken van de vorming van contrails (vliegtuigstrepen), die qua orde van grootte mogelijk een vergelijkbaar opwarmings-effect<sup>10</sup> hebben als de CO<sub>2</sub>-uitstoot<sup>11</sup>. Vorming van contrails kan beperkt worden door het vermijden van de luchtlagen waarin ze gevormd worden. Dit zal veelal betekenen dat er wat lager en langzamer gevlogen zal moeten worden in de gebieden waar contrails gevormd worden, hetgeen wel wat extra brandstof en vliegtijd gaat kosten. Het grootschalig voorkomen van contrails vergt informatievoorziening aan vliegtuigen over de locatie van contrail vormende luchtlagen en wetgeving om deze gebieden verplicht te vermijden.

**Informeren:** een meteorologische dienst creëren die de (dynamische) gebieden van het luchtruim aangeeft waar langlevende contrails gevormd kunnen vormen. Deze dienst zal luchtvaartmaatschappijen en luchtvaartautoriteiten informeren (locatie, hoogte en tijd) over deze gebieden.

**Afdwingen:** omdat het vermijden van gebieden waar contrails gevormd worden niet vanzelf zal geschieden (het kan kostenverhogend zijn), moeten er internationale afspraken gemaakt worden over de manier waarop het vermijden van deze gebieden afgedwongen kan worden. Dit kan een functie van luchtverkeersleiding worden. Een andere optie is dat landen gaan differentiëren in “*overflight fees*” waarbij vliegen in contrail gebieden duurder wordt.

---

<sup>9</sup> Momenteel kunnen alleen de drop-in dieselvervangers HVO en HEFA met beperkte modificaties ingezet worden in de luchtvaart. Voor de benzinevervanger bio-ethanol is dit veel lastiger, omdat de techniek om ethanol om te zetten in SAF nog niet op commerciële schaal beschikbaar is.

<sup>10</sup> Lee, D. S., Fahey, D. W., Skowron, A., Allen, M. R., Burkhardt, U., Chen, Q., ... & Wilcox, L. J. (2021). The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric Environment*, 244, 117834. Lee et al. hebben voor 2018 het netto opwarmingseffect van de luchtvaart geraamd op 101 milliwatt (mW) per m<sup>2</sup>, waarvan 34 mW door CO<sub>2</sub>, 57 mW door contrails en 18 mW door NO<sub>x</sub>. Er bestaat een grote onzekerheid over de grootte van niet-CO<sub>2</sub> effecten

<sup>11</sup> In tegenstelling tot CO<sub>2</sub>, zorgen contrails voor een instantaan effect. Met andere woorden, als de productie van contrails stopt, verdwijnt het opwarmingseffect van contrails binnen enkele dagen.



# 1 Inleiding

De luchtvaart is voor de klimaatopgave een belangrijke uitdaging. De CO<sub>2</sub>-uitstoot van de luchtvaart vanuit Nederland was in 2019, het laatste jaar voor coronapandemie, ca. 12 megaton<sup>12</sup>, qua omvang vergelijkbaar met het personenautoverkeer. Daarbovenop hebben ook de niet-CO<sub>2</sub> klimaat-effecten, als gevolg van uitstoot van stikstofoxiden, roetdeeltjes, sulfaat en de vorming van condenssporen op hoogte, een wezenlijke invloed op de opwarming van de aarde. Die kunnen qua orde van grootte vergelijkbaar zijn met het CO<sub>2</sub>-effect.

Bovendien is de groeisnelheid van de luchtvaart groot waardoor het aandeel van de luchtvaart in de klimaatproblematiek sterk kan gaan toenemen. Het vervoersvolume<sup>13</sup> in de luchtvaart in Nederland is in twintig jaar tijd (tussen 1999 en 2019) met 85% toegenomen (Uitbeijerse en Hilbers, 2018; CBS Statline, 2021), veel meer dan de 20% groei van het wegverkeer in dezelfde periode. Zo'n sterke groei is met efficiëntieverbetering niet bij te houden. De vraag naar luchtvaart zal internationaal waarschijnlijk sterk blijven toenemen. Of de luchtvaart ook in Nederland (zo sterk) blijft groeien, hangt af van de beleidsmatige ruimte die geboden gaat worden.

Het aanpakken van de klimaatimpact voor de luchtvaart is uitdagend, omdat in de lucht gewicht en volume beperkende factoren zijn. Als de overstap van fossiele kerosine naar duurzame energiedragers gepaard gaat met een duidelijk hoger gewicht of een veel groter volume heeft dat grote consequenties. Bovendien zorgen de beperkingen van gewicht en volume al vanaf het begin van de luchtvaart voor een voortdurende stimulans om minder brandstof te gebruiken en dus ook minder uit te stoten. Ook de stevige concurrentie op kosten heeft gezorgd voor het steeds zuiniger worden van vliegtuigen. Met andere woorden, "het laaghangende fruit om in de luchtvaart het brandstofverbruik te verminderen is al geplukt".

Mondiale luchtvaart is verantwoordelijk voor ongeveer 2,5% van de wereldwijde uitstoot van CO<sub>2</sub>. Het overgrote deel daarvan valt niet onder de verantwoordelijkheid van individuele landen. Op basis van afspraken van de IPCC hoeven landen namelijk alleen de emissies van de binnenlandse activiteiten mee te tellen in hun emissietotalen. Luchtvaartemissies vallen daarmee buiten de scope van nationale emissiedoelstellingen zoals het Nederlandse doel om in 2030 de uitstoot van broeikasgassen met minimaal 55% te reduceren ten opzichte van 1990.

Bovendien is de luchtvaart sterk internationaal. De concurrentie en stringent nationaal beleid kunnen leiden tot verplaatsing van vluchten naar andere landen, waardoor mondiaal de CO<sub>2</sub>-uitstoot veel minder afneemt. Het meest effectief is daarmee het maken van beleid in internationaal verband, maar dat proces is stroperig. We kunnen niet zeggen dat de internationale luchtvaart vooroploopt in ambitieus klimaatbeleid. Luchtvaart wordt ook gekarakteriseerd door kleine en sterk wisselende winstmarges. Veel landen steunen hun nationale luchtvaartmaatschappijen in

---

<sup>12</sup> Op de basis van getankte kerosine in Nederland

<sup>13</sup> Het vervoersvolume is uitgedrukt in afgelegde reizigers- en vrachtkilometers in vluchten vanaf Nederland en exclusief mogelijke tweede leg van de Nederlandse passagiers en/of vracht die door buitenlandse luchtvaartmaatschappijen vervoerd worden (bijvoorbeeld overstap in Frankfurt geregeld door Lufthansa, overstap op de Midden-Oosten hubs)

verschillende mate; subsidies en staatseigendom van de luchtvaartmaatschappijen zijn geen uitzondering in deze sector.

Tot slot gaan vliegtuigen lang mee, gemiddeld meer dan 20 jaar. Vlootvernieuwing gaat daardoor langzaam. Twee vliegtuigbouwers (Boeing en Airbus) en drie straalmotorbouwers (GE Aviation, Pratt & Whitney en Rolls-Royce) domineren de wereldmarkt. De efficiëntieverbetering kwam in de afgelopen decennia vooral door efficiëntere motoren en in mindere mate door verbetering van overige vliegtuigtechnologie. De markt is daarom heel geconcentreerd en innovatie is daardoor afhankelijk van het gedrag van een beperkt aantal spelers<sup>14</sup>.

De inzichten van dit rapport zijn gebaseerd op de kennis en informatie over het beleid die medio 2023 beschikbaar waren.

### ***Paden richting klimaatneutrale luchtvaart in 2050***

Nederland en de EU hebben zichzelf ten doel gesteld om uiterlijk in 2050 klimaatneutraal te zijn (European Green Deal). Dit is een grote opgave die veel veranderingen met zich meebrengt. Om de implicaties van deze opgave voor de mobiliteit in, van en naar Nederland in kaart te brengen, verkennen PBL en TNO in een gezamenlijke set rapporten hoe paden naar klimaatneutrale mobiliteit in 2050 eruit kunnen zien. Dit is gedaan voor vier vervoerswijzen: het wegverkeer, de luchtvaart, de binnenvaart en de zeescheepvaart. Op basis van de paden is per vervoerswijze onderzocht welke kansen, uitdagingen en handelingsperspectieven daaruit voortvloeien voor het Nederlandse beleid. Het voorliggende rapport schetst de opgave en de resultaten voor de luchtvaart<sup>15</sup>. Naast de verkenningen per vervoerswijze wordt in een overkoepelende rapportage ingegaan op de lessen die uit de vier verhalen gezamenlijk kunnen worden getrokken voor het mobiliteitssysteem in Nederland.

Dit rapport beschrijft het luchtvaartsysteem en laat mogelijke paden naar een CO<sub>2</sub>-vrije luchtvaart in 2050 zien. De beelden voor 2050 en de paden daarnaartoe zijn een combinatie van verdedigbare aannames over vervoersvolumes, efficiëntieverbetering en bijbehorende inzet van technologieën en energiedragers. De paden naar CO<sub>2</sub>-vrije luchtvaart moeten niet als meest waarschijnlijke uitkomst gezien worden, het is een schets van het speelveld inclusief de uitdagingen die de transitie met zich meebrengt.

Hoe zouden paden richting CO<sub>2</sub>-vrije luchtvaart in 2050 eruit kunnen zien? Hoe gaan vervoersvolumes en energie-efficiëntie zich ontwikkelen? De beelden en bijbehorende paden dekken niet de volledige bandbreedte aan denkbare uitkomsten af en zijn primair bedoeld om op basis van de huidige kennis tot een realistische inschatting te komen van de toekomstige energievraag en de

---

<sup>14</sup> Het is moeilijk om een conclusie te trekken of de marktconcentratie de innovaties bevordert of tegenwerkt. Het ontwikkelproces, de certificering en commercialisatie van nieuwe vliegtuigtypes duurt lang en eist veel investeringen. Vliegtuigfabrikanten moeten ook met veel onderaannemers en fabrikanten van onderdelen werken in complexe ontwikkel- en productieketens.

<sup>15</sup> ZE in 2050 per modaliteit is een keus voor het in deze rapporten uitgevoerde gedachtenexperiment om haalbaarheid te verkennen. Voor de daadwerkelijke realisatie van klimaatneutraliteit in 2050, is er geen harde noodzaak dat iedere modaliteit klimaatneutraal is in 2050. Om klimaatneutraliteit te halen kan het ook in praktijk zo zijn dat het efficiënter of goedkoper is om elders in het systeem negatieve emissies te creëren (CCS met biomassa) dan de luchtvaart (of andere sectoren) zelf helemaal naar klimaatneutraliteit te brengen.

potentie om die vraag op een duurzame manier te bedienen. De paden in deze verkenning zijn globaal uitgewerkt in cijfers en figuren. Het betreft echter geen integrale doorrekening zoals bijvoorbeeld de KEV of de WLO dat wel zijn. Om tot bandbreedtes te komen is gebruik gemaakt van eerder onderzoek van TNO en PBL, eerdere doorrekeningen zoals de KEV 2022 en de WLO-scenario's uit 2015 en literatuurstudie.

Het uitgangspunt voor deze studie is klimaatneutraliteit in 2050. Dit uitgangspunt is gebruikt voor iedere vervoerswijze<sup>16</sup>. In een aanpalende studie van PBL genaamd 'Trajectverkenning Klimaatneutraal' (TVKN) wordt onderzocht hoe de hele Nederlandse economie in 2050 klimaatneutraal zou kunnen worden. De beelden voor luchtvaart die in de voorliggende studie zijn uitgewerkt dienen hiervoor als input.

Deze verkenning richt zich op de periode tot 2050 en redeneert vanuit het nationale en Europese doel van een klimaatneutrale samenleving in (uiterlijk) 2050. In het licht van de klimaatafspraken van Parijs is 2050 'slechts' een tussenstap in het beperken van de opwarming van de aarde. Het pad naar (klimaatneutraal in) 2050 en de ontwikkeling daarna bepaalt uiteindelijk of de Parijsafspraken worden gehaald, niet alleen het emissieniveau in 2050 zelf. Vanuit praktisch oogpunt wordt echter niet gewerkt met koolstofbudgetten<sup>17</sup>. In de verkenning is echter ook onderzocht hoe snel de afname van de emissie van broeikasgassen kan plaatsvinden en welke factoren daarop van invloed zijn.

### **Scope van het rapport**

Deze verkenning richt zich op de *mobiliteit binnen, van en naar Nederland*. Specifiek is als scope gekozen de energievraag van mobiliteit in Nederland<sup>18</sup>. Dit is dezelfde scope die in de Klimaat- en Energieverkenning wordt gebruikt (PBL et al., 2022) en in de nationale broeikasgasinventarisatie die Nederland jaarlijks aan de VN oplevert (RIVM, 2023). De luchtvaart is per definitie een internationale aangelegenheid. Een analyse van de paden richting klimaatneutraal kan dus niet beperkt blijven tot de Nederlandse context. In deze analyse is verondersteld dat de EU en de rest van de wereld ook op een pad zitten dat in lijn is met de Parijsafspraken. Dit pad is niet expliciet gemaakt, maar impliciet gaan we ervan uit dat de paden naar klimaatneutrale mobiliteit in Nederland niet tot grote

---

<sup>16</sup> Het is niet gezegd dat iedere vervoerswijze ook daadwerkelijk klimaatneutraal moet zijn in 2050 om het Nederlandse en Europese doel van een klimaatneutrale samenleving in uiterlijk 2050 te realiseren. Ook is niet gezegd dat klimaatneutrale mobiliteit in 2050 in Nederland in lijn is met de klimaatafspraken van Parijs. Welke emissiereductie in Nederland gerealiseerd moet worden om in lijn met Parijs te handelen valt buiten de scope van deze studie. In PBL (2021) wordt daar wel op gereflecteerd.

<sup>17</sup> Het koolstofbudget is de maximale uitstoot van broeikasgassen die we mondiaal in totaal nog mogen uitstoten om de opwarming van de aarde met een bepaalde kans tot een bepaald niveau te beperken. Hoe ambitieuzer het klimaatdoel en hoe groter de nagestreefde kans van slagen, hoe lager het resterende koolstofbudget is dat daarbij past. Onderzoek naar het koolstofbudget kan onderwerp zijn van vervolgonderzoek. In TVKN wordt op het niveau van het Nederlandse energiesysteem als geheel, inclusief de bunkermarkten voor de lucht- en scheepvaart, verkend hoe ook de klimaatdoelen voor 2030 of 2040 gehaald kunnen worden, naast het doel van klimaatneutraliteit in 2050.

<sup>18</sup> Gezien het feit dat er nauwelijks binnenlandse vluchten zijn, kijken we, vanuit duurzame energie perspectief, naar de benodigde volumes van duurzame energiedragers om de vluchten vanuit Nederland uit te voeren. De impact op het transportvolume van de Nederlandse luchtvaart houdt er rekening met de aanname dat de vluchten vanuit buitenland naar Nederland ook op duurzame energie in 2050 worden uitgevoerd.

uitwijkeffecten leiden naar omringende landen. Iedereen doet mee. Het tempo waarin dit tot emissiereductie leidt en het type oplossingen kan uiteraard wel verschillen per regio.

De paden in dit rapport schetsen de energievraag en de uitstoot van broeikasgassen in de sector tot 2050: wij gebruiken de zogeheten *tank-to-wheel* emissie. Voor klimaatneutraliteit dient de hele keten van de brandstoffen en van de (productie, gebruik en sloop van) vliegtuigen in ogenschouw te worden genomen. Bij de productie en sloop van de vliegtuigen en bij de productie van de energiedragers wordt ook energie gebruikt met bijbehorende uitstoot van broeikasgassen. Deze bijdrage wordt niet expliciet berekend. Er worden in het kader van TVKN aparte rapportages geschreven over de verduurzaming van de elektriciteitsopwekking en over biogrondstoffen. In die rapportages wordt ingegaan op het aanbod van hernieuwbare energiedragers. Voor een overzicht van de totale energieketens voor klimaatneutrale mobiliteit wordt verwezen naar recent onderzoek van het KiM (2022).

### **Leeswijzer**

In dit rapport schetsen we eerst de (klimaat)opgave voor de luchtvaart en de organisatie van het speelveld (hoofdstuk 2). Wij beschrijven kort het huidige beleid omtrent decarbonisatie van de luchtvaart in hoofdstuk 3. Vervolgens brengen we in hoofdstuk 4 de opties in kaart voor de inzet van hernieuwbare energiedragers, efficiëntieverbetering en volumebeperking. Op basis hiervan volgen in hoofdstuk 5 de bijbehorende alternatieve beelden voor een CO<sub>2</sub>-neutrale luchtvaart in 2050 en mogelijke plausibele paden daar naar toe. Die paden naar 2050 zijn niet zonder onzekerheden en belemmeringen. Handelingsperspectieven om de verschillende decarbonisatiepaden mogelijk te maken, worden in hoofdstuk 6 besproken.

## 2 De opgave

Het is gebruikelijk om de CO<sub>2</sub>-uitstoot van de luchtvaart in Nederland te baseren op de afzet van brandstof op de luchthavens. Iedere kilo telt in de luchtvaart. Daardoor geeft de getankte brandstof een goede indicatie van het brandstofgebruik voor vluchten vanaf Nederland<sup>19</sup>. Dit betekent dus niet dat alle in Nederland getankte brandstof ook leidt tot uitstoot in het Nederlandse luchtruim. Sterker nog, het merendeel van de uitstoot gegenereerd door in Nederland getankte brandstof vindt plaats buiten onze landsgrenzen. De hoeveelheid getankte brandstof is tussen 1990 en 2019 toegenomen van 66 PJ naar 167 PJ, omgerekend naar CO<sub>2</sub>-uitstoot een toename van 5 naar 12 Mton (Statline, Hoeveel brandstof verbruikt de luchtvaart in Nederland). De energievraag en CO<sub>2</sub>-uitstoot van de Nederlandse luchtvaart in 2019 vormen een uitgangspunt voor de paden naar CO<sub>2</sub>-vrij luchtvaart in 2050.

### 2.1 Huidige staat van luchtvaart in Nederland

Het vervoersvolume in de luchtvaart bestaat uit vrachtvervoer en passagiersverkeer. Het vrachtvervoer van en naar Nederland is grotendeels intercontinentaal. Het passagiersverkeer is voor het grootste gedeelte Europees. Voor Europese vluchten worden meestal kleinere vliegtuigen ingezet en kortere afstanden afgelegd. Europese bestemmingen vertegenwoordigen het grootste aantal vluchten en het grootste aantal reizigers. Maar voor de CO<sub>2</sub>-uitstoot is dat anders: 70% daarvan kan worden toegerekend aan intercontinentale vluchten.

Op basis van de gegevens uit het Aeolus model<sup>20</sup> voor 2017, kan een indicatie gegeven worden over het aantal luchtreizen, de afgelegde kilometers en de daaraan te koppelen CO<sub>2</sub>-uitstoot van Nederlanders, buitenlandse bezoekers en transferpassagiers via Nederlandse luchthavens.

---

<sup>19</sup> Er wordt mogelijk in beperkte mate meer getankt op Schiphol dan op de vluchten vanaf Schiphol wordt verbruikt, zogenaamde 'Fuel Tankering', de praktijk van meer brandstof dan nodig voor een veilige uitvoering van de vlucht te tanken en mee te nemen als de brandstofprijs op de bestemming significant hoger is dan op de herkomstluchthaven (Peeters et al., 2021). Deze praktijk is beperkt toepasbaar omdat het leidt tot extra brandstofverbruik en het "opeten" van payload capaciteit door extra kerosinegewicht. Het komt meestal voor op korte-afstandsvluchten naar kleine luchthavens waar kerosine duurder is dan bij de grote (thuis)hubs. Wij verwijzen naar een onderzoek van Eurocontrol (2019) voor meer details.

<sup>20</sup> Aeolus is een mondiaal en strategisch luchtvaartmodel, waarmee voor bepaalde toekomstsscenario's onder meer het aantal luchtreizigers, de hoeveelheid luchtvracht en het aantal vliegtuigbewegingen voor Nederlandse luchthavens kunnen worden berekend.

Nederlanders maakten in 2017 volgens het Aeolus model 38 miljoen vliegreizen en legden daarmee 113 miljard kilometer af. Dit resulteerde in 10,4 Mton CO<sub>2</sub>-uitstoot. De helft daarvan is toe te schrijven aan de 29 miljoen reizen binnen Europa en de andere helft aan intercontinentale reizen. 80% van de CO<sub>2</sub>-uitstoot betreft niet-zakelijk vliegverkeer.

De CO<sub>2</sub>-uitstoot van alle reizen van, naar of via de Nederlandse luchthavens is beduidend hoger: ruim 21 Mton. Deze uitstoot kan niet alleen aan de Nederlandse luchthavens toegerekend worden, omdat inkomende vluchten op buitenlandse luchthavens worden getankt. Ruim 13 Mton betreft Nederlandse en buitenlandse reizigers die aankomen of vertrekken vanaf Nederlandse luchthavens, zonder dat ze hier overstappen (O/D passagiers). De 13 miljoen transferpassagiers combineren voor een groot deel een Europese en een intercontinentale vlucht en zijn daardoor verantwoordelijk voor bijna 8 Mton CO<sub>2</sub>-uitstoot.

De CO<sub>2</sub>-uitstoot van de luchtvaart wordt bepaald door drie aspecten: het vervoersvolume, de (energie)efficiëntie en het type energiedrager dat wordt gebruikt. Tussen 1999 en 2019 is zoals gezegd het volume met 85% toegenomen; een gemiddelde groei van ca. 3% per jaar. De efficiëntie (zowel zuinigere vliegtuigen als een hogere bezettingsgraad en het hogere aantal passagiers per m<sup>2</sup> van in vliegtuigen beschikbare ruimte) is in die periode met ca. 39% verbeterd, oftewel met gemiddeld 1,6% per jaar. De brandstofafzet is daardoor in dezelfde periode met 33% toegenomen, ofwel met 1,4% per jaar. Tot nu toe wordt vrijwel volledig op kerosine gevlogen, waardoor ook de CO<sub>2</sub>-uitstoot met 1,4% per jaar is toegenomen.

Door de COVID-19 pandemie was de omvang van de luchtvaart in 2020 en 2021 veel geringer. Het aantal vluchten was ruim 50% lager, het aantal passagiers lag 68% lager en de kerosineafzet daalde zo'n 40%. Alleen het vrachtvolume bleef op het niveau van 2019.

## 2.2 Vooruitblik

De verwachting is dat de komende jaren de omvang van de luchtvaart uitgedrukt in aantal reizigers en tonnen vracht (ook uitgedrukt in passagierskilometers en vracht tonkilometers) zich weer zal herstellen tot het niveau van 2019 en waarschijnlijk verder zal groeien. Een belangrijke vraag daarbij is het toekomstige overheidsbeleid over het aantal vluchten dat Schiphol mag verwerken. Daarom maken we hier een onderscheid tussen enerzijds het aantal vliegbewegingen, dat door dat beleid waarschijnlijk beperkt gaat worden, en anderzijds het transportvolume dat ook bij een beperking van het aantal vluchten nog steeds zou kunnen groeien als op Schiphol grotere vliegtuigen worden ingezet.

