

Second opinion op factsheet en technische briefing: Toekomst verduurzaming luchtvaart

prof. dr. Henri Werij (TU Delft)

prof. dr. ir. Richard van de Sanden (TU Eindhoven)

prof. dr. ir. Harry Hoeijmakers (Universiteit Twente)

Inleiding

Op verzoek van het ministerie IenW heeft een commissie bestaande uit prof. dr. Henri Werij (TU Delft), prof. dr. ir. Richard van de Sanden (TU Eindhoven) en prof. dr. ir. Harry Hoeijmakers (Universiteit Twente) een *second opinion* opgesteld over de geactualiseerde factsheet van ir. Joris Melkert (TU Delft) en dr. ing. Paul Peeters (Hogeschool Breda) en de [technische briefing](#)¹ op basis hiervan aan de vaste commissie IenW van de Tweede Kamer, gegeven op 21 juni 2021.

Opgemerkt dient te worden dat de heren Melkert en Peters hun factsheet en presentatie hebben gepresenteerd op persoonlijke titel, waarbij hun onderbouwing uiteraard is gestoeld op hetgeen zij in hun werk aan respectievelijk de TU Delft en Hogeschool Breda hebben onderzocht. Probleem bij het geven van een *second opinion* door 4TU wetenschappers is dat het zwaartepunt van de kennis op luchtvaartgebied ligt bij de TU Delft. Ondanks het feit dat de heer Melkert aan de TU Delft werkt, is er daarom toch voor gekozen om een hoogleraar van de TU Delft mee te laten schrijven aan de *second opinion*, waarbij de onafhankelijke blik gegarandeerd wordt door de medeschrijvers van TU Eindhoven en Universiteit Twente, waarbij deze expert zijn op onderdelen die geadresseerd worden in de factsheet, te weten synthetische brandstoffen en aerodynamica.

De factsheet bevat zeven hoofdboodschappen, waarin Melkert en Peeters schetsen hoe de luchtvaartsector de komende decennia lijkt te gaan groeien, dat ontwikkelingen in de vliegtuigtechnologie alleen onvoldoende zijn om de emissies tijdig te reduceren, en dat daarom groeimatiging en een sterke inzet op synthetische kerosine (*Synthetic Aviation Fuel*) nodig zijn.

In het onderstaande document gaan wij in op de afzonderlijke hoofdboodschappen.

Reactie op hoofdboodschappen van de Factsheet

Hoofdboodschap 1: *Bij een ongewijzigd trendscenario zal de luchtvaart ergens tussen 2070 en 2100 alle emissies die volgens de doelstelling van het Parijse klimaatakkoord nog mogelijk zijn opsouperen. Daarna zijn dan negatieve emissies nodig.*

De wereldwijde luchtvaart vertoont qua aantal gevlogen passagierkilometers een groei van circa 5% per jaar. Rekening houdend met een gemiddelde uitstootreductie t.g.v. technologische verbeteringen van zo'n 1.5% per passagierkilometer per jaar resulteert dit in een verdubbeling van de uitstoot in 20 jaar tijd. Dit impliceert dat de CO₂ uitstoot gerelateerd aan de luchtvaart (momenteel circa 2.5% van de huidige wereldwijde CO₂

¹ https://www.tweedekamer.nl/debat_en_vergadering/commissievergaderingen/details?id=2021A02775

emissie t.g.v. menselijk handelen) in het jaar 2100 ruwweg 40% zal bedragen van de huidige totale CO₂ uitstoot in alle sectoren samen (industrie, energiesector, lucht-, water- en wegtransport, huishoudens, agrarische sector, etc.). Het Klimaatakkoord van Parijs stelt echter dat de wereldwijde uitstoot juist moet verminderen; voor Nederland als volgt vertaald in het Klimaatakkoord: in 2030 49% minder CO₂ uitstoot dan in 1990. Gezien deze doelstelling is het correct dat bij ongewijzigde trend de luchtvaart voor het eind van deze eeuw het volledige emissiebudget zal overschrijden. NB: 'negatieve emissies' zoals genoemd in Hoofdboodschap 1 zijn in de luchtvaart niet mogelijk. Dit zou gelezen moeten worden als 'het (extra) invangen en opslaan van CO₂; vanuit de atmosfeer'.

