



Parlement en Wetenschap

FACTSHEET TOEKOMST VERDUURZAMING LUCHTVAART (ACTUALISATIE 2024)

Deze factsheet is tot stand gekomen in het kader van de samenwerking tussen de Tweede Kamer, de KNAW, NFW, NWO, UNL en de Jonge Akademie.

Auteurs: dr. Ing. Paul Peeters (lector Academie voor Toerisme, Breda University of Applied Sciences), ir. Joris Melkert BBA (Universitair Hoofddocent, Faculteit Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek, TU Delft)

26 MAART 2024

Hoofdboodschappen

1. Het is niet mogelijk om een ongewijzigd groeiscenario voor de wereldwijde luchtvaart met een ongewijzigd (inter-)nationaal beleid te combineren met het behalen van de Parijse klimaatdoelen. Tenzij men grote hoeveelheden zeer onzekere en dure negatieve emissies veronderstelt.
2. Wat betreft geluidsdruk blijkt dat technologie de ontwikkeling van het aantal vliegbewegingen op Schiphol nog weet te compenseren, er is zelfs sprake van een kleine reductie, maar dat de ervaren hinder desondanks is toegenomen en dat stiltegebieden onder steeds zwaardere druk staan door vliegtuiggeluid. Wat betreft luchtkwaliteit blijkt uit zowel Nederlands als internationaal onderzoek vooral ultrafijnstof een potentieel probleem voor de volksgezondheid op te leveren maar met name concreet voor de platformmedewerkers op luchthavens.
3. Alhoewel vliegtuigen continu beter worden, worden er niet voldoende technische verbeteringen aan het vliegtuig zelf voorzien die het klimaatprobleem bijtijds op kunnen lossen. Naast het continu verbeteren van de vliegtuigen zijn meer maatregelen nodig vanuit een holistische benadering.
4. Luchtvaart kan mogelijk wel wereldwijd binnen de Parijse doelemissiepaden blijven op basis van een zwaar pakket aan maatregelen bestaande uit sterk verminderde groei, revolutionaire technologie, de invoering van synthetische *e-fuels* via een progressieve bijmengverplichting en integratie van luchtvaart in alle lange-afstandsmobiliteit.
5. Voor Nederland geldt dat de luchtvaart, en met name Schiphol, zo omvangrijk is geworden dat het steeds vaker conflicteert met wettelijke geluidsnormen, internationale klimaatafspraken, ruimteclaims voor woningbouw en recreatie en, via stikstof, de landbouw en op de arbeidsmarkt concurreert met andere essentiële sectoren als de bouw- en energiesectoren voor technisch geschoold personeel en ook in de zorg en het onderwijs voor overige personeel.
6. 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 (door)ontwikkeling van vliegtuigen alsook het grootschalig introduceren van *e-fuels* tot 2050 de meeste emissiebesparing op zal leveren. Nul emissies in 2050 kunnen zeer waarschijnlijk niet bereikt worden in combinatie met voorgaande trendmatige wereldwijde groei van de luchtvaart. Na 2050 zullen nul-emissie vliegtuigen belangrijker worden, mits de ontwikkeling daarvan nu voortvarend ter hand wordt genomen. Maatregelen kunnen zijn:
 - Significant meer onderzoek en ontwikkeling.
 - Het sneller vervangen van oude vliegtuigen door schonere en minder lawaaige vliegtuigen. Dit is vooral effectief voor geluid en luchtkwaliteit.
 - Betere operationele procedures (inclusief herindeling luchtruim en invoering *Single European Sky*)
 - Significante 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
 - De groei een functie maken van de effectiviteit van het gehele maatregelenpakket, de wettelijke normen en (inter-)nationale milieuafspraken.

1. Inleiding

In 2018 openden we Peeters en Melkert (2018) deze factsheet met de woorden "Wereldwijd is sprake van aanhoudende groei van de luchtvaart". Vanaf begin 2020 leek dat perspectief sterk gekanteld te zijn als gevolg van de Coronapandemie. In 2021 verwachtte McKinsey dat herstel van de luchtvaart wereldwijd naar het niveau van 2019 ergens rond 2024 zou gebeuren (Bouwer, Saxon, & Wittkamp, 2021). En dat lijkt uit de meest recente cijfers inderdaad uit te komen. Waar het op neer komt is dat de Coronacrisis een viertal jaren van groei tot nul heeft gereduceerd, waardoor de wereldwijde luchtvaart vanaf 2024 ongeveer 15-18% geringer is dan ze zonder de Coronacrisis zou zijn geweest. Voorts lijkt het erop dat dit stukje verloren groei niet ingehaald gaat worden, maar dat de pre-Corona groei ook niet meer gehaald zal worden (het 20-jarig vooruitzicht van Boeing liet in 2018 een groei van 4,7% per jaar zien (Boeing, 2018), terwijl dat in de prognose van 2023 was gedaald naar 3,8% (Boeing, 2023), wat bijna 20% minder vraag over twintig jaar oplevert). Redenen voor hernieuwde groei zijn de grote inzet van overheden om de sector door de crisis te leiden, het gegeven dat de wereldluchtvloot een enorm kapitaal vertegenwoordigt wat een grote druk op gebruik ervan zet en het gegeven dat de reislust van mensen niet verminderd lijkt te zijn. Ook lijkt de vakantiemarkt zich beter hersteld te hebben dan de zakelijke markt. Daarnaast wordt de komende jaren een sterke groei verwacht in Azië.

De Luchtvaartnota gaat uit van gematigde groei van het aantal vluchten van en naar Nederlandse luchthavens. Deze lieten in de jaren vóór 2020 een groei zien die vergelijkbaar was met de rest van de wereld. Groei veroorzaakt een steeds groter spanningsveld met duurzaamheid. Bij Schiphol bereikte de groei in 2019 de grens van de afgesproken capaciteit van 500.000 vliegbewegingen (starts plus landingen) per jaar. Op middellange termijn zou voortgaande groei van Schiphol grote infrastructurele investeringen en een forse aanpassing van de indeling van het Nederlandse luchtruim vergen. Dat is vooral van belang voor de handhaving van het huidige veiligheidsniveau. Inmiddels heeft de minister besloten om de voortdurende overschrijdingen van de geluidsnormen op een aantal handhavingpunten niet langer te gedogen, waarvoor een krimp naar 440.000 vluchten per jaar onvermijdelijk bleek te zijn (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2022). Een coalitie van Nederlandse en buitenlandse luchtvaartorganisaties begon daarop een rechtszaak tegen de Nederlandse staat die in eerste instantie werd gewonnen en in tweede instantie verloren, waarna de coalitie in cassatie is gegaan. Uitspraak in die zaak wordt medio 2024 verwacht. Intussen heeft het Ministerie een '*balanced approach*' met een iets afgezwakte krimpdoelstelling (452.500) bij de Europese Commissie ingediend (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2023b), een procedure die men dacht te vermijden door het oorspronkelijk plan uit 2022 als 'experiment' in te richten. Ter vergelijking: in 2023 was het aantal bewegingen op Schiphol 441.969.

Groei van de luchtvaart staat tegelijkertijd op gespannen voet met de opgave voor het tegengaan van klimaatverandering die in het klimaatakkoord van Parijs is afgesproken. Een recente studie laat zien dat een 'eerlijk aandeel' van de nog uit te stoten CO₂-emissies, leidt tot een maximale capaciteit van tussen de 211.000 en 480.000 afhankelijk van het aandeel van intercontinentale vluchten en de mate waarin luchtvaart een uitzonderingspositie krijgt voor haar bijdrage aan de emissievermindering (NLR, 2024, p. 16).

Wereldwijd waren er in 2019 in totaal 81 miljoen vliegtuigbewegingen in de commerciële luchtvaart en werden ongeveer 4,5 miljard passagiers vervoerd (IATA, 2020). In Nederland waren dat op alle vijf luchthavens van nationaal belang (Amsterdam, Eindhoven, Rotterdam-The Hague, Maastricht-Aachen en Groningen) volgens het CBS 552 duizend vliegtuigbewegingen voor handelsverkeer en 81,1 miljoen passagiers. Dat is 0,68% van het wereldtotaal in vliegtuigbewegingen en 1,80% van het aantal passagiers wereldwijd. Afgezet tegen de wereldbevolking trekken de Nederlandse luchthavens daarmee significant meer passagiers dan gemiddeld in de rest van de wereld.

1.1 Centrale vraagstelling

De Kamer heeft behoefte aan een tweede actualisering van de factsheets uit 2018 (Peeters & Melkert, 2018) en de eerste actualisering uit 2021 (Peeters & Melkert, 2021). Op verzoek van de Tweede kamer is in 2022 een 'second opinion' opgesteld (Werij, van de Sanden, & Hoeijmakers, 2022). De auteurs van de second opinion bevestigen de uitkomsten van de eerste update van het

factsheet in grote lijnen. Waar de auteurs van de second opinion suggesties doen voor aanvullende informatie en ontwikkelingen, hebben we die in deze update meegenomen. Het oorspronkelijke factsheet beoogde een actueel inzicht in de stand van zaken en een prognose van technologische ontwikkelingen en innovatie op het gebied van verduurzaming van de luchtvaart (klimaat, luchtkwaliteit en geluid) te bieden. Daarbij wilde de Kamer zowel inzicht hebben in (de verwachte) technische mogelijkheden voor duurzame vliegtuigen (bijvoorbeeld op gebied van motoren, brandstoffen en aerodynamica) en de bijbehorende milieu-impact, als in bedrijfseconomische aspecten en de verwachte tijdsduur waarin deze technische mogelijkheden breed kunnen zijn ingevoerd. Vanwege de veelal nog onvolledige definitie van de te verwachten toekomstige technologische ontwikkelingen en de grote spreiding in kosten en baten in de vakliteratuur, geven we alleen enkele deels kwalitatieve indicaties voor mogelijke kosten en doen geen bedrijfseconomische uitspraken. Deze laatste hangen ook in sterke mate af van flankerend beleid en de ontwikkelingen in de rest van de wereld. In de voorliggende tweede actualisatie hebben we de snelle ontwikkelingen op het gebied van inzichten in mogelijke oplossingen verwerkt.

1.2 Historisch perspectief

De ontwikkelingen in de luchtvaart sinds de invoering van de straalmotor medio jaren 50 zijn spectaculair. Zowel het brandstofverbruik als de geluidsproductie per passagierskilometer zijn substantieel gedaald. Figuur 3 in paragraaf 3.2 geeft de ontwikkeling van de benodigde energie (en dus brandstofverbruik) voor het vervoeren van één stoel over een afstand van één kilometer. Het brandstofverbruik is één op één gekoppeld aan de uitstoot van CO₂. De uitstoot van CO₂ van het vervoer van passagiers per vliegtuig is vergelijkbaar met dat van de gemiddelde auto uitgaande van de gemiddelde bezettingsgraad voor lange afstanden van tussen de twee en drie personen per auto. Het grote verschil tussen auto's en vliegtuigen is echter dat mensen met vliegtuigen, veel grotere afstanden afleggen. Dat komt vooral door de hoge snelheid van het vliegtuig. Daardoor zijn de emissies per reis voor de gemiddelde autovakantie 56 kg CO₂ veroorzaakt en de gemiddelde vliegvakantie 820 kg (Eijgelaar, Peeters, de Bruijn, & Dirven, 2016).