De verdere groei van het volume is afhankelijk van vraag en aanbod. De vraag wordt bepaald door onder andere bevolkingsgroei en economische groei die beide resulteren in meer vraag naar passagiersvervoer en/of vrachtovervoer. Een ander aspect dat de vraag beïnvloedt is in hoeverre vliegen duurder of goedkoper wordt. Het aanbod wordt mede bepaald door begrenzing van de luchtvaart, waarbij de vraag is in welke mate verschillende soorten capaciteitsrestricties leiden tot begrenzing van het vervoersvolume-aanbod.

## 2.2.1 Beperkingen

Capaciteitsbeperkingen kunnen twee vormen krijgen. De eerste, en de meest bekende vorm, is een beperking van het aantal vliegbewegingen. In september 2023 heeft het kabinet besloten<sup>21</sup> om het aantal jaarlijkse vliegbewegingen op Schiphol van 500.000 naar 452.500 te verlagen, maar in november 2023 heeft het kabinet besloten om deze beperking voorlopig in te trekken. Het betekent dat Schiphol voorlopig weer maximaal 500.000 vliegbewegingen zal krijgen. De beperking van het aantal vluchten heeft geen evenredige impact op het transportvolume: luchtvaartmaatschappijen kunnen de capaciteit van vliegtuigen waarmee ze naar of van Schiphol vliegen verhogen. Bijvoorbeeld, een “narrow body” vliegtuig zoals de Airbus A320 of Boeing B737 vervangen door een “wide body” vliegtuig zoals de Airbus A350 of Boeing B777 waarmee het aantal passagiers per vliegbeweging ruim verdubbelt. Deze mogelijkheid bestaat met name voor buitenlandse luchtvaartmaatschappijen; voor de meeste vervoerders die op Schiphol gevestigd zijn, is het vergroten van het aantal passagiers per vlucht op korte termijn moeilijker. Voor de op Schiphol gevestigde luchtvaartmaatschappijen kan verandering in vliegtuiggrootte gerealiseerd worden via aanschaf van grotere vliegtuigen, hetgeen lang kan duren vanwege de lange cycli van vlootvernieuwing.

De tweede vorm van capaciteitsbeperking is het beperken van het aantal passagiers of het volume van emissies (ook van geluid). Het beperken van het aantal passagiers is juridisch lastig. Het beperken van emissies, bijvoorbeeld door middel van een CO<sub>2</sub>-(uitstoot)plafond is in principe mogelijk. In maart 2023 heeft het kabinet het principebesluit genomen over de invoering en vormgeving van een CO<sub>2</sub>-plafond voor de luchtvaart. Op het moment van schrijven is het kabinet bezig met het uitwerken van vormen en implementatie van CO<sub>2</sub>-plafond. Het beperken van geluidhinder is al bestaand beleid, maar kan verder worden aangescherpt.

Zonder beperkingen zou de luchtvaart van en naar Nederland nog flink door kunnen groeien. Het Aeolus model voorspelde (CPB / PBL, 2016) voor de WLO scenario's Hoog en Laag een groei van de vraag van 2,1 tot 3,2% groei per jaar tot 2050. De omvang van de luchtvaart loopt echter tegen acceptatie grenzen aan. Om geluidshinder te beperken mocht Schiphol tot 2020 tot maximaal 500.000 vluchten per jaar groeien. Het niveau van 500.000 vliegbewegingen is in 2019 bereikt. In het regeerakkoord 2017-2021 was het voornemen opgenomen om met een 50/50 regel de helft van het effect van geluidsarmere vliegtuigen te gebruiken voor het toestaan van verdere groei, maar dit voornemen is niet omgezet in regelgeving. Daarnaast is ook veiligheid een zorgpunt.

Inmiddels is ook de stikstofuitstoot en het ontbreken van een natuurvergunning problematisch. In het coalitieakkoord van het kabinet (Rutte IV) is benoemd dat men het grote aanbod aan rechtstreekse verbindingen (hubfunctie) van Schiphol wil behouden, maar tegelijkertijd de impact van de luchtvaart op mens, milieu en natuur wil verminderen. Concrete besluiten over de invulling van deze ambitie, waaronder het besluit over het al dan niet openen van Lelystad Airport, zijn op het moment van schrijven van ons rapport nog niet genomen. Daarmee is feitelijk nog onduidelijk welke groei van de luchtvaart in Nederland op langere termijn mogelijk zal zijn. Het is denkbaar dat gematigde groei wordt toegestaan, maar ook denkbaar dat het aantal vluchten op het huidige niveau moet blijven of zelfs zou moeten krimpen. Ook inzet van beleidsinstrumenten zoals capaciteitsbeperking of beperking van externe effecten is denkbaar.

---

<sup>21</sup> Notificatie Europese Commissie Balanced Approach procedure Schiphol [bijlage-2-notificatiedocument-balanced-approach-procedure-schiphol.pdf](#)

Bij krimp zal naar verwachting een deel van de reizigers, vooral transferpassagiers, uitwijken naar andere luchthavens. Deze ontwikkeling kan impact hebben op de hubfunctie van Schiphol en de netwerkkenmerken zoals het aantal directe verbindingen en vluchtfrequenties. De volumeontwikkeling van de luchtvaart in Nederland hangt daarmee af van: (1) een combinatie van de vraagontwikkeling van zowel businessreizigers als vakantiegangers; (2) de impact van klimaatbeleid op die vraag (wordt daardoor vliegen duurder en in hoeverre vermindert dat de vraag?); en (3) van de toegestane capaciteitsontwikkeling.

### 2.2.2 Verwachte ontwikkelingen

De efficiëntie van de luchtvaart bestaat uit operationele efficiëntie (optimale beladingsgraad, efficiënte vliegroutes) en het gebruik van energie-efficiënte vliegtuigen. Het energiegebruik per eenheid transportvolume (passagier-kilometer en vracht-tonkilometer) is in twintig jaar tijd met zo'n 39% afgenomen doordat nieuwe vliegtuigen energiezuiniger zijn, de bezettingsgraad van vliegtuigen toenam (Uitbeijerse en Hilbers, 2018) en de dichtheid van passagiers (aantal stoelen per m<sup>3</sup>) ook toenam, met name op het midden-afstand segment waar geen "full flat bed" businessclass stoelen aangeboden worden.

De komende decennia wordt nog een verdere verbetering van de vervoersefficiëntie verwacht, door een (bescheiden) verhoging van de bezettingsgraad, de instroom van zuinigere vliegtuigen en door beter luchtruimmanagement (zoals via de Single European Sky<sup>22</sup>).

De mogelijkheden om de beladingsgraad verder te verbeteren lopen tegen grenzen aan. De bezettingsgraad is inmiddels ruim boven de 80%<sup>23</sup> en de beschikbare fysieke ruimte in vliegtuigen wordt al zo efficiënt mogelijk gebruikt. Deels komt de hoge bezettingsgraad ook door de prijsstrategie van luchtvaartmaatschappijen. Met optimalisaties en dynamic pricing slagen ze erin hun opbrengsten te maximaliseren door het maximaal aantal stoelen te verkopen maar wel tegen uiteenlopende tarieven. Er zijn nog wel mogelijkheden om vliegroutes te verkorten<sup>24</sup> door een efficiëntere indeling van het luchtruim. Toegenomen efficiëntie kan via lagere brandstofkosten en daardoor lagere ticketprijzen ook tot extra vraag en zo tot extra volume leiden.

Het laatste aspect is de gebruikte energiedrager. Tot nu toe is de inzet van hernieuwbare brandstoffen zeer beperkt en wordt vooral op fossiele kerosine gevestigd. Door gebruik te maken van alternatieve brandstoffen zoals (geavanceerde) biobrandstoffen, of – op termijn – groene waterstof en synthetische kerosine kan de netto uitstoot van broeikasgassen per gebruikte energie-eenheid dalen. Als het gebruik van fossiele brandstof verminderd moet worden en de alternatieve brandstoffen duurder zijn, kan dat de sector ook prikkelen om de efficiëntieverbetering te versnellen of via hogere ticketprijzen de vraag naar luchtvaart te verkleinen.

---

<sup>22</sup> Het Single European Sky is een initiatief van de Europese Commissie met het doel om het Europese luchtruimbeheer te moderniseren en te harmoniseren.

<sup>23</sup> Bijvoorbeeld heeft Ryanair al in 2019 een bezettingsgraad van 96% gehad.

<sup>24</sup> Verkorten van vliegroutes betekent kortste luchtroutes (en niet op de aardeoppervlak geprojecteerde routes). De lucht beweegt continue en de luchtvaartmaatschappijen kiezen om (sterke) tegenwinden te vermijden en als mogelijk meewinden te gebruiken. Daarom kunnen meest efficiënte luchtroutes langer zijn dan de kortste op de oppervlak geprojecteerde route.



## 2.3 Niet-CO<sub>2</sub> klimaatimpact

De klimaatimpact als gevolg van CO<sub>2</sub>-uitstoot door de luchtvaart is redelijk goed bekend, omdat ten eerste zoals hierboven is beschreven de hoeveelheid uitstoot relatief nauwkeurig te bepalen is op basis van het brandstofverbruik, en ten tweede omdat de klimaatimpact van die uitstoot ook redelijk goed bekend is. Onderzoek naar de klimaatimpact van de luchtvaart was in het verleden dan ook voornamelijk gericht op de klimaatimpact door CO<sub>2</sub>. Er zijn echter meer emissies die worden veroorzaakt door de luchtvaart die, direct dan wel indirect, invloed hebben op de opwarming van de aarde. Hierbij gaat het om water(damp), stikstofoxiden, roetdeeltjes en sulfaat die op grote hoogte in de atmosfeer een thermisch effect hebben.

Hieronder worden deze effecten kort toegelicht:

- Stikstofoxiden (NO<sub>x</sub>): deze stoffen verhogen de concentratie van het broeikasgas ozon in de atmosfeer, en verminderen de concentratie van het broeikasgas methaan (die zelf de concentratie van ozon en water vergroot).  
Over het geheel genomen heeft op dit moment de toevoeging van NO<sub>x</sub> aan de atmosfeer een versterkend broeikaseffect, dat sterk afhankelijk is van achtergrondconcentraties van andere stoffen (en dat, bij eventueel toekomstig zeer lage concentraties van methaan, zelfs negatief zou kunnen worden). NO<sub>x</sub> heeft voornamelijk effect in de hoge troposfeer en lage stratosfeer: het gebied waar de cruise fase van de vlucht zich bevindt.
- Waterdamp en fijnstof (particulate matter, PM): gecombineerd zorgen deze twee voor condenssporen (contrails) die vervolgens weer de vorming van cirruswolken stimuleren.
- Cirruswolken hebben een versterkend broeikaseffect. Over het algemeen zorgen water en fijnstof op dit moment samen voor een versterkend broeikaseffect, maar de onzekerheid rond dit effect is groot. De vorming van contrails is temperatuurafhankelijk; lage atmosfeer-temperaturen zorgen voor meer contrailvorming waardoor dit op grotere hoogtes en ook 's nachts tot een groter versterkend broeikaseffect leidt.
- Water heeft afzonderlijk ook nog een broeikaseffect: water absorbeert (door de aarde uitgezonden langgolvlige) straling en heeft daardoor een versterkend broeikaseffect. Luchtvaart zorgt voor een toename van de waterinhoud in de stratosfeer.
- Fijnstof en zwavel hebben afzonderlijk ook nog een broeikaseffect: zij vormen aerosolen die straling weerkaatsen, maar doen dit zowel naar boven als naar beneden waardoor het effect zowel versterkend als verminderend is. Fijnstof lijkt netto een (licht) positief broeikaseffect te hebben en zwavel een negatief broeikaseffect.

Niet alleen is het lastig om de klimaateffecten van bovenstaande emissies te kwantificeren, ook is het lastig om de klimaatimpact direct te vergelijken met die van CO<sub>2</sub>, omdat de levensduur van genoemde stoffen over het algemeen veel korter is dan die van CO<sub>2</sub> (Lee et al., 2021). Met de Effective Radiative Forcing (ERF)<sup>25</sup> methode wordt het opwarmingseffect van niet-CO<sub>2</sub> emissies in kaart

---

<sup>25</sup> Het directe opwarmingseffect van niet-CO<sub>2</sub> uitstoot is vaak korter dan dat van CO<sub>2</sub>. De levensduur van "langdurige" contrails is niet meer dan enkele dagen, als ze verdwijnen dan warmen ze de aarde niet meer op. Het opwarmingseffect van contrails kan echter (terwijl ze in de atmosfeer blijven) sterk zijn. De warmte wordt door de aarde "opgeslagen" zodat op lange termijn de temperatuur stijgt. Om het effect van niet-CO<sub>2</sub>-uitstoot vergelijkbaar met het effect van CO<sub>2</sub> te maken, gebruikt men het concept van Effective Radiative Forcing (ERF).

gebracht. Lee heeft voor 2018 het netto opwarmingseffect van de luchtvaart geraamd op 101 milliwatt (mW) per m<sup>2</sup>, waarvan 34 mW door CO<sub>2</sub>, 57 mW door contrails en 18 mW door NO<sub>x</sub>. (Lee et. al (2021)). Er bestaat een grote onzekerheid over de grootte van niet-CO<sub>2</sub> effecten<sup>26</sup>, zie Tabel 2.2. Het is belangrijk om op te merken dat het om het instantane opwarmingseffect van contrails gaat. Het opwarmingseffect zal verdwijnen als er geen contrails meer gecreëerd worden: het vermijden van gebieden waar contrails kunnen vormen zal zorgen voor de onmiddellijke verdwijning van contrails en dus van het bijbehorende opwarmingseffect.

Tabel 2.2: Direct opwarmingseffect van de luchtvaart in 2018 (Lee et al 2021)

Klimaat <span>effect</span> <sup>27</sup>	Opwarming, mW/m <sup>2</sup> (95% zekerheidsinterval)
CO <sub>2</sub>	34 (28, 40)
Contrails	57 (17, 98)
NO <sub>x</sub>	18 (1, 29)
<b>Opsomming van andere effecten (fijnstof, zwavel, methaan afname, enz.)</b>	-8 <sup>28</sup>
<b>Totaal</b>	<b>101 (55, 145)</b>

Van de niet-CO<sub>2</sub>-effecten hebben de cirruswolken, een type wolken die op een hoogte van 6 tot 12 kilometer voorkomen, en de vorming van ozon door NO<sub>x</sub> vermoedelijk dus de grootste klimaatimpact.

De niet-CO<sub>2</sub>-effecten maken het extra lastig om de luchtvaart klimaatneutraal te maken. Het vervangen van kerosine door een CO<sub>2</sub>-neutrale energiedrager kan dit probleem wel verminderen, al is de mate waarin sterk afhankelijk van de energiedrager. Doordat de niet-CO<sub>2</sub>-effecten bovendien locatieafhankelijk zijn, kan er ook met aangepast vlieggedrag winst worden behaald, al leidt dat soms wel tot meer energiegebruik.

<sup>26</sup> De zekerheidsmarges van het opwarmingseffect van niet-CO<sub>2</sub> uitstoot zijn groot. Voor meer details over de zekerheidsmarges verwijzen wij naar Lee et. al (2021).

<sup>27</sup> Bij CO<sub>2</sub> toont de tabel een cumulatief effect van de luchtvaart tot 2018. In tegenstelling tot CO<sub>2</sub> zorgen contrails voor een instantaan (tijdelijk) effect. Met andere woorden, als de productie van contrails stopt, verdwijnt het opwarmingseffect van contrails binnen enkele dagen.

<sup>28</sup> Dit is een opsomming van een aantal van de niet-CO<sub>2</sub> effecten zoals gepresenteerd door Lee et. al (2021). Voor deze opsomming kunnen wij het betrouwbaarheidsinterval niet aangeven: de lezer kan meer details vinden in het paper van Lee et. al. 2021

## 3 Het speelveld in beleid

Er zijn drie niveaus van luchtvaartbeleid: internationaal, Europees en nationaal. De beleidsruimte voor Nederland wordt medebepaald door de ICAO en EU; het beleid van de EU is ook deels bepaald door de ICAO en het Verdrag van Chicago (ICAO Doc 7300/9).

### 3.1.1 Internationaal beleid

Nederland is een lid van **ICAO**, de luchtvaartorganisatie van de Verenigde Naties. In het klimaatakkoord van Parijs is de klimaatopgave voor de internationale luchtvaart niet bij de afzonderlijke lidstaten maar bij ICAO neergelegd. ICAO heeft voor de aanpak van de klimaatopgave in 2016 het klimaatplan CORSIA opgesteld (“Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation”) met onder andere financiering van herbebossing en projecten voor duurzame energie, ter waarde van ongeveer 2% van de jaarlijkse inkomsten van de sector. Het programma is gestart in 2020, met vrijwillige deelname tot 2027, waarna de compensatieregeling verplicht wordt. De ambitie van CORSIA is bescheiden: geen daling van de CO<sub>2</sub>-uitstoot, maar de groei van CO<sub>2</sub>-uitstoot vanaf 2020 compenseren; niet-CO<sub>2</sub>-effecten worden genegeerd door CORSIA. CORSIA is daarmee minder ambitieus dan de EU in haar ETS (zie paragraaf 3.1.2). De EU heeft dan ook uitgesproken dat voor de intra-Europese vluchten het strengere ETS geldt en niet CORSIA.

Wel is het aannemelijk dat het tot een aanscherping van internationale afspraken komt. Recent heeft de ICAO het Long-Term Global Aspirational Goal (LTAG) initiatief aangenomen (ICAO, 2022). Om de doelen van het Parijsakkoord te halen, stelt LTAG voor dat de internationale luchtvaart netto nul CO<sub>2</sub>-emissies uitstoot tegen 2050. Nederland is een lid van ICAO en de LTAG-afspraken zijn van toepassing op de Nederlandse luchtvaartsector. De CO<sub>2</sub>-neutraliteit in 2050 kan op vele manieren worden bereikt, waaronder met emissiecompensaties. De klimaatimpact van dit beleid zal daarom sterk afhangen van de manier waarop deze maatregelen worden geïmplementeerd en de kwaliteit van de uitvoering.

De wereldwijde luchtvaartsectororganisatie ATAG (Air Transport Action Group) scherpte in het najaar van 2021 de eigen doelstelling aan naar een netto nul CO<sub>2</sub>-uitstoot in 2050, waarbij men ervan uitgaat dat 19% van de doelstelling mogelijk wordt gemaakt door compensatie en CO<sub>2</sub>-afvang (ATAG, 2021)<sup>29</sup>. De Europese luchtvaartsector heeft in 2021 in “Destination 2050” (van de Sman et al, rapport van NLR en SEO, 2021) een route naar nul CO<sub>2</sub>emissie uit de luchtvaart in 2050 laten uitwerken. De druk op de luchtvaartsector om te verduurzamen neemt toe.

De afwezigheid van sluitende internationale afspraken creëert speelruimte voor de luchtvaartmaatschappijen van buiten de EU om marktaandeel te vergroten ten koste van de Europese luchtvaartmaatschappijen.

Klimaatgerelateerde eisen binnen de EU zoals brandstofkostenverhogende maatregelen (brandstofbelasting, bijmengverplichting) geven een kostenvoordeel aan bijvoorbeeld luchthubs in het

---

<sup>29</sup> De praktijk leert dat vrijwillige compensatieschema's vaak niet van degelijke kwaliteit waren om te zorgen voor daadwerkelijk zero uitstoot.

Midden-Oosten (Istanbul, Dubai,...) en dat is gunstiger voor de luchtvaartmaatschappijen uit deze regio's. Dit kan gevolgen hebben voor de concurrentiepositie van de Europese luchtvaartmaatschappijen. Bij de implementatie van bovengenoemde beleidsinstrumenten moet rekening worden gehouden met het effect op concurrentiepositie van de Europese luchtvaartmaatschappijen.

Het samenspel tussen volumeontwikkeling en verduurzaming wordt intrigerend. De sector wil kunnen groeien om verduurzaming te kunnen financieren. Maar de marges zijn klein in de luchtvaart, dus is het maar de vraag of er met groei meer financieringsruimte komt voor verduurzaming. Als de verduurzaming achterblijft betekent groei juist meer CO<sub>2</sub>-uitstoot. Een scenario waarin de mate van verduurzaming de ruimte voor de luchtvaart bepaalt, biedt meer zekerheid voor de klimaatopgave. Het ontwikkelen en tot productie brengen van nieuwe type vliegtuigen en nieuwe energiedragers vraagt om grote investeringen. Het belang van heldere internationale kaders is daarmee evident.

### 3.1.2 Europees beleid

De **EU** heeft in 2021 in **Fitfor55** een ambitieus programma voor Europees klimaatbeleid neergelegd. Voor de luchtvaart behelst het:

- ReFuelEU Aviation is een oplopende bijmengverplichting voor hernieuwbare brandstof (2% in 2025, 6% in 2030, 70% in 2050) voor intra-Europese en vertrekkende intercontinentale vluchten. Vanaf 2030 moet een deel synthetisch zijn, en in 2050 minimaal 35% van het totale volume. Om te zorgen dat maatschappijen zich aan de bijmengverplichting houden, wordt tankering (extra brandstof meenemen voor een volgende vlucht) aan banden gelegd<sup>30</sup>. Per maatschappij moet de gebruikte brandstof minimaal 90% van de getankte brandstof zijn<sup>31</sup>.
- ETS<sup>32</sup>: geen gratis rechten meer voor luchtvaart, ETS-prijzen op intra-Europese vluchten
- ETD<sup>33</sup>: er komt een kerosinebelasting op intra-Europese vluchten. In het voorstel komt het minimumtarief in 2033 op een niveau van omgerekend 0,37 euro per liter. Voor passagiersvluchten wordt het tarief vanaf 2023 in stapjes van 10% per jaar opgebouwd, tot het uiteindelijke doelniveau in 2033. Vrachtluchten<sup>34</sup> en hernieuwbare alternatieve brandstoffen zijn vrijgesteld. Op het moment van schrijven zijn er nog

---

<sup>30</sup> De praktische implementatie van controle lijkt op dit moment zeer lastig te zijn. Tankering heeft een vrij beperkte scope wegens vermindering van payload van de vluchten en extra brandstof verbruik.

<sup>31</sup> Deze eis wordt wellicht verder verduidelijkt en uitgewerkt. Bijvoorbeeld op de vluchten van 2 uur (meest voorkomende B737 / A320 vluchten binnen Europa) wordt ca 5 ton kerosine verbruikt en landt men gemiddeld met 2,5-3,5 ton brandstof aan boord (reserve eisen vanuit vliegveiligheid). Dit type vluchten zou niet aan de norm van 90% verbruikt getankte brandstof voldoen.