Hierbij moet worden opgemerkt dat niet alleen in de luchtvaart een radicale trendbreuk nodig is. Andere sectoren waar sprake is van groot energieverbruik en een exponentiele groei (ten gevolge welvaartstoename en bevolkingsgroei) staan op soortgelijke wijze voor een gigantische opgave. Ook hier zal bij ongewijzigde trend overschrijding van het volledige emissiebudget plaatsvinden. Dat is geen argument om niets aan de luchtvaart te doen (integendeel), maar de eis tot verduurzaming d.m.v. radicale veranderingen geldt voor alle hierboven genoemde sectoren. De eerste hoofdboodschap zou dus in het perspectief horen te staan van de soortgelijke situatie in overige sectoren. De wijze en snelheid waarop diverse sectoren de stap moeten maken naar totale verduurzaming is met name een politieke keuze, waarbij vanuit het totale energiesysteemperspectief rekening moet worden gehouden met efficiëntie en effectiviteit van de verschillende mogelijke oplossingen. Het gaat erom waar en hoe met de beschikbare middelen (budget, grondstoffen, duurzame elektriciteit, etc.) de (bijgestelde) doelstelling van het Akkoord van Parijs het best kan worden gehaald.

Hoofdboodschap 2. *Internationale maatregelen zijn vooralsnog onvoldoende ambitieus en effectief om luchtvaartemissies wereldwijd binnen de Parijs doelstelling te kunnen houden.*

Het probleem van luchtvaartemissies is een wereldwijd probleem, dat we ook alleen op wereldwijde schaal zullen kunnen oplossen. Inmiddels heeft de International Air Transport Association (IATA) in oktober 2021 tijdens de 77ste *Annual General Meeting* een resolutie voor de wereldwijde luchtvaartindustrie aangenomen, waarin wordt afgesproken een netto-nul CO₂ emissie te realiseren in het jaar 2050, in lijn met de doelen van het Akkoord van Parijs de opwarming van de aarde te beperken tot 1.5°C. Ook in Europees ([Destination 2050](https://www.destination2050.eu/)²) en nationaal ([Akkoord Duurzame Luchtvaart](https://duurzaam-vliegen.nl/wp-content/uploads/2021/03/Akkoord-Duurzame-Luchtvaart.pdf)³) verband zijn inmiddels vergelijkbare en uiterst ambitieuze afspraken gemaakt.

Naar onze mening is hoofdboodschap 2 hierdoor achterhaald. Wel dient te worden opgemerkt dat het een gezamenlijke private en publieke verantwoordelijkheid is de plannen en afspraken om te zetten in realiseerbare doelen voor 2050.

Hoofdboodschap 3. *Wat betreft geluid blijkt dat technologie de ontwikkeling van het aantal vliegbewegingen op Schiphol weet te compenseren, maar dat de ervaren hinder de afgelopen paar jaar toegenomen lijkt te zijn en dat bijvoorbeeld stiltegebieden onder mogelijk zware druk staan door vliegtuiggeluid. Wat betreft luchtkwaliteit blijkt uit zowel Nederlands als internationaal onderzoek vooral ultrafijnstof een potentieel groot probleem voor de volksgezondheid op te leveren.*

² <https://www.destination2050.eu/>

³ <https://duurzaam-vliegen.nl/wp-content/uploads/2021/03/Akkoord-Duurzame-Luchtvaart.pdf>

Het is inderdaad juist dat vliegtuigen steeds stiller zijn geworden en dat de netto geluidsproductie afneemt, maar dat de ervaren hinder, althans in Nederland, lijkt toe te nemen. Wat betreft de luchtkwaliteit en de concentratie van ultrafijnstof heeft een grote luchthaven zoals Schiphol een nadelige invloed, op met name luchtkwaliteit en concentratie van ultrafijnstof in de nabije omgeving. Hetzelfde geldt, zoals bekend, voor concentraties van andere vervuilende activiteiten (industrie, snelwegen). Er wordt momenteel onderzoek door het RIVM verricht naar de gevolgen van grondgebonden activiteiten en van de vliegbewegingen op en rond Schiphol voor luchtkwaliteit en ultrafijnstofemissie en de gevolgen voor de volksgezondheid.