Het geluid van vliegtuigen is in de loop van de tijd significant gedaald. Sinds de introductie van de straalmotor produceren vliegtuigen ongeveer 25 dB minder lawaai. De gebruikte decibelschaal is een logaritmische schaal. Dat betekent dat elke vermindering van 3 dB een weer een halvering van de geluidsenergie betekent. Bedenk wel dat de gevoeligheid van het menselijk oor diezelfde logaritmische relatie volgt. Dat betekent dat een verschil van 3 dB net waarneembaar is, maar van 25 dB juist goed te horen is.

Ook nu nog is de geluidsproductie van elke nieuwe generatie vliegtuigen weer in de orde van 3 dB lager dan de vorige generatie. Bijvoorbeeld het nieuwe A320NEO-vliegtuig produceert 4 dB minder geluid dan het oudere A320CEO-vliegtuig. Dat zien we in de praktijk ook terug op Schiphol. Door voortdurende vlootvernieuwing neemt de netto geluidsproductie nog steeds iets af. Dit ondanks de groei van het aantal vliegbewegingen.

1.2.1 Fabrikanten

Het aantal vliegtuigfabrikanten is de afgelopen decennia drastisch gereduceerd. Voor grote passagiersvliegtuigen (>100 passagiers) zijn alleen Boeing en Airbus overgebleven. De orderportefeuilles van beiden zijn voor ongeveer de komende zes tot acht jaar gevuld, wat betekent dat wie nu een vliegtuig bestelt dat pas in 2030-2032 geleverd krijgt. Daarbij produceert Airbus inmiddels een 67% van de vliegtuigen voor de korte en middellange afstand, mede door problemen met de veiligheid van vliegtuigen van Boeing en de daaruit voortvloeiende hoge kosten voor deze fabriek (Flottau, 2024). Het portfolio van vliegtuigen dat wordt aangeboden is voor beiden vergelijkbaar.

De ontwikkeling van een nieuw verkeersvliegtuig vergt grote investeringen (>10 miljard euro) en een doorlooptijd van ongeveer 10 jaar vanaf het moment dat de beslissing tot ontwikkeling genomen wordt tot het moment dat de eerste vliegtuigen uitgeleverd worden. De doorlooptijd en kosten zijn hoog vanwege de complexe technologie en de vereiste veiligheidsniveaus. Immers alleen als volledig is aangetoond dat een nieuw type vliegtuig voldoende veilig is wordt door de luchtwaardigheidsautoriteiten een bewijs van luchtwaardigheid verstrekt.

Beide fabrikanten hebben de afgelopen jaren een aantal nieuwe modellen op de markt gebracht (Boeing 737MAX en 787 en Airbus A320NEO en A350) of zijn in de afrondende fase van een nieuwe ontwikkeling (Boeing 777X). Op dit moment zijn er geen plannen voor grote nieuwe ontwikkelingen, behalve een nieuw concept voor de korte en middellange afstand van Boeing: een vliegtuig gebaseerd op de *Transonic Truss-Braced Wing* (Dubois, Massy-Beresford, Norris, Warwick, & Batey, 2023). Het eerder aangekondigde middellangeafstandsvliegtuig is door Boeing in de ijskast gezet. De problemen die in 2018 en 2019 opdoken bij de Boeing 737MAX8 zullen ook nog jaren effecten hebben op de beschikbare investeringsbudgetten bij Boeing. Omdat dergelijke problemen bij Airbus niet spelen, zien we dit bedrijf wel stappen maken in nul- CO₂-emissie vliegtuigontwikkeling bijvoorbeeld hun ZEROe-programma (Airbus, 2023; Flottau, 2023).

Voor de wat kleinere vliegtuigen (orde van grootte 100 passagiers) zijn er ook maar twee grote fabrikanten over gebleven, Embraer en Bombardier. Inmiddels is de productie van de vliegtuigen in van Bombardier in dit segment overgenomen door Airbus (Airbus A220). Ook zij hebben een goed gevulde orderportefeuille en zijn er geen grote ontwikkelingen gaande. In China wordt gewerkt aan een tegenhanger van de Airbus A320 en de Boeing 737. Deze COMAC C919 heeft in 2017 zijn eerste vlucht uitgevoerd en is sinds September 2022 gecertificeerd voor gebruik in China. Ook dit type vliegtuig is bij lange na geen nul- CO₂-emissie vliegtuig. Daarnaast bestaat er een groeiende groep kleine vliegtuigbouwers die proberen om volledig nieuwe vliegtuigconcepten in de markt te zetten (zie verder 3.3).

1.2.2 Luchtvaartmaatschappijen

De catalogusprijs van de meest populaire vliegtuigen, Boeing 737 en Airbus A320, ligt in de orde van 100 miljoen euro per stuk. Daarbij gaan vliegtuigen ook geruime tijd mee. De technische levensduur ligt in de orde van 25 tot soms wel 45 jaar. De economische levensduur is gemiddeld genomen wat minder. De beslissing tot aankoop van nieuwe vliegtuigen is daarom een beslissing die zeer zorgvuldig wordt genomen. Het is derhalve uitgesloten om elke paar jaar de nieuwste vliegtuigen te kunnen kopen. Hierbij moet worden opgemerkt dat het gemiddelde vliegtuig in gebruik bij de zogenaamde low-cost carriers duidelijk jonger is dan bij andere luchtvaartmaatschappijen.

In de afgelopen decennia hebben we de opkomst van de low-cost carriers gezien. Dat heeft tot gevolg gehad dat de ticketprijzen sterk zijn gedaald, zeker in de perceptie van het publiek. Als gevolg daarvan is de financiële marge op de verkoop van een ticket erg klein geworden. Wereldwijd was de gemiddelde winst in 2023 op de verkoop van een ticket minder dan 10 dollar. Het gevolg hiervan is dat regelmatig luchtvaartmaatschappijen failliet gaan en de druk op de kosten erg hoog is. Dat uit zich onder andere door langdurige onderhandelingen over de Cao's.

Inmiddels zijn de ticketprijzen forser gestegen dan de inflatie van de afgelopen jaren. Zo was de prijsindex van tickets in de Verenigde Staten 135 tussen 2021 en mei 2023, met een piek van maar liefst 160 in voorjaar 2022 (Luman & Soroka, 2024). Luman and Soroka (2024) verwachten ook dat ticketprijzen verder omhoog zullen gaan door de kosten van het Europese emissiehandelssysteem en door duurzaamheidsbeleid. Dit leidt vooralsnog niet tot een significante afname in het aantal passagiers dat deze tickets koopt, maar mogelijk wel tot een vertraagde groei.

De consequentie van dit alles is dat de marge om snel in te spelen op technologische ontwikkelingen erg klein is. Zo zijn bijvoorbeeld alternatieve brandstoffen vaak veel duurder dan de standaard gebruikte kerosine. Het is voor één enkele luchtvaartmaatschappij daarom ook niet betaalbaar om een overstap te maken. Pas wanneer geleidelijk collectief wordt overgegaan op een dergelijke dure brandstof dan kunnen luchtvaartmaatschappijen zich goed aanpassen zoals de meeste dat ook doen na grote olieprijschokken. Collectief hoeft er dus geen economische belemmering te zijn maar lokale aanpassingen zijn economisch gezien problematisch voor luchtvaartmaatschappijen omdat zij met de rest van de wereld moeten concurreren.

1.2.3 Luchthavens

Luchthavens produceren zelf ook CO₂-emissies vanwege gebruik van elektriciteit, en voor verwarming van gebouwen en hangaars. Een toenemend aantal luchthavens is bezig de emissies naar nul te brengen. Twee van de 19 die Europe (2022) noemt liggen in Nederland: Schiphol en

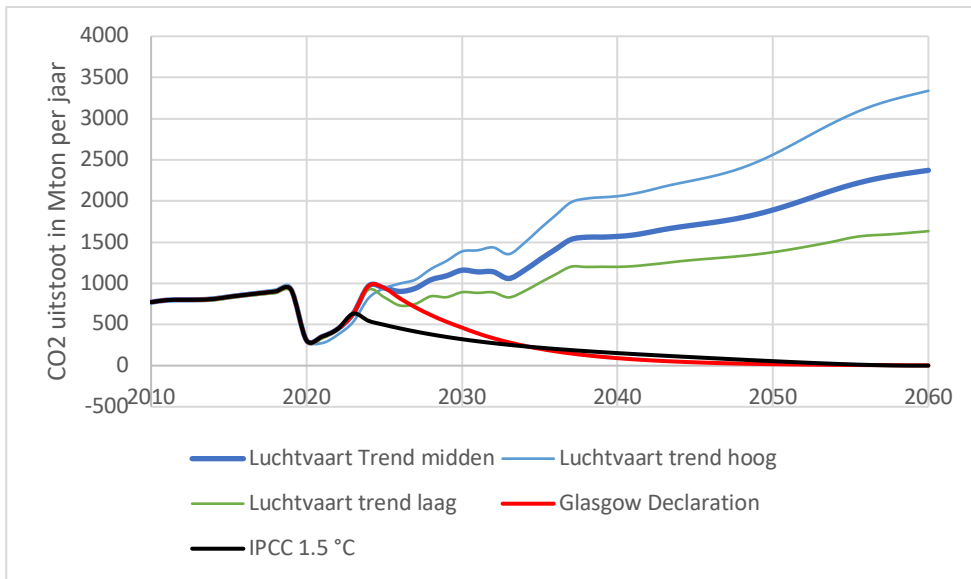
Eindhoven. Men moet zich echter realiseren dat luchthavens slechts minder dan 1% van alle luchtvaart emissies veroorzaken, dus dat een duurzame luchthaven absoluut geen duurzame luchtvaart hoeft te betekenen. Tegelijk spelen luchthavens een cruciale rol als het gaat om het accommoderen van nieuwe zuinigere vliegtuigontwerpen en bijvoorbeeld nieuwe duurzame brandstoffen of waterstof. Ook bepaalt de totale wereldwijde capaciteit van luchthavens het totaal aantal vluchten in de wereld en dient men zich te realiseren dat de bouw van luchthavencapaciteit in beginsel de verantwoordelijkheid is van nationale overheden. Zeker wanneer men bedenkt dat bijna 70% van de wereldwijde investeringen uit publiek geld komt en bijna 30% uit privaat-publieke investeringen bestaat (Tourism Panel on Climate Change, 2023), maakt duidelijk dat de ontwikkeling van de luchthavencapaciteit de verantwoordelijkheid is van nationale overheden. Dit biedt kansen om de groei van de luchtvaart te reguleren zodat nul-emissies in de toekomst mogelijk worden.