<sup>32</sup> Emissions Trading System (ETS) aviation: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_22\\_7609](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_7609)

<sup>33</sup> Energy Taxation Directive (ETD). [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/document/print/en/qanda\\_21\\_3662/QANDA\\_21\\_3662\\_EN.pdf](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/document/print/en/qanda_21_3662/QANDA_21_3662_EN.pdf)

<sup>34</sup> Het is onduidelijk hoe deze belasting op belly vracht wordt toegepast: als dedicated vrachtluchten van deze belasting uitgezonderd worden, en passagiersvluchten, die ook veel vracht kunnen vervoeren, volledige belasting betalen, dan creëert deze belasting potentieel een prikkel om meer dedicated vrachtluchten uit te voeren en minder gebruik te maken van de beschikbare belly ruimte: dat kan potentieel leiden tot meer uitstoot. Voor meer achtergronden over dit onderwerp verwijzen we naar Davydenko et al. (2020).

onderhandelingen gaande over de ETD: invoering van de ETD eist een unanimitieit van de EU lidstaten.

### 3.1.3 Nationaal beleid

De **Nederlandse Rijksoverheid** heeft als regelgever direct invloed op de capaciteit van luchthavens, de vliegbelasting en een eventuele nationale bijmengverplichting voor duurzame brandstoffen. Daarnaast heeft de Nederlandse Rijksoverheid een meerderheidsbelang in de Schiphol Group (eigenaar Schiphol, Rotterdam The Hague airport, vliegveld Lelystad, meerderheidsbelang in vliegveld Eindhoven en minderheidsbelang in Maastricht Aachen Airport) en een minderheidsbelang in de Air France-KLM Groep. Als lid van de EU en van ICAO<sup>35</sup> heeft Nederland een stem in het Europees en wereldwijde luchtvaartbeleid.

Het **coalitieakkoord** van het inmiddels demissionaire Kabinet-Rutte IV gaf aan dat de regering de voorstellen voor verduurzaming uit de Luchtvaartnota 2020-2050 “Verantwoord vliegen naar 2050” (2020) wil doorzetten, waaronder emissieplafonds per luchthaven. De vliegticketbelasting is verhoogd naar 26,43 euro, waarbij de opbrengst deels gebruikt wordt voor de verduurzaming van de luchtvaart en vermindering van leefomgevingseffecten. Europese afspraken over het rechtvaardig belasten van de luchtvaart worden ondersteund. Het gelijke speelveld binnen de EU en dat van de EU ten opzichte van derde landen staat hierbij centraal. De ambitie is ook dat in Europa vervoer per trein zo snel mogelijk, zowel qua tijd als qua kosten, een goed alternatief wordt voor vliegen<sup>36</sup>. Op nationaal niveau wordt het bijmengen van biokerosine verplicht<sup>37</sup> en wordt de productie van synthetische kerosine gestimuleerd. Wel wil het coalitieakkoord de sterke hubfunctie van Schiphol behouden. Vanwege de diverse uitdagingen op het gebied van stikstof, (ultra)fijnstof, geluidsoverlast, leefomgevingskwaliteit, veiligheid en woningbouw zoekt de overheid een integrale oplossing die zekerheid en perspectief biedt voor zowel de hubfunctie van Schiphol als de omgeving van de luchthaven.

Het bestaande nationale luchtvaartbeleid is vastgelegd in de **Luchtvaartnota** 2020-2050 “Verantwoord vliegen naar 2050” (2020). De nota wil de klimaatdoelen uit het Akkoord Duurzame Luchtvaart borgen: de CO<sub>2</sub>-uitstoot van uit Nederland vertrekkende vluchten in 2030 terugbrengen op het niveau van 2005, in 2050 minimaal halveren ten opzichte van 2005 en in 2070 tot nul reduceren. Men wil inzetten op ambitieuzere internationale klimaatdoelen en -instrumenten voor de luchtvaart in ICAO- en EU-verband. Zodra ICAO voor 2050 een ambitieuzer klimaatdoel vaststelt, neemt de regering dat doel over voor de internationale luchtvaart vanuit Nederland. De nota stelt dat innovaties sneller worden ingevoerd, namelijk ontwikkeling en toepassing van duurzame brandstoffen, nieuwe vliegtuigontwerpen en nieuwe soorten aandrijving (bijvoorbeeld op elektriciteit of waterstof). De nota geeft aan dat Nederland actief inzet op de invoering van een Europese bijmengverplichting van hernieuwbare brandstoffen. Indien de invoering van een Europese verplichting niet (tijdig) wordt bereikt, stelt de Luchtvaartnota dat Nederland er naar zal streven per

---

<sup>35</sup> ICAO is de Internationale Burgerluchtvaartorganisatie, Engels: International Civil Aviation Organization ([icao.int](http://icao.int))

<sup>36</sup> Action Plan to boost long-distance and cross-border passenger rail services, [Action Plan to boost passenger rail \(europa.eu\)](http://ActionPlan.to.boost.passenger.rail.europa.eu)

<sup>37</sup> In het Ontwerpakkoord Duurzame Luchtvaart is afgesproken dat in 2030 14% van de brandstof voor luchtvaart in Nederland duurzaam is.

2023 een nationale bijmengverplichting in te voeren. Tot slot dient een aanpak uitgewerkt te worden om niet-CO<sub>2</sub>-klimaatmissies een plek te geven in het klimaatbeleid voor de luchtvaart.

Het **Akkoord Duurzame Luchtvaart** uit 2021 is een akkoord tussen overheid (Ministeries I&W en EZK) en de sector (luchtvaartmaatschappijen, luchthavens, vliegtuigbouwers en energieleveranciers). Het akkoord richt zich op bijmenging van duurzame brandstoffen, vlootvernieuwing, retrofitting, verduurzaming van grondgebonden operaties, hybride-elektrisch vliegen, luchtruimherziening voor efficiëntere vliegroutes en het vervangen van korte afstandsvluchten door vervoer per spoor. De ambitie van het akkoord is geen CO<sub>2</sub>-uitstoot op Nederlandse luchthavens van grondgebonden activiteiten van de burgerluchtvaart in 2030 (zoals vervoer van bagage, passagiers en vracht), de CO<sub>2</sub>-uitstoot van de internationale commerciële luchtvaart vanuit Nederland moet terug zijn op het niveau van 2005 in 2030, nog verder halveren in 2050 en in 2070 mag de luchtvaart in en vanuit Nederland geen CO<sub>2</sub> meer uitstoten. Voor de uitvoering van dit akkoord bestaat er een duurzame luchtvaarttafel. Luchtvaartmaatschappijen bekijken de verduurzamingsopgave wel vanuit bedrijfs-economisch perspectief. Ze zijn geen voorstander van maatregelen als een verhoging van de vliegbelasting of een CO<sub>2</sub>-plafond. De marges van luchtvaartmaatschappijen zijn klein, de schuldenlast van bedrijven als de KLM is hoog. De hevige concurrentie maakt deze bedrijven kwetsbaar, ondanks het feit dat door de vrijstelling van BTW en accijns de belastingdruk laag is.

## 4 De opties

In deze paragraaf beschrijven we de mogelijke bouwstenen die bijdragen aan de transitie naar een klimaatneutrale luchtvaart:

- De inzet van duurzame energiedragers (4.1): om op nul CO<sub>2</sub>-emissie te komen is dit uiteindelijk de doorslaggevende factor
- Het verbeteren van de efficiëntie (4.2): vermindert het beslag op energie en kan het kostenverhogend effect van het gebruik van duurzame energiedragers verminderen
- Het verminderen van de omvang van de luchtvaart (4.3): vermindert de uitstoot en het gebruik van duurzame energie en kan ook het bijeffect zijn van hogere kosten
- Het verminderen van de niet-CO<sub>2</sub>-effecten (4.4)
- Tot slot gaan we nog nader in op de mogelijke rol van compenseren<sup>38</sup> (offset) (4.5)

### 4.1 Inzet van duurzame Energiedragers

#### 4.1.1 Algemeen

Een vliegtuigmotor heeft voor de voortstuwing een energiedrager nodig. Klassiek is dit een verbrandings(turbine)motor die gebruik maakt van kerosine. Dezelfde verbrandingsmotor kan ook gebruik maken van biokerosine of synthetische kerosine, beide worden ook SAF genoemd (Sustainable Aviation Fuel, ofwel kerosine uit hernieuwbare bron). Ook waterstof kan in een verbrandingsmotor worden toegepast, maar dat vraagt aanpassingen aan de motor. Een geheel ander type aandrijving zijn batterij-elektrische en brandstofcel-elektrische aandrijving. Die kunnen gebruik maken van energie uit waterstof en/of batterijen en zijn daarmee een alternatief voor het gebruik van brandstof in een verbrandingsmotor. In totaal zijn er 6 mogelijkheden, zie Tabel 4.1.

---

<sup>38</sup> Het Fit-for-55 plan gaat uit van de noodzaak van negatieve emissies (sinks) om in 2050 rest-emissies te compenseren. Compensatie moet geen maatregel zijn om een doel te bereiken maar is een terugval-optie als het technisch onmogelijk is om in 2050 op nul emissies uit te komen. Gegeven de niet-CO<sub>2</sub> impacts zal een vorm van compensatie nodig zijn om netto klimaatneutraal te worden.

Tabel 4.1: Alternatieven voor het aandrijvingssystem

Soort motor	Energiedrager in vliegtuig	Bron
Verbrandingsmotor	Kerosine	Aardolie
	Biokerosine	Biomassa
	Synthetische Kerosine	H <sub>2</sub> uit hernieuwbare elektriciteit <sup>39</sup> + CO <sub>2</sub> uit Direct Air Capture (DAC) of flue gases (Carbon Capture and Use (CCU)); biomassa kan ook een bron van koolstof zijn.
	Waterstof	Elektrolyse + duurzame elektriciteit via elektrolyse
Brandstofcel + elektromotor	Waterstof (+ evt. batterij)	Elektrolyse + duurzame elektriciteit
Batterij-elektrisch	Batterij	Duurzame elektriciteit

Elke mogelijkheid heeft voor- en nadelen.

**Biokerosine** kan in bestaande vliegtuigen worden toegepast. Biokerosine is nu al in beperkte mate beschikbaar. Op dit moment is er echter niet genoeg om de hele luchtvaartsector te voorzien. Een verschuiving naar een nieuwe generatie, meer duurzame geavanceerde<sup>40</sup> biobrandstoffen zal nodig zijn. Biokerosine lijkt in vergelijking met de andere oplossingen op dit moment relatief goedkoop. Biobrandstoffen zijn echter (maatschappelijk) niet onomstreden<sup>41</sup> en de beschikbaarheid van voldoende duurzame biomassa kan een knelpunt worden. De mate van NO<sub>x</sub>-uitstoot en ook wateruitstoot van biokerosine is vergelijkbaar met die van fossiele kerosine, en daarmee zijn de individuele niet-CO<sub>2</sub>-effecten ook vergelijkbaar. De uitstoot van PM-deeltjes is vermoedelijk wat lager dan die voor fossiele kerosine waardoor de vorming van condenssporen ook wat minder is.

**Synthetische kerosine** is een alternatief. Ook deze brandstof kan, net als biokerosine, in bestaande vliegtuigen worden toegepast. De productie van synthetische kerosine staat nog in de kinderschoenen. De verwachting op dit moment is dat het in vergelijking met biobrandstoffen duurder blijft.

Hoewel de efficiëntie van straalmotoren steeds beter wordt<sup>42</sup>, maakt het lage rendement van productie van synthetische kerosine op dit moment een minder efficiënte optie vergeleken met

<sup>39</sup> Elektriciteit kan ook uit een grijze bron komen. In dat geval is de synthetische kerosine geen hernieuwbare brandstof. Er is geen garantie dat eerste generatie e-fuels volledig duurzaam zijn.

<sup>40</sup> Geavanceerde biobrandstoffen zijn gedefinieerd als vloeibare of gasvormige biobrandstoffen gemaakt van materialen genoemd in deel A van bijlage IX van de richtlijn hernieuwbare energie II (RED II). Dit betreft vooral hout- en grasachtige grondstoffen.

<sup>41</sup> [Biomassa in balans \(ser.nl\)](#)

<sup>42</sup> Thermische efficiëntie van de nieuwe straalmotoren is al boven de 55%: het is inderdaad lager dan de efficiëntie van elektrische motoren, maar het verschil in de efficiëntie is veel minder dan bijvoorbeeld tussen de ICE's (Internal Combustion Engines in bijvoorbeeld auto's en vrachtwagens) en elektrische motoren. Gekoppeld met de propulsieve efficiëntie van boven de 70%, ligt de totale efficiëntie van moderne straalmotoren boven de 40%. Ref: Commercial Aircraft Propulsion and Energy Systems Research: Reducing Global Carbon Emissions (2016)



volledig elektrische oplossingen. Er is relatief veel hernieuwbare elektriciteit nodig. Voor synthetische kerosine geldt, net als voor biokerosine, dat de mate van NO<sub>x</sub>- en ook wateruitstoot vergelijkbaar is met die van fossiele kerosine, maar de uitstoot van PM-deeltjes<sup>43</sup> en daarmee de vorming van condenssporen ligt wat lager.

**Waterstof** is gemakkelijker en energie-efficiënter te maken dan synthetische kerosine, maar moeilijker te gebruiken. Het vraagt vergaande aanpassingen aan het ontwerp van vliegtuigen. Waterstof zelf is licht maar volumineus. Bij lange afstanden zou een groot deel van het ruim in het vliegtuig gevuld zijn met waterstoftanks. Het gewicht van de tanks neemt het gewichtsvoordeel van de brandstof weg. Het betekent dat de toepassing van waterstof vooralsnog vooral voor afstanden tot 2000 kilometer als alternatief wordt gezien. Gebruik van brandstofcelaandrijving is efficiënter en heeft als groot voordeel dat ook de niet-CO<sub>2</sub>-effecten veel geringer zijn. Aan de andere kant hebben brandstofcelaandrijvingen moeite om voor het opstijgen of afbreken van een landing<sup>44</sup> van een vliegtuig voldoende stuwkracht te leveren en ze voegen ook substantieel meer gewicht toe<sup>45</sup>. Als oplossing voor de brandstofcelaandrijving wordt gedacht aan hybride toepassingen zoals kort gebruik van elektriciteit uit batterijen voor het opstijgen en in het geval van afbreking van een landing.

Waterstof zou niet alleen nieuwe vliegtuigontwerpen vereisen, maar ook aanleg van (vloeibare) waterstof distributie- en tankinfrastructuur (op alle vertrek én aankomst locaties). Bij grotere luchthavens zoals Schiphol kunnen de kosten van aanleg en onderhoud van waterstofinfrastructuur over een groot aantal vluchten gespreid worden. Bij kleine luchthavens met een beperkt aantal vluchten worden de kosten per vlucht zeer hoog. Omdat vliegtuigen aan beide kanten van de vlucht moeten tanken en er nog geen ontwerpen in zicht zijn die op kerosine én waterstof kunnen vliegen, kan de afwezige waterstofinfrastructuur op de luchthavens van aankomst of kleinere luchthavens een serieuze drempel zijn voor de uitrol van waterstofvliegtuigen.

Voor gebruik van waterstof in verbrandingsmotoren geldt dat NO<sub>x</sub>-emissies minder zijn dan voor kerosine. De uitstoot van water(damp) is hoger dan voor kerosine, maar omdat er geen PM-deeltjes uitgestoten worden vindt naar verwachting minder condensvorming plaats. Bovendien lijken de ijskristallen en contrails zich op een andere manier te vormen waardoor het opwarmingseffect minder is.

Bij gebruik van waterstof in een brandstofcel vindt geen NO<sub>x</sub>-uitstoot plaats. Er wordt wel net als bij de verbranding van waterstof meer water(damp) geproduceerd. Maar de uitstoot van waterdamp, en daarmee de vorming van contrails, kan in dit geval sterk verminderd of zelfs volledig geëlimineerd worden (door bijvoorbeeld condensatie en vervolgens dumpen als water), wat een voordeel biedt ten opzichte van verbranding van waterstof.

---

<sup>43</sup> Brandstoffen met een hoge concentratie van aromaten (fossiele kerosine) veroorzaken een hogere uitstoot van fijnstof omdat aromaten langzamer verbranden dan andere koolwaterstoffen. Synthetische kerosine bevat geen aromaten, en veroorzaakt dus minder condenssporen, Faber et al (2022).

<sup>44</sup> Bij het afbreken van een landing moeten motoren binnen een aantal seconden vol vermogen leveren.

<sup>45</sup> Huidige generatie brandstofcellen wegen 0,625 kg per kW aan vermogen (Kadyk et. al, 2018). Voor cruise fase van de vlucht heeft een typische B737 of A320 rond 10-15 MW nodig. Brandstofcellen zouden aanzienlijk meer gewicht met zich mee brengen (leeg gewicht van de huidige generatie van dit type vliegtuigen ligt tussen de 40 en 50 ton) en vereisen veel zwaardere vliegtuigontwerpen met meer vermogen aan motoren en brandstofcellen.

**Batterij-elektrische aandrijving** is voor het wegverkeer een belangrijke oplossing, maar in de luchtvaart eigenlijk nauwelijks. Het grote probleem van batterijen is de lage energiedichtheid en dus het hoge gewicht. De energie-inhoud per kilogram is veel lager dan voor kerosine (ongeveer een factor 45, afhankelijk van het batterijontwerp). Alleen voor kleine vliegtuigen en korte afstanden wordt het als een mogelijke oplossing gezien, maar algemene veiligheidsnormen zoals vliegduur en de eisen voor doorstart en uitwijk naar andere luchthavens maken elektrische vliegtuigen onpraktisch in de lijnoperaties. Elektrisch vliegen is in termen van niet-CO<sub>2</sub>-effecten wel de gunstigste optie, omdat hierbij helemaal geen uitstoot plaatsvindt (uiteraard wel onder de voorwaarde dat de elektriciteit duurzaam is opgewekt). Tabel 4.2 somt meest belangrijke karakteristieken van de verschillende opties op.

Tabel 4.2: Meest belangrijke karakteristieken van alternatieve energiedragers voor de luchtvaart

Type energiedrager	Belangrijke voordelen	Belangrijke nadelen
<b>Biokerosine</b>	Geschikt voor conventionele vliegtuigen; relatief goedkoop; geavanceerde productiemethodes concurreren niet met voedselketens	Op dit moment niet genoeg beschikbaar, vereist nieuwe productiemethodes, bio-brandstoffen uit energiegewassen hebben een zeer hoog landgebruik (Bakker et al, 2022)
<b>Synthetische kerosine</b>	Geschikt voor conventionele vliegtuigen; in het geval van DAC circulair: CO <sub>2</sub> (uit de lucht), water en (duurzame) elektriciteit zijn de invoer in productie proces	Relatief duur; minder energie-efficiënt; veel hernieuwbare elektriciteit nodig
<b>Waterstof</b>	Relatief energie-efficiënt; relatief makkelijk productieproces; niet-CO <sub>2</sub> effecten kunnen beperkt worden	Niet geschikt voor conventionele vliegtuigen, vereist nieuwe types vliegtuigen; vereist waterstofinfrastructuur op de luchthavens (zowel hubs als kleinere luchthavens)
<b>Batterij</b>	Meest energie-efficiënt; geen niet-CO <sub>2</sub> effecten	Niet geschikt voor conventionele / grotere vliegtuigen; lage energiedichtheid van batterijen maakt het onpraktisch

Hieronder gaan we dieper in op de opties voor energiedragers.

## 4.1.2 Biobrandstoffen

### **Productieroutes van biobrandstoffen en huidig gebruik**

Er worden op dit moment acht verschillende biobrandstofproductieroutes voor de luchtvaart erkend door de American Society for Testing and Materials (ASTM) standaarden. Tabel 4.3 introduceert deze productieroutes. Het maximale bijmengpercentage, vastgesteld via certificering, is hier ook bij aangegeven. Het is belangrijk hierbij op te merken dat deze bijmengpercentages de komende jaren wellicht opgehoogd worden, zodat gevlogen kan worden met meer SAF of volledig op SAF. Op dit moment wordt getest met het vliegen op SAF; daarvoor wordt met name HEFA gebruikt. HEFA-SPK is momenteel de enige commercieel beschikbare vorm van biokerosine. In 2020 omvatte het gebruik van SAF in de EU luchtvaartmarkt minder dan 0,05% van het totale brandstofgebruik in de luchtvaart (SWD(2021) 633).

Tabel 4.3: Door ASTM gecertificeerde productieroutes van biobrandstoffen voor gebruik in commerciële vluchten (uit IRENA (2021))

<b>Naam</b>	<b>Proces/grondstoffen</b>	<b>Jaar van certificering</b>	<b>Maximum toegestane bijmengpercentage</b>
<b>HEFA-SPK (Hydrogenated esters and fatty acids)</b>	Waterstofbehandeling van olieachtige gewassen* en andere vette gewassen en residuen (bijv. UCO en dierlijke vetten)	2011	50%
<b>FT-SPK (Fischer-Tropsch hydroprocessed synthetic paraffinic kerosene)</b>	Thermochemische route, gebaseerd op biomassavergassing gevolgd door FT-synthese. Grondstoffen omvatten gewassen voor energieproductie, lignocellulose-grondstoffen (bijvoorbeeld landbouw- en bosresiduen) en vast gemeentelijk afval (gft)	2009	50%
<b>FT-SPK/A (synthetic paraffinic kerosene aromatics)</b>	Productie van vliegtuigbrandstof door biochemische fermentatie van biograndstoffen zoals suiker en zetmeel bevattende gewassen* en lignocellulose-biograndstoffen	2015	50%
<b>AtJ-SPK (Alcohol to jet synthetic paraffinic kerosene)<sup>1</sup></b>	Waterstofbehandeling van vetten afkomstig van microalgen	Gecertificeerd in 2016 voor isobutanol als tussenproduct Gecertificeerd in 2018 voor ethanol als tussenproduct	30% (isobutanol route), 50% (ethanol route)
<b>HC-HEFA-SPK (hydrocarbon-hydroprocessed ester and fatty acid)</b>	Hydrothermische liquefactie met vetzuuresters en vetzuren als grondstoffen	2020	10%
<b>CHJ-SPK (catalytic hydrothermolysis)</b>	Biochemische route waarin gemodificeerde gisten suikers (zowel conventioneel** als lignocellulose) fermenteren naar C15 koolwaterstoffen (farneseen), welke vervolgens via waterstofbehandeling in farnesane worden omgezet.	2020	50%
<b>SIP-SPK (synthesized iso-paraffinis from hydroprocessed fermented sugars)</b>	Co-verwerking van plantaardige** en dierlijke vetten in bestaande petroleum raffinaderijen, waar waterstofbehandeling één van de processtappen is. Co-verwerking van FT vloeistoffen in bestaande raffinaderijen.	2014	10%
<b>Co-verwerking van vetten en FT vloeistoffen</b>		Co-verwerking vetten in 2018, FT vloeistoffen in 2020	tot 5%

\* De methanol route is nog niet ASTM-gecertificeerd

\*\* Het EU ReFuelEU Aviation voorstel sluit voedselgewassen uit (conventionele gewassen of voedsel- en voedergewassen). Deze brandstoffen zijn afgetopt in de RED III.

