

## **Achtergrondinformatie ten behoeve van de beleidsaanpak voor niet-CO<sub>2</sub>-klimaateffecten van luchtvaart**

### **Vliegtuigtechnologie**

Als mondiaal opererende en concurrerende sector, wordt er in de luchtvaart sinds lange tijd veel geïnvesteerd in brandstofefficiënte vliegtuigen. Deels betreft dat een lichtere en meer aerodynamische romp, staart en vleugels. Door op die wijze minder energie per passagier-kilometer te verbruiken worden zowel de CO<sub>2</sub>-emissies als niet-CO<sub>2</sub>-emissies (en hun klimaateffecten) geleidelijk verminderd.

Efficiëntie kan ook komen door betere vliegtuigmotoren. Langs die lijn heeft brandstofbesparing (en dus CO<sub>2</sub>-reductie) niet altijd voordelen voor niet-CO<sub>2</sub>-emissies. NO<sub>x</sub>-emissies zijn bijvoorbeeld een direct gevolg van de hoge temperatuur in de verbrandingskamer (rond 2000 °C) die nodig is om zoveel mogelijk energie uit de brandstof te halen en zo min mogelijk CO<sub>2</sub> en roet uit te stoten. Door meer voor een parameter (bijvoorbeeld geluid, gewicht of betrouwbaarheid) te optimaliseren in het ontwerp van een motor zullen andere parameters, waaronder emissies, minder verbeterd kunnen worden of zelfs verslechteren. Er is grote potentie om met evolutionaire en revolutionaire technologie zowel CO<sub>2</sub>-emissies als niet-CO<sub>2</sub>-emissies en -klimaateffecten te verminderen.

Parallel met andere modaliteiten en industrieën heeft het voor het totale effect op klimaat, de luchtkwaliteit en de natuur de voorkeur om volledig *zero-emissie* te vliegen. Batterij-elektrisch vliegen, waar Nederland onder andere met het AHEV-programma<sup>1</sup> op inzet, is wat dat betreft ideaal. Helaas is het potentiële bereik van vliegtuigen met batterijen, zelfs na 2050, beperkt. Daarom wordt ook ingezet op hybride-elektrische vliegtuigen en op waterstof. Afhankelijk van het precieze ontwerp kunnen deze alternatieve aandrijflijnen, bijvoorbeeld bij gebruik van brandstofcellen, vrijwel niets meer uitstoten. Andere ontwerpen, zoals die gebaseerd op de verbranding van waterstof, zouden mogelijk juist meer niet-CO<sub>2</sub>-klimaateffect kunnen hebben dan conventionele vliegtuigen doordat ze meer waterdamp en NO<sub>x</sub> uitstoten.

Volume II van Annex 16 bij het Chicagoverdrag bevat al sinds 1981 standaarden voor de emissies van vliegtuigmotoren. Deze eerste standaarden hadden betrekking op het rooknummer<sup>2</sup>, en de uitstoot van onverbrande koolwaterstoffen, koolmonoxide en NO<sub>x</sub>. De standaard voor NO<sub>x</sub> is op vier momenten aangescherpt, waarvan in 2011 voor het laatst. Sindsdien ligt de focus op de ontwikkeling van een nieuwe standaard voor roet (nvPM) die het rooknummer vervangt. Vanaf 2023 geldt deze nvPM-standaard voor alle (middel)grote straalmotoren die geproduceerd worden. De ICAO-lidstaten en hun autoriteiten, zoals de Amerikaanse FAA en het Europese EASA, zetten deze standaarden om in bindende regelgeving voor de certificatie van vliegtuigen. EASA onderhoudt tevens voor ICAO de mondiale databank<sup>3</sup> met alle vrijwillig openbaar gemaakte certificatiegegevens. De focus van de bestaande standaarden ligt op het verminderen van luchtverontreiniging rondom luchthavens. Motoren worden op de grond getest op vier voortstuwingsniveaus die representatief zijn voor de *landing & take-off* (LTO-fase) tot 3.000 voet. Er is een significant verband tussen deze LTO-emissies en de emissies op kruishoogte, die tot niet-CO<sub>2</sub>-klimaateffecten leiden. Zodoende hebben de ICAO-standaarden dus bijgedragen aan het beperken van de niet-CO<sub>2</sub>-klimaateffecten van de luchtvaart. Bij het ontwikkelen en aanscherpen van dergelijke standaarden spelen technische haalbaarheid en kosteneffectiviteit een grote rol, maar ook de *trade-offs* die ontstaan in het ontwerpen van motoren zoals de eerder genoemde relatie tussen efficiënte verbranding en NO<sub>x</sub>.