2. Duurzaamheidsproblemen luchtvaart

2.1 Klimaatverandering

Wereldwijd draagt luchtvaart 2,5% bij aan CO₂-emissies en gemiddeld 3,5% aan klimaatverandering (Lee et al., 2021). Meer dan in het heden, ligt de klimaatproblematiek van de luchtvaart in de toekomst zoals Figuur 1 duidelijk laat zien. Zowel in hoge als lage groeiscenario's voor wereldeconomie en -bevolking overschrijdt de luchtvaart de doelemissies uit bijvoorbeeld de Glasgow Declaratie (One Planet Network, 2021) waarin meer dan duizend toeristische bedrijven, waaronder de luchthaven van Dallas, afspreken de emissies tot 50% te reduceren in 2030 en tot nul in 2050. Peeters and Papp (2023) laten zien hoe de toeristische sector dergelijke doelen kan bereiken. Het verschil tussen trend-scenario's en deze scherpe doelstelling is groot. Tevens hebben we een evenredig doel voor luchtvaart berekend op basis van het IPCC 1.5°C rapport (IPCC, 2018). We zijn daarbij uitgegaan van de in het 1.5°C compatibele scenario zonder negatieve emissies (P1) gegeven procentuele emissiereducties ten opzichte van 2010 tot 2060 (daarna zijn de emissies nul).

Een probleem bij klimaatverandering is dat de emissies van broeikasgassen geen directe relatie hebben met de klimaatverandering zelf (de toename van de temperatuur). Die laatste is namelijk alleen gerelateerd aan de totale hoeveelheid CO₂ in de atmosfeer en die hoeveelheid neemt toe door het verbranden van fossiele brandstoffen als kerosine. Wanneer dus de emissies met 10% omlaag gaan, dan **vertraagt** dat het tempo van klimaatverandering met ongeveer 10%, maar de temperatuur **blijft toenemen**. De wereldwijde klimaatdoelen vergen dat in 2050 de broeikasgasemissies netto nul worden. Wat dus werkelijk telt is de totale hoeveelheid opgetelde emissies in de toekomst. Dit noemen we het carbon budget. Bij elke temperatuur hoort een carbon budget dat nog uitgestoten kan worden voordat die temperatuur wordt overschreden. Om met enige zekerheid (50%) onder de 1.5°C te blijven is er wereldwijd nog maar 500 Gton CO₂ over vanaf 2020 (IPCC, 2022). In 2020-2024 is daarvan alweer ruim 100 Gton opgemaakt. Volgens de scenario's in Figuur 1 zou luchtvaart wereldwijd 24% bij lage groei, 37% bij gemiddelde groei en zelfs 55% van die 500 Gton opsouperen bij hoge groei. In het Glasgow scenario kom je op 1.9% en in het 1.5°C IPCC scenario op 1.6%, beiden meer in lijn met de wereldwijde economische bijdrage van luchtvaart.



Figuur 1: Ontwikkeling van de lange-termijn wereldwijde CO₂-emissies van luchtvaart en de door de toerisme sector opgestelde reductie-doelstelling in de Glasgow Declaratie (One Planet Network, 2021) en berekend aan de hand van het P1 scenario van het IPCC 1.5°C rapport (IPCC, 2018). Bronnen luchtvaart trends: (Peeters & Papp, 2023; Peeters, 2017).

Daarom is het van belang om bij doelstellingen niet zozeer naar de emissies per jaar te kijken, maar vooral naar het budget. Voor Nederland zijn recent twee rapporten over verschenen (Grebe et al., 2024; NLR, 2024). De twee studies laten zien dat het aantal vluchten dat Schiphol binnen het carbon budget kan leveren afhangt van de politieke keuze voor een 'eerlijk aandeel' en een klimaatdoel (1,5° versus 1,7°C) en de strategische keuze voor het aandeel intercontinentale vluchten (nu ongeveer 25%). Waar CE (Grebe et al., 2024) ruimte vindt voor tussen de 330.000 en 520.000 vluchten vanaf Schiphol, komt het (NLR, 2024) op tussen de 211.000 en 480.000. Belangrijkste parameters zijn het aandeel intercontinentaal (hoe groter hoe minder vluchten mogelijk zijn), en de mate waarin de luchtvaart haar emissies even sterk vermindert als de gemiddelde andere sectoren.

Een onderwerp dat met veel onzekerheden en onvoldoende ontwikkelde methodes van berekenen kampt vormen de zogenaamde niet- CO₂-effecten van luchtvaart. Deze effecten bestaan voor het grootste deel (86%) uit het opwarmende effect van vliegtuigstrepen, contrails, plus de vorming van consistente cirrus-bewolking uit deze strepen. Daarnaast heeft een reeks andere emissies op grote hoogte invloed op de samenstelling van de atmosfeer en daarmee een opwarmend effect (Lee et al., 2021). In 2018 werd een derde van het totale klimaat effect veroorzaakt door alle opgetelde CO₂-emissies van de luchtvaart tussen 1945 en 2018 en twee derde door de huidige luchtvaart als gevolg van de zeer kortlevende niet- CO₂-effecten, oftewel een factor van ongeveer drie tussen het totale klimaateffect en dat van CO₂ alleen. Deze factor wordt dan vaak toegepast om de CO₂-emissies om te rekenen naar CO₂-equivalenten. Wetenschappelijk is dit eigenlijk niet juist zoals Lee et al. (2021, p. 13) opmerken omdat een simpele equivalentie factor voor langetermijnprognoses die factor aanzienlijk zal veranderen als toekomstige totale en luchtvaartemissies afwijken van hun huidige groeitraject. Een andere reden om de niet- CO₂-effecten te negeren, is dat CO₂ een intergenerationeel effect vormt waardoor een toekomstige generatie geen andere keuze heeft dan te leven met de nadelen van onze emissies. De meeste niet- CO₂ -effecten zijn daarentegen intra-generatieel en kunnen dus binnen één generatie worden opgelost zodat voor- en nadelen van de luchtvaart bij dezelfde generatie terecht komen. Dit is ook het belangrijkste argument van Lee et al. (2023), die concludeert dat de focus vooral op CO₂ moet liggen.

Er is ook een lijn van onderzoek, die juist probeert de niet-CO₂ effecten tot op individueel vluchtniveau te bepalen. Grebe and Raphaël (2023) ontwikkelden voor Nederland het *Aviation Non-CO₂ estimator* (ANCO) model. Uit dit model blijkt dat bijvoorbeeld de ophoogfactor voor niet-CO₂ effecten voor vluchten vanaf Amsterdam naar Spitsbergen op 12.8, naar Vancouver op 8.6 en naar Bali op 2.6. De directe CO₂ uitstoot naar Spitsbergen 327 kg, naar Vancouver 626 kg en

naar Bali 919 kg, dus als het om het CO₂ gaat kun je het best naar Spitsbergen en liever niet naar Bali. Maar wanneer je die ophoogfactoren toepast lijkt het of naar Bali vliegen minder dan de helft van de klimaateffecten oplevert als naar Spitsbergen vliegen. Het bekijken van die verschillende factoren per markt kan op beleidsniveau nog enige zin hebben, maar het lijkt ons buitengewoon verwarrend voor de consument en gegeven de conclusie uit diverse onderzoeken dat juist de afstanden omlaag moeten om de CO₂-emissies uiteindelijk op nul te kunnen krijgen.

Een laatste lijn van onderzoek beschouwt het effect van iets gewijzigde vliegpaden op de niet-CO₂ gevolgen (Dahlmann, Grewe, Matthes, & Yamashita, 2023; Geraedts et al., 2023; Molloy et al., 2022; Simorgh et al., 2022). Los van of dit technisch goed te organiseren is en of contrail-informatie voldoende accuraat is om vliegpaden onderweg te kunnen optimaliseren, blijkt dat dergelijke strategieën tot enkele procenten extra CO₂ kunnen opleveren omdat wordt afgeweken van het optimale vliegpad.

2.2 Geluidhinder

In 2015 ondervonden 4,1 miljoen inwoners van de EU een geluidsbelasting van meer dan 55 dB L_{den} (dag, avond en nacht gewogen) als gevolg van de luchtvaart (EEA, 2018). Daarnaast ondervonden (in 2017) een miljoen mensen ernstige hinder en werden 223.000 mensen ernstig in hun slaap verstoord (EASA, EEA, & EUROCONTROL, 2023). Voor inwoners rondom de 45 grootste luchthavens in de EU schommelt dit aantal tussen de 2,5 en 2,6 miljoen tussen 2005 en 2015. Bij een geringe technologische ontwikkeling en hoge groei loopt dat in 2035 op tot 3,4 miljoen, maar bij sterke technologische ontwikkeling en hoge groei neemt het af naar 2,3 miljoen en bij lage groei en sterke technologische ontwikkeling naar 1,6 miljoen (EEA, 2018).

In Nederland werden in 2016 zo'n 48.500 mensen door meer dan 55 dB L_{den} belast als gevolg van de luchthaven Schiphol (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2017). Op basis van nog lopend onderzoek bij de TU Delft (Simons, Besnea, Mohammadloo, Melkert, & Snellen, 2022) blijkt dat in Nederland de geluidsemisatie rond Schiphol het afgelopen decennium inderdaad is gedaald, terwijl het aantal vliegbewegingen is toegenomen. Dat is in lijn met de Europese bevindingen. Echter, de relatie tussen geluidsdruk en geluidhinder is verre van eenduidig. Zo blijkt uit onderzoek door GGD GHOR (2022) dat in heel Nederland in 2016 420.000 mensen aangaven ernstige geluidhinder te ondervinden, een aantal dat in 2020 tot bijna 521.000 was toegenomen. Ook bleken 225.000 mensen aan te geven in hun slaap verstoord te zijn. De aantallen mensen die hinder ervaren liggen dus aanzienlijk hoger dan de aantallen mensen dat volgens de geluidscontour zouden moeten ervaren. Kortom, de geluidsdruk gemeten in dB heeft niet zo'n eenduidig verband met de ervaren hinder. Zo vinden Breugelmans, Houthuijs, and van Poll (2016) dat het percentage van de bevolking dat ernstige hinder ervaart bij 55 dB L_{den} voor de diverse luchthavens in Nederland varieert van 25% (Schiphol ondergrens) tot 75% (Eindhoven in 2014). Ook blijkt daaruit dat ver onder de wettelijke limieten ook ernstige hinder wordt gerapporteerd: 2-10% bij 40 dB L_{den}, de limiet voor stiltegebieden. Uit een internationale studie bleek verder dat in de meeste landen de geluidsnormen voor luchtvaart fors hoger liggen dan de waarden waarboven de Wereldgezondheidsorganisatie (WHO) negatieve effecten op de gezondheid verwacht (Kemper, Peeters, Hooghwerff, & Ummels, 2022). Dobruszkes and Efthymiou (2020) onderzochten de situatie rondom de luchthaven van Brussel en vonden dat ook een groot verschil tussen de geluidscontouren en de herkomst van klachten en hinder. Voorts zagen ze een grote afhankelijkheid van de contouren van allerlei aannames over de definitie van de indicatoren, de grenswaarden waaronder nul hinder wordt verondersteld en men raadt aan nog eens goed te kijken naar de indicatoren.