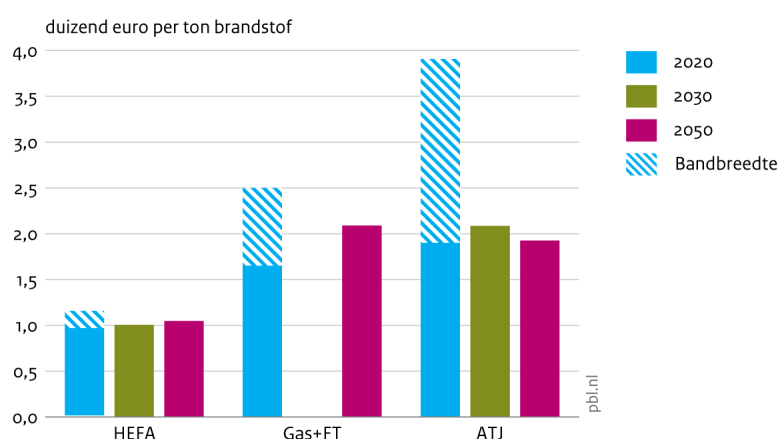
## Efficiëntie van productie

De efficiëntie van de genoemde productieroutes van HEFA varieert tussen de 69% en 83% op energiebasis (Neuling, 2014). De efficiëntie zal vermoedelijk niet meer sterk toenemen omdat de technologie al behoorlijk volwassen is. De efficiëntie van het productieproces van de geavanceerde brandstoffen varieert sterk. Op dit moment hebben de meeste processen wel een efficiëntie hoger dan 50%, maar lager dan voor HEFA-productie (Neuling, 2014). Hoe de efficiëntie zich zal ontwikkelen, is erg onzeker, maar deze zal naar verwachting voor de geavanceerde routes wel toenemen.

## Hoge productiekosten in vergelijking tot conventionele kerosine

Eén van de voornaamste redenen voor de kleine markt en de daaraan gerelateerde afwezigheid van grootschalige productiecapaciteiten is het prijsverschil tussen duurzame en conventionele luchtvaartbrandstoffen en gebrek aan beleid dat toepassing van duurzame brandstoffen afdwingt. De competitieve aard van de luchtvaartsector en de druk om te concurreren op ticketprijzen, maakt dat er weinig neiging is tot investering in 'groene' alternatieven. Brandstofkosten zijn de belangrijkste gebruikskosten (gemiddeld 1/4 - 1/3 van het totaal (Klauber et al., 2017)) in de luchtvaart. Als SAF's (uit geavanceerde grondstoffen) op grote schaal geproduceerd gaan worden, zullen naar verwachting de productiekosten dalen door technologische leereffecten en schaalvoordelen. Figuur 4.1 toont de prijsniveaus zoals geraamd in het Ricardo-project (Europese Commissie 2020).

## Kosten per type energiedrager



Bron: PBL & TNO

Figuur 4.1: Toekomstig kostenreductiepotentieel van biokerosine productietrajecten<sup>46</sup>

## Duurzaam aanbod aan biomassa

Er is veel debat over verantwoorde beschikbaarheid van biomassa<sup>47</sup> (PBL, 2020; SER, 2020; I&W 2020, 2022). De inzet van duurzame biomassa zou niet ten koste mogen gaan van voedselproductie en rekening moeten houden met ecologische beperkingen, zoals het ontzien van gebieden met wartertekorten, met risico op bodemdegeneratie of gebieden met een hoge biodiversiteit. Gezien deze beperkingen en de potentiële vraag vanuit andere sectoren kan voldoende beschikbaarheid een

<sup>46</sup> Geen data voor Gas+Ft voor 2030 en geen ranges voor kosten van ATJ in 2030 en 2050 in de EC studie.

<sup>47</sup> [Biomassa in balans \(ser.nl\)](#), [Beschikbaarheid en toepassingsmogelijkheden van duurzame biomassa. Verslag van een zoektocht naar gedeelde feiten en opvattingen. \(pbl.nl\)](#),

knelpunt worden<sup>48</sup>. Echter naarmate wegvervoer geëlektrificeerd wordt, zullen biobrandstoffen die nu voor wegvervoer bestemd zijn beschikbaar komen voor de andere toepassingen, ook deels voor de luchtvaart<sup>49</sup>, uiteraard in voor straalmotoren geschikte vorm<sup>50</sup>. Omdat in andere sectoren, zoals de elektriciteitsproductie, er meer alternatieven zijn om klimaatneutraliteit te bereiken, wordt de beschikbaarheid van biomassa voor luchtvaart en scheepvaart, naast inzet voor de productie van materialen en in de chemie, wel als prioritair gezien (SER, 2020; I&W en EZK 2020, 2022). Dit vraagt ten eerste om meer R&D-activiteiten om de huidige en toekomstige volumes van biobrandstoffen geschikt te maken (qua vereiste eigenschappen) voor luchtvaart en ten tweede om het opschalen van de productie van geavanceerde biobrandstoffen (met name hout- en grasachtige grondstoffen) die niet met de voedselproductie concurreren.

### 4.1.3 Synthetische brandstoffen voor de luchtvaart

Een tweede alternatief voor fossiele kerosine is het gebruik van synthetische kerosine. Synthetische kerosine kan worden gemaakt uit waterstof (geproduceerd via elektrolyse uit hernieuwbare elektriciteit) en een koolstofbron (doorgaans CO<sub>2</sub>). Wanneer de waterstof voor dit proces is verkregen vanuit elektrolyse wordt gesproken over e-kerosine.

#### **Conversieprocessen**

In het Fischer-Tropsch (FT) proces wordt syngas (een mengsel van CO en H<sub>2</sub>) omgezet in een mengsel van koolwaterstoffen dat voor een groot deel kan worden omgezet in synthetische kerosine. Het syngas kan onder andere verkregen worden via vergassing van biomassa. Methanol biedt een andere productieroute: methanol kan ook vanuit CO<sub>2</sub> of CO en H<sub>2</sub> worden geproduceerd en worden omgezet in kerosine. Net zoals nu bij de raffinage van olie het geval is, kan het chemische proces zo worden ingesteld dat, afhankelijk van de vraag, meer of minder brandstoffen voor de luchtvaart, scheepvaart en/of grondstoffen voor de chemische industrie worden geproduceerd. De technologie om vanuit syngas of methanol synthetische kerosine te produceren is dus voorhanden en de grootste uitdaging om tot (e-)kerosine te komen lijkt dan ook te liggen in de productie van de energie en grondstoffen (elektriciteit, H<sub>2</sub> en CO<sub>2</sub> of CO) aan de ene kant en opschaling en kostenverlaging aan de andere kant.

#### **CO<sub>2</sub> ten behoeve van de productie van e-fuels**

De koolstof in kerosine komt na gebruik (verbranding) vrij als CO<sub>2</sub> en wordt uitgestoten in de atmosfeer. Om tot een hernieuwbare brandstof te komen, moet de CO<sub>2</sub> die als grondstof wordt gebruikt voor synthetische kerosine dus ook uit de atmosfeer gehaald worden. Een manier om CO<sub>2</sub> uit de lucht te halen is met direct air capture (DAC) technologie. Dit proces wordt al gedemonstreerd, hoewel nog op relatief kleine schaal van ca. 4000 ton per jaar (PBL 2018<sup>51</sup>, Climeworks, 2021). Naast opschaling van de DAC-installaties zal ook het energiegebruik (verder) beperkt moeten worden om de kosten verder te verlagen. Het valt te verwachten dat verdere ontwikkeling en optimalisatie van

---

<sup>48</sup> In de TVKN studie van PBL genaamd (Trajectverkenning Klimaatneutraal) wordt integraal gekeken op het systemisch niveau naar hoe de hele Nederlandse economie in 2050 klimaatneutraal zou kunnen worden.

<sup>49</sup> Beschikbaarheid kan alleen op systeemniveau worden beschouwd.

<sup>50</sup> De kwaliteitseisen voor luchtvaartbrandstof liggen hoger dan die voor wegvervoer. Dat kan de markt moeilijker maken.

<sup>51</sup> [NEGATIEVE EMISSIES. Technisch potentieel, realistisch potentieel en kosten voor Nederland. \(pbl.nl\)](#)

de technologie zal leiden tot een lager energiegebruik, naast het feit dat waarschijnlijk ook gebruik kan worden gemaakt van restwarmte van andere processen (Fasihi et al., 2019).

Koolstof in biomassa komt ook uit de lucht en dus kan biogene (d.w.z. niet-fossiele) CO<sub>2</sub> ook als grondstof dienen voor productie van (e-)kerosine. Deze biogene CO<sub>2</sub> kan bijvoorbeeld komen uit afvalverbrandingsinstallaties<sup>52</sup>, uit biogascentrales, of uit processen waarin biobrandstoffen worden geproduceerd. In dit laatste geval kan bijvoorbeeld H<sub>2</sub> (vanuit elektrolyse) worden bijgemengd na het biomassavergassingsproces zodat een hoger percentage van de koolstof uit biomassa kan worden omgezet in brandstoffen. Dit zal dan leiden tot een combinatie van bio- en e-kerosine in het uiteindelijke product waarbij de energie in de kerosine deels uit biomassa en deels uit elektriciteit komt (ca. 1:1) en de koolstof geheel uit biomassa.

Naast de hernieuwbaarheid van de CO<sub>2</sub>-bron zullen ook de kosten van de CO<sub>2</sub> die geleverd wordt aan het e-kerosine productieproces belangrijk zijn. Deze kosten kunnen erg variëren en zijn afhankelijk van het type bron en de locatie hiervan. Wanneer er waterstof aan het bestaande proces kan worden toegevoegd, zoals bij biomassavergassing, zullen de kosten voor de CO<sub>2</sub> minimaal zijn. Dit zal ook het geval zijn voor processen waarin toch al een relatief zuivere stroom van CO<sub>2</sub> vrijkomt, zoals bij bijvoorbeeld een biogascentrale. Bij afvang van CO<sub>2</sub> uit rookgassen<sup>53</sup> lopen de kosten erg uiteen en hangen deze vooral af van de zuiverheid van de gasstroom en de concentratie van CO<sub>2</sub> hierin. Een kostenoverzicht voor afgevangen CO<sub>2</sub>-emissies is in 2017 gerapporteerd voor verschillende processen, zoals elektriciteits-, staal- en kunstmestproductie, en locaties (Irlam, 2017). Voor geconcentreerde CO<sub>2</sub>-stromen kwamen de kosten op 20-33 dollar per ton afgevangen CO<sub>2</sub>, terwijl voor minder geconcentreerde gasmengsels de kosten uitkomen tussen de 60 en 194 dollar per ton afgevangen CO<sub>2</sub> (prijsspeil 2015). Hoewel in de huidige regelgeving geen duidelijke voorkeur is voor niet-fossiele CO<sub>2</sub>, zal het gebruik van fossiele CO<sub>2</sub> uit puntbronnen gekoppeld zijn met het Europese emissiehandel systeem (ETS). Dit zal een prijsopdrijvend effect hebben aangezien de CO<sub>2</sub> prijs ergens betaald moet worden voor de CO<sub>2</sub> uit een fossiele bron. De EU-ETS prijs ligt op dit moment rond de 85 euro per ton CO<sub>2</sub> en zal vermoedelijk stijgen (Ember, 2022; PBL KEV 2022<sup>54</sup>). Als CO<sub>2</sub> niet uit een hernieuwbare bron komt dan zal deze EU-ETS prijs opgeteld moeten worden bij de kosten voor afvang. Kosten voor DAC liggen nu nog erg hoog, mede door de vroege ontwikkelingsstatus van de technologie. De verwachting is dat deze kosten nog flink kunnen dalen en inschattingen laten zien dat CO<sub>2</sub>-productiekosten van onder de 200 euro per ton CO<sub>2</sub> mogelijk zouden moeten zijn (Keith et al., 2018; Fasihi et al., 2019). Op basis van al deze gegevens zullen de kosten voor CO<sub>2</sub> als grondstof voor de productie van e-kerosine ergens rond de 200 euro per ton CO<sub>2</sub> komen te liggen.

### **Elektriciteit en waterstof ten behoeve van de productie van e-fuels**

Zoals al genoemd is het gebruik van hernieuwbare elektriciteit essentieel voor de productie van hernieuwbare waterstof (en indirect e-kerosine). Het aanbod en de kosten van elektriciteit zullen

---

<sup>52</sup> Afval bevat bijna altijd ook niet-biogene koolstof. Dus de CO<sub>2</sub> in het rookgas van verbrandingsinstallaties is maar gedeeltelijk van biogene oorsprong.

<sup>53</sup> Binnen de EU loopt een discussie over de datum (orde 2035-2040) waarna de koolstofbron voor e-kerosine niet meer (gedeeltelijk) van fossiele oorsprong mag zijn. Tegen die tijd dat e-kerosine op grote schaal geproduceerd zal gaan worden kan rookgas van fossiele oorsprong dus niet meer als koolstofbron worden gebruikt.

<sup>54</sup> [Klimaat- en Energieverkenning 2022 \(pbl.nl\)](#)

daarom een belangrijke rol spelen in de opschaling van waterstofproductie en (in het verlengde daarvan) e-kerosine routes. Zonne- en windenergie zullen naar verwachting het grootste aandeel hebben in het toekomstige aanbod en de kosten hiervan. Het potentieel voor zonne-energie in Nederland is groot en in scenario's varieert de geprojecteerde capaciteit van 16 tot 84 GW (Afman & Rooijers, 2017). Voor wind op zee wordt vaak 60 GW als potentieel genoemd (Matthijssen et al., 2018). Het kabinet kijkt of voor de verdere uitrol van windenergie op zee na 2030 de bovenkant van de bandbreedte van de energiescenario's (38-72 GW)<sup>55</sup> gerealiseerd kan worden. Dit betekent dat er gekeken wordt naar ca. 50 GW in 2040 en ca. 70 GW in 2050.<sup>56</sup> Doordat de zon niet altijd schijnt en de wind niet altijd waait zal zonder energie/elektriciteitsopslag een elektrolysefabriek niet altijd kunnen draaien.

Een groot voordeel van een elektrolysefabriek is dat deze ingezet kan worden op momenten van overschot aan groene elektriciteit: naarmate de opwekcapaciteit van hernieuwbare elektriciteitsbronnen groter wordt, zullen overschotten vaker optreden (Jain et al. 2023, Samani et al. 2020). Keerzijde zijn de tijden zonder elektriciteitsoverschot waarin de (kostbare) elektrolysefabriek niet kan werken: dit zal de productiekosten verhogen. Uiteindelijk zal er een balans gevonden moeten worden tussen de kosten van stroom en de kosten van de fabriek. De investeringskosten voor elektrolyse zijn nog erg hoog, maar deze kunnen naar verwachting nog aanzienlijk dalen door verschillende innovaties en leereffecten (Detz & Weeda, 2022).

In andere landen kan het potentieel aan hernieuwbare elektriciteitsproductie en het aantal draaiuren van de elektrolysefabriek hoger zijn, waardoor ook de waterstofproductiekosten beduidend lager zouden kunnen uitvallen. Ook is het de vraag of er voldoende hernieuwbare elektriciteit opgewekt kan worden in Nederland om in de vraag naar waterstof (en e-fuels) te kunnen voorzien. Het is daarom waarschijnlijk dat een (groot) deel van de toekomstige energie(dragers) zal worden geïmporteerd net zoals dat nu het geval is met olie, kolen en gas. Het is nog onduidelijk welke waardeketen en energiedragers het meest optimaal, snelst opschaalbaar en/of het meest economisch aantrekkelijk zijn. Zo kan gekozen worden voor de import van biomassa, waterstof, waterstofdragers of hernieuwbare brandstof zelf. Uiteraard hebben deze keuzes een belangrijke invloed op de productiecapaciteit in Nederland (zie ook de paragraaf over import).

### **Energiegebruik**

Wanneer alle energie voor de gehele keten uit elektriciteit komt is er ca. 2,0-2,2 GJ aan elektriciteit nodig om 1 GJ aan e-kerosine te produceren. De meeste elektriciteit is nodig om waterstof te produceren via elektrolyse, waarbij de energetische efficiëntie ca. 58-70% bedraagt. Deze efficiëntie kan in de toekomst nog iets omhoog, vooral wanneer hoge-temperatuurelektrolyse wordt toegepast en de daarvoor benodigde stoom uit restwarmte van andere processen komt. DAC technologie gebruikt energie om CO<sub>2</sub> uit de lucht te halen. Wij gaan hier uit van 0,25 MWh aan elektriciteit per ton CO<sub>2</sub>, waarbij de aanname is dat extra benodigde warmte uit restwarmte gehaald kan worden.

Een alternatief voor de productie van CO<sub>2</sub> met behulp van DAC is door gebruik van rookgassen die vrijkomen bij industriële processen. Deze route is over het algemeen energie-efficiënter en daardoor

---

<sup>55</sup> Eerder is in o.a. de Noordzee Energie Outlook 2050 uitgegaan van een bandbreedte van 38-72 GW windenergie op zee voor 2050

<sup>56</sup> Kamerbrief windenergie op zee 2030-2050 (16 september 2022)

ook goedkoper omdat CO<sub>2</sub> is in grote mate aanwezig. Een nadeel van het gebruik van CO<sub>2</sub> uit rookgassen is overigens dat men afhankelijk blijft van stromen die tijdens de transitie naar een koolstofarme economie naar verwachting kleiner worden.

Bij de conversie van CO<sub>2</sub> en H<sub>2</sub> naar kerosine gaat ca. 20-30% van de energie uit H<sub>2</sub> verloren. De energetische efficiëntie lijkt via methanolsynthese iets hoger te liggen dan de route via het FT-proces, maar beide routes zijn, inclusief elektrolyse en DAC, nog niet op commerciële schaal gedemonstreerd.

### **Productiekosten**

De onzekerheid over de energetische efficiëntie maakt het inschatten van de totale investerings- en productiekosten nog lastig en onzeker.

De huidige productiekosten van e-kerosine liggen waarschijnlijk (ruim) boven de 2 euro per liter, maar toekomstige inschattingen geven een range weer van 0,5 tot 2 euro per liter waarbij de aannames voor bijvoorbeeld het aantal draaiuren van de fabriek en de kosten van CO<sub>2</sub> en elektriciteit grote invloed hebben op het resultaat (Detz et al., 2018; IEA, 2019; van Kranenburg et al., 2021; Saric et al., 2021; Verbeek et al., 2020; Yugo & Soler, 2019). De kosten voor CO<sub>2</sub> en elektriciteit bepalen in het algemeen het grootste deel van de kosten. Bij investerings- en operationele kosten (CAPEX+OPEX) van 1 euro per liter zal bij CO<sub>2</sub>-kosten van 50 euro per ton CO<sub>2</sub> de productie van e-kerosine ergens tussen de 1,5 en 2,5 euro per liter uitkomen. Dit is 2-5 keer zo hoog als de huidige fossiele kerosine prijs van ca. 0,5-0,9 euro per liter. Efficiëntieverbeteringen, vooral in de elektrolysestap, kunnen het elektriciteitsverbruik verder doen afnemen.

### **Import**

In gebieden waar de kosten voor hernieuwbare elektriciteit en circulaire CO<sub>2</sub> laag zijn zullen de productiekosten voor e-kerosine relatief laag zijn. De transportkosten<sup>57</sup> zijn, vooral in het geval van vloeibare brandstoffen zoals kerosine, slechts een kleine extra kostencomponent. Gemiddeld bestaat meer dan 95% van de totale invoerkosten uit de productiekosten. Wel is het soms lastig om op dezelfde locatie zowel goedkope hernieuwbare elektriciteit als circulaire CO<sub>2</sub> voorhanden te hebben. Water moet ook aanwezig zijn voor de elektrolyse. Is lokaal geen CO<sub>2</sub> voorhanden dan zijn routes waarin bijvoorbeeld waterstof(dragers) worden geëxporteerd naar gebieden waar wel voldoende aanvoer van circulaire CO<sub>2</sub> mogelijk is erg interessant. Het transport en de opslag van waterstof(dragers) is vaak wel duurder dan transport van vloeibare brandstoffen als kerosine. Het is dus goed mogelijk dat import van e-kerosine uit gebieden waar de productiekosten laag zijn een belangrijke rol gaat spelen (Saric et al., 2021).

### **Potentieel in Nederland**

Wanneer vanuit economisch, politiek, of strategisch belang e-kerosine in Nederland geproduceerd gaat worden, zal hiervoor naast de conversietechnologie ook elektriciteit en CO<sub>2</sub> beschikbaar moeten zijn. Wanneer er 2,2 GJ aan elektriciteit nodig is om 1 GJ e-kerosine te produceren, is voor 10 PJ aan e-kerosine dus 22 PJ aan elektriciteit nodig (het bunkervolume voor de luchtvaart in 2019 was 167

---

<sup>57</sup> Zolang de bijmengverplichtingen nog ver onder de 100% zitten, moet het mogelijk zijn om e-fuels te kopen en die door een ander laten verbruiken, maar dan zelf de credits te krijgen voor het kopen van e-fuels en te voldoen aan het mandaat. Dat zou transportkosten schelen.



PJ). Om dit te leveren zal ongeveer 1,5 GW wind-op-zee (grotweg 2,5% van het potentieel) of meer dan 10 GW aan zon-PV (grotweg 8% van het potentieel)<sup>58</sup> geïnstalleerd moeten worden samen met vrijwel dezelfde capaciteit aan elektrolysefabrieken. Er zal dan ook ruim 0,7 megaton aan circulaire CO<sub>2</sub> geleverd moeten worden. Bij een vraag van 100 PJ aan e-kerosine (dit is ongeveer de hoeveelheid van energie die er in 2050 nodig is in het scenario met nadruk op e-fuels, zie sectie 5.2) loopt dit dus op tot 25% van het potentieel voor wind-op-zee of 80% van het potentieel aan zon-PV. Dit suggereert dat om tot voldoende hoeveelheden van duurzame brandstoffen te komen, moeten deze waarschijnlijk in de toekomst niet alleen in Nederland geproduceerd worden, maar ook geïmporteerd worden, inclusief bunkerbrandstoffen voor andere modaliteiten zoals zeevaart.

#### 4.1.4 Waterstof en batterij-elektrisch

Om de inzet van fossiele kerosine in de luchtvaart te vervangen zijn biobrandstoffen en synthetische brandstoffen het meest geëigend. Zoals hierboven beargumenteerd is, resulteert inzet van hernieuwbare “drop-in fuels” in CO<sub>2</sub>-neutraliteit. Hierdoor wordt het klimaatteffect van vliegen echter maar ten dele beperkt. Zoals besproken kleven er ook nog andere klimaatnadelen aan het gebruik van dit type brandstoffen. Zo is er nog steeds sprake van uitstoot van luchtverontreinigende stoffen (zoals NO<sub>x</sub> en fijnstof), de beschikbaarheid van voldoende SAF is onzeker en de productie van synthetische kerosine is energie-inefficiënt. Daarnaast moet er rekening worden gehouden met de nog relatief onbekende ‘niet CO<sub>2</sub>-gerelateerde’ klimaatteffecten door bijvoorbeeld de vorming van contrails hoog in de atmosfeer.

