

EnergieTransitie
Radarweg 60
1043 NT Amsterdam

TNO-rapport

www.tno.nl

TNO 2021 M10659

T +31 88 866 50 10

Als vliegen de enige optie lijkt

Analyse van verschillende opties om een vlucht duurzamer te maken

Datum	8 april 2021
Auteur(s)	Omar Usmani Hein de Wilde Ayla Uslu
Aantal pagina's	7
Projectnummer	060.43159

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2021 TNO

Steeds meer mensen ervaren vliegschaamte (of 'flygskam' in het Zweeds, waar de term vandaan komt). Dit heeft tot nu toe echter nog niet geleid tot minder vliegen. **Vliegen blijft op dit moment de standaard optie voor (internationaal) reizen.**

In de afgelopen 20 jaar groeide het aantal passagiers wereldwijd met [ongeveer 5,5% per jaar](#). Tussen 2015 en 2019 bedroeg de groei [ongeveer 7%-8% \(4.2% in 2019\)](#). De International Air Transport Association (IATA) voorspelt een groei van [3,6% per jaar in de komende 20 jaar](#) (met een bandbreedte van 2,7% tot 5,6%). In termen van passagiers zou dit een groei zijn van ongeveer 3,8 miljard passagiers in 2016 tot 7,8 miljard in 2036 (bandbreedte: 6,7 en 11,4 miljard). Vliegen is gemakkelijk, goedkoop en wordt gezien als de standaardoptie voor internationaal reizen. Het boeken van een vliegticket naar bijvoorbeeld Madrid kan in een paar minuten worden geregeld. Een alternatief, zoals de trein, is voor zo'n internationale reis veel complexer, duurt langer en kost vaak (veel) meer geld. Uitzondering hierop zijn specifieke reizen, zoals met de Thalys naar Parijs. De prijzen van vliegtickets zijn drastisch gedaald van honderden euro's 25 jaar geleden tot [tientallen euro's](#) vandaag de dag. Hoewel mensen ervaren dat er geen andere realistische optie is om naar bijvoorbeeld Madrid te gaan, worstelen ze met het feit dat vliegen niet duurzaam is. Daarom wordt in dit artikel gekeken naar mogelijkheden om duurzamer te vliegen.

De CO₂-impact van de luchtvaartsector neemt toe en is lastig te verminderen

Wat is de impact van de luchtvaartsector op de wereldwijde uitstoot? Uitgedrukt in CO₂-emissies is de sector momenteel goed voor [ongeveer 2,5 % van de wereldwijde uitstoot](#). Dit is een klein, maar relevant percentage, zeker omdat de luchtvaartsector groeit. Het is daarom belangrijk om het vliegen duurzamer te maken. De luchtvaartsector heeft wel enige actie ondernomen, met name op het gebied van energie-efficiëntie zoals hieronder wordt besproken, maar loopt tot op de dag van vandaag om verschillende redenen achter op andere sectoren wat betreft de aanpak van de klimaatverandering:

1. Het is technisch moeilijk. Hernieuwbare brandstoffen worden nog niet op industriële schaal geproduceerd en zijn niet concurrerend in prijs met gewone kerosine. Bovendien zijn elektrische vliegtuigen geen realistisch alternatief (zoals verderop in dit artikel zal worden uitgelegd).
2. Er zijn geen verplichte CO₂-reductiedoelstellingen. Ook zijn afzonderlijke landen niet verantwoordelijk voor de CO₂-uitstoot van de luchtvaart (met uitzondering van binnenlandse vluchten en vluchten binnen de intra-EER, de Europese Economische Ruimte).

De betrouwbaarheid en het langetermijneffect van compensatieregelingen is onzeker

Bij het boeken van een ticket is het vaak mogelijk om het vakje 'compenseer de CO₂-uitstoot van uw vlucht' aan te vinken en een paar euro meer te betalen voor de reis. [Verschillende luchtvaartmaatschappijen](#) bieden [CO₂-compensatieregelingen](#) aan met allerlei kenmerken. De meeste regelingen hebben betrekking op het planten van bomen of het, in ontwikkelingslanden, vervangen van houtgestookte kooktoestellen door kooktoestellen die werken op zonne-energie. Er zijn echter ook initiatieven die geen enkel verband houden met het tegengaan van de klimaatverandering, zo ondersteunen sommige regelingen het [spotten van walvissen](#) als een manier om de vlucht te compenseren. De meeste van deze initiatieven vinden plaats in ontwikkelingslanden.