Voor geluidhinder geeft onderzoek aan dat vooral nachtvluchten bepalen hoeveel hinder wordt ervaren (Bartels, Rooney, & Müller, 2018). Een strakker nachtregime wordt op sommige luchthavens met succes toegepast (b.v. de huidige 50/50-regel voor groei op Schiphol). In navolging van geluid zou ook een 50/50 regel voor CO₂-emissies ingesteld kunnen worden. Bij de berekening van de geluidhinder wordt vaak gebruik gemaakt van de zogenaamde L_{den} eenheid zogenaamde L_{den} eenheid. Hierbij staat het subscript 'den' voor day-evening-night. Deze geeft een naar tijd van de dag en sterkte van elk geluidsterkte per vlucht gewogen optelling van het geluid alle vluchten. Daarbij worden nachtvluchten tien keer zwaarder meegeteld omdat bekend is dat deze meer hinder veroorzaken (Breugelmans, Houthuijs, van Poll, Hajema, & Hogenhuis, 2017). En daarom is het aantal nachtvluchten van extra groot belang voor de totale geluidsbelasting. Tegelijk blijkt dat de gerapporteerde hinder in de nacht juist minder is vergeleken met het over dag en nacht gewogen gemiddelde in L_{den} (van Poll et al., 2023). Dat

kan echter mogelijk worden veroorzaakt doordat mensen de hinder niet opmerken omdat men dan slaapt. Behalve 'hinder' veroorzaakt geluid ook verminderde leerprestaties van kinderen en gezondheidsklachten als hartklachten (Basner et al., 2017).

Ten slotte is een weinig belicht aspect van vliegtuiggeluid de invloed op recreatie-, natuur en stiltegebieden. Uit een recente studie in opdracht van de provincie Noord-Holland (Natuur en Milieufederatie Noord-Holland, 2017), blijkt dat van de 41 stiltegebieden die de provincie rijk is, er 26 niet langer aan de voorwaarden voor het predicaat stiltegebied voldoen als gevolg van vliegverkeer. Daarvan zijn er zeven die ook door industrielawaai en/of wegverkeerslawaai die status zouden kunnen verliezen, maar dus 19 exclusief door vliegtuiggeluid. Ook is er weinig aandacht voor de gemeten relatie tussen de kwaliteit van recreatiegebieden en luchtvaartgeluid zoals bijvoorbeeld beschreven in (Rapoza, Sudderth, & Lewis, 2015). Uit een studie naar de geluidsgevolgen van Maastricht-Aachen Airport op recreatie- en toerisme in het Heuvelland (Peeters, Eijgelaar, Neelis, & Adrichem, 2020) bleek dat het uitbreiden van het aantal vluchten van de huidige circa 6.000 naar de vergunde 19.000 kan leiden tot jaarlijks tussen €23 en €70 miljoen directe schade aan de toerisme economie van het Heuvelland. Ook zullen de grote natuur- en stiltegebieden niet langer binnen de voor dergelijke gebieden geldende geluidsnormen blijven en de facto verloren gaan. Voor bezoekers van recreatie- en natuur- en stiltegebieden blijkt de gevoeligheid bij lage geluidsdruk veel hoger dan voor bewoners, maar bij hoge geluidsdruk juist lager. Dat laatste is hoogstwaarschijnlijk het gevolg van het feit dat bezoekers die geluid als hinderlijk ervaren (Peeters et al., 2020), lawaaiige gebieden mijden, terwijl voor bewoners die mogelijkheid niet zo makkelijk is. Een van de mogelijke verklaringen hiervoor is dat de ervaren hinder onder andere gekoppeld is aan het piekniveau van het geluid. Door het toepassen van normen uitgedrukt in L_{den} wordt over een langere tijd het geluidsniveau gemiddeld en lijkt daarom lager te zijn.

2.3 Luchtkwaliteit

Emissies van vliegtuigen naar de lucht, met name die van stikstofoxiden en deeltjes, hebben een significante invloed op de gezondheid van de Europese bevolking: ongeveer 3700 mensen overleden hierdoor gemiddeld 11 jaar eerder; de externe kosten daarvan beliepen ongeveer 8 miljard Euro (EEA, 2018). Dit is berekend zonder naar de onverwacht hoge emissies van ultrafijnstof door vliegtuigmotoren te kijken (Alonso et al., 2018). Alonso et al. (2018) merken tegelijk op dat de maatregelen om NOx emissies tegen te gaan ook deze ultrafijnstof emissies lijken te reduceren. Dat Schiphol een invloed heeft op de fijnstofconcentraties in de wijde omgeving bleek uit een studie van Keuken et al. (2014), die aantoonde dat deze concentratie – gemeten in het Amsterdamse bos - ongeveer drie keer zo hoog waren op dagen met wind vanuit Schiphol vergeleken met andere dagen. Het is nog niet bekend in welke mate vliegtuigen aan deze verhoogde concentratie bijdragen. Uit internationaal onderzoek blijkt echter al duidelijk dat de concentraties van ultrafijnstof met een factor 3-5 hoger kunnen liggen onder de aanvliegroutes van vliegtuigen vergeleken met gebieden die niet onder zo'n aanvliegroute liggen maar een vergelijkbare verkeerssituatie op de grond kennen (Riley et al., 2016). Uit onderzoek van Snijders and Melkert (2011) komen indicaties dat het gebruik van synthetische kerosine (*e-fuel*) de concentratie (ultra)fijnstof aanzienlijk kan reduceren. Dit is een effect dat vergelijkbaar is met de zwavelarme diesel in vrachtwagens.

Uit de meest recente studie van het RIVM over de bijdrage van luchtvaart in een gebied rondom Schiphol aan de luchtkwaliteit (Visser & Hofman, 2022) blijkt bijvoorbeeld dat circa 10% van de stikstof-concentratie in de lucht¹ door de luchtvaart wordt veroorzaakt. Het Ministerie van Infrastructuur en Milieu (2023a) heeft recent ook laten onderzoeken of de luchtvaart bijdraagt aan zeer zorgwekkende stoffen in de atmosfeer. Dit blijkt beperkt het geval te zijn en vormt tussen de 1 en 5% van de concentratie in de lucht. Echter, op bijvoorbeeld platforms kan dit oplopen tot een derde (NLR, 2023).

Onze conclusie is dat vliegtuigen potentieel een beperkte invloed op de emissies van fijnstof en de luchtkwaliteit en gezondheid van mensen kunnen hebben.

¹ Let op dat deze stikstofconcentratie in de lucht iets anders is dan de stikstofdepositie in de natuur, waar vooral landbouw voor verantwoordelijk is.

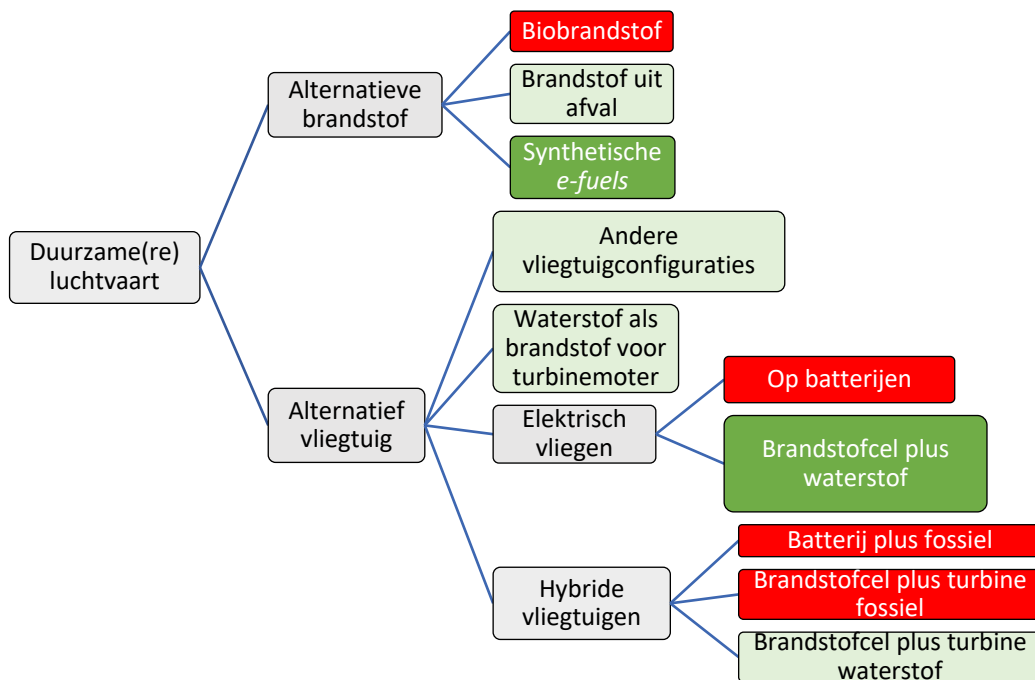
3. Verduurzaming van luchtvaart: oplossingen

3.1 Inleiding en begripsontwarring

In de publieke discussie over verduurzaming van de luchtvaart zien we een grote begripsverwarring. Men heeft het bijvoorbeeld over 'elektrisch vliegen' of 'alternatieve brandstoffen', maar beide begrippen zijn betekenisloos zonder naar de details te kijken van hoe men de elektriciteit aan boord wil krijgen of over welk type alternatieve brandstof men het over heeft. Daardoor kunnen de uitspraken 'we gaan in de toekomst elektrisch vliegen' en 'duurzame brandstoffen lossen het klimaatprobleem op' beiden zowel waar als onwaar zijn. Om de begrippen zinvol te maken moeten we meer details toevoegen. Het schema in Figuur 3 geeft dit aan.

Duidelijk mag zijn dat met de term 'alternatieve brandstoffen' zeer verschillende technologieën bedoeld worden, die bovendien, zoals we hieronder zullen laten zien, zeer verschillende mogelijkheden en uitdagingen hebben. Hetzelfde geldt voor 'elektrisch vliegen'. Het is daarom van belang om steeds onderscheid te maken in wat precies bedoeld wordt.