Bovenstaande argumenten kunnen redenen zijn om naast het gebruik van SAF's ook op zoek te gaan naar alternatieve technieken die binnen de luchtvaart nog een verdere verschonings- en verduurzamingsslag kunnen bewerkstelligen.

Als alternatief voor een verbrandingsmotor wordt snel gedacht aan batterij-elektrische of waterstof-elektrische aandrijftechnieken. Een stroomversnelling van elektrische aandrijvingen zoals binnen het wegtransport zullen we echter niet snel zien bij de luchtvaart. Het gewicht van een vliegtuig is namelijk één van de belangrijkste ontwerpcriteria. De huidige ‘state-of-the-art’ batterijtechniek bevat ca. 45 keer minder energie per kilogram dan kerosine. Elektrisch vliegen vergt daarom grote en zware batterijen. Dit resulteert in zwaardere vliegtuigen met minder ruimte voor passagiers en een kleinere maximale vliegafstand. Peeters & Melkert (2021) berekenen in een recent gepubliceerde factsheet dat de energiedichtheid van accu's met een factor 7 moet verbeteren<sup>59</sup> om met batterij-elektrische aandrijving korte-afstandsvluchten (vluchten tot 2.000 km) mogelijk te maken. Dit wordt niet aannemelijk geacht voor 2080. De voor lange afstandsvluchten vereiste batterijen worden zelfs niet voor 2100 verwacht (Peeters & Melkert, 2021). Voor 2050 wordt batterij-elektrisch vliegen daarom niet als realistische optie gezien voor grootschalige commerciële luchtvaart.

---

<sup>58</sup> Er is een recente studie die het potentieel voor zonnestroom in Nederland veel hoger inschat, op 200 TWh in 2050, zie van Hoof (2021). Met nader onderzoek kunnen de inschattingen over het potentieel aan duurzame elektriciteit in Nederland substantieel veranderen.

<sup>59</sup> Vliegen is energie-intensief, de energie-inhoud per kilogram van de huidige generatie van batterijen is niet voldoende voor de uitvoering van praktische commerciële vluchten: de vluchten hebben meer energie nodig dan opgeslagen kan worden in de batterijen; ook veiligheidseisen m.b.t. beschikbare energie aan boord bij het landen vereisen een veel grotere capaciteit van batterijen dan nu mogelijk is met de huidige technologieën.

Een alternatieve methode is vliegen met waterstof als energiedrager. In tegenstelling tot batterijen bevat waterstof juist meer energie per kilogram dan kerosine (ongeveer 3 keer zoveel, excl. gewicht van de tanks). Ondanks het lage gewicht neemt de opslag van waterstof wél veel ruimte in beslag. In conventionele vliegtuigen zit de meeste kerosine in de vleugels: het neemt geen nuttig volume in de romp in beslag en het gewicht van de kerosine hoeft niet doorgegeven te worden van de romp naar vleugels. Waterstof kan niet in de vleugels opgeslagen worden en dus vereist het een waterstoftank in de romp die nuttig volume in beslag zal nemen. Waterstof zal waarschijnlijk een zwaarder ontwerp vereisen vanwege de sterkere gewichtsinteractie tussen de romp en vleugels.

Door de lage volumetrische energiedichtheid van waterstof is vooral het benodigde opslagvolume een beperkende factor. Waterstof kan onder hoge druk, of in vloeibare vorm, worden opgeslagen om meer energie per volume-eenheid te bereiken. Gecomprimeerde waterstof op 700 bar weegt ca. 42 kg/m<sup>3</sup>. In vloeibare vorm neemt de gewichtsdichtheid toe tot ca. 71 kg/m<sup>3</sup>. Deze getallen zijn exclusief het gewicht van de tank. In het geval van vloeibare waterstof moet de waterstof wel worden gekoeld en opgeslagen bij een temperatuur van -252,8 °C<sup>60</sup>. De hoeveelheid energie die kan worden opgeslagen is in vloeibare vorm ongeveer 8,5 GJ/m<sup>3</sup>. Dit is per m<sup>3</sup> nog steeds zo'n 4x minder dan kerosine. De beperkte energieopslag van waterstof per een volume-eenheid heeft als gevolg dat er nieuwe oplossingen voor de opslag van deze energiedrager aan boord van vliegtuigen moeten worden gevonden. Dit wordt wel realistisch geacht. Zo heeft AIRBUS recentelijk drie concepten van passagiersvliegtuigen gepresenteerd met waterstof als energiedrager<sup>61</sup>.

Bij toepassing van waterstof in de luchtvaart kan gebruik worden gemaakt van een brandstofcel (fuel cell), waarmee waterstof aan boord wordt omgezet in elektriciteit die in combinatie met een accusysteem de elektromotoren (en daarmee de propeller(s)) aandrijft. Een andere configuratie is waterstofverbranding in turbines (turboprops en straalmotoren). Een hybride oplossing door middel van een combinatie van waterstofstraalmotoren en waterstofbrandstofcellen is ook mogelijk. De gepresenteerde modellen van AIRBUS gebruiken alle een hybride vorm van waterstof-elektrische aandrijving en waterstof-verbrandingsmotoren<sup>62</sup>. Deze concepten hebben een range tot ca. 3700 kilometer en kunnen tot 200 passagiers vervoeren, wat deze toestellen alleen geschikt maakt voor korte tot middellange afstanden. ZeroAvia<sup>63</sup> heeft in 2024 de eerste waterstofvlucht gepland staan tussen London en Rotterdam met een passagiersvliegtuig van 19 personen<sup>64</sup>. Dit toestel

---

<sup>60</sup> De huidige technologie voor het koelen van waterstof naar de vloeibare vorm heeft een stroomverbruik van 12 kWh/kg. Dit komt overeen met 36% van de bruikbare energie in 1 kg waterstof (33,33 kWh/kg), bron: [https://www.idealhy.eu/index.php?page=lh2\\_outline](https://www.idealhy.eu/index.php?page=lh2_outline). De minimale theoretische energie om waterstof vloeibaar te maken onder normale omgevingscondities (300 K, 1,01 bar) is 3,3 kWh/kg LH<sub>2</sub> of 3,9 kWh/kg LH<sub>2</sub> met conversie naar para-LH<sub>2</sub>, bron: [https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/9013\\_energy\\_requirements\\_for\\_hydrogen\\_gas\\_compression.pdf](https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/9013_energy_requirements_for_hydrogen_gas_compression.pdf)

<sup>61</sup> [ZEROe - Zero emission - Airbus](#)

<sup>62</sup> Brandstofcellen kunnen niet voldoende piekvermogen leveren voor het opstijgen of doorstarten. Daarom zijn er voor de piekvermogensvraag andere oplossingen nodig: of verbrandingsmotor of een batterij.

<sup>63</sup> [Zeroavia plans hydrogen-electric flights between London and Rotterdam in 2024 – Business Traveller](#)

<sup>64</sup> Een belangrijke opmerking is dat met een 19 passagiers vliegtuig er 10 vluchten nodig om zijn hetzelfde aantal passagiers te vervoeren als 1 vlucht met een Boeing 737 / Airbus 320. Die kleine waterstofvliegtuigen zijn wel stiller dan een Boeing maar om hetzelfde aantal passagiers te vervoeren is er factor 10 meer vluchten nodig, wat extra overlast voor omwonenden kan brengen.

gebruikt een brandstofcel in combinatie met elektromotoren. Nader onderzoek zal moeten uitwijzen hoe zich dit verhoudt ten opzichte van het gebruik van SAF's en of de voordelen opwegen tegen de uitdagingen.

### **Kosten**

Waterstof als brandstof voor vliegtuigen resulteert niet alleen in hogere brandstofkosten maar vergt ook kosten voor de significante aanpassingen in het ontwerp van de vliegtuigen en motoren.

In een studie van McKinsey & Company (McKinsey & Company, Clean Sky 2 JU, Fuel Cells and Hydrogen 2 JU, 2020) naar waterstof in de luchtvaart is de conclusie dat de "total cost of ownership" (TCO) bij korte afstandsvliegtuigen lager is dan van een vergelijkbaar vliegtuig op synthetische brandstoffen wegens meer energie-efficiënte brandstofketen, zie sectie "4.1.3 Energiegebruik" voor meer detail. Op middellange afstanden is de TCO vergelijkbaar en vliegen met synthetische brandstoffen wordt voor lange afstandsvluchten als kosten-effectiever ingeschat (in vergelijking tot waterstof). Operationele kosten bij het gebruik van waterstof kunnen toenemen met \$5-10 per passagier voor korte afstandsvluchten. Op langere afstandsvluchten vereist het gebruik van waterstof aanpassingen aan het vliegtuigontwerp wat de kosten per passagier met 40-50% doet toenemen (McKinsey & Company, Clean Sky 2 JU, Fuel Cells and Hydrogen 2 JU, 2020).

### **4.1.5 Infrastructuur**

Vliegtuigen gaan vaak rond de 20 jaar mee, met uitschieters van boven de 30 jaar, en de ontwikkeling van nieuwe modellen duurt rond de 10 jaar. Daardoor duurt het enkele decennia voordat nieuwe technologie grootschalig in de luchtvaart wordt toegepast. De ontwikkeling van nieuwe techniek brengt ook veel kosten met zich mee en vraagt om uitgebreide certificering.

Voor een grootschalige toepassing van de SAF is in principe geen nieuwe infrastructuur aan de kant van de luchthavens nodig: voor SAF ligt de uitdaging in de ontwikkeling van de productiecapaciteit. Bij toepassing van nieuwe energiedragers, anders dan SAF, moet aan de infrastructuurkant op de luchthavens ook de nodige ontwikkelingen plaatsvinden. Bij gebruik van waterstof moeten er pijpleidingen voor waterstof-bunkering worden aangelegd en de veiligheid rondom de afhandeling moet gewaarborgd zijn. Door het internationale karakter van de luchtvaart moeten deze infrastructurele ontwikkelingen ook op alle relevante bestemmingsluchthavens zijn gerealiseerd. De beste manier om waterstofinfrastructuur te realiseren is daarom gezamenlijk optrekken met, in eerste instantie, Europese partners (het gaat immers om korte afstandsvluchten) om de infrastructuur gelijktijdig te ontwikkelen.

Voor elektrisch vliegen is de laadinfrastructuur nodig. Voor de laadinfrastructuur, kunnen we stellen dat de inzet van elektriciteit (uit batterijen) in 2050 naar verwachting nog heel klein is. Gezien de kleine verwachte rol van elektrische vliegtuigen in 2050 zou de laadinfrastructuur voor de elektrische vliegtuigen geen grote uitdaging moeten vormen aangezien ontwikkeling van de laadinfrastructuur goed begrepen zal worden met veel ervaring opgebouwd tijdens ontwikkeling van laadinfrastructuur voor andere modaliteiten zoals het wegvervoer, mobiele machines en binnenvaart. Toch kan het verstandig zijn om er van tevoren over na te denken, vooral voor nieuwe luchthavens of als er renovatiewerkzaamheden op de luchthaven worden gepland.

De technische haalbaarheid van waterstof lijkt realistischer maar de exacte rol van waterstof als aandeel van de gehele luchtvaart in 2050 is nog onzeker. Post-2050 kunnen waterstof en/of elektrisch wél "gamechangers" zijn, zeker in combinatie met principiële nieuwe vliegtuigontwerpen,

hoewel de ontwikkeling en uiteindelijke toepassing daarvan nog wel zeer onzeker zijn. Vanwege de traagheden in vlootvernieuwing en uitrol van energie-infrastructuur is het daarom beleidsmatig toch relevant hier nu al op voor te sorteren.

## 4.2 Efficiëntieverbetering

Efficiëntieverbetering betreft het verminderen van het energiegebruik per vervoerde eenheid. De felle concurrentie in de luchtvaart en het substantiële aandeel van de brandstofkosten in de totale kosten is in zichzelf al een sterke drijfveer voor efficiëntieverbetering. Zoals beschreven nam tussen 1990 en 2019 het energiegebruik per vervoerde eenheid met ca. 39% af.

Het gaat hierbij zowel om operationele of logistieke efficiëntieverbetering (hogere bezettingsgraad, kortere vliegroutes, aangepast vlieggedrag) als om de inzet van nieuwe generaties energiezuinigere vliegtuigen.

De autonome efficiëntiewinsten door de combinatie van zuinigere vliegtuigen en efficiëntere routeplanning zullen waarschijnlijk de komende decennia nog leiden tot jaarlijkse verbeteringen van het brandstofverbruik met 1 à 1,5% (Grewe et al., 2021). Het doorvoeren van efficiëntieverbeteringen zal op termijn echter steeds lastiger worden, tenzij onverwachte radicale ontwerpveranderingen worden doorgevoerd.

### **Operationele efficiëntieverbetering**

De mogelijkheden voor een verdere logistieke efficiëntieverbetering nemen langzaam af. Het meeste laaghangend fruit is al wel geplukt. Zo is de gemiddelde passagiersbezettingsgraad bij de KLM tussen 1983 en 2019 gestegen van 66% naar 89%, en is de bezettingsgraad bij low cost carriers als Easyjet en Ryanair al respectievelijk 93% en 96%. De mogelijkheden voor een verdere verhoging zijn dus beperkt.

Er is een relatief bescheiden potentieel aanwezig om het aantal vrachtluchten te verminderen door zoveel mogelijk langeafstandsvrachtvervoer te verplaatsen van vrachtvliegtuigen naar passagiersvliegtuigen. De beladingsgraad voor vracht bij de KLM ligt rond de 50%-60%<sup>65</sup>. Gezien het feit dat er een handelsstroomonbalans is (tussen Nederland en andere landen), zijn er grenzen aan de maximaal haalbare vrachtbeladingsgraad. Niettemin hebben de nieuwste generaties van langeafstandsvliegtuigen aanzienlijke vrachtruimte waarin - afhankelijk van het type vliegtuig, routelengte en vrachtkenmerken - ca. 20 ton aan vracht vervoerd kan worden per vliegbeweging. De potentie zit in het verplaatsen van algemene vracht van vrachtvliegtuigen naar de vrachtruimte van passagiersvliegtuigen om die ruimte zo veel mogelijk te benutten binnen de operationele grenzen. Uiteraard moeten gevaarlijke goederensoorten, speciale vracht of vracht van grote afmetingen vervoerd blijven worden in vrachtvliegtuigen.

Een efficiëntere indeling van het luchtruim kan directere routes mogelijk maken. Zogenaamde Continuous Climb / Descend Operations (CCO / CDO) kunnen brandstof besparen als vliegtuigen op een optimale manier naar de gewenste hoogte stijgen en de luchthaven naderen zonder de noodzaak in

---

<sup>65</sup> KLM Traffic Reports

stapjes te dalen. Zo zou ook de invoering van de Single European Sky<sup>66</sup> kunnen bijdragen aan de reductie van het brandstofverbruik<sup>67</sup> binnen de EU. Ondanks aanzienlijke vorderingen op het gebied van digitale technologie en vliegtuigtechnologie, zijn ingrijpende hervormingen uitgebleven vanwege een gebrek aan internationale samenwerking in de hele sector (Bodell, 2023).

Als door de verduurzaming de energiekosten of de kosten van CO<sub>2</sub>-rechten sterk oplopen, kan dat ook doorwerken in de netwerkoptimalisatie. Elk vliegtuigtype heeft een optimale vliegafstand. Bij korte vluchten is de energie-efficiëntie lager dan voor vluchten over middellange afstanden, omdat brandstofverbruik tijdens taxiën en starten een relatief groot deel uitmaakt van het totale brandstofverbruik. Als energie veel duurder wordt, kan het zo zijn dat dat bij korte vluchten extra aantikt, en andere modaliteiten als bijvoorbeeld de trein of de auto marktaandeel winnen. Bij (zeer) lange vluchten neemt de efficiëntie van vliegen af ten opzichte van vluchten over middellange afstanden omdat er meer brandstof meegenomen moet worden, en het meenemen van extra brandstof door het extra gewicht ook weer extra brandstof vraagt. Voor lange afstanden kunnen daardoor extra tussenstops besparend werken<sup>68</sup>. “Hub and spoke” systemen zijn flexibel in de allocatiecapaciteit en kunnen voor hogere bezettingsgraden zorgen met name op langeafstandsvluchten. Directe vluchten kunnen bij een hoge bezettingsgraad ook efficiënter zijn dan “hub and spoke” systemen waar passagiers of vracht de bestemming bereiken met een of meerdere tussenlanding(en) op een luchthub. De efficiëntiewinst komt omdat reizigers bij een directe vlucht minder omvliegen en maar één keer hoeven op te stijgen en te landen. Dit kan er toe leiden dat de traditionele luchtvaartmaatschappijen hun netwerk anders organiseren, en/of dat low-cost carriers met alleen directe verbindingen een groter marktaandeel krijgen ten koste van traditionele vervoerders met “hub and spoke” netwerken.

### *Energiezuinigere vliegtuigen*

Nieuwe vliegtuigen zijn zuiniger dan oude vliegtuigen. Dat gaat soms met kleine stappen (optimalisatie bestaande modellen), soms met iets grotere stappen (nieuwe modellen). Vliegtuigen gaan lang mee, maar “jonge” vliegtuigen vliegen meestal meer uren per jaar dan de oudere, als gevolg van vlootoptimalisatie. In 2018 was de gemiddelde “vliegtuig leeftijd” 11,2 jaar (Cooper et al., 2018), de verwachting is dat in 2027 naar 10,5 jaar daalt.

---

<sup>66</sup> Volgens IATA, zijn de redenen voor de trage invoering complex: ze zijn meer geworteld in de politiek dan in de technologische ontwikkeling (luchtruimsoevereiniteit en nationale luchtvaartnavigatiedienstverleners).

<sup>67</sup> De potentiële maximale opbrengst is waarschijnlijk ergens tussen de 5 en 10%. Dat is een aanzienlijke winst, maar dit is een eenmalige verbetering. In tegendeel, worden vliegtuigen continue verbeterd en iedere volgende generatie van vliegtuigen wordt wel steeds beter.

<sup>68</sup> De “ideale” lengte van de vlucht ligt rond 5-8 uur vanuit het perspectief van brandstofverbruik per gevlogen kilometer. Maar een tussenlanding brengt andere kosten met zich mee, zoals de kosten van extra of zelfs dubbele bemanning, extra tijd die het vliegtuig op de grond doorbrengt, extra landingskosten. Ook hebben meeste passagiers een voorkeur voor directe (non-stop) vluchten: de trend is voorlopig naar (zeer) langeafstandsvluchten zonder tussenlanding, zoals bijvoorbeeld, Perth-Londen en New York – Singapore.

Daarna worden vliegtuigen veelal nog een tijd als vrachtvliegtuig of elders in de wereld gebruikt, waardoor de totale levensduur soms op ruim 30 jaar uitkomt<sup>69</sup>. De ontwikkeltijd van nieuwe vliegtuigen is lang, ca. 10 jaar. Daarna wordt een model gemiddeld 20 jaar verkocht, voordat er een opvolger komt. Dat maakt dat al redelijk bekend is wat er tot 2030 mogelijk is.

Gemiddeld genomen daalt door de vlootvernieuwing het energiegebruik met ca. 1-1,5% per jaar. De verwachting is dat in de periode tot 2050 de grootste efficiëntiewinst zal komen door de inzet van lichtgewicht materialen (in de afgelopen decennia kwam de efficiëntieverbetering voornamelijk door verbeteringen in de motortechnologie). Niettemin zal de vooruitgang in de motortechnologie, evenals de vermindering van de luchtweerstand en de aerodynamische integratie van vliegtuigmotoren, de efficiëntie van conventionele vliegtuigontwerpen verder verbeteren. (Grewe et al., 2021).

Een snellere groei van de luchtvaart leidt tot een gemiddeld jongere en dus efficiëntere vloot, maar netto tot meer CO<sub>2</sub>-uitstoot. Als doorvliegen met oude vliegtuigen duurder wordt (mede door hoge kosten van CO<sub>2</sub>-rechten) dan de afschrijvingskosten en rentelasten, dan kan vlootvernieuwing wellicht iets versneld worden.

## 4.3 Verminderen van de omvang van de luchtvaart

De omvang van de luchtvaart is geen vast gegeven, maar een resultante van vraag en aanbod, inclusief de regelgeving die daarop van invloed is. Minder luchtvaart betekent minder energievraag, minder CO<sub>2</sub>-uitstoot en minder niet-CO<sub>2</sub>-effecten. De omvang van de luchtvaart kan beperkt worden door het begrenzen van het aanbod, onder andere via capaciteitsbeleid, en door het verminderen van de vraag via beprijzen, het aanbieden van alternatieven of het beïnvloeden van de vlieggeneigdheid (gedrag van consumenten). Door de verplichte verduurzaming (SAF, EU-ETS, ook CORSIA) zullen de kosten van vliegen toenemen en zal de vraag gedempt worden.

### **Capaciteitsbeleid**

Luchthavens zijn begrensd in hun capaciteit, hetzij in de capaciteit van terminals of baancapaciteit van de start- en landingsbanen, hetzij door beperkingen vanuit regelgeving rond geluidhinder of luchtkwaliteit, hetzij vanwege beperkingen rond veiligheid.

Als een luchthaven tegen capaciteitsgrenzen aanloopt, zal dat de groei remmen. Luchtvaartmaatschappijen kunnen dan niet alle slots (tijdsperiode waarbinnen een vliegtuig mag opstijgen of landen) krijgen die ze zouden willen. Ze kunnen dit deels opvangen met de inzet van grotere vliegtuigen. Ze kunnen ook uitwijken naar andere luchthavens. Het kan ook zijn dat door het gebruik van nieuwe, stillere en schonere vliegtuigen er wat extra groei mogelijk wordt.

---

<sup>69</sup> Luchtvaartmaatschappijen optimaliseren eigen kosten: nieuwe vliegtuigen zijn relatief goedkoop m.b.t. onderhoud en brandstofverbruik, maar duurder qua kapitaalkosten (leasebetalingen of eigen kapitaal). Bij oudere vliegtuigen is het andersom, ze zijn duurder per vlieg uur. In de praktijk betekent dit dat nieuwe vliegtuigen meer vliegguren per jaar maken, en dus de gemiddelde leeftijd van vliegtuigen in de lucht kleiner is dan de gemiddelde leeftijd van de totale vloot.