Om de impact op de omgeving te verminderen heeft Schiphol de ambitie uitgesproken in 2030 qua grondgebonden activiteiten emissievrij te zijn, o.m. door gebruik te maken van warmte-koude opslag, elektrificatie van grondgebonden verkeer (incl. bussen en zgn. pushback voertuigen). Ook zullen alle vliegtuigopstelplaatsen worden voorzien van walstroom, waardoor vliegtuigen voor hun elektriciteitsvoorziening niet meer gebruik hoeven te maken van hun *on-board Auxiliary Power Units* (hulpgeneratoren) die vliegtuigbrandstof verbruiken.

Hoofdboodschap 4. *Alhoewel vliegtuigen continu beter worden, worden er geen technische verbeteringen voorzien die het klimaatprobleem bijtijds op kunnen lossen.*

De oplossing van het klimaatprobleem gerelateerd aan de luchtvaart vergt een holistische aanpak, waarbij onder meer optimalisatie van vliegroutes, vliegtuigontwerp en voorstuwingsysteem een zeer belangrijke rol spelen. Uiteraard dienen vliegtuigen een zo laag mogelijk energieverbruik te hebben, hetgeen een lage aerodynamische weerstand en een laag gewicht van de constructie vereist. Verder dient de voortstuwingsinstallatie licht en efficiënt te zijn, met zo weinig mogelijke emissies, waarbij het niet alleen gaat over de uitstoot van CO₂, maar ook die van NO_x, roet, vorming van condensstrepen en wolken (de zgn. niet-CO₂ effecten, die wellicht de impact op het klimaat door de luchtvaart met een factor 2 à 3 groter maken). Technologische ontwikkelingen op gebied van aerodynamica, lichtgewicht constructies en motoren zullen verder gaan, maar om de klimaatproblematiek gerelateerd aan de luchtvaart succesvol aan te pakken is het vervangen van fossiele brandstoffen door een CO₂-neutrale en liefst geheel emissievrije energiedrager onvermijdelijk. Ook dit zal, afhankelijk van de gemaakte keuze, een impact hebben op vliegtuig- en motorontwerp. Wat duurzame energiedragers betreft zijn er in grote lijnen de volgende mogelijkheden:

- Batterijen in combinatie met elektrische voorstuwing
- Waterstof in combinatie met brandstofcellen en elektrische voorstuwing
- Waterstof in combinatie met verbrandingsmotoren
- Synthetische brandstoffen (e-fuels en biobrandstoffen)

Hierbij zouden al deze opties gebaseerd moeten zijn op gebruik van duurzame elektriciteit, hetgeen vanzelfsprekend een zeer grote claim legt op de beschikbaarheid hiervan. Het benadrukt ook het grote belang van voortdurend verdergaande ontwikkeling van vliegtuigen en motoren; er moet immers zo efficiënt mogelijk worden omgegaan met schaarse duurzame energie.

Qua efficiency en uitstoot is het gebruik van batterijen op het eerste gezicht het meest aantrekkelijk. Duurzame elektriciteit kan immers worden opgeslagen en teruggewonnen met minimale verliezen, elektromotoren zijn extreem efficiënt, gedurende de vlucht is er geen enkele emissie en naarmate het aantal laadcycli toeneemt, neemt de milieu- en

klimaatimpact (met name ten gevolge van grondstofwinning en productie) per gevlogen kilometer - gemeten over de hele levenscyclus - af. De totale efficiëntie gerekend van elektrisch vermogen dat in de batterij wordt gestopt tot aan voortstuwingvermogen bedraagt circa 85%. Het grote probleem is echter i) de zeer beperkte energiedichtheid van huidige batterijen - leidend tot een ontoelaatbaar groot gewicht en derhalve een beperkt vliegbereik - en ii) het beperkt aantal beschikbare laadcycli.