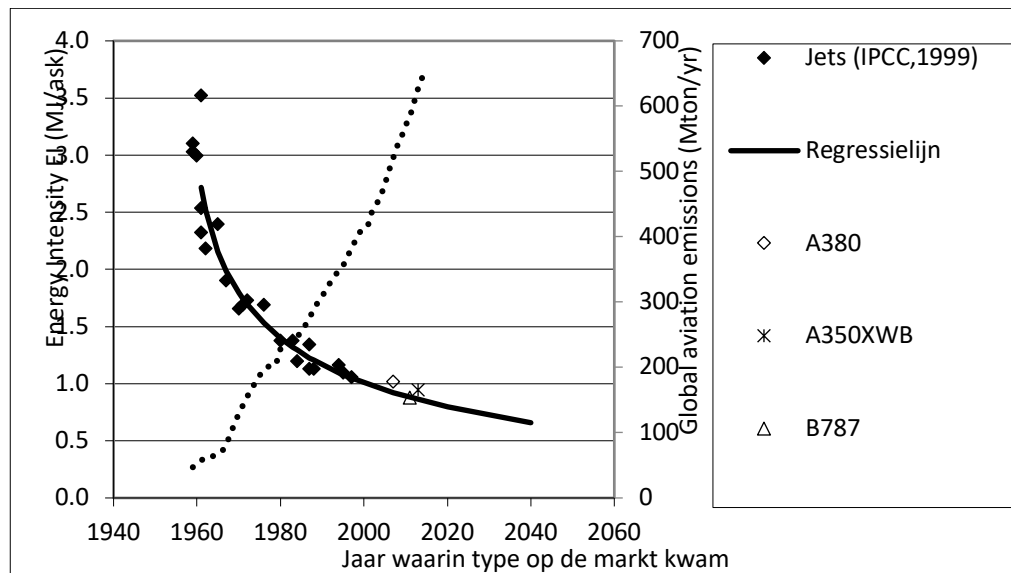
Hier komt bij dat bijvoorbeeld een vliegtuig dat gebruik gaat maken van waterstof als brandstof ook een forse aanpassing van het ontwerp nodig heeft omdat waterstof veel meer ruimte in zal nemen dan kerosine. Zelfs als de waterstof vloeibaar gemaakt wordt, neemt deze bij een gelijke hoeveelheid energie, nog steeds vier keer meer ruimte in dan kerosine. De waterstof kan daarom lastig in de vleugels geplaatst worden en vraagt om speciale tanks in de romp.



Figuur 1 Mogelijke ontwikkelingen richting een duurzame luchtvaart. Betekenis kleuren: Donkergroen levert nul-emissies; lichtgroen levert milieuverbetering, en rood beperkte milieuwinst en/of grote technische obstakels.

In de bovenstaande opties speelt groene waterstof een sleutelrol. Bij de meeste productieprocessen van biobrandstoffen en brandstoffen op basis van afval is groene waterstof een onmisbare grondstof. Ook bij de productie van de synthetische e-fuels is veel waterstof nodig. Uiteraard moet groene waterstof beschikbaar komen op luchthavens wanneer we met brandstofcelvliegtuigen of waterstofvliegtuigen gaan vliegen.

3.2 Evolutionaire techniek



Figuur 2: Ontwikkeling van de brandstofefficiëntie van vliegtuigtypes in het verleden en met een projectie voor de toekomst (Peeters & Middel, 2007). De totale emissies zijn gebaseerd op Peeters (2017)

Elke generatie vliegtuigen is gemiddeld genomen 15-20% zuiniger dan de voorgaande generatie. Ook nu nog worden vliegtuigen op het niveau van de wereldwijde vloot gemiddeld 1-1,5% per jaar beter in de zin van brandstofverbruik en dus emissies per afgelegde stoel-km. Maar dit is niet genoeg, zoals *Figuur 2* duidelijk illustreert. Dat komt door de snelle groei van de luchtvaart met 3,5-4,5% per jaar, waarbij de efficiëntiewinst zwaar achterblijft bij de wereldwijde groei van de luchtvaart. Lange-termijn scenario's laten zien dat deze groei zou kunnen afnemen, maar halverwege deze eeuw is sprake van bijna een verdrievoudiging ten opzichte van 2015 en aan het eind een vertienvoudiging (Bows-Larkin, Mander, Traut, Anderson, & Wood, 2016; Peeters, 2017). Het is niet realistisch te verwachten dat conventionele technologische ontwikkelingen de efficiency met meer dan 2% per jaar verbeteren, dus die zijn onvoldoende om groeiende voortgaande groei van CO₂-emissies te voorkomen. Aanvullende maatregelen zijn daarom noodzakelijk. Batteiger et al. (2022) geven een goede analyse van alle mogelijkheden. We zullen een aantal verder uitwerken in de volgende paragrafen.

3.3 Revolutionaire techniek

3.3.1 Andere configuratie van vliegtuigen

Sinds de introductie van het verkeersvliegtuig wordt er gevlogen met een configuratie die nagenoeg ongewijzigd is. Deze configuratie bestaat uit een cilindervormige romp met passagiers, vracht en bemanningen en twee vleugels die de benodigde draagkracht leveren en de brandstoftanks bevatten. Aan de romp of aan de vleugels worden twee of meer motoren geplaatst. Tenslotte zorgt de combinatie van het horizontaal en verticaal staartvlak voor de benodigde stabiliteit en besturing van het vliegtuig.

Deze zogenaamde "tube and wings" configuratie is in de loop der jaren sterk geoptimaliseerd en levert een veilig en economisch vliegtuig. Er wordt echter ook al vele jaren nagedacht over andere configuraties. Een veel bestudeerd alternatief is de zogenaamde "blended wing body" configuratie. Daarbij vloeien de romp en de vleugels in elkaar over. Deze configuratie lijkt sterk op een vliegende vleugel. Voordeel van een dergelijke configuratie zijn vooral een lagere luchtweerstand, een hogere brandstofefficiëntie en een lichtere constructie. Er zijn echter ook

nog heel veel technische uitdagingen die moeten worden overwonnen die ervoor zorgen dat deze configuratie geen oplossing biedt voor de korte termijn. Ook de Flying-V zoals deze bij de TU Delft in ontwikkeling is biedt vergelijkbare voordelen. Ook de mogelijke invoering van vliegtuigen met deze configuratie zal nog geruime tijd op zich laten wachten. In de huidige luchtvaart kost het een decennium om een vliegtuig te ontwikkelen en daarna nog eens een tot twee decennia om de gehele vloot te vervangen omdat vliegtuigen lang meegaan en te duur zijn om snel af te schrijven. Ook het hoge veiligheidsniveau vraagt een zorgvuldige en tijdrovende analyse van dergelijke nieuwe configuraties. Ook is het aan de grote vliegtuigfabrikanten om te besluiten dergelijke vliegtuigen deze wel of niet te gaan bouwen. De Nederlandse kennisinstellingen kunnen significant bijdragen aan de initiële ontwikkelingen.

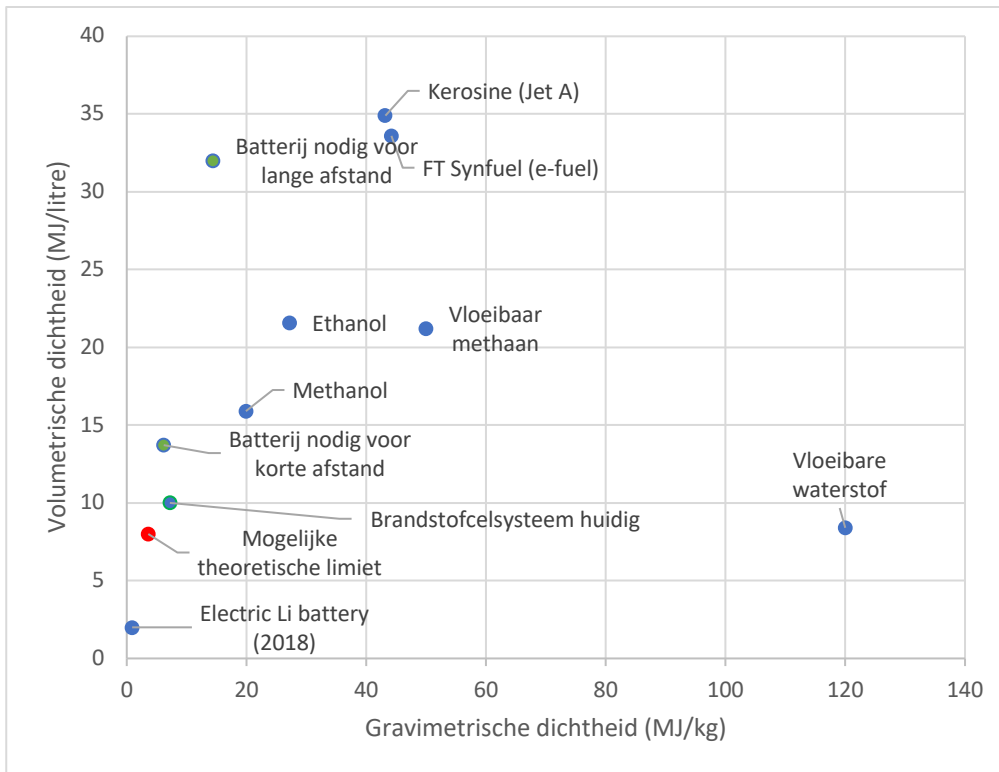
3.3.2 Elektrisch vliegen op batterijen

Op dit moment is een tweepersoons elektrisch vliegtuig van de firma Pipistrel, de Velis Electro, het enige gecertificeerde batterij-vliegtuig. Dit vliegtuig heeft een effectief vliegbereik van slechts 68 km (Pipistrel, 2024) bij de meest zuinige manier van vliegen. Het kritieke punt bij elektrisch vliegen is de batterijen. Voor de luchtvaart spelen niet alleen de veiligheid en de kosten een rol maar ook de energiedichtheid van de batterij (Eaton, Naraghi, & Boyd, 2023). De energiedichtheid zegt hoeveel energie er kan worden opgeslagen in een kilo batterij. Op dit moment kan er ongeveer 40-50 keer minder energie in een kilo batterij worden opgeslagen dan in een kilo kerosine (zie Figuur 4). De verwachting is dat batterijen nog flink zullen verbeteren maar dat daar mogelijk een limiet op zit na een factor drie (Figuur 6 in Epstein & O'Flarity, 2019). Wel is het zo dat de elektrische motor twee tot drie keer zo efficiënt is vergeleken met een turbomotor en daardoor is ongeveer een derde van de energie in de batterij nodig vergeleken met de hoeveelheid die je in kerosine nodig hebt. Daar komt helaas weer bij dat het gewichtsvoordeel (en dus ook een voordeel in benodigde energie) dat een vliegtuig ervaart gedurende de vlucht door de verbranding van kerosine, niet geldt voor vliegtuigen met batterijen. De batterijen moeten de hele vlucht meegetorst worden. Het kost een significante hoeveelheid energie om deze massa accu's te vervoeren.

Om een korte-afstandsvliegtuig te maken, uitgaande van een halvering van de normale maximale range van zo'n 2000 km, is een batterij nodig die 7 keer meer energie per kg bevat dan de huidige batterijen; voor lange afstanden is dat zo'n 15 keer. Deze benodigde verbeteringen maken elektrisch vliegen voor de grote luchtvaart technisch gezien voor vele decennia onmogelijk.

Voor de kleine luchtvaart is elektrisch vliegen met batterijen mogelijk wel een oplossing voor een emissievrije toekomst. Maar ook daarvoor geldt dat de ontwikkelingen van luchtvaart-gekwalificeerde batterijen langzaam gaan. Het is de verwachting dat dit bereik in de toekomst zal toenemen en dat ook het aantal zitplaatsen zal toenemen. Het is echter niet realistisch aan te nemen dat dit op korte termijn zal leiden tot vliegtuigen die op een batterijlading 500-1.000 km kunnen vliegen met 20 tot misschien 90 passagiers, zoals blijkt uit recent onderzoek (de Vries, Wolleswinkel, Hoogreef, & Vos, 2024; Wolleswinkel, de Vries, Hoogreef, & Vos, 2024).