Schaarste aan capaciteit op luchthavens kan de gemiddeld betaalde ticketprijs verhogen (Burg-hout, Lieshout, & van Spijker (2017)). Wegens schaarste hoeven luchtvaartmaatschappijen dan minder stoelen tegen een lage prijs te verkopen om het vliegtuig vol te krijgen. Zo leidt schaarste tot betere winstmarges voor de luchtvaartmaatschappijen. Keerzijde is dat de groeipotentie beperkt is. Luchtvaartmaatschappijen die gevestigd zijn op capaciteitsbeperkte luchthavens kunnen hun markt zien verkleinen als luchtvaartmaatschappijen van buiten de hub grotere vliegtuigen naar capaciteitsbeperkte luchthaven inzetten. Bovendien leiden capaciteitsrestricties tot compromissen over netwerkqualiteit (Rienstra en Visser, 2021).

De betalingsbereidheid van reizigers varieert. Zakelijke reizigers zijn bereid meer te betalen dan reizigers voor sociaal-recreatief verkeer. Reizigers met een herkomst of bestemming in de omgeving van de luchthaven (O/D passagiers) hebben een hogere betalingsbereidheid dan overstappers (Transferpassagiers). Bij toenemende schaarste wijken transferpassagiers uit en kan ook het aandeel sociaal-recreatieve reizigers afnemen. Het uitwijken naar andere luchthavens kan betekenen dat, hoewel de CO<sub>2</sub>-uitstoot van en naar de luchthaven wel beperkt wordt, het mondiale effect sterk tegenvalt.

Er zijn mogelijk ook reboundeffecten. Als een luchthaven tegen zijn maximale capaciteit aanzit, hebben ook maatregelen gericht op vraagreductie een ander effect: het vervangen van korte vluchten door de trein kan ruimte bieden aan extra lange vluchten. Minder vliegen vanwege vlieg-schaamte bij een deel van de bevolking, biedt (bij gelijkblijvende capaciteit van de luchthaven) extra ruimte voor een ander soort passagiers en ook voor vrachtluchten.

### **Het aanbieden van vervoersalternatieven, zoals treinverbindingen**

Bij reisafstanden tot maximaal zo'n 800 kilometer blijkt de trein op sommige routes in reistijd nog met het vliegtuig te kunnen concurreren. Daarboven is het reistijdverschil meestal te groot, ook als het vortransport en natransport en de tijd die nodig is voor inchecken en security worden meege-rekend. Binnen dit gebied heeft het KiM de verbeterkansen voor de trein voor de 13 belangrijkste bestemmingen met directe vluchten van Schiphol op een rij gezet (Savelberg en Lange, 2018). Dit zijn Londen, Parijs, Kopenhagen, Berlijn, Frankfurt, Hamburg, München, Basel, Düsseldorf, Hanno-ver, Brussel, Bristol en Birmingham (Savelberg en Lange, 2018). Vliegen naar de onderzochte be- stemmingen is in de meeste gevallen nu nog goedkoper dan de trein, met grote variaties in tarieven naar tijdstip van vertrek en boeken. De trein kan volgens KiM in 2030 minimaal 1,9 miljoen vliegrei-zen vervangen op de 13 belangrijkste bestemmingen (tot 800 km) van en naar Schiphol. Vooral tus- sen Nederland en Londen kan het spoor een goed alternatief bieden door kortere reistijden en meer dagelijkse reismogelijkheden. Volgens het KiM kan de trein jaarlijks zelfs 3,7 miljoen vliegrei-zen vervangen door beter transfervoer en bij 20% goedkopere treinkaartjes. Het verbeteren van het treinproduct zal overigens niet alleen luchtreizigers trekken. Bestaande treinreizigers kunnen vaker gaan reizen, en er kunnen ook mensen van de auto naar de trein switchen. Met name in het sociaal recreatief verkeer is het aantal reizen en de bestemmingskeuze geen vast gegeven. Een ste- dentrip met de trein naar Berlijn kan een volwaardig alternatief zijn voor een stedentrip per vlieg- tuig naar Barcelona of New York. Het combineren van een andere vervoerwijze en een kortere reisafstand geeft een veel grotere CO<sub>2</sub>-winst.

### **Vergaderen op afstand**

In de Coronaperiode hebben werkgevers gemerkt dat online vergaderen een goedkoop en bruik-baar alternatief is voor een zakenreis. Als gevolg hiervan is het mogelijk dat de zakelijke markt structureel 1 of 2% per jaar minder snel zal groeien dan voor de pandemie werd verwacht. Dat

betekent niet alleen dat het totale luchtvaartvolume minder sterk groeit, maar ook dat het verdienmodel van luchtvaartmaatschappijen onder druk komt te staan. De hogere betalingsbereidheid van zakelijke reizigers maakte dat zij een relatief groot deel van de kosten droegen. Een kleinere zakelijke markt betekent dat een groter deel van de kosten door het sociaal-recreatief verkeer opgebracht moet worden. Hogere tarieven voor deze groep leiden echter tot vraaguitval. Zo leidt minder zakelijk verkeer ook tot minder sociaal-recreatief verkeer.

### **Vlieggeneigdheid en vliedschaamte**

Menselijk gedrag is geen constant gegeven, en kan slechts gedeeltelijk met economische principes als nutsmaximalisatie verklaard worden. In 2018 is het begrip vliedschaamte opgekomen. Het wordt omschreven als 'schaamte die mensen voelen als ze het vliegtuig nemen, omdat vliegen slecht is voor het milieu'. Wie vliedschaamte ervaart, vliegt minder of stopt helemaal met vliegen. Wie zich door het vliegen onprettig of schuldig voelt, maar er wel mee doorgaat, voelt vlieggêne en wie achteraf spijt heeft voelt vliegwoeging (Jaco Beveling 2019). De VPRO veronderstelde in een documentaire (VPRO Tegenlicht) dat vliegen wel eens het nieuwe roken zou kunnen worden. 'Terwijl de overheid voorsnog haar zinnen heeft gezet op uitbreiding van Schiphol, is verandering van onderaf al gaande. (...) Het bezit van een auto is geen must meer en een groeiende groep mensen stapt niet langer in het vliegtuig.' (Bakker, 2018). Minder duidelijk is in welke mate Nederlanders zich schamen voor hun vliegtrips (Beveling, 2019, Beveling et al., 2020). Recent onderzoek van RTL (RTL 2023) wijst er op dat 26% van respondenten wegens schuldgevoel vliegt minder of zelfs helemaal niet meer. Aan RTL onderzoek hebben 18.000 leden van het RTL Nieuwspanel deel genomen, waarvan 47% maakt zich zorgen over klimaateffect van vliegen. Deze zorgen leiden er voor dat een verdere groei van de luchtvaart in het politiek/maatschappelijk debat is meer omstreden geworden.

Dit neemt niet weg dat het denkbaar is dat in de toekomst milieuoverwegingen de vlieggeneigdheid kunnen beperken. Ook hiervoor geldt dat in een situatie met capaciteitsschaarste de vrijgekomen tickets door anderen met minder gewetensbezwaren ingenomen kunnen worden. Naarmate de luchtvaartsector verduurzaamt, kan het vliedschaamte-effect ook wegebben.

### **Beprijzen**

Een andere optie om de omvang van de luchtvaart te beïnvloeden is prijsbeleid. Vliegtickets zijn vrijgesteld van BTW en over kerosine wordt geen accijns geheven. Wel is er sinds enige jaren een vliegbelasting voor vertrekkende passagiers van 7,85 euro. Vanaf 2023 is de vliegbelasting verhoogd tot 26,43 euro. Op een gemiddelde ticketprijs van 180 euro is dat zo'n 15%, nog steeds iets lager dan het normale btw-tarief van 21% waarvan vliegtickets zijn vrijgesteld. De vliegbelasting geldt daarbij niet voor transferpassagiers of het vrachtvervoer. Het vaste bedrag van de vliegbelasting kan een denivellerend effect hebben: goedkope tickets worden relatief zwaarder belast, terwijl luchtvaartmaatschappijen meestal alleen stunts met prijzen bij de stoelen die anders niet verkocht kunnen worden en dus leeg zouden vliegen als ze niet verkocht worden met een aanzienlijke korting. Als gevolg zal de gemiddelde bezettingsgraad lager zijn, met name in het low-cost carrier (LCC) segment.

Voor vluchten binnen de EU moeten er sinds 2012 rechten in het emissiehandelssysteem ETS worden verworven. Het ruime aanbod aan gratis rechten drukte de afgelopen jaren de CO<sub>2</sub>-prijs en beperkte daardoor het effect van de maatregel. Maar met het 'Fit-for-55' programma heeft de EU aangekondigd zowel die gratis rechten sterk te verminderen, alsook het aanbod aan ETS-rechten. Omdat de luchtvaart binnen de EU nog maar weinig gebruik maakt van hernieuwbare brandstoffen



betekent dit in praktijk een significante stijging van de brandstofprijzen<sup>70</sup>. De prijselasticiteit in de luchtvaart is hoog: in de zakelijke markt is die -0,5 en dan betekenen 10% hogere prijzen 5% minder reizigers; in het sociaal-recreatieve verkeer is die prijselasticiteit -1, en dan betekenen 10% hogere prijzen 10% minder reizigers (Romijn, Blom en Hilbers, 2016). Verhoogde brandstofkosten zullen dus zich vertalen in minder vraag aan vliegreizen.

## 4.4 Verminderen niet-CO<sub>2</sub>-klimaateffecten

Zoals eerder aangegeven hebben contrails (condensstrepen) een belangrijk opwarmend klimaateffect. Langlevende contrails (die enkele uren tot enkele dagen bestaan) worden gevormd in koude lucht met een hoge concentratie van waterdamp (oververzadigde atmosferische omstandigheden). De uitstoot van straalmotoren voegt nog extra water toe als gevolg van verbranding van koolwaterstoffen en ook fijne deeltjes van gedeeltelijk verbrande brandstof (roet). Deze deeltjes fungeren als kernen voor condensatie van waterdamp, waardoor contrails gevormd worden. De condities waarin langlevende contrails, en dus cirruswolken, gevormd kunnen worden, komen in ca. 15% van het luchtruim voor. De gebieden waarin langlevende contrails zich (makkelijk) kunnen vormen, kunnen een grote horizontale omvang (tot 400 km) hebben, maar de verticale omvang is klein (meestal minder dan 600 m). Deze gebieden kunnen dus worden vermeden door aanpassingen van de kruishoogte (Dray et al. 2022). Dray et al. schatten in dat 50% van de langlevende contrails kan worden vermeden bij een toename van het brandstofverbruik met 1%. Mannstein et. al (2005) vonden dat, wanneer de verticale grenzen van contrail-vormende gebieden bekend zijn, een hoogteverandering van de vlucht met 300 meter voldoende zou zijn om ca. 50% van de gebieden waar contrails worden gevormd te vermijden; een hoogteverandering van 600 meter zou voldoende zijn om ca. 80% van de gebieden te vermijden. Als de laag van het luchtruim waarin zich langlevende contrails kunnen vormen vrij dun is (tot 600 meter), kan met hoger of lager vliegen het contraileffect met een zeer beperkte verhoging van brandstofverbruik (1%) sterk gereduceerd worden. Gezien het feit dat deze gebieden in slechts 15% van het luchtruim voorkomen, gaat het in totaal om acceptabele hoeveelheden extra brandstofverbruik: de klimaatimpact van het extra verbruik is aanzienlijk kleiner dan de klimaatwinst die je boekt door vermindering van de contrails.

Echter, de aanname dat de optimale vlieghoogte slechts 300 meter hoeft te worden aangepast moet kritisch beoordeeld worden. Ten eerste bedraagt de scheidingsafstand tussen de vlieghoogtes in dezelfde richting meestal 2 flight levels (ongeveer 600 meter). Ten tweede zijn veel gebieden in Europa, Noord Amerika en de Atlantische oceaan vrij druk, zodat daar waarschijnlijk niet altijd een hoogteverandering van 600 meter mogelijk is.

Ten derde zijn de veiligheidsmarges voor hogere echelons (vlieghoogtes) vrij klein, zodat in dat geval een hoogteverandering lager vliegen zal betekenen. Daarom kunnen praktische overwegingen de mogelijkheden om met een hoogteverandering contrail-vormende gebieden te vermijden kleiner maken dan de optimistische theoretische inschattingen. Samenvattend kunnen we stellen dat het vermijden van contrail-vormende gebieden mogelijk is, maar dat de praktische uitvoerbaarheid en extra kosten nog nader onderzocht moeten worden.

---

<sup>70</sup> Een ETS prijs van 100 €/ton CO<sub>2</sub> vertaalt zich in ongeveer 0,25 €/l prijsverhoging voor brandstof, bovenop een basisprijs van kerosine van 0,5-0,9 €/liter.

EASA (2020) noemt, naast het vermijden van contrail-vormende gebieden, nog andere opties om de niet-CO<sub>2</sub>-klimaatimpact van vliegen te verminderen, hoewel de effecten daarvan nog onzeker zijn:

- **NO<sub>x</sub> uitstoot bij hogere EPR** (engine pressure ratio, motordrukverhouding): In het algemeen vindt bij het gebruik van een hogere pressure ratio een hogere uitstoot van NO<sub>2</sub> plaats. Deze uitstoot zou verminderd kunnen worden, maar komt met een 'fuel penalty' (en dus meer brandstofverbruik en dus CO<sub>2</sub>-uitstoot). De mate waarin een netto klimaatwinst behaald kan worden is moeilijk te bepalen en onzeker.
- **Minder contrailvorming bij minder PM uitstoot:** Aangezien ijskristallen condenseren op stofdeeltjes, kan bij vermindering van deze deeltjes, bijvoorbeeld door gebruik van SAF met geen of weinig aromatische stoffen, de vorming van contrails en van cirrus clouds voor een deel voorkomen worden. Er is echter niet simpelweg een lineaire relatie tussen het aantal PM-deeltjes en contrails omdat ijsvorming een complex fysisch proces is waardoor de omvang van het effect onzeker is.

**Onder de streep:** contrails dragen bij aan de opwarming van de aarde. De gebieden waar zich langdurige contrails vormen kunnen in theorie relatief makkelijk vermeden worden door een beetje hoger of lager te vliegen. Er is duidelijk behoefte aan concrete informatie over welke dynamische gebieden en hoogtes moeten worden vermeden. Om het beschreven potentieel te kunnen benutten is er daarbij behoefte aan een coördinerende of zelfs afdwingende autoriteit die luchtvaartmaatschappijen gaat informeren hoe ze om de contrail-gebieden heen kunnen vliegen. Deze functie kan potentieel door de luchtverkeersleiding uitgevoerd worden, maar gezien de omvang van het probleem, ook door een speciaal toegewijde autoriteit uitgevoerd worden.

Bij veel van bovenstaande opties, bestaat er een trade-off tussen de niet-CO<sub>2</sub>-gerelateerde klimaatimpact en de CO<sub>2</sub>-uitstoot. Of deze afweging in termen van het klimaat positief of negatief uitpakt, is complex. Niet alleen door de onzekerheid over de niet-CO<sub>2</sub>-effecten, maar ook doordat deze afhangen van de beschouwde tijdshorizon. Hoe verder we in de toekomst kijken, hoe zwaarder het negatieve effect van meer CO<sub>2</sub>-uitstoot meetelt, simpelweg omdat dit molecuul veel langer in de atmosfeer aanwezig blijft.

## 4.5 Compenseren (offsets)

Op dit moment kunnen luchtreizigers bij de aanschaf van hun ticket soms al aanvinken dat ze de CO<sub>2</sub>-uitstoot van hun vlucht (elders) willen compenseren. Ook voor onvermijdbare niet-CO<sub>2</sub>-klimaat-effecten biedt het "offsetten" een mogelijkheid om die te compenseren. In CORSIA is deze zogenaamde offset een belangrijke component van de strategie. Er bestaat twijfel of deze compensatie daadwerkelijk netto CO<sub>2</sub> uit de lucht haalt (Gifford, 2020). Het aankopen van CO<sub>2</sub>-rechten is een vergelijkbare maatregel, waarbij feitelijk in andere sectoren extra CO<sub>2</sub> wordt bespaard. Het is daarom belangrijk dat de offsetprogramma's van goede kwaliteit zijn en door een onafhankelijke en deskundige partij worden beoordeeld.

Zolang er in andere sectoren van de economie nog fossiele brandstoffen worden gebruikt, en daar een overgang naar duurzame energie gemakkelijker is dan in de luchtvaart, kan het efficiënter en/of kosteneffectiever zijn om vanuit de luchtvaart te betalen voor extra CO<sub>2</sub>-besparing elders. Naarmate de emissies in die andere sectoren naar nul gaan nemen de langs deze weg beschikbare compensatiemogelijkheden voor de luchtvaart af. Als de luchtvaart dan niet tijdig voldoende technologie heeft ontwikkeld om zelf om te schakelen ontstaat er een acuut probleem. Compenseren of CO<sub>2</sub>-

rechten kopen kan dus een overweging zijn voor de kortere termijn, mits het onderdeel is van een bredere aanpak die ook zeker stelt dat de luchtvaart op termijn ook daadwerkelijk zelf klimaatneutraal wordt.

# 5 Beelden voor en paden richting 2050

Hoewel de toekomst moeilijk te voorspellen is, vereist de transitie naar een klimaatneutrale luchtvaart inschattingen van de omvang van de luchtvaart en de toekomstige (duurzame) energieverbruik.

In dit hoofdstuk worden toekomstige ontwikkelpaden kwantitatief benaderd, eerst vanuit perspectief van huidig beleid en daarna wordt het effect van CO<sub>2</sub>-vrij luchtvaart op het volume en energiebehoefte ingeschat. Zowel de mate van de autonome groei als de toekomstige energiemix zijn onzeker. Daarom kijken we naast de verwachte “centrale” groeipad ook naar wat hogere en lagere groeipaden; aan de energiekant kijken we naar een energiemix met de nadruk op biobrandstoffen en een energiemix met de nadruk op waterstof en e-fuels.

## 5.1 Volumeontwikkeling

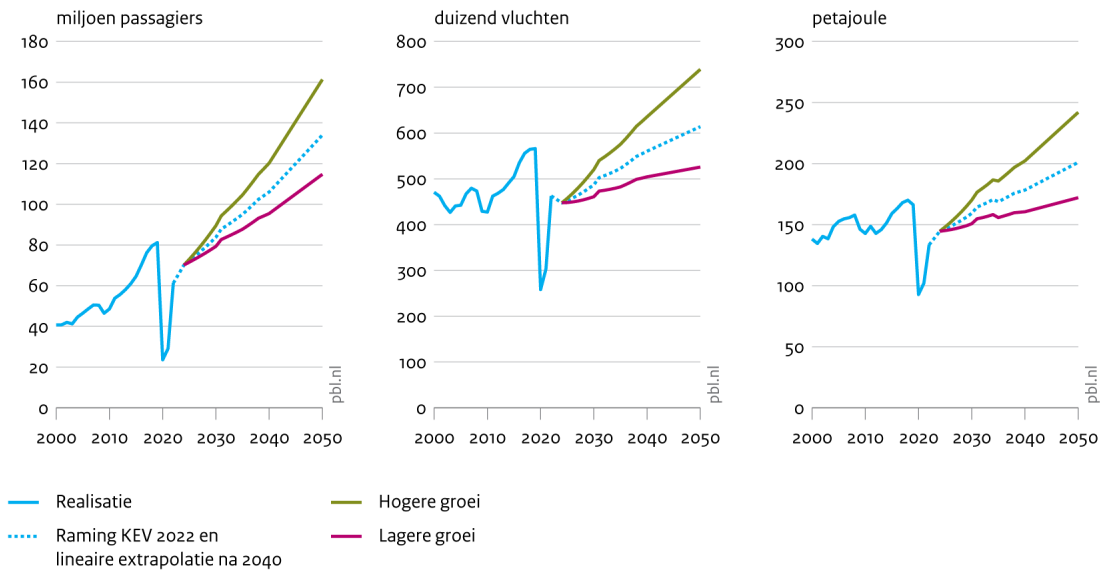
De huidige verwachting is dat na de coronadip het volume en de energiebehoefte van de Nederlandse luchtvaart weer doorgaan met groeien.

De verwachting is dat rond 2024 de luchtvaart qua volume weer op het niveau van 2019 is. De Klimaat en Energie Verkenning (KEV) 2022 verwacht dat daarna de luchtvaart vanuit Nederland weer gaat groeien, met gemiddeld 2% per jaar<sup>71</sup>. Afhankelijk van de bevolkingsgroei, economische groei, kostenontwikkeling en vlieggeneigdheid kan die autonome groei hoger (2,6% per jaar) of lager (1,5% per jaar) uitvallen, zie Figuur 5.1. In deze groeiverwachting is het remmende effect van huidig beleid (hogere vliegbelasting, CORSIA, ETS en bijmengverplichting conform FitFor55) al meegenomen ([Aeolus doorrekeningen KEV 2022 \(van Eck en Kouwenhoven, 2022\)](#)).

---

<sup>71</sup> Deze studie baseert zich mede op inzichten uit de KEV 2022. De KEV 2023 leidt niet tot andere inzichten over de transitiepaden die in dit rapport worden geschetst. Wel zijn de emissiecijfers voor sommige modaliteiten licht gewijzigd ten opzichte van de KEV 2022, die als basis dient voor een aantal figuren in dit rapport. Dit verandert niets aan de conclusies van de voorliggende rapportage.

## Paden van autonome ontwikkeling in de Nederlandse luchtvaart



Bron: Emissieregistratie (realisatie); PBL (raming)

Figuur 5.1: Paden van autonome luchtvaartontwikkeling onder het huidige beleid<sup>72</sup>.

De toename van het aantal vluchten is niet gelijk aan de toename van het aantal passagiers. In de jaren tot 2019 zagen we dat het aantal passagiers sterker toenam dan het aantal vluchten door een hogere bezettingsgraad, inpassing van meer stoelen, minder accent op vrachtvluchten en vooral door de inzet van grotere vliegtuigen. De verwachting is dat die trend doorzet. In het Aeolus-model, dat gebruikt wordt voor de KEV, wordt uitgegaan van 1,5% meer passagiers per vlucht per jaar. Daardoor is het aantal vluchten in de middelste variant pas in 2040 weer op het niveau van 2019 (waar dat qua passagiers al in 2030 is). Voor 2050 varieert de raming van het aantal vluchten vanaf Nederlandse luchthavens tussen de 430.000 en 740.000 vluchten.

## 5.2 Energiebehoefte en inzet van energiedragers

De combinatie van zuinigere vliegtuigen en efficiëntere routeplanning zal waarschijnlijk de komende decennia nog leiden tot jaarlijkse verbeteringen van het brandstofverbruik per vervoerde eenheid. De trendmatige verbetering van de efficiëntie in Aeolus vloeit voort uit de instroom van nieuwe generaties zuinigere vliegtuigen waardoor in lijn met Grewe et al. (2021) in 2050 29%<sup>73</sup> minder energie nodig zal zijn voor vervoer van een passagier-kilometer ten opzichte van 2019. De totale energievraag van de Nederlandse luchtvaart was in 2019 167 PJ. Aangezien de efficiëntieverbetering lager is dan autonome groei, neemt de energievraag toe, tot ca. 200 PJ. Bij

<sup>72</sup> Bron: KEV 2022 doorrekeningen en trendmatige extrapolatie na 2040

<sup>73</sup> Dit komt overeen met een gemiddelde jaarlijkse efficiëntieverbetering van ongeveer 1%. De aanname is gebaseerd op (1) efficiëntieverbetering van nieuwe generaties vliegtuigen en motoren en (2) snelheid waarmee de vloot vernieuwd wordt.

een snellere groei van de luchtvaart kan dat richting 240 PJ gaan, bij een lagere groei kan het beperkt blijven tot ca. 140 PJ.