### **Luchtvaartbrandstoffen**

Zoals omschreven in het EASA-rapport over niet-CO<sub>2</sub>-klimaateffecten<sup>4</sup>, leveren meetcampagnes de laatste jaren bemoedigende resultaten op. Deze laten zien dat duurzame luchtvaartbrandstof (SAF) vanwege een andere chemische samenstelling bij verbranding minder roet uitstoot. Dat leidt volgens sommige onderzoeken tot een vermindering van vliegtuigstrepen. De sleutel is een lager

---

<sup>1</sup> Kamerstukken II, 2022-2023, 31936, nr. 1001

<sup>2</sup> Het rooknummer is een eenheid om de uitstoot van roet uit te drukken.

<sup>3</sup> <https://www.easa.europa.eu/en/domains/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank>

<sup>4</sup> COM/2020/747 final en SWD(2020) 277 final

gehalte aan aromatische koolwaterstoffen en daarbinnen aan naftalenen.<sup>5</sup> Duurzame luchtvaartbrandstof bevat doorgaans ook geen zwavel. Die combinatie van minder aromatische koolwaterstoffen en minder zwavel leidt naar verwachting tot minder luchtvervuiling en minder niet-CO<sub>2</sub>-effecten. Dat komt boven op de CO<sub>2</sub>-reductie in de keten doordat ze geproduceerd worden uit duurzame grondstoffen. Duurzame luchtvaartbrandstoffen is echter een breed begrip. Doorgaans worden deze categoriaal gezien als brandstoffen met nul aromaten en nul zwavel, en dit lijkt op te gaan voor de meest gangbare grondstoffen en productiemethoden. Er zijn echter potentiële grondstoffen en productiemethoden die als duurzaam gezien (kunnen) worden, maar die een andere samenstelling kunnen opleveren. Een mogelijk voorbeeld daarvan is *recycled carbon fuel* die onder andere door chemische recycling van plastics gemaakt kan worden.

Hoewel het kabinet 100% duurzame kerosine in 2050 als doel heeft, is dit jaartal nog ver weg en zal een groot deel van de wereld niet op datzelfde tempo kunnen verduurzamen. Een aanvullende optie die daarmee in beeld komt is de productie van schonere fossiele luchtvaartbrandstof. Door de samenstelling hiervan te veranderen zodat deze meer op duurzame luchtvaartbrandstof lijkt (minder aromaten) lijkt het mogelijk om al op korte termijn significante verbeteringen qua luchtkwaliteit en niet-CO<sub>2</sub>-klimaateffecten te realiseren. In aanvulling daarop lijkt een dergelijke aanpassing aan de samenstelling te leiden tot een hogere energiedichtheid<sup>6</sup> ten opzichte van de huidige brandstof en daarmee een kleine (ongeveer 1%) verbetering in CO<sub>2</sub>-uitstoot. De inzet hierop raakt aan de ontzwaveling van kerosine, al is zwavel belangrijker voor de luchtkwaliteit en zijn aromaten belangrijker voor het klimaateffect. Wel lijkt dezelfde processtap, *hydrotreatment*, beide bestanddelen tegelijk te verminderen.