Wereldwijd wordt met name door allerlei startups verkondigd dat vliegen op batterijen een grote vlucht zal nemen, waarbij mogelijk zelfs een vliegbereik van 1500 km haalbaar is. Tenzij er doorbraken op batterijgebied plaatsvinden, die experts onwaarschijnlijk of zelfs onmogelijk achten, lijkt het echter niet mogelijk hiermee een praktisch vliegbereik te verwezenlijken dat groter is dan een paar honderd kilometer. Vooralsnog zien we de ontwikkeling van vliegtuigen die uitsluitend op batterijen vliegen dan ook in het segment met weinig passagiers en korte afstanden. Gezien de kleine procentuele bijdrage van deze korte vluchten in de totale - aan luchtvaart gerelateerde - emissie kunnen we dit dan ook niet zien als een wezenlijke oplossing van de klimaatproblematiek. Dat batterijvliegtuigen een gunstige bijdrage kunnen hebben op het energieverbruik in het totale transportpallet voor regionale afstanden is echter ook een gegeven, waarbij aanwezige infrastructuur, geografische situatie en verwachte vervoersstromen een rol spelen in de afweging tussen diverse modaliteiten.

Momenteel wordt door diverse vliegtuigbouwers, inclusief Airbus ([ZEROe⁴](#)) en Embraer, en fabrikanten van vliegtuigmotoren grootschalig onderzoek verricht naar het gebruik van waterstof, zowel in combinatie met brandstofcellen als in combinatie met verbrandingsmotoren (turbofans of turboprops). Ook hier moeten nog zeer grote technologische stappen worden gezet, maar de doelstelling is dat er in 2035 een nieuwe generatie van vliegtuigen voor de middellange afstand beschikbaar komt die gebruik maakt van waterstof als energiedrager. In Europees verband wordt hier hard op gestuurd in de nieuwe *EU Joint Undertaking Clean Aviation⁵*, waarin vanuit Nederland ook koninklijke NLR en TU Delft een belangrijke rol spelen. Dit betekent dat vanaf 2035 de vliegtuigen voor middellange afstand geleidelijk vervangen worden door vliegtuigen op waterstof. Vliegtuigen op waterstof voor de lange afstand zullen nog later beschikbaar komen.

Indien we gebruik maken van waterstof dan bedraagt de totale efficiëntie, gerekend van elektrisch vermogen benodigd voor waterstofproductie, het vloeibaar maken ervan en het uiteindelijk weer omzetten in voortstuwingvermogen, circa 25%, zowel bij gebruik van brandstofcellen in combinatie met elektromotoren als bij gebruik van verbrandingsmotoren. In geval van brandstofcellen hebben we uitsluitend te maken met emissie van water. Bij gebruik van verbrandingsmotoren komt daar NO_x bij, hetgeen uit klimaatoogpunt minder gunstig is.

De laatste optie, het gebruik van synthetische brandstoffen, wordt besproken in het commentaar op hoofdboodschap 5.

Hoofdboodschap 5. *Luchtvaart kan mogelijk wel wereldwijd binnen de Parijse doelemissiepaden blijven op basis van een zwaar pakket aan maatregelen bestaande uit*

⁴ <https://www.airbus.com/en/innovation/zero-emission/hydrogen/zeroe>

⁵ <https://clean-aviation.eu/>

verminderde groei, alle beschikbare technologie, de planmatige invoering van synthetische e-fuels en integratie van luchtvaart in alle lange-afstandsmobiliteit.

Zoals hierboven betoogd, zal het gebruik van waterstof en – in geringe mate – batterijen, de luchtvaart niet snel genoeg doen verduurzamen. Dit betekent dat er ook over andere maatregelen gedacht moet worden, waarbij de introductie van synthetische brandstoffen een zeer belangrijke component is. Synthetische brandstoffen omvatten hier zowel de zogenaamde biobrandstoffen, gebaseerd op biologisch materiaal dat verwerkt wordt tot biokerosine, als zogenaamde e-fuels, waarbij synthetische kerosine wordt geproduceerd door met duurzame elektriciteit waterstof te produceren en CO₂ uit de lucht in te vangen. Het grote voordeel is dat deze aanpak relatief weinig aanpassingen vergt aan vliegtuigen en motoren. Je kunt dan ook nu reeds beginnen met bijmengen, zoals bijvoorbeeld KLM inmiddels standaard doet. Gezien de enorme hoeveelheid kerosine die wereldwijd wordt gebruikt (momenteel circa 300 Megaton per jaar), lijkt biobrandstof slechts een kleine fractie te kunnen leveren. Als je de totale hoeveelheid landoppervlak in ogenschouw neemt die nodig is voor de productie van de benodigde duurzame elektriciteit voor e-fuels en je vergelijkt dit met het landoppervlak en de hoeveelheid water benodigd voor biobrandstof, dan lijkt de e-fuel route verreweg efficiënter, ook al heb je voor productie ruwweg 4x meer elektrische energie nodig dan uiteindelijk opgeslagen wordt in de e-fuel. Dit laatste betekent dat je voor de productie van een hoeveelheid e-fuel die gelijk is aan het huidige jaarlijks gebruik van kerosine in Nederland (4 Mton), circa 22 GW aan duurzaam opgewekte elektriciteit nodig hebt. Het is evident dat we dat nooit in ons land kunnen opwekken. Dit geldt overigens voor alle sectoren en voor heel Europa. We zullen energie moeten opwekken buiten onze landsgrenzen, bijvoorbeeld in woestijngebieden en op zee met drijvende windfarms waar lokaal waterstof wordt geproduceerd. Hetzelfde geldt voor de bijbehorende CO₂-afvang uit de atmosfeer.