Bijna alle stakeholders (waaronder de EU) zijn het er over eens dat het verduurzamen van de luchtvaart tot 2050 in zeer belangrijke mate gestoeld zal zijn op de inzet van hernieuwbare kerosine. Biokerosine (HEFA), gemaakt uit gebruikte oliën en vetten, is het enige proces dat momenteel op commerciële schaal operationeel is. Gezien de begrensde beschikbaarheid van gebruikte oliën en vetten en de inzetbegrenzing uit de Europese Richtlijn hernieuwbare Energie (RED III) kan HEFA maar een beperkt deel van de toekomstige vraag naar SAF dekken. De andere routes voor productie van biokerosine, in het bijzonder Fischer-Tropsch to Jet en Alcohol-To-Jet zijn nog niet op commerciële schaal beschikbaar, terwijl er ook nog technische barrières moeten worden overwonnen (zie paragrafen 4.1.2 en 4.1.3).

In de toekomst zal waarschijnlijk de inzet van e-fuels belangrijker worden: ReFuelEU stelt voor dat in 2050 SAF voor 35% uit e-fuels<sup>74</sup> bestaat. Ook de productie van e-kerosine vindt nog niet op commerciële schaal plaats. Het proces vraagt veel hernieuwbare elektriciteit en een koolstofbron. In eerste instantie kunnen hiervoor geconcentreerde CO<sub>2</sub>-puntbronnen worden gebruikt, maar deze zullen steeds schaarser worden. Op termijn zal vrijwel zeker ook overgeschakeld moeten worden op CO<sub>2</sub> die uit de lucht wordt afgevangen (DAC, Direct Air Capture). De inzet van hernieuwbare waterstof en elektriciteit in 2050 kent veel onzekerheden maar zal in ieder geval bescheiden zijn (zie paragraaf 4.1.3). De inzet van elektriciteit (uit batterijen) zal in 2050 nog verwaarloosbaar zijn (<1%). De rol van waterstof in 2050 is onzeker, maar zal in 2050 beperkt zijn tot kortere vluchten (<2000 km) en niet mogelijk zijn voor alle bestemmingen wegens (nog) niet beschikbare waterstofinfrastructuur op alle luchthavens (zie paragraaf 4.1.4). Verondersteld dat waterstofvliegtuigen in de komende 20 jaar ontwikkeld én gecommmercialiseerd worden, verwachten wij dat waterstof *potentieel* in 2040 2,5% en in 2050 10% van de kerosinevraag zal kunnen vervangen.

In Fitfor55 heeft de EU voor de vluchten binnen en vanuit Europa een ingroeipad uitgezet van 6% bijmenging van duurzame energiedragers in 2030 tot 70% in 2050 (ReFuelEU Aviation<sup>75</sup>). Om in 2050 op nul emissie uit te komen, zal dat ingroeipad voor duurzame energiedragers aangescherpt moeten worden. We gaan uit van 14% bijmenging in 2030 en nemen aan dat de bijmenging dan verder op basis van een rechte lijn oploopt via 52% in 2040 naar 100% in 2050.

De vervolgvraag is welk deel van de energiedragers biobrandstoffen zijn, welk deel synthetische kerosine en of er nog een aandeel waterstof kan zijn. Biobrandstoffen zijn normaal gesproken goedkoper, maar bij beperkte beschikbaarheid en/of bij een voorspoedige technologische ontwikkeling van e-fuels/waterstof kan een lager aandeel biobrandstoffen logisch zijn.

De EU heeft in ReFuelEU Aviation een minimaal aandeel synthetische kerosine opgenomen, van 1% in 2030 tot 35% in 2050. In een scenario met groter accent op biobrandstoffen houden we daaraan vast. Bij een accent op e-fuels en waterstof gaan we uit van 30% e-fuels in 2040 en 60% e-fuels in 2050 en van 2,5% waterstof in 2040 en 10% waterstof in 2050. Het aandeel biobrandstoffen blijft dan beperkt tot 22% in 2040 en 30% in 2050, zie Figuur 5.2.

---

<sup>74</sup> ReFuelEU eist minimaal 70% SAF in 2050 waarvan 35% synthetische e-fuels.

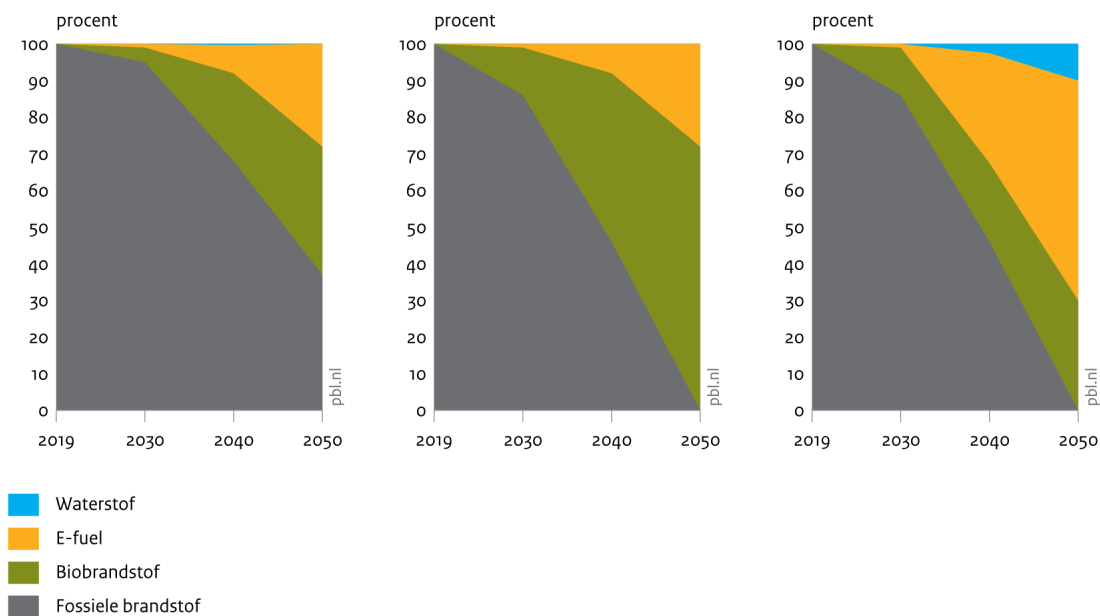
<sup>75</sup> [EUR-Lex - 52021PC0561 - EN - EUR-Lex \(europa.eu\)](#)

## Brandstofmix van vertrekkende vluchten vanuit Nederland

Conform ReFuelEU

Accent op biobrandstoffen

Accent op e-fuel en waterstof



Bron: PBL & TNO

Figuur 5.2: Mogelijke ontwikkelpaden van toekomstige brandstofmix.

Met de hierboven geschetste inzet van duurzame brandstoffen kan de Nederlandse luchtvaart in 2050 CO<sub>2</sub>-neutraal zijn, maar niet klimaatneutraal. Er wordt namelijk nog voor minimaal 90% gebruik gemaakt van biofuels en e-kerosine in verbrandingsmotoren. Daarmee blijven de niet-CO<sub>2</sub>-effecten bestaan. Klimaatneutraliteit vereist alsnog compensatie in andere sectoren en creëren van carbon sinks, wanneer andere sectoren in 2050 al op nul CO<sub>2</sub> zitten, evenals het vermijden van gebieden waar langlevende contrails kunnen voorkomen.

## 5.3 Impact van duurzame energiedragers op volume

Biobrandstoffen, e-fuels en waterstof zijn duurder in gebruik dan de fossiele kerosine. De onzekerheid hierin is groot, voor berekening van de impact van een stijgende brandstofprijs op volume gaan we uit van een factor 3 duurdere duurzame energiedragers ten opzichte van fossiele kerosine. Duurdere brandstofkosten betekenen hogere ticketprijzen. De omvang van de luchtvaart is prijsgevoelig: hogere ticketprijzen betekenen minder volume en dat betekent een lagere energievraag. Voor de vluchten binnen en vanuit Europa is door RefuelEU Aviation al een oplopend percentage aan bijmenging voorgeschreven (70% SAF voor vertrekkende vluchten in 2050).

We gaan er van uit dat zowel aankomende als vertrekkende vluchten gebruik maken van hetzelfde aandeel duurzame brandstoffen en dat dat aandeel gelijk is aan wat is geschetst in de scenario's van de sectie 5.1. Voor vertrekkende vluchten betekent dat een beperkte extra inzet t.o.v. de oplopende verplichting uit RefuelEU Aviation. De kosten van voldoen aan de oplopende verplichting uit

RefuelEU Aviation, en de impact daarvan op de vraag, is al verwerkt in het referentiescenario. Voor inkomende vluchten, die in het referentiescenario niet aan RefuelEU Aviation voldoen, is een veel grotere extra inzet van duurzame brandstoffen nodig, met een groter effect op de brandstofkosten. Het prijseffect van de extra inzet van SAF wordt gedempt doordat voor vluchten binnen de EU minder ETS-rechten gekocht hoeven te worden.

Tabel 5.1: Effect van extra inzet duurzame energiedragers op vervoersvolume via doorberekening meerkosten in ticketprijzen

	2019	2030	2040	2050
<b>aandeel SAF binnen en vanuit Europa in KEV (fit-for55)<sup>76</sup></b>		5%	32%	63%
<b>aandeel SAF inkomend van buiten Europa in KEV</b>		0%	0%	0%
<b>extra aandeel SAF binnen en vanuit Europa</b>		9%	22%	37%
<b>extra aandeel SAF inkomend van buiten Europa</b>		14%	54%	100%
<b>verschil in kostprijs SAF in vergelijking met fossiel</b>		x3	x3	x3
<b>ticketprijsontwikkeling KEV</b>	100	108	113	116
<b>effect ticketprijs bij extra inzet SAF t.o.v. KEV</b>		+4%	+11%	+17%
<b>vraageffect verandering ticketprijs op vervoersvolume</b>		-4%	-10%	-15%

Per saldo betekent de extra bijmenging in 2050 zo'n 17% hogere ticketprijzen dan het KEV pad, waardoor het volume zo'n 15% lager kan uitvallen. In plaats van een stijging van de energievraag tot 200 PJ betekent dit een stabilisatie op het niveau van 2019 (ca. 170 PJ). De eerder genoemde bandbreedte van 140 tot 240 PJ valt hierdoor terug tot 120 á 205 PJ.

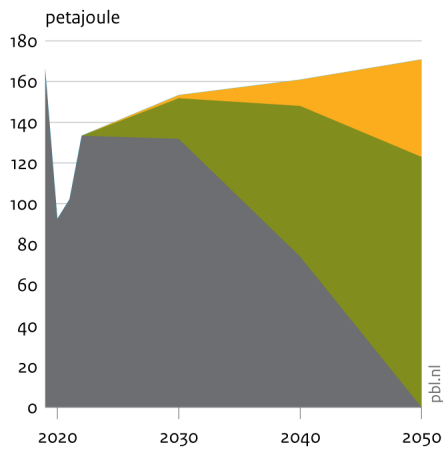
Gecombineerd met de eerder geschetste energiemixen geeft dit het volgende beeld (Figuur 5.3):

<sup>76</sup> Recent zijn de bijmengpercentages in ReFuelEU Aviation aangescherpt, nu wordt in 2050 70% SAF vereist. KEV 2022 ging er van 63% SAF bijmengpercentage uit in 2050.

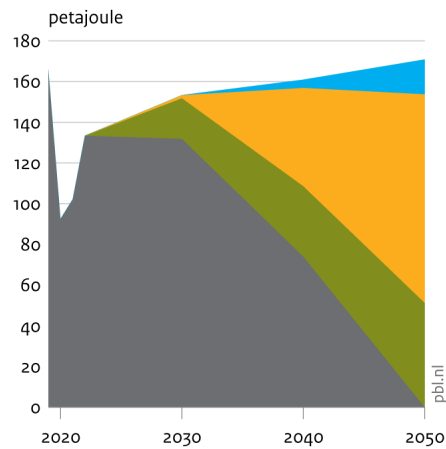


## Energievraag van vertrekkende vluchten vanuit Nederland

Accent op biobrandstoffen



Accent op e-fuel en waterstof



Bron: PBL & TNO

Figuur 5.3: Energiebehoefte en brandstofmix in het middenscenario, afhankelijk van de technologiepaden.

Bij een accent op biobrandstoffen is er in het middenscenario in 2050 zo'n 120 PJ aan biobrandstoffen nodig en zo'n 50 PJ aan e-fuels. Bij een accent op e-fuels is er in 2050 zo'n 50 PJ aan biobrandstoffen nodig en zo'n 100 PJ aan e-fuels en 20 PJ aan waterstof.

### Onder de streep

Decarbonisatie van de Nederlandse luchtvaart is een grote uitdaging, maar het lijkt binnen de grenzen van het mogelijke te liggen. Het pad dat we hier schetsen, gaat van het volledig vliegen op fossiele kerosine in 2019 naar netto CO<sub>2</sub>-vrije brandstoffen en energiebronnen in 2050. Er is een grote onzekerheid in de aanname over de snelheid van de autonome groei, omdat onzeker is hoe vaak men in de toekomst wil en kan vliegen en naar welke bestemmingen. Ook is er onzekerheid over de mate waarin de productie van biobrandstoffen, e-fuels en waterstof de vraag kan bijhouden.

Vanuit **de technologische kant** liggen de meeste kansen in de komende drie decennia bij hernieuwbare drop-in brandstoffen: deze brandstoffen kunnen naadloos fossiele kerosine vervangen. Drop-in brandstoffen maken het ook mogelijk dat de technologische ontwikkeling van straalmotoren door kan gaan. De grootste efficiëntiesprongen worden verwacht in een verbetering van de motoren en vermindering van het gewicht van de constructie (lichtere vliegtuigen) alsmede betere aerodynamische vormgeving. Zoals uitgebreid toegelicht, verwachten wij niet dat elektrische vliegtuigen een noemenswaardig deel van de passagier-kilometers gaan uitvoeren in 2050, tenzij er een zéér grote doorbraak komt in batterijtechnologie. Op langere termijn is een grote(re) rol van batterijtechnologie wel denkbaar. Gezien de eerder besproken nadelen van waterstofvliegtuigen, is de meest waarschijnlijke niche voor waterstofvliegtuigen het korte en middellange afstandssegment. De huidige vliegtuigen in dit marktsegment, met name de B737 en A320, veroorzaken nu ca.

20% van de CO<sub>2</sub>-uitstoot. Gezien de onzekerheid en vrij kleine kans dat waterstofinfrastructuur op alle luchthavens aanwezig zal zijn, veronderstellen wij in ons reductiepad de marktpotentie voor waterstofvliegtuigen rond de 9% in 2050, in termen van energiebehoefte.

Volledige decarbonisatie van luchtvaart in 2050 vereist het vergroten van de **productie van hernieuwbare brandstoffen**. Biobrandstoffen zullen hierbij een grote rol spelen: decarbonisatie (met elektrische en waterstofoplossingen) van wegtransport zal de huidige volumes van daar nu bijgemengde biobrandstoffen deels vrij maken. Theoretisch is het mogelijk om de luchtvaart in 2050 van genoeg hernieuwbare brandstoffen te voorzien<sup>77</sup>, maar of het daadwerkelijk gebeurt hangt uiteraard af van het beleid met betrekking tot eisen voor inzet, productie en eventueel import van duurzame energiedragers. Het zal veel vragen om een substantiële verhoging van de productie van biobrandstoffen, hernieuwbare elektriciteit en e-fuels te realiseren. Dit is zowel in Nederland een uitdaging als in andere landen waar we eventueel een deel van de hernieuwbare luchtvaartbrandstoffen van zullen gaan betrekken.

Als de luchtvaart geheel gedecarboniseerd wordt, blijven de **niet-CO<sub>2</sub>-effecten** grotendeels bestaan. Er bestaat grote onzekerheid over het opwarmingspotentieel van contrails (condenssporen) en NO<sub>x</sub>-uitstoot. Wij verwachten dat deze onzekerheid de komende jaren kleiner zal worden door klimaatonderzoek. Contrails kunnen zorgen voor relatief veel opwarming: gelukkig kunnen de meeste gebieden, waar langlevende contrails en cirruswolken gevormd worden, vermeden worden door het aanpassen van vlieghoogtes.

Als die gebieden nauwkeurig dynamisch geïdentificeerd worden dan zal het vermijden van die gebieden maximaal enkele procenten aan extra brandstofverbruik kosten, en per vlucht wellicht zelfs nog minder dan 1%. De NO<sub>x</sub>-uitstoot wordt bepaald door motortechnologie en de hoeveelheid gebruikte brandstof. Aangezien het brandstofverbruik per passagier-kilometer zal dalen, geldt dat ook voor de NO<sub>x</sub>-uitstoot. Er mag dus in 2050 een beperkte daling van de NO<sub>x</sub>-uitstoot per passagier-kilometer verwacht worden, maar een grotere totale uitstoot vanwege de toename van het luchtverkeer. Op dit moment is er nog geen oplossing voor het opwarmingseffect van de NO<sub>x</sub>-uitstoot, anders dan compensatie (bijvoorbeeld door negatieve emissies of opslag van CO<sub>2</sub>).

---

<sup>77</sup> Het is aannemelijk dat Nederland e-fuels gaat importeren. Gezien het feit dat ook scheepvaart CO<sub>2</sub>-neutraal moet gaan worden, zal de totale behoefte aan e-fuels groter zijn dan de genoemde getallen voor de luchtvaart.

## 6 Handelingsperspectieven voor beleid

Als de andere sectoren hun bijdrage aan het klimaatprobleem sterk reduceren, is de kans groot dat het ook internationaal niet geaccepteerd wordt dat de luchtvaart haar schade aan het klimaat verder blijft vergroten. Verschillende internationale luchtvaartorganisaties hebben hun klimaatambities de afgelopen tijd al aangescherpt. De ambitie van CORSIA is nog bescheiden, maar met CORSIA is wel een instrument geïntroduceerd dat de mondiale uitstoot van CO<sub>2</sub> door de luchtvaart kan reguleren. Aanscherping van het ambitieniveau is goed denkbaar als instrument om stringenter klimaatdoelen te bewerkstelligen, zeker nu ook de sector zelf meer ambitie toont. Als de transitie de inzet van nieuwe soorten vliegtuigen vereist, is er een lange aanloop nodig. Het kost 10 jaar om een nieuw type vliegtuig te ontwikkelen, zo'n model wordt dan nog zo'n 20 jaar verkocht en blijft dan nog 20 jaar vliegen. Het kost zo decennia om een vloot te vervangen, terwijl voor de lange vluchten de benodigde technologie om klimaatopwarming te voorkomen nog ontbreekt. Als de internationale luchtvaartsector wil overleven, moet ze tijdig een oplossing vinden. Uitwijken en uitstellen is een doodlopende weg. Tegen de tijd dat ze gedwongen wordt om de bakens te verzetten, moet ze de oplossing klaar hebben liggen. Dat vereist dat de sector weet dat er geen ontsnappen aan is. Dat vereist ook internationale regelgeving, maar die komt er niet vanzelf.

Zoals in het voorgaande uiteengezet, is het aannemelijk dat met hernieuwbare brandstoffen als biokerosine en e-kerosine de luchtvaart in principe CO<sub>2</sub>-neutraal kan worden. Deze brandstoffen kunnen in bestaande vliegtuigen worden toegepast en vereisen dus geen vervanging van de vloot. Wel zal ook hier een aanlooptijd gelden voor innovatie, opschaling van de beschikbaarheid van duurzame reststromen, hernieuwbare elektriciteit en duurzame koolstofbronnen, en voor opschaling van productiecapaciteit. Omdat deze brandstoffen duurder zijn dan de huidige fossiele kerosine, zal het gebruik moeten worden afgedwongen met verplichte bijmengpercentages en/of CO<sub>2</sub>-beprijzing. Vliegen zal duurder worden. Dat zal de groei wat dempen, maar het gaat niet om prijsstijgingen die vliegen onacceptabel duur maken, zeker niet omdat de luchtvaart nu nog nauwelijks wordt belast.

Een probleem is nog wel dat het gebruik van biokerosine en e-kerosine het probleem van de niet-CO<sub>2</sub>-gerelateerde klimaateffecten niet oplost. Om de niet-CO<sub>2</sub>-effecten volledig weg te nemen, moet van de verbrandingsmotor worden afgestapt. Hier is een nieuwe technologische doorbraak nodig. Die is nog niet in beeld, en gezien de lange ontwikkeltijd van nieuwe vliegtuigen en de trage vlootvernieuwing is 2050 erg dichtbij. Zoals eerder besproken, zijn contrails relatief makkelijk te verminderen, de NO<sub>x</sub>-uitstoot is dat niet. Als het niet lukt een technologische oplossing te vinden, is de enige uitweg voor de klimaatneutrale luchtvaart om het vliegen met CO<sub>2</sub>-neutrale energiedragers te combineren met negatieve emissies buiten de sector om de niet-CO<sub>2</sub>-gerelateerde effecten te compenseren.

De luchtvaartsector is zeer competitief met kleine en volatiele marges, en zal alleen voldoende verduurzamen als het onontkoombaar is. Startpunt voor de te volgen strategie is dan ook dat de luchtvaart linksom of rechtsom haar klimaatprobleem zal moeten oplossen. De snelheid waarmee dat lukt, en het resterende beslag op duurzame energie en grondstoffen, bepaalt daarbij hoeveel luchtvaart er in de toekomst mogelijk is.

De autonome efficiëntieverbetering van ca. 1% per jaar zal helpen, maar is niet genoeg om de verwachte groei te compenseren. De overstap naar duurzame energiedragers is dus cruciaal. Op korte termijn is biokerosine zeer beperkt en e-kerosine nog niet beschikbaar. De komende jaren is er qua CO<sub>2</sub>-besparing het meeste te behalen via het remmen van de groei door beprijzing of capaciteitsbeleid, waarbij wel nauwlettend gekeken moet worden of door uitwijkgedrag het effect niet tegenvalt. Naast het instellen van een EU en/of nationaal plafond kunnen rijk en EU hierbij ook inzetten op het bieden van alternatieven aan consument en bedrijfsleven (reizen per hoge snelheidstrein, telewerken, etc.).