In 2022 heeft CE Delft in opdracht van het ministerie van IenW een onderzoek uitgevoerd waarin de meest recente informatie is verzameld over dit onderwerp.<sup>7</sup> Daaruit blijkt dat er nog geen sterke wetenschappelijke consensus is over de rol van brandstofsamenstelling in de omvang van niet-CO<sub>2</sub>-klimaateffecten en luchtverontreiniging. Sommige modellen en metingen laten juist een groei in roetuitstoot zien als het aromatengehalte verminderd wordt, en sommige mkba's geven netto negatief maatschappelijk rendement voor het nabehandelen van kerosine vanwege de benodigde warmte en waterstof (doorgaans uit aardgas). Er is meer data nodig over de samenstelling van zowel fossiele als duurzame luchtvaartbrandstof en meer onderzoek naar de rol van die samenstelling op de uitstoot.

### **Vliegoperaties en luchtruim**

In de aanpak van CO<sub>2</sub>-reductie is operationele efficiëntie in het luchtruim een belangrijke component, maar met afstand op de derde plek na technologie en brandstoffen. Voor niet-CO<sub>2</sub>-klimaateffecten lijkt deze ordening niet op te gaan vanwege de relatie tussen deze klimaateffecten en de lokale atmosferische omstandigheden. Generieke verbeteringen in de efficiëntie van het luchtruim, net als meer ingewikkelde opties zoals formatievliegen, kunnen zowel CO<sub>2</sub>-emissies als niet-CO<sub>2</sub>-emissies en hun klimaateffecten verminderen. Door de afhankelijkheid van het niet-CO<sub>2</sub>-klimaateffect van de atmosferische omstandigheden op het moment van uitstoot, ontstaat er echter ook een geheel nieuwe categorie aan mitigatie-opties. Hierbij gaat het niet om het verminderen van de emissies zelf, maar om het verminderen van het effect door op andere plekken uit te stoten. Leidend hierbij zijn de weersomstandigheden. De meest besproken optie in deze categorie is het gericht vermijden van gebieden waar zich vliegtuigstrepen kunnen vormen. Andere opties worden ook ontwikkeld, onder andere in het EU ClimOP-project waar het NLR en TU Delft aan meewerken. Dat betreft bijvoorbeeld het tijdelijk sluiten van kleine tot grotere klimaatgevoelige delen van het luchtruim. De meest eenvoudige operationele maatregel die reeds lange tijd bestudeerd wordt, betreft alle vluchten lager laten vliegen. Dat betekent echter ook dat iedere vlucht meer brandstof verbruikt vanwege de hogere luchtweerstand en dus meer CO<sub>2</sub> uitstoot en meer geld kost.

---

<sup>5</sup> Aromaten zijn cyclische koolwaterstoffen waaronder benzeen. Naftalenen zijn aromaten met minstens twee benzeenringen erin.

<sup>6</sup> Door de cyclische verbindingen bevatten aromaten minder waterstof (H) per koolstofatoom (C) en hebben dus een iets lagere energiedichtheid dan lineaire koolwaterstoffen.

<sup>7</sup> Kamerstukken II, 2021-2022, 30175, nr. 416

Er is groeiende wetenschappelijke en, sinds kort, commerciële aandacht voor het idee dat vliegtuigstrepen de grootste bijdrage vormen aan het klimaateffect van vliegen. Onderzoek wijst uit dat slechts een klein deel van de vluchten belangrijk is voor een groot deel van de opwarming door middel van vliegtuigstrepen en dat dit vooral gebeurt in delen van de atmosfeer die oververzadigd zijn ten opzichte van ijs. Het lijkt mogelijk om met slimme aanpassingen in dat kleine aantal vluchten een groot deel van het klimaateffect aan te pakken. Daarvoor is het wel van belang dat het omleiden daadwerkelijk leidt tot het vermijden van een vliegtuigstreep die zich anders wel zou hebben gevormd, en dat de extra CO<sub>2</sub>-uitstoot die gepaard gaat met het omvliegen zeer klein gehouden wordt.