Hoofdboodschap 6. *Afgezet tegen de wereldbevolking vliegt de Nederlander significant meer dan de gemiddelde wereldburger.*

Dit is zonder meer waar, net als het feit dat de gemiddelde Nederlander, en wat dat betreft de gemiddelde Europeaan, in alle opzichten veel meer energie verbruikt dan de gemiddelde wereldburger.

Hoofdboodschap 7. *Er is geen eenvoudige manier om de luchtvaart duurzaam te maken; één 'silver bullet' ontbreekt.*

Dat neemt niet weg dat een consistente aanpak nodig is, waarbij voor het klimaatprobleem zowel de ontwikkeling van e-fuels als die van nul-emissies vliegtuigen nu voortvarend ter hand genomen moeten worden en waarbij tot 2050 het grootste effect met de e-fuels wordt bereikt, maar daarna in toenemende mate van die nieuwe vliegtuigen. Maatregelen kunnen zijn:

- *Significant meer onderzoek en ontwikkeling*
- *Het sneller vervangen van oude vliegtuigen door schonere en stillere vliegtuigen is vooral effectief voor geluid en luchtkwaliteit.*
- *Betere operationele procedures (inclusief herindeling luchtruim en invoering Single European Sky)*
- *Significante ontwikkeling van en investeringen in alternatieve "drop in" brandstoffen, met name e-fuels.*
- *Voor de korte tot middellange termijn is verdere toetreding - naast ETS voor EU luchtvaart - van luchtvaart tot gesloten emissiehandelssystemen effectief.*

- *Sterkere stimulansen om duurzamer te worden, zowel in de vorm van nieuwe wetgeving als belastingen en maatschappelijke druk*
- *Afhankelijk van het gehele maatregelenpakket, de groei van de wereldwijde luchtvaart sterk afremmen of tot stilstand brengen.*

Met deze hoofdboodschap zijn wij het grotendeels eens; er is geen "silver bullet". Gedragsverandering is een belangrijke component bij het verminderen van de klimaatimpact van de luchtvaart. In de westerse wereld zien we de voedingsbodem daarvoor toenemen. De grote groei van het luchttransport wordt echter verwacht in Azië (met name China, India) en vooralsnog willen de bewoners daar meer en meer de geneugten proeven die wij in de westerse wereld al zo lang genieten. Wat dat betreft is de ontwikkeling van nieuwe technologie cruciaal en dienen politieke/economische maatregelen de invoering ervan zo veel mogelijk te versnellen.

Conclusie

Op veel punten gaan wij, zoals hierboven betoogd, mee met de hoofdboodschappen zoals die door Melkert en Peeters zijn geponeerd. Wel zien wij dat er inmiddels op een aantal punten door overheden en luchtvaartorganisaties doelstellingen significant zijn aangescherpt en dat er door de industrie concrete stappen worden gezet. Feit blijft dat er nog ontzettend veel gedaan moet worden, zowel op het gebied van onderzoek als realisatie en certificering van nieuwe vliegtuigen, motoren en brandstoffen, terwijl de resterende tijd urgentie vereist. We willen er hier nogmaals op wijzen dat de manier waarop CO₂ budgetten en besparingsdoelstellingen verdeeld worden over de diverse sectoren een politieke keuze is, waarbij idealiter rekening gehouden wordt met het potentieel van (verschillende aspecten binnen) iedere sector om klimaatwinst te behalen.