Van belang is om de productie en de inzet van biokerosine en e-kerosine op gang te brengen. Het Fit-for-55 pakket van de EU helpt dit op gang te brengen door verplichte bijmenging en stevige CO<sub>2</sub>-beprijzing in de vorm van het aangescherpte ETS. De verplichte bijmenging in Fit-for-55 voor vluchten vanaf Europese luchthavens loopt op tot 70% in 2050. Om in 2050 nul CO<sub>2</sub>-uitstoot te bewerkstelligen zou dat moeten oplopen tot 100%. Ook is tijdige certificering van volledige (100%) bijmenging van SAF's noodzakelijk. EASA is hiervoor verantwoordelijk in de EU en FAA in de VS.

Daarnaast is het ook mogelijk om het aanbod te vergroten door de productie op gang te helpen van FTJ (Fischer-Tropsch to Jet) en/of ATJ (Alcohol-To-Jet), waarvan de productie nu nog niet op commerciële schaal beschikbaar is. Hetzelfde geldt voor de productie van e-kerosine, waarbij met name de opschaling van productie van groene waterstof en de overgang van CO<sub>2</sub>-gebruik uit een puntbron naar DAC en de opschaling van DAC belangrijke technische en economische barrières zijn. Hier ligt mogelijk een interessante groeimarkt. Nederland zal geschikter gemaakt moeten worden voor import van waterstof en/of e-kerosine en (meer) biomassa-import, met een hoofdrol voor de Rotterdamse haven. Hierbij speelt ook nog het aspect voorzieningszekerheid. Het kan goedkoper zijn SAF's elders in de wereld te produceren, maar in een onrustige wereld kan leveringszekerheid en het voorkomen van afhankelijkheid een relevant aspect blijven.

Zoals gezegd zijn de biokerosine en e-kerosine voor de niet-CO<sub>2</sub>-effecten geen oplossing. Met research en development kan er mogelijk een doorbraak worden gevonden. De overheden zouden R&D en de marktintroductie van vliegen op waterstof en met batterijen kunnen ondersteunen, aangezien deze technieken na 2050 hopelijk wél kunnen gaan bijdragen aan een klimaatneutrale luchtvaart.

De overstap naar vliegtuigen op waterstof of andere vormen zonder verbrandingsmotor zal niet vanzelf gaan. Vanwege de traagheden in zowel vlootvernieuwing als uitrol van complexe energieinfrastructuur is het daarom beleidsmatig toch relevant hier nu al op in te zetten met het stimuleren van R&D en kleinschalige marktintroductie. Het is van belang om ten eerste een plan te maken voor beleid omtrent ontwikkeling en commercialisatie van waterstofvliegtuigen, bijvoorbeeld door het middel van stimulerende maatregelen, en ten tweede door het tijdig plannen van de realisatie van waterstofinfrastructuur op vertrek- én aankomstluchthavens. Er moet ook aandacht besteed worden aan het certificeringsproces voor het gebruik van waterstof op luchthavens. Het vraagt aanpassingen aan de luchthavens, maar het moet ook aantrekkelijk gemaakt worden. Het gebruik van waterstof lijkt gemakkelijker bij kleinere vliegtuigen, maar bij beperkte capaciteit op luchthavens zullen vliegmaatschappijen juist steeds meer gebruik willen maken van grotere vliegtuigen. Het kan te overwegen zijn bij de slottoewijzing hier gericht op te sturen.

## 6.1 Beleid rond productie en inzet van SAF

Hernieuwbare vliegtuigbrandstoffen (SAF's) zijn veel duurder dan conventionele kerosine. Zonder concreet beleid zal de snelheid waarmee de SAF's conventionele kerosine gaan vervangen te traag zijn om een betekenisvolle rol te spelen bij het bereiken van nul-CO<sub>2</sub>-uitstoot in 2050. Er zijn maatregelen nodig die de vraag naar SAF verhogen en óók die de productie van SAF bevorderen. Conceptueel zijn er twee middelen<sup>78</sup> om productie en gebruik van SAF te versnellen:

### 1. Subsidies voor het opschalen van de productie van duurzame brandstoffen

Subsidies kunnen gebruikt worden om de prijs van geproduceerde SAF vooraf vast te stellen en zo investeringen in productiecapaciteit zeker en rendabel te maken (analogie: vast feed-in tarief voor hernieuwbare elektriciteit). Een alternatieve route is om de meerkosten van SAF ten opzichte van fossiel met een subsidie te overbruggen en daardoor de afzetmarkt voor de SAF te garanderen (analogie: prijsplafond).

Daarnaast zijn subsidies nodig voor onderzoek en ontwikkeling naar de productie van hernieuwbare brandstoffen uit biomassa die niet met voedselketens concurreert (d.w.z. geavanceerde bio-brandstoffen, overwegend gemaakt uit hout- en grasachtige grondstoffen). Hier moeten de combinaties van productiemethode en feedstock geprioriteerd worden die de grootste kans hebben voor het opschalen en tegelijkertijd voldoende beschikbaarheid hebben en weinig negatieve impact creëren op voedselketens en vegetatie.

### 2. Bijmengverplichtingen

Het is van groot belang een concreet en realistisch tijdspad op te stellen voor de bijmengpercentages van SAF. De EU heeft een voorstel gedaan met het ReFuelEU initiatief waarmee het verplichte minimale percentage van SAF zou stijgen van 2% in 2025 tot 70% in 2050. Als dit voorgestelde tijdspad bindend wordt, dan weten de marktpartijen waar ze aan toe zijn en kunnen ze capaciteitsplannen ontwikkelen en investeringen doen. Om de luchtvaart in 2050 CO<sub>2</sub>-neutraal te maken, zal de bijmengverplichting aangescherpt moeten worden.

Snellere decarbonisatie van het wegvervoer kan zorgen dat er meer SAF beschikbaar komt voor de luchtvaart. De volumes aan biobrandstoffen die nu verplicht bijgemengd worden voor het wegvervoer kunnen (onder de conditie van geschiktheid<sup>79</sup> en certificatie) ingezet worden in de luchtvaart. Een snellere elektrificatie (en mogelijk het gebruik van waterstof) in wegvervoer zal een boost geven voor de beschikbaarheid van SAF voor de luchtvaart. Ook kan biomassa, die nu in kolencentrales bijgestookt wordt, gebruikt worden voor productie van SAF.

---

<sup>78</sup> Theoretisch hoort ook CO<sub>2</sub> beprijzing bij de gereedschapskist van beleidsinstrumenten. CO<sub>2</sub> beprijzing gebeurt al indirect via deelname van luchtvaart aan ETS. Maar de scope van CO<sub>2</sub>-beprijzing is beperkt door internationale verdragen, het is alleen mogelijk voor intra-Europese vluchten. Inzet van duurzame brandstoffen voor alle vertrekkende vluchten zal een veel grotere impact hebben op CO<sub>2</sub>-uitstoot van de luchtvaart. Bovendien is de verwachting dat een verplichting voor inzet van duurzame energiedragers sneller de markt voor duurzame energiedragers op gang zal brengen.

<sup>79</sup> Momenteel kunnen alleen de drop-in dieselvervangers HVO en HEFA met beperkte modificaties direct ingezet worden in de luchtvaart. Voor de benzinevervanger bio-ethanol is dit veel lastiger, omdat de techniek om ethanol om te zetten in SAF nog niet op commerciële schaal beschikbaar is.

## 6.2 Beleid rond niet-CO<sub>2</sub> klimaateffecten

Decarbonisatie van brandstoffen lost nog niet het probleem op van de niet-CO<sub>2</sub> klimaateffecten van de luchtvaart, die mogelijk een. Er is wel een gedeeltelijke oplossing in de vorm van het sterk verminderen van contrails (“vliegtuigstrepen”), die als “laaghangend fruit” gezien kan worden. Productie van contrails kan aanzienlijk verminderd worden door het vermijden van luchtlagen waar ze gevormd worden. Dat zal wel wat extra brandstof en vliegtijd gaan kosten. Om het vermijden van de contrailvormende gebieden te implementeren, zal informeren over de locaties van deze gebieden en wetmatig afdwingen van aanpassing van vlieghoogtes nodig zijn.

**Informeren:** Een meteorologische dienst creëren die de (dynamische) gebieden van het luchtruim aanwijst waar langlevende contrails gevormd kunnen vormen. Deze dienst zal luchtvaartmaatschappijen en luchtvaartautoriteiten informeren (locatie, hoogte en tijd) over deze gebieden.

**Afdwingen:** Omdat het vermijden van gebieden waar contrails gevormd worden niet vanzelf zal geschieden (het kan kostenverhogend zijn), moeten er internationale afspraken gemaakt worden over de manier waarop het vermijden van deze gebieden afgedwongen kan worden. Dit kan een functie van de luchtverkeersleiding worden. Of landen zouden kunnen gaan differentiëren in *overflight fees* waarbij vliegen in contrail gebieden duurder wordt.

## 6.3 Beleidsopties die verder wetenschappelijk onderzoek vereisen

**Beprijzen van de totale klimaatimpact:** Deze maatregel zou de breedste dekking hebben (omdat het alle uitstoot en klimaatimpact daarvan omvat), en is daardoor de meest ingewikkelde om te implementeren. De beprijzing zou er toe dienen om de externe kosten van klimaatimpact van de luchtvaart af te dekken. Voor deze maatregel is het nodig dat de klimaatimpacts van verschillende stoffen (niet-CO<sub>2</sub> en CO<sub>2</sub>) op een bepaalde wijze gemonetariseerd kunnen worden. Een uitdaging daarbij is dat er nog geen wetenschappelijke consensus is over wat de maatschappelijke kosten van CO<sub>2</sub> zijn, maar de grootste uitdaging is in het berekenen van de kosten van niet-CO<sub>2</sub> uitstoot. Het klimaateffect van niet-CO<sub>2</sub> uitstoot van vluchten moet inzichtelijk gemaakt worden, bijvoorbeeld op een manier die het klimaateffect in termen van CO<sub>2</sub>-equivalenten uitdrukt. Als dat lukt dan zou CO<sub>2</sub> beprijzing voldoende zijn om zowel CO<sub>2</sub> als niet CO<sub>2</sub> klimaateffecten te beprijzen. De maatregel zou op de langere termijn geïmplementeerd kunnen worden.

**Onderzoek naar welke maatregelen en beleidsopties het meeste opleveren buiten Europa:** De EU kent een streng klimaatbeleid; buiten de EU is het beleid veel minder streng, terwijl de potentie voor de verdere groei van het luchtvaartvolume ligt in de ontwikkelingslanden, met name in Azië. In de EU gaat veel geld besteed worden (publiek en privaat) aan het verduurzamen van luchtvaart. Daarom is het relevant de vraag te beantwoorden welke ontwikkel- en verduurzamingspaden het meeste zullen opleveren op mondiaal niveau. Gezien de leidende rol van de ontwikkelingen die in de EU plaats gaan vinden, rijst de vraag welke transitiepaden de meeste kans van slagen hebben buiten de EU en met name in Zuidoost Azië. Met andere woorden, welke ontwikkelingen moeten door het beleid in Nederland en de EU geprioriteerd worden, zodat ze later overgenomen worden in de rest van de wereld en het meest opleveren qua klimaat?

# Referenties

- ACARE (2022), Fly the Green Deal, Europe's Vision for Sustainable Aviation, Report of the Advisory Council for Aviation Research and Innovation in Europe
- Avidan, A. A., 1988. Gasoline and distillate fuels from methanol, in book: Methane Conversion, Bibby, D.M., Chang, C.D., Howe, R .F., and Yurchak, S. (Editors), Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, The Netherlands.
- Bakker, S., Moorman, S., Knoope, M., Zyl, S. van, Moncada Botero, J. & Mulder, H. (2022). Energieketens voor CO<sub>2</sub>-neutrale mobiliteit. Efficiëntie, kosten en ruimtegebruik in beeld. Achtergrondrapport. Den Haag: Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid
- Berveling, J. (2019). Vliedschaamte. Een ongemakkelijke waarheid? Bijdrage aan het Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk, 21 en 22 november 2019. Leuven: Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid
- Berveling, J., Zijlstra, T., Knoope, M., Huibregtse, O. (2020) Op de groene toer De bijdrage van gedragsinterventies aan het verduurzamen van de luchtvaart, Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid | KIM
- Bodell, L. (2023), Why Airlines Want Single European Skies Implemented: Will the Industry Finally Make Progress Following Decades of Inaction? Simplyflying, Apr 09 2023,
- Burghouwt, G., Lieshout, R., & van Spijker, V. (2017). Economische effecten Schiphol: Over indirecte effecten en de gevolgen van capaciteitsschaarste. AmsterdamSEO Economisch Onderzoek.
- Climeworks, 2021. The world's largest climate-positive direct air capture plant: Orca! Verkregen via website: <https://climeworks.com/orca> (bezoekt maart 2022).
- COM(2021) 561 final. Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on ensuring a level playing field for sustainable air transport
- Commercial Aircraft Propulsion and Energy Systems Research: Reducing Global Carbon Emissions (2016) Chapter: 3 Aircraft Gas Turbine Engines National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2016. Washington, DC: The National Academies Press.  
<https://doi.org/10.17226/23490>.
- Cooper, T.; Smiley, J.; Porter, C.; Precourt, C. (2018), Global Fleet & MRO Market Forecast Commentary Summary 2018-2028, Oliver Wyman 2018.
- CPB / PBL (2016), Mobiliteit – Luchtvaart Achtergronddocument WLO – Welvaart en Leefomgeving, Toekomstverkenning 2030 en 2050
- Davydenko, I. Y., Hopman, W. M. M., & Smokers, R. T. M. (2020). Carbon Footprinting of Combined Passenger Freight Operations in Aviation Networks. TNO: The Hague, The Netherlands.
- Detz, R. & Weeda, M., 2022. Projections of electrolyzer investment cost reduction through learning curve analysis, TNO 2022 P10111
- Dray, L., Schäfer, A. W., Grobler, C., Falter, C., Allroggen, F., Stettler, M. E., & Barrett, S. R. (2022). Cost and emissions pathways towards net-zero climate impacts in aviation. Nature Climate Change, 1-7.
- Eck, van G., Kouwenhoven, M. (2022). Aeolus doorrekeningen KEV2022, Significance 2022
- Ember, 2022. Daily Carbon Prices. Verkregen via website: <https://ember-climate.org/data/carbon-price-viewer/> (bezoekt maart 2022).

- EUROCONTROL Think Paper #1 - Fuel tankering in European skies: economic benefits and environmental impact (2019), <https://www.eurocontrol.int/publication/fuel-tankering-european-skies-economic-benefits-and-environmental-impact>
- European Commission (2020), Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through LCA
- Faber, J., Király, J., Lee, D., Owen, B., & O’Leary, A. (2022). Potential for reducing aviation non-CO<sub>2</sub> emissions through cleaner jet fuel, Delft, CE Delft, February 2022
- Fasihi, M., Efimova, O., Breyer, C., 2019. Techno-economic assessment of CO<sub>2</sub> direct air capture plants, *Journal of Cleaner Production* 2019, 224, 957e980. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.086>
- Giannelos et al. (2021). Study supporting the impact assessment of the ReFuelEU Aviation initiative
- Gifford, L. (2020). “You can’t value what you can’t measure”: a critical look at forest carbon accounting. *Climatic Change*, 161, 291-306.
- Grewe, V., Gangoli Rao, A., Grönstedt, T., Xisto, C., Linke, F., Melkert, J., ... & Dahlmann, K. (2021). Evaluating the climate impact of aviation emission scenarios towards the Paris agreement including COVID-19 effects. *Nature Communications*, 12(1), 1-10.
- Hammingh, P., Abels-van Overveld, M., van Beijnum, B., Blomjous, D., Boom, H., van den Born, G. J., ... & Arets, E. (2022). *Klimaat-en energieverkenning 2022 / Netherlands Climate and Energy Outlook 2022*, PBL Planbureau voor de Leefomgeving.
- ICAO (2022), Resolution A41-21: Consolidated statement of continuing ICAO policies and practices related to environmental protection — Climate change. [https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/Assembly/Resolution\\_A41-21\\_Climate\\_change.pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/Assembly/Resolution_A41-21_Climate_change.pdf). Accessed on July 5, 2023
- International Energy Agency (IEA), 2019. *The Future of Hydrogen - Seizing today’s opportunities*
- IRENA (2021), *Reaching Zero with Renewables: Biojet fuels*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. ISBN 978-92-9260-350-2
- Irlam, L., 2017. Global CCS Institute, *Global costs of carbon capture and storage, 2017 update*, Verkregen via website: <https://www.globalccsinstitute.com/> (bezocht maart 2022).
- Jain, R., Nagasawa, K., Veda, S., & Sprik, S. (2023). Grid ancillary services using electrolyzer-Based power-to-Gas systems with increasing renewable penetration. *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 6, 100308.
- Kadyk, T., Winnefeld, C., Hanke-Rauschenbach, R., & Krewer, U. (2018). Analysis and design of fuel cell systems for aviation. *Energies*, 11(2), 375.
- Keith, D.W., Holmes, G., St. Angelo, D., Heidel, K., 2018. A Process for Capturing CO<sub>2</sub> from the Atmosphere, *Joule*, 2018, 2, 1573–1594. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.05.006>
- Klauber et al. (2017). *Innovative Funding for Sustainable Aviation Fuel at U.S. Airports: Explored at Seattle-Tacoma International Rocky Mountain Institute, SkyNRG*, July 2017. <https://www.rmi.org/insights/reports/innovativefunding-sea-tac-2017>.
- Klimaatakkoord, 2019. Verkregen via website: <https://www.klimaatakkoord.nl/klimaatakkoord/documenten/publicaties/2019/06/28/klimaatakkoord> (bezocht maart 2022).
- van Kranenburg, K., van Bree, T., Gavrilova, A., Harmsen, J., Schipper, C., Verbeek, R., Wieclawska, S., Wubbolts, F., 2021. *Transition to e-fuels: a strategy for the Harbour Industrial Cluster Rotterdam*, TNO 2021 R12635.
- van Hooff, W., Kuijers, T., Quax, R., Witte, J., Londo, M., Matthijsen, J., van Sark, Sinke, W. (2021). *Ruimtelijk potentieel van zonnestroom in Nederland*, TKI Urban Energy rapport,



<https://www.topsectorenergie.nl/sites/default/files/uploads/Urban%20energy/publicaties/Ruimtelijk%20potentieel%20ovan%20zonnestroom%20in%20Nederland.pdf>

- Lamboos, S., Weeda, M., 2022. Impact 'Fit for 55' voorstel voor herziening RED op de vraag naar groene waterstof in Nederland. Verkregen via website: <https://www.rijksoverheid.nl/binaries/rijksoverheid/documenten/kamerstukken/2022/03/02/21313145bijlage1-impact-fit-for-55-voorstel-voor-herziening-red-op-de-vraag-naar-groene-waterstof-in-nederland/21313145bijlage1-impact-fit-for-55-voorstel-voor-herziening-red-op-de-vraag-naar-groene-waterstof-in-nederland.pdf> (bezoekt maart 2022).
- Lin, T. et al. (2016), "Biomass feedstock preprocessing and long-distance transportation logistics", GCB Bioenergy, Vol. 8/1, pp. 160–170, <https://doi.org/10.1111/gcbb.12241>.
- Mannstein, H., Spichtinger, P., & Gierens, K. (2005). A note on how to avoid contrail cirrus. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 10(5), 421–426.
- Matthijssen J., Dammers, E., Elzenga, H., 2018. De toekomst van de Noordzee - De Noordzee in 2030 en 2050: een scenario studie. Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving (PBL).
- Miao, Z. et al. (2011), "Lignocellulosic biomass feedstock supply logistic analysis", American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting 2011, ASABE 2011, Vol. 7/January 2011, pp. 5440–5460, <https://doi.org/10.13031/2013.37203>.
- Peeters, P., G.C.M. Uitbeijerse, B. Peerlings & G.P. Geilenkirchen (2021), Fuel tankering in relation to a Dutch CO<sub>2</sub> ceiling for aviation, The Hague: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency.
- Peeters, P., & Melkert, J. (2021). Toekomst verduurzaming luchtvaart: een actualisatie. Rienstra, S., Visser, J. (2021). Perspectieven op netwerkqualiteit bij schaarse capaciteit Schiphol, Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (KiM)
- Romijn, G., Blom, W., Hilbers, H. (2016). Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving Achtergronddocument Mobiliteit – Luchtvaart, CPB Centraal Planbureau en PBL Planbureau voor de Leefomgeving, Den Haag, 2016, PBL-publicatienummer: 2373, <https://media.acc.wlo2015.nl/upload/pbl-2016-wlo-achtergronddocument-mobiliteit-luchtvaart-2373.pdf>
- RTL (2023), Kwart vliegt minder vanwege zorgen om klimaatverandering, <https://www.rtlnieuws.nl/nieuws/nederland/artikel/5402868/vliedschaamte-vliegtuig-vliegen-klimaatverandering>
- Samani, A. E., D'Amicis, A., De Kooning, J. D., Bozalakov, D., Silva, P., & Vandeveld, L. (2020). Grid balancing with a large-scale electrolyser providing primary reserve. IET Renewable Power Generation, 14(16), 3070–3078.
- Saric, M., Detz, R., van Kranenburg, K., 2021. Evaluation of different routes for e-diesel and e-kerosene supply in the port of Rotterdam. TNO report 2021 R12731
- Savelberg, F., & de Lange, M. (2018). Substitutiemogelijkheden van luchtvaart naar spoor. Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid | KiM.
- Shell, 2022, Pearl GTL overview. Verkregen via website: <https://www.shell.com/about-us/major-projects/pearl-gtl/pearl-gtl-an-overview.html> (bezoekt maart 2022).
- van der Sman, E., Peerlings, B., Kos, J., Lieshout, R., & Boonekamp, T. (2021). Destination 2050: A Route to Net Zero European Aviation, NLR en SEO Amsterdam Economics
- SWD(2021) 633 COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT IMPACT ASSESSMENT Accompanying the Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on ensuring a level playing field for sustainable air transport

- Tabak S. A, Avidan, A. A., Krambeck, F. J., 1986, Production of synthetic gasoline and diesel fuel from non-petroleum resources. Am. Chem. Soc., Div. Gas Fuel Chem., Prepr. American Chemical Society national meeting, New York, NY, USA, 13 Apr
- TNO datasheets zijn te downloaden van website: <https://energy.nl/data> (bezocht maart 2022).
- Uslu (2019). ADVANCEFUEL market analysis. D5.1 RESfuels in transport sector.
- Verbeek, R., Verbeek, M., de Kler, R., van Kranenburg, K., Smokers, R., 2020. TNO report Power-2-Fuels Cost Analysis. Verkregen via website: [https://smartport.nl/wp-content/uploads/2020/09/Cost-Analysis-Power-2-Fuel\\_def\\_2020.pdf](https://smartport.nl/wp-content/uploads/2020/09/Cost-Analysis-Power-2-Fuel_def_2020.pdf) (bezocht maart 2022).
- Yugo, M., Soler, A., Concawe, 2019, A look into the role of e-fuels in the transport system in Europe (2030–2050) (literature review)