Compensatieregelingen hebben te maken met verschillende uitdagingen:

- a. Respons: hoewel er al meer dan tien jaar vrijwillige compensatieregelingen bestaan, hebben deze een extreem lage respons. Zo heeft slechts 0,26% ([88.000](#) van de [34,2 miljoen](#)) van de KLM-passagiers in 2018 gebruik gemaakt van het KLM-programma CO₂ Zero.
- b. Impact: Een van de redenen voor het uitblijven van respons zou kunnen zijn dat de compensatieregelingen te goedkoop lijken om effect te hebben, in ieder geval voor geïnformeerde consumenten. De kosten voor het compenseren van een retourvlucht tussen Amsterdam en Madrid zijn €2,12 bij KLM (gebaseerd op KLM.nl) en [€14 bij myclimate.org](#), wat veel lager is dan de [€46-€229](#) die nodig is voor het vervangen van de kerosine door duurzame brandstof. Als je naar dat verschil kijkt en op de hoogte bent van de [uitspraken van experts in de media](#), is het voor consumenten moeilijk te geloven dat tegen zo weinig kosten het effect van de uitstoot echt kan worden gecompenseerd.
- c. Vertrouwen en transparantie: Een belangrijk probleem rond compensatieregelingen is de kwestie van [additionaliteit](#). Dit betekent dat het project dat door een compensatieregeling wordt ondersteund, zonder de regeling ook had plaatsgevonden. Een voorbeeld van een project dat zeer waarschijnlijk niet additioneel is, is het leveren van efficiënte verlichting aan huishoudens, omdat het project op zichzelf economisch levensvatbaar is (het heeft een korte terugverdiensijd). Het is moeilijk om de financiële levensvatbaarheid van de betreffende projecten te onderzoeken: zou het project echt de financiële steun van de regeling nodig hebben om verwezenlijkt te worden? Het is ook moeilijk om de financiën van deze, vaak niet transparante, projecten te achterhalen. [De organisaties die de compensatieregelingen certificeren](#) moeten werken met veronderstellingen of met beperkte informatie over de financiën van de verschillende regelingen. Het is wellicht een beter idee om geld te steken in een fonds voor technologische ontwikkeling om de invoering van hernieuwbare brandstoffen te versnellen.¹
- d. Aanbod: er [is een zeer beperkt aanbod van compensatieregelingen die bewezen hebben aanvullend \(additioneel\) te zijn](#) en te voldoen aan de [regels](#) rond het opzetten van CO₂-compensatieregelingen.

De vermindering van de uitstoot van de luchtvaart vereist een wereldwijde aanpak, en staat nog in de kinderschoenen

Is het niet eenvoudiger om emissiereductie af te dwingen via regels en voorschriften? In tegenstelling tot de automotive sector is de luchtvaart op het gebied van emissieregeling aan weinig nationale en internationale wetten onderworpen. Europese vluchten vallen onder de regelgeving van het emissiehandelssysteem ([Emissions Trading System](#) - ETS), maar verschillende landen, waaronder de VS, China en India, nemen hier niet aan deel. [Bovendien krijgen luchtvaartbedrijven gratis CO₂-compensatiecredits voor ongeveer de helft van hun emissies](#). Een ander element dat de impact van het ETS in de luchtvaart vermindert, is dat het alleen van toepassing is op vluchten die beginnen en eindigen in de EER.

¹ Op basis van een gesprek met Professor Paul Peeters (Breda University of Applied Sciences), op 15 oktober 2019.

Een wereldwijde overeenkomst is dus vereist, maar het bereiken van internationale consensus is complex. Als eerste stap heeft de sector de 'Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation' (CORSIA)" geïntroduceerd; een koolstofcompensatie en -verminderingregeling voor de internationale luchtvaart. [De CORSIA-overeenkomst](#) heeft tot doel de CO₂-uitstoot van de luchtvaart op het niveau van 2020 te houden. Dit kan ofwel door efficiëntieverbeteringen, ofwel door het gebruik van hernieuwbare brandstoffen, ofwel door de aankoop van compensaties van andere sectoren. CORSIA is het resultaat van een compromis: niet alle landen tonen zich toegewijd om de uitstoot te verminderen. Pogingen om een strenge regelgeving tot stand te brengen zijn op actieve weerstand gestuit. Een voorbeeld is de toepassing van het ETS op vluchten (gedeeltelijk) buiten de EER. [Een aantal landen is naar het Europese Hof van Justitie \(EHJ\) gegaan om dit te blokkeren](#), onder andere op basis van [het Verdrag van Chicago](#). [Het EHJ heeft zich vóór het opnemen van externe vluchten uitgesproken](#), maar [de EU heeft haar regels toch beperkt tot vluchten binnen de EER](#) om de Internationale Burgerluchtvaartorganisatie (ICAO) voldoende tijd te geven om een wereldwijde, marktconforme maatregel te ontwikkelen en af te stemmen. Dit evenwicht tussen eigen optreden en internationale samenwerking is een belangrijk element van het [externe luchtvaartbeleid van de EU](#).