Elektrisch vliegen zal overigens niet stil zijn omdat de propeller van het vliegtuig een aanzienlijke hoeveelheid geluid zal blijven produceren.



Figuur 3: Overzicht van de energiedichtheid met betrekking tot gewicht en volume voor kerosine, alternatieve brandstoffen en batterijen, brandstofcelsysteem huidige technologie op diverse studies.

3.3.3 Elektrisch vliegen met waterstof en brandstofcel

Om in de grote luchtvaart elektrisch vliegen mogelijk te maken is een alternatief voor de accu nodig. Dat alternatief bestaat gelukkig: de brandstofcel. Dergelijke brandstofcellen maken van een brandstof rechtstreeks elektriciteit zonder verbranding. De meest voor de hand liggende optie is de brandstofcel op waterstof. Het idee bestond al eind jaren negentig (Peeters, 2000; Snyder, 1998), maar is recenter opnieuw sterk in de aandacht gekomen bij NASA (Snyder et al., 2009) en met een mooi voorbeeld van Nederlandse bodem (Delgado Gosálvez et al., 2018).

Hoewel in beide gevallen waterstof de energiebron is, zijn de verschillen tussen deze twee aanpakken zeer groot. Tabel 1 geeft de belangrijkste aan.

Het belangrijkste punt is dat de luchtvaart weliswaar nul-CO₂-emissies kan bereiken met *e-fuels*, maar alleen met een brandstofcellen systeem in staat zal zijn zero-emissies te halen (daar komt alleen vloeibaar water uit). Bovendien zal de energiebehoefte van het hele systeem (*well-to-wing*) voor *e-fuels* zeer aanzienlijk hoger zijn dan voor zo'n brandstofcel vliegtuig. Dus ons advies is om deze optie heel serieus te bestuderen en te ontwikkelen, ook al zijn er nog heel wat technische dingen om op te lossen. Eén daarvan is de relatieve traagheid van brandstofcellen om snel op vol vermogen te komen, waardoor bij de landing een doorstart niet mogelijk is. Het lijkt erop dat Airbus dit oplost met een additionele hybride oplossing (extra turbine motor die de waterstof kan verbranden voor noodgevallen). ZeroAvia doet dit met een batterij die genoeg elektriciteit bevat heeft (en door de brandstofcellen wordt bijgeladen) om een doorstart te kunnen maken op de elektrische motoren.

Tabel 1: belangrijkste verschillen tussen vliegtuigen met motoren die waterstof verbranden en vliegtuigen met brandstofcellen die elektrische motoren van stroom voorzien uit waterstof.

Kenmerk van het systeem	Waterstof verbranden in turbinemotoren	Waterstof met brandstofcellen en elektrische motoren
Energie-efficiëntie	0	+
Hoeveelheid waterstof benodigd	-	0
Ruimte energiesysteem	-	0
Gewicht energiesysteem	0	-
Niet-CO ₂ emissies	-	+
Operaties als huidige vliegtuig	+	-
Kruissnelheid	0	-
Maximale range	> 6000 km	>2000 km
Payload	> 200 passagiers	>100 passagiers
Introductie in de markt	Na 2040	Tussen 2026 en 2030 (retrofit ATR-72 met 70 stoelen)

Op dit vlak zijn er inmiddels veel initiatieven. De meesten bevinden zich echter nog in de ontwerpfase. De ontwikkelingen gaan wel sneller dan oorspronkelijk gedacht. Een kleine greep uit de lopende projecten is de volgende:

- Airbus ZEROe programma (Airbus, 2023): dit programma van Airbus is snel groeiend. In alle opties die Airbus bekijkt spelen brandstofcellen en waterstof een rol. Ook bestudeert het concern de mogelijkheid om elektromotoren sterk te koelen en supergeleiding te bereiken waarmee het hele voortstuwingssysteem 50% lichter kan worden gemaakt². De uitkomst na een jaar studie was dat batterijvliegtuigen voor grote vliegtuigen geen kans maken en men doorgaat met vliegtuigen die waterstof verbranden of gebruiken om elektriciteit mee te maken via brandstofcellen.
- ZeroAvia: met een omgebouwde 6-zitter die al een reeks vluchten heeft uitgevoerd. In dit vliegtuig zit weliswaar ook een batterij vanwege het snel kunnen opstarten van de energielevering in geval van een doorstart. In 2023 werden tien testvluchten uitgevoerd met een omgebouwde Dornier 228 waar 19 passagiers in kunnen. Eén van de twee motoren was elektrisch. De afgelopen jaren zijn de ambities van het bedrijf wat minder groot geworden en wil het niet langer hele vliegtuigen bouwen maar voor de waterstof-brandstofcel-elektrische voorstuwingssystemen die andere fabrieken in hun vliegtuigontwerpen kunnen gebruiken.
- Een dergelijke fabriek is Universal Hydrogen. Zij testvliegen sinds midden 2023 met een omgebouwde De Havilland Dash 8 waarvan één motor is vervangen. Dit toestel heeft zo'n 40 zitplaatsen. Verder is men bezig met de ombouw van een ATR-72, een 70-zitter. De plannen zijn om binnen enkele jaren retrofit kits aan te gaan bieden voor ombouw van bestaande ATR-72 en Dash 8 vliegtuigen voor commerciële luchtvaart. Ook is het

² <https://www.compositesworld.com/news/airbus-ascend-program-to-explore-liquid-hydrogen-and-superconductivity-for-zero-emission-aircraft>

bedrijf bezig met de ontwikkeling van tanksystemen voor waterstof die luchthavens kunnen gebruiken.

Ook de Nederlandse kennisinstellingen doen onderzoek op het gebied van waterstof aangedreven vliegtuigen. Het Koninklijk NLR heeft al diverse drones gevlogen. De TU Delft heeft voor de Koninklijke Marine de zogenaamde Neder-drone ontwikkeld.

We zien wel een verschil in de benadering van duurzaamheid tussen Europa en Airbus aan de ene kant en de VS en Boeing aan de andere kant. Boeing focust in de duurzaamheidsprogramma's met name op duurzame vormen van kerosine (zie paragraaf 3.4). Airbus maakt daarnaast de stap naar het gebruik van waterstof. Daarbij wedden ze eigenlijk wel op twee paarden. Aan de ene kant ligt er een focus op het gebruik van waterstof via o.a. het ZEROe-programma en eerder het E-FanX-programma. Aan de andere kant is men ook nog heel erg bezig met het verbeteren van de brandstofefficiëntie van conventionele vliegtuigen. Dat wordt ook nog eens sterk gestimuleerd door de Franse overheid met een forse subsidie (Flottau, 2023). Duurzame vormen van kerosine zijn daar de enige optie. Overigens is, zoals eerder gemeld, hier ook veel duurzaam gemaakte waterstof voor nodig. Tegelijkertijd zijn er initiatieven om brandstofcel-waterstof vliegtuigen als retrofit optie voor bestaande vliegtuigen aan te gaan bieden (Bjerregard, 2022). Het bovenstaande maakt duidelijk dat het gebruik van brandstofcellen volop in de belangstelling staat en daarmee ook grote kansen biedt voor de Nederlandse industrie, zoals verder uitgewerkt in paragraaf 3.4. Het is daarom ook goed dat dit ruime aandacht krijgt in het groeifondsprogramma 'Luchtvaart in Transitie'. Overigens moet men bedenken dat de brandstofcel op dit moment de enige optie is die serieuze kansen biedt voor een efficiënte nul-emissies luchtvaart op de lange termijn. Daarom zullen de technische en economische uitdagingen aangegaan moeten worden om situaties met uit de hand gelopen klimaatverandering of een zeer sterk gekrompen luchtvaartsector te vermijden. Het is daarom goed dat het gebruik van waterstof in het onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma 'Luchtvaart in Transitie' ruim aandacht krijgt.

3.3.4 Waterstofvliegtuigen

Daarnaast is er ook toenemende belangstelling voor het gebruik van waterstof in turbine-motoren. Ook dat idee is verre van nieuw en al in de jaren 80 vlogen de Russen een omgebouwd passagiersvliegtuig op waterstof (zie ook (Brewer, 1991)). Voor waterstof geldt dat het weliswaar aanzienlijk minder zwaar is, maar ook aanzienlijk meer ruimte nodig heeft. In een vliegtuig zijn gewicht en ruimte altijd erg schaars en daarom hebben dergelijke brandstoffen een grote impact op het vliegtuigontwerp en zeker ook de kosten en tijd gemoeid met het ontwikkelen van een vliegtuig op een dergelijke brandstof.

Waterstof is in die zin wel een apart geval. De energiedichtheid van waterstof is namelijk veel hoger dan die van kerosine (zie *Figuur 3*) voor gewicht (bij vloeibaar waterstof een factor 3) maar juist veel lager voor volume (bij vloeibaar waterstof een factor 4). Waterstof kan naar alle waarschijnlijkheid ook gebruikt worden in de huidige generatie motoren (Kivits, Charles, & Ryan, 2010), al zijn daarvoor wel aanpassing aan motoren nodig. Nadelen van waterstof zijn dat er erg veel volume nodig is om het op te slaan, zodat het gekoeld of onder hoge druk bewaard moet worden en dat het licht ontvlambaar en explosief is.

Miller, Chertow, and Hertwich (2023) laten zien dat met het gebruik van waterstof een aanzienlijke reductie te bereiken is in de klimaat-impact van de luchtvaart, maar alleen als groene waterstof wordt gebruikt. Ook is vormt de waterdamp die dergelijke motoren uitstoten een risico voor de vorming van contrails die kunnen uitgroeien tot cirrusbewolking en een fors netto opwarmend klimaateffect kunnen hebben.

3.3.5 Hybride Waterstofvliegtuigen

Vaak worden 'hybride vliegtuigen' voorgesteld om de emissies naar nul te brengen. Helaas is dat in de meeste gevallen niet mogelijk, want hybride betekent in die gevallen een mix van bijvoorbeeld een batterij plus elektrische motor naast een volwaardige door fossiele energie gedreven voortstuwing. Deze dubbele motor en brandstof/energiesystemen hebben allereerst een enorm gewicht, ruimte- en kostennadeel, maar bovendien blijkt de batterij in de meeste gevallen slechts een paar procent van het totale energiegebruik te dekken en de reductie van de CO₂-emissie is navenant gering. Soms worden ook waterstof en batterijen of waterstof verbranden en in brandstofcellen gebruiken als hybride voorgesteld. Hoewel daar meer potentie in zit, de veel te zware batterij blijft weg en beide voortstuwingssystemen zijn zonder CO₂-emissies, blijf je zitten met veel extra complexiteit en kosten.