CORSIA is dan ook bijzonder in die zin dat het de eerste mondiale overeenkomst is die de groei van de uitstoot enigszins afremt. CORSIA gaat echter niet in op de kwestie van emissiereductie, aangezien het alleen gaat om het begrenzen van de groei van de emissies. Aanvullende maatregelen om de uitstoot te verminderen zijn daarom noodzakelijk.

Vliegen wordt efficiënter, maar dat is niet genoeg om de groeiende CO₂-uitstoot tegen te gaan

Het ontwerpen en ontwikkelen van een nieuw type vliegtuig en het operationeel maken ervan duurt ongeveer 20 jaar. De levenscyclus van een vliegtuig is 20-30 jaar. Dit betekent dat ondanks de verwachting dat nieuwe modellen uiterst efficiënt zullen zijn, het nog een half decennium zal duren voordat we er gebruik van kunnen maken. Naast vliegtuigen die bijvoorbeeld aerodynamischer zijn of minder brandstof verbruiken, kan de efficiëntie worden geoptimaliseerd door bijvoorbeeld de bedrijfsvoering te verbeteren:

- Efficiëntere opstijg- en landingsprocedures
- Optimalisatie van vliegtrajecten
- Elektrisch taxiën (het gebruik van elektrische motoren om de vliegtuigen van en naar de gates te brengen).

Het verhogen van de efficiëntie is een voortdurend aandachtspunt van luchtvaartmaatschappijen, aangezien het de brandstofkosten verlaagt. Het is echter niet voldoende om de groei van de vraag in het luchtvervoer te compenseren. De impact van efficiëntie kan ongeveer [2,0% CO₂-reductie](#) opleveren. Verhoging van de efficiëntie kan echter ook leiden tot reboundeffecten: hogere efficiëntie verlaagt de operationele kosten, wat kan leiden tot lagere ticketprijzen en vervolgens tot meer vliegen. Op deze manier kan de winst in CO₂-reductie afnemen, omdat de winst in brandstof of besparing (mede) zal leiden tot meer vluchten door lagere ticketprijzen. Gemiddeld is het rebound effect (d.w.z. de hoeveelheid extra vraag per efficiëntieverbetering) voor de Amerikaanse luchtvaartsector ongeveer [19%](#). Dit rebound-effect wordt begrensd door het feit dat de brandstofkosten slechts een deel van de operationele kosten van de luchtvaartmaatschappijen uitmaken ([23,7% in 2019](#)). In vergelijking met [het 100% rebound-effect](#) dat de afgelopen 300 jaar is bereikt met efficiënte verlichting, is dit rebound-effect klein. Dit kan echter nog steeds aanzienlijk zijn in het licht van de relatief

beperkte mogelijkheden die de luchtvaartsector heeft om zijn emissies te verminderen. Dit effect is waarschijnlijk groter in landen die zich in een vroege(re) ontwikkelingsfase van hun luchtvaartsector bevinden.

De ontwikkeling van elektrische vliegtuigen kent talloze uitdagingen

Het gewicht van de batterijen is een belemmering dat een elektrisch vliegtuig letterlijk aan de grond zou houden. Niet alleen hebben batterijen een veel lagere energiedichtheid dan kerosine (zelfs als we rekening houden met het hogere rendement van elektrische aandrijving), maar hun gewicht blijft ook constant tijdens de vlucht, in tegenstelling tot kerosine dat wordt weggebrand. Het is onduidelijk is of er ooit batterijen zullen worden ontwikkeld met een zodanig hoge energiedichtheid dat het een vliegtuig van energie kan voorzien. Een dergelijke energiedichtheid is bij de fabrikanten van batterijen ook geen prioriteit, omdat er een veel grotere markt van elektrische automobilititeit wacht. In die markt is kostenreductie de belangrijkste prioriteit. Zelfs als deze enorme toename van de energiedichtheid zou worden behaald, zou het alleen maar helpen bij kortereafstandsvluchten met een laag aantal passagiers. En voor dit type vluchten zouden juist hogesnelheidstreinen een aantrekkelijk alternatief kunnen worden. Dit wordt ook weerspiegeld in de mening van deskundigen, die verwachten dat het elektrisch vliegen nog lang niet zover is: [2080 voor kortereafstandsvluchten en 2100 voor langereafstandsvluchten](#).

Waterstof zou in principe een geschikt alternatief zijn voor kerosine. Hiervoor zouden echter fundamenteel andere vliegtuigen nodig zijn. De ontwikkeling hiervan kost tientallen jaren en bovendien vereist dit een voldoende toevoer van duurzaam geproduceerde waterstof. [Deskundigen concluderen](#) dat het onwaarschijnlijk is dat waterstofvliegtuigen een aanzienlijk marktaandeel zullen hebben op de tijdschaal die nodig is om de emissies te laten dalen (2050). Voor waterstof is de tijdshorizon 2050 voor kortereafstandsvluchten en 2080 voor langereafstandsvluchten.

Toekomstige vliegtuigen kunnen alternatieve brandstoffen gebruiken

Op de lange termijn zijn duurzame brandstoffen de enige realistische optie voor een duurzamere luchtvaartsector (in ieder geval voor 2050). Deze brandstoffen kunnen worden ontwikkeld als drop-ins (d.w.z. chemisch identieke brandstoffen die in bestaande vliegtuigen kunnen worden gebruikt).

Er zijn twee soorten [hernieuwbare brandstoffen](#):

1. **Biobrandstoffen**, die uit verschillende soorten biomassa kunnen worden gemaakt. [Teruggewonnen frituurolie is een belangrijke bron voor de biobrandstoffen](#) die momenteel op [de markt zijn](#). De productie van vele biobrandstoffen kan op dit moment echter vaak niet concurreren op technisch-economisch vlak in vergelijking met de huidige gebruikte grondstof, (gebruikte) bakolie. Er is een markt voor het aanbieden van de mogelijkheid aan passagiers om duurzame vliegtuigbrandstof te kopen voor hun vluchten. SkyNRG zet samen met KLM en SHV Energy een [duurzamevliegtuigbrandstoffabriek](#) op in [Delfzijl](#) voor 250 miljoen euro, die vanaf 2023 100.000 ton brandstof per jaar zal leveren. Driekwart hiervan is bestemd voor KLM².

[Neste Oil](#) kondigde dit najaar de opening aan van een kantoor bij Schiphol (Hoofddorp) en overweegt een biokerosinefabriek in Nederland op te zetten. Dat zal waarschijnlijk gebeuren bij de bestaande biodieselfabriek dat het bedrijf sinds

² Op basis van een gesprek met Maarten van Dijk, managing director SkyNRG, op 19 oktober 2019.

2011 in Rotterdam exploiteert. Neste produceert nu 100.000 ton biokerosine per jaar (op diverse locaties buiten Nederland) en heeft aangekondigd dat dit binnen 4 jaar [vertienvoudigd](#) zal worden. Ter referentie: wereldwijd wordt jaarlijks ongeveer 300 miljoen ton kerosine gebruikt. [Nederland gebruikt ongeveer 4 miljoen ton per jaar](#). Een belangrijk voordeel van biobrandstoffen is dat er al veel ervaring is met- en kennis over biobrandstoffen die worden gebruikt in het wegvervoer. Er is echter een lopende [discussie](#) gaande over de lange termijn beschikbaarheid van duurzame biomassa om aan de vraag van de luchtvaartsector (en andere sectoren die om dezelfde biomassa concurreren) te kunnen voldoen. Afvalbronnen zoals frituurolie zijn te klein om in een aanzienlijk deel van de totale vraag naar brandstof te voorzien. Technologieën om biokerosine te produceren uit grondstoffen die in aanmerking komen voor de productie van geavanceerde biobrandstoffen volgens de [EU-RED-II \(grondstoffen die niet worden gebruikt voor levensmiddelen of veevoer\)](#), zijn nog niet beschikbaar op commerciële schaal. Dit wordt wel verwacht in de komende 10-15 jaar.

2. [Synthetische brandstoffen](#) (zie ook [Factsheet Hernieuwbare brandstoffen](#)). Deze worden geproduceerd door hernieuwbare elektriciteit uit wind of zon te gebruiken om waterstof te maken en dit te combineren met CO₂ dat wordt afgevangen uit de atmosfeer of uit bepaalde industriële processen. Synthetische brandstoffen bevinden zich momenteel in het experimentele teststadium. De eerste zeer kleinschalige proefproductiefaciliteiten staan gepland voor [de komende jaren](#). Vanaf 2030 wordt een bescheiden marktintroductie verwacht. [Grootschalige toepassing](#) zou in 2040-2050 van start kunnen gaan. Synthetische brandstoffen vereisen zeer goedkope hernieuwbare elektriciteit en een verdere ontwikkeling van de technologie voor het afvangen van CO₂ uit lucht. Een duidelijk voordeel ten opzichte van biobrandstoffen is dat er geen problemen zijn met betrekking tot de duurzaamheid van de grondstoffen, behalve als ze koolstof afvangen uit niet-duurzame processen.