Toch laat bijvoorbeeld de Vries et al. (2024) zien dat ook een hybride vliegtuig vrijwel nul-emissies kan worden. Dat is gelukt door de wettelijk verplichte reserve-energie die een vliegtuig aan boord moet hebben niet in de vorm van accu's mee te nemen maar als gewone brandstof. Omdat deze reserve vrijwel nooit hoeft te worden aangesproken komt er bij normale vluchten nooit CO₂ vrij, terwijl het een forse gewichtsbesparing oplevert.

3.3.6 Mythes

Het idee dat de grote luchtvaart ooit op zonne-energie zal vliegen die via zonnecellen op de vleugels wordt opgewekt kan naar het rijk der fabelen worden verwezen op grond van het feit dat de energie die een verkeersvliegtuig nodig heeft om te vliegen, uitgedrukt in een energiedichtheid van een vliegtuig per m² vleugel circa 1000 keer zo hoog is als de zon maximaal kan leveren. Daarnaast is er nog een reeks van andere praktische en economische bezwaren die dit technisch en economisch onhaalbaar maken. Het gebrek aan energiedichtheid van de zon kan niet met techniek worden opgelost, omdat zonnecellen al 30% of meer van de zonne-energie omzetten in elektriciteit en er bij een praktisch nooit haalbare 100% nog altijd een factor 300 te weinig energie beschikbaar komt voor het vliegtuig. Zie verder ook Peeters, Higham, Kutzner, Cohen, and Gössling (2016) over dergelijke 'technologische mythes'.

3.4 Alternatieve brandstoffen

De standaard brandstof in de luchtvaart is op dit moment fossiele kerosine, een beetje vergelijkbaar is met diesel en gemaakt uit aardolie. De hoeveelheid energie die in een kilogram kerosine zit is hoog. Voor de luchtvaart is dit van groot belang omdat letterlijk elke gram telt. Daarnaast is kerosine niet licht ontvlambaar en bevriest niet als een vliegtuig op grote hoogte vliegt. Een probleem met veel alternatieven zoals ethanol, methanol en vloeibaar methaan, is dat hun energiedichtheid lager is dan van kerosine (zie Figuur 4).

Om de huidige vloot te kunnen gebruiken en toch de emissies sterk te verlagen is het ook mogelijk zogenaamde "drop-in" brandstoffen toe te passen. Internationaal staan ze bekend als SAF: "Sustainable Aviation Fuels". Deze brandstoffen kunnen door bestaande vliegtuigen en de daarbij behorende brandstofdistributiesystemen gebruikt worden. Deze drop-in brandstoffen zijn bijna identiek aan fossiele kerosine en mogen nu al tot 50% worden bijgemengd. De verwachting is dat vanaf 2025 dit bijmengen tot 100% wordt toegestaan. Mogelijke vormen van SAF zijn bio-kerosine, kerosine uit afval, *Gas-to-Liquid* (GtL), *Coal-to-Liquid* (CtL), *Power-to-liquid* (PtL, ook wel *solar fuel* of *e-fuel* genaamd). Al deze brandstoffen zijn vloeibaar en hebben een energiedichtheid die (bijna) identiek is aan die van kerosine.

Bij GtL en CtL wordt fossiele brandstof (respectievelijk aardgas en kolen), via een chemisch proces omgezet naar een vloeibare brandstof. Het proces daarvoor is al bijna een eeuw oud. Er is ook al aangetoond dat deze brandstof veilig is voor vliegtuigen. Nadeel van deze brandstoffen is dat ze nog steeds uitgaan van fossiele bronnen en dus de CO₂-uitstoot er niet door zal verminderen. Het voordeel is wel dat door het omzettingsproces de verontreinigingen die in standaard kerosine zitten, zoals zwavel, eruit gehaald zijn. De verbranding is dus veel schoner. Experimenten van TU Delft hebben dit aangetoond (Snijders & Melkert, 2011). Dit heeft dus meteen effecten op de lokale luchtkwaliteit rond luchthavens.

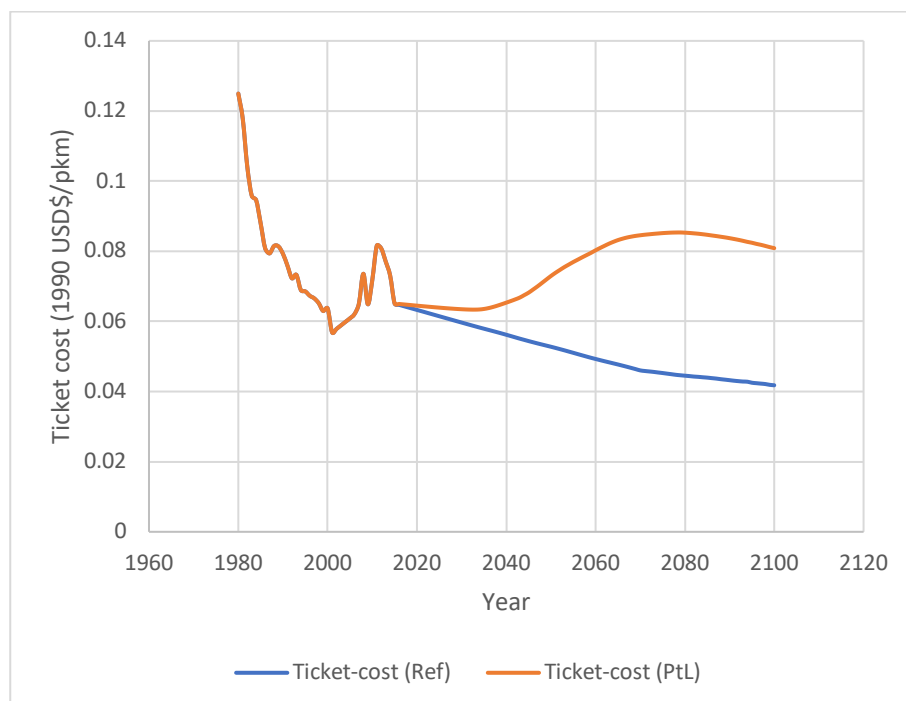
Bio- en afval-brandstoffen zijn technische gezien vergelijkbaar met GtL en CtL. Het voordeel van deze type brandstoffen is dat ze wel daadwerkelijk de CO₂-uitstoot reduceren. Op levenscyclus basis is dat tussen de "van vrijwel geen besparing" tot 85% (de Jong et al., 2017). Nadelen zijn de relatief geringe energie omzettingsefficiëntie van bladgroen (Biello, 2012) met algen als eenzaam hoogtepunt op maximaal 3%, nog altijd tien keer minder dan de beste zonnecellen. Daardoor is veel ruimte nodig tussen de 200 en 6.000 liter/ha (algen 60.000).

Een vanuit milieuoogpunt veelbelovend alternatief zijn de e-fuels (Schmidt & Weindorf, 2016; Terwel & Kerkhoven, 2017). Hierbij wordt kerosine gemaakt van CO₂ uit een industriële bron (CCU; carbon capture and usage) of rechtstreeks uit de lucht. Het chemische proces is ruwweg vergelijkbaar met de productie van GtL en CtL maar de bron van de koolstof is anders. De benodigde energie voor dit proces moet uit duurzame bronnen (wind, zon, waterkracht) gehaald worden om de CO₂-emissies naar bijna nul te kunnen reduceren. Het voordeel van deze brandstof is dat ze geen 'vruchtbare' grond nodig heeft en dus niet zo makkelijk interfereert met

de productie van voedsel of natuur en ook goed toepasbaar is in de luchtvaart. Ten opzichte van biobrandstoffen gebruiken ze ongeveer tien keer minder ruimte, honderd tot duizend keer minder water en is de levenscyclus reductie van CO₂ bijna 100% (Schmidt & Weindorf, 2016). Nadelen zijn ook hier weer de beschikbaarheid en de kosten. Wat de kosten betreft kan men stellen dat deze goed door de sector gedragen kunnen worden wanneer er wereldwijd in de pas lopende bijmengmandaten worden ingevoerd. Uitgaande van een introductie pad tot 100% *e-fuel* in 2050 en viervoudige kosten voor *e-fuels* vergeleken met fossiele kerosine laat Figuur 5 zien wat het gevolg voor de ticketkosten zal zijn. Deze blijken niet hoger te worden dan de afgelopen tien jaar en de veranderingen zullen geleidelijk verlopen vergeleken met eerdere normale marktontwikkelingen. Derhalve lijkt er geen reden te zijn om aan te nemen dat dergelijke mandaten, kostentechnisch, niet door de luchtvaartsector opgevangen zouden kunnen worden. Voorwaarde is dan wel dat dergelijke mandaten voor alle luchtvaartmaatschappijen gelden om ongelijke concurrentie te voorkomen.

De Werkgroep Duurzame Brandstoffen (WDB) heeft in 2021 al een rapport gepubliceerd met de plannen in Nederland op het gebied van *e-fuels* (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2021). Een lijstje van de plannen en ambities:

- In 2030 is 14% van de fossiele kerosine vervangen door alternatieve brandstoffen (SAF)
- In 2050 moet dit 100% zijn.
- In 2070 moeten de emissies van de luchtvaart nul zijn.
- In 2024 moet er 200.000 ton SAF worden geproduceerd in Nederland, oplopend via 500.000 ton in 2026 ongeveer 700.000 ton in 2030.
- Een *e-fuel* fabriek draait per 2028.



Figuur 4: mogelijk verloop van de ticketprijs bij een wereldwijde gemandateerde introductie van *e-fuels* tot 100% in 2050. Gebaseerd op analyses met het dynamische Global Tourism & Transport Model (Peeters, 2017).

Opvallend is dat de groei van de productiecapaciteit in de planning afneemt tussen 2026 en 2030, terwijl men juist in 2030 op ene sterk groeipad moet zitten om de 100% SAF te kunnen halen in 2050. Het lijkt dat de ambitie voor productiecapaciteit hoger kan en moet zijn om op de langere termijn de doelen te kunnen halen. De rol van *e-fuels* zou groter moeten zijn om conflicten met landgebruik en andere duurzaamheidsproblemen te voorkomen. Overigens geeft het ministerie aan dat de hoeveelheid duurzame energie benodigd voor de productie van *e-fuels* conflicteert met de problemen die Nederland heeft om voor alle sectoren voldoende te produceren. Daarom merken wij op dat dergelijk *e-fuels* fabrieken zowel vanuit kosten als

doelmatigheidsperspectief beter in landen met zeer veel zon aangelegd kunnen worden. Wat we nodig hebben is een wereldwijde SAF-beurs, die er in de komende tien twintig jaar voor zorgt dat de brandstof verspreid kan worden gekocht, maar in eerste instantie vooral rond de eerste *e-fuel* fabrieken kan worden getankt en gebruikt. Dat maakt de introductie van de eerste paar procenten *e-fuel* aanzienlijk doelmatiger dan wanneer iedereen op kleine schaal eigen fabriekjes gaat bouwen of dat SAF eerst over grote afstanden vervoerd moet worden voordat deze in een vliegtuig belandt. Zo'n SAF-beurs werkt vergelijkbaar als groene stroom die ook niet per adres wordt geleverd maar in de gehele elektriciteitsmix zit.