De huidige versies van hernieuwbare kerosine zijn gecertificeerd om te worden gemengd tot 50%, als ze voldoen aan de vereiste specificaties. Uit kleinschalige kortetermijn proeven met synthetische kerosine is gebleken dat een mengsel van 90% kan worden bereikt zonder problemen voor de motor. Aanvullende langetermijn testen moeten nog plaatsvinden, maar het is waarschijnlijk dat de conclusies van de eerste testen zullen standhouden. Overigens is een 100% mengsel nog niet mogelijk, omdat synthetische brandstoffen 'te schoon' zijn. Straalmotoren zijn ontworpen op basis van gewone kerosine, wat enige onzuiverheden bevat. Deze onzuiverheden hebben specifieke voordelen die niet in 100% schone brandstof zitten. Het vinden van alternatieven voor deze kwaliteiten in synthetische brandstoffen is echter geen onoverkomelijk probleem. In ieder geval is de vraag welk percentage hernieuwbare kerosine mag en kan worden gebruikt waarschijnlijk geen probleem voor de invoering van hernieuwbare kerosine. Zeker niet omdat de momenteel toegestane niveaus ver boven het huidige niveau liggen dat kan worden geproduceerd en geleverd. Het belangrijkste probleem met hernieuwbare kerosine is dan ook het bovengenoemde: de productie van voldoende hernieuwbare kerosine.³

³ Op basis van een gesprek met Joris Melkert, docent luchtvaarttechniek op de Technische Universiteit Delft, op 16 oktober 2019.

De invoering van alternatieve brandstoffen vergt tijd, gezien de grote technische, economische en beleidsuitdagingen

Een groeiende groep mensen wil graag duurzamer vliegen, maar niet tegen elke prijs. De prijzen van duurzame brandstoffen moeten aanzienlijk dalen om te kunnen concurreren met reguliere kerosine. De luchtvaartsector heeft zeer kleine winstmarges en de concurrentie is hevig. Een kleine verhoging van de ticketprijs kan ertoe leiden dat klanten zich wenden tot goedkopere vliegtuigen, indien er geen algemeen geldende doelstellingen of targets zijn. [De brandstofkosten zullen ongeveer 2 tot 6 keer zo hoog zijn als de huidige brandstofkosten](#), waarbij de factor 2 meer op de [lange termijn](#) is gericht. Een concreet voorbeeld wordt toegelicht in het rapport '[Het effect van duurzame brandstoffen op vliegtickets](#)': de brandstofkosten voor een retourvlucht tussen Amsterdam en Madrid bedragen ongeveer [€46 per passagier](#). De duurzame premie zou extra kosten van ongeveer €46-€229 betekenen. Hernieuwbare brandstoffen moeten worden opgeschaald, wat meer vraag en aanbod vereist. Beleid dat een bepaalde hoeveelheid duurzame brandstoffen vereist is noodzakelijk om de brandstoffen tot de nieuwe norm te maken.

Helaas lijkt er geen snelle of gemakkelijke oplossing te zijn om op een duurzame manier te blijven vliegen. Dit betekent niet dat er niets gebeurt om de luchtvaartsector duurzamer te maken: hernieuwbare brandstoffen worden ontwikkeld en vliegtuigen worden efficiënter. Maar om duurzame vluchten te kunnen aanbieden, moet de luchtvaartsector technische uitdagingen en complexe beleidsbelemmeringen overwinnen die geen oplossing op korte termijn bieden.

Met dit in het achterhoofd is het nodig dat mensen bij iedere vlucht een bewuste keuze maken, in plaats van vliegen als standaardkeuze.

Opmerking: Door de coronacrisis is het vliegverkeer sterk gedaald ([~2/3 op wereldniveau](#)). De IATA verwacht dat het vliegverkeer tot [2025](#) onder het niveau van 2019 zal blijven. Desalniettemin zijn er geen directe redenen om te denken dat trends en feiten in dit artikel (wiens focus is op de lange termijn) veranderd zijn door de coronacrisis. Indirecte effecten (zoals faillissementen van luchtvaartmaatschappijen of strenge politieke maatregelen) zouden heel speculatief zijn, en met onzekere effecten.