Becken, Mackey, and Lee (2023) hebben een uitgebreide analyse gemaakt van mogelijke transitiepaden naar duurzame brandstoffen voor de luchtvaart. Op de middellange termijn zal dit grotendeels een vorm van biobrandstof zijn. Op de lange termijn, richting 2050 zullen dat met name *e-fuels* worden. Zij waarschuwen dat er rekening moet worden gehouden met een behoorlijk beslag op beschikbare biomassa en de beschikbare duurzame energie. Met name voor *e-fuels* is de enorme hoeveelheid duurzame energie (zon en wind) die nodig zal zijn om alle kerosine in 2050 te vervangen problematisch (Schmidt, Weindorf, Failer, Astono, & Ullmann, 2023). Uit wereldwijde scenariostudies blijkt dat een (sterke) groei van de luchtvaart moeilijk verenigbaar is met die energiebehoefte omdat luchtvaart dan onevenredig grote aandelen van de duurzame energie gaat gebruiken. Zelfs zonder groei en met alle denkbare conventionele technologieontwikkeling blijkt dat aandeel tot 10% op te lopen (Peeters & Papp, 2023).

Daar waar de beschikbaarheid van duurzame vormen van kerosine een paar jaar geleden nog verwaarloosbaar was zitten we momenteel in de eerste fase van opschaling. Eurocontrol (2023) geeft aan waar deze al beschikbaar is. De bijmengverplichting die vanuit de EU wordt opgelegd gaat helpen bij deze opschaling. Het garandeert een afzetmarkt. Daarmee wordt het interessant voor producenten om te gaan investeren in meer en grotere productiefaciliteiten. De EU eist in 2025 een bijmenging van 2%, in 2030 6% en dat loopt dan verder op richting 2050. Nederland heeft ambities om sneller te gaan. Het bijmengen van duurzame kerosine kan ook gaan leiden tot een verminderde vorming van contrails (Märkl et al., 2023). In de tussentijd komen ook steeds meer processen beschikbaar om deze brandstoffen op een duurzame manier te produceren (Schäppi et al., 2022). Bij biobrandstoffen blijft daarbij noodzakelijk goed in de gaten te houden welke bronmaterialen gebruikt worden (Suzan, 2023; The Royal Society, 2023) zodat duurzaamheid gegarandeerd blijft. Het zal hierbij noodzakelijk blijven in onderzoek te investeren.

3.5 Bedrijfseconomische aspecten

Wat zijn realistische tijdspaden voor de inzet van de nieuwste technologieën door de luchtvaartmaatschappijen? Wat zijn belemmeringen en kansen voor versnelling van deze inzet en voor bijvoorbeeld uitfasering van de minst duurzame vliegtuigen in burgerluchtvaart? Antwoorden op de vraag hoe de techniek zich kan ontwikkelen zijn niet eenvoudig te geven en economische gevolgen daarvan zelfs nog lastiger. Tabel 2 geeft de belangrijkste mogelijkheden voor verduurzaming met tijdspaden en - deels kwalitatief - enige opmerkingen over de kosten.

Tabel 2: Overzicht belangrijkste maatregelen en hun bedrijfseconomische aspecten.

Technologie	Effect	Ontwikkeltijd	Luchtvaart-brede implementatie	Economie
<i>Evolutionaire technologie, effect op het niveau van de wereldwijde vloot</i>	<i>Nu tot 2050: 1,0%/jr -1,5%/jr 2050-2100: 1,0%/jr-0,7%/jr</i>	<i>Stapsgewijs per generatie ca 15% per 15-25 jaar</i>	<i>Voortdurend</i>	<i>Intern deel luchtvaartstelsysteem</i>
<i>Revolutionaire vliegtuig configuraties</i>	<i>Zo'n 10-20% additionele</i>	<i>20-30 jaar</i>	<i>Na 2060 maar vergt nu significante investeringen in</i>	<i>In beginsel kan dit binnen sector; probleem is het risico van de vele</i>

Technologie	Effect	Ontwikkeltijd	Luchtvaart- brede implementatie	Economie
	<i>efficiëntie- verbetering</i>		<i>fundamenteel en toegepast onderzoek.</i>	<i>tientallen miljarden ontwikkelkosten per type plus aanpassingen infrastructuur</i>
<i>Elektrisch vliegen (batterij)</i>	<i>100% mits 100% duurzame energiebronnen</i>	<i>Korte afstand: 20-40 jaar Lange afstand: op basis van huidige kennis waarschijnlijk nooit</i>	<i>Korte afstand: na 2080 Lange afstand: niet deze eeuw</i>	<i>Volledige invoering brengt mogelijk honderden miljarden ontwikkelkosten</i>
<i>Elektrisch vliegen (Waterstof, brandstofcel)</i>	<i>100% mits 100% duurzame energiebronnen</i>	<i>Korte afstand: 10 jaar Lange afstand: 20 jaar</i>	<i>Korte afstand: na 2040 Lange afstand: na 2080</i>	<i>Volledige invoering brengt mogelijk honderden miljarden ontwikkelkosten</i>
<i>Biobrandstoffen</i>	<i>40-80%</i>	<i>Geen voor 1^{ste} en 2^{de} generatie; 10 jaar voor 3^{de} (bv algen)</i>	<i>2-3% vervanging per jaar</i>	<i>Brandstofkosten circa 1% tot 10% per jaar omhoog in 2-3% vervanging per jaar pad</i>
<i>e-fuels (PtL)</i>	<i>95-100% mits duurzame bronnen</i>	<i>Via CCU: 5 jaar Via CCA: 10-15 jaar</i>	<i>2-3% vervanging per jaar; in 30 tot 50 jaar volledige vervanging. Op dit vlak zou Nederland een voortrekkersrol kunnen spelen.</i>	<i>Brandstofkosten circa 2% tot 18% per jaar omhoog in 2-3% vervanging per jaar pad</i>
<i>Aanpassing vliegprocedures ter vermijding niet-CO₂ klimaateffecten en "omvliegen"</i>	<i>Circa 40% klimaateffect; noot: circa 10% toename CO₂</i>	<i>Afhankelijk internationale regelgeving (10 jaar)</i>	<i>Afhankelijk internationale regelgeving (10 jaar) Invoering van de Single European Sky is daarbij gewenst.</i>	<i>Circa 3-10% extra operationele kosten</i>
<i>Invoering Single European Sky</i>	<i>5-10%</i>	<i>Kan met bestaande vliegtuigen worden ingevoerd</i>	<i>Invoering in Europe</i>	<i>Reductie van operationele kosten</i>

4. Beleid

4.1 Bestaand beleid verduurzaming luchtvaart

De ICAO ontwikkelt internationale regelgeving voor de veiligheid en de milieuprestaties van vliegtuigen. Deze zijn in normen vastgelegd en elk vliegtuigtype en/of motortype dient te worden gecertificeerd en daarbij aan te tonen binnen deze normen te blijven. Deze normen worden wereldwijd omgezet in nationale wetgeving. De gegevens van vliegtuigen op dit vlak zijn openbaar beschikbaar voor alle gecertificeerde vliegtuigen. Aan de certificatieprocedure voor milieunormen worden dezelfde hoge eisen gesteld als voor vliegveiligheid. De ICAO richtte in het CAEP (*Civil Aviation Environmental Project*) drie werkgroepen op per type norm. WG-1 ontwikkelt normen voor geluid waar vliegtuigtypen aan moeten voldoen, WG-2 doet motoremissies en WG-3 CO₂-uitstoot van vliegtuigen). In CAEP werken industrie, overheden, luchtvaartbelangenorganisaties en maatschappelijke organisaties (met name ICSA, *International Coalition for Sustainable Aviation*) samen. Het niveau van de norm wordt steeds zodanig gekozen dat deze het meest kosteneffectief is: de grootste vermindering van milieubelasting per € kosten voor de industrie. Een andere ICAO-voorwaarde is dat de norm niet 'technology forcing' is, oftewel niet een bepaalde nieuwe technologie voor alle fabrikanten afdwingt.

Deze normen worden elke 5 tot 10 jaar aangescherpt, afhankelijk, van de technologische vooruitgang. Individuele landen, voor Nederland via de Europese luchtwaardigheidsautoriteit EASA, nemen deze regels over en kunnen ze tot op zekere hoogte aanscherpen. In 2017 zag een belangrijke uitbreiding van normen het licht met de introductie van een PM norm (*Particulate Matter* = deeltjes) voor motoren en een CO₂-norm voor vliegtuigtypen. Deze worden voor Europa gedetailleerd beschreven door EASA (2017).

Een additionele regelgeving is opgesteld in het kader van *Climate Neutral Growth* (CNG). CNG wil zeggen dat de internationale luchtvaart haar CO₂-emissies na 2020 niet meer laat groeien, ondanks een voortgaande groei van het volume van luchtvaart. Dat is geen ambitieuze doelstelling vergeleken met de reductiedoelstellingen afgesproken in Parijs en in andere sectoren, waarin de emissies in 2050 netto-nul moeten zijn. De ICAO-maatregelen bestaan eruit dat luchtvaartmaatschappijen vanaf 2021 vrijwillig en vanaf 2027 verplicht de totale emissies niet meer zullen laten groeien ten opzichte van de emissies van 2019. De CO₂-emissies boven het niveau van 2019 moeten worden gecompenseerd via de vrije markt van *Certified Emission Reductions* (CERs). Door de snelle groei van de luchtvaart is de vloot gemiddeld relatief nieuw (wereldwijd circa 10 jaar oud) en is het aandeel zeer oude vliegtuigen gering en zal het weghalen daarvan meer symbolische dan werkelijke effecten op de CO₂-emissies hebben, maar mogelijk wel significant zijn voor geluid en luchtkwaliteit. Als gevolg van de COVID-19 crisis komt pas dit jaar de luchtvaart weer op het niveau van 2019 en is de verwachting dat CORSIA vanaf volgend jaar enig effect zal hebben. Een groter probleem is dat het middel van CORSIA, compensatie via CERs op de vrije markt, in 85% van de certificaten aantoonbaar slecht functioneert (Cames et al., 2016) en vergeleken met een emissiehandel systeem als het Europese ETS een gering effect zal hebben (Maertens, Grimme, Scheelhaase, & Jung, 2019). De kritiek op compensatie neemt toe omdat het riskant is (Becken, Miller, Lee, & Mackey, 2024) en het effect discutabel (Mello, 2024).

Om een bewijs van luchtwaardigheid te krijgen moeten vliegtuigen ook onder een bepaald vastgelegd geluidsniveau blijven volgens ICAO-regelgeving. Afhankelijk van het jaar van certificatie moet een vliegtuig aan steeds strengere eisen voldoen. Deze worden weergegeven door zogenaamde "chapters" of "stages". Oudere vliegtuigen, zoals *chapter 2* vliegtuigen, worden sinds 2002 al niet meer toegelaten. Voor nieuwe vliegtuigen die sinds 2006 gecertificeerd worden is de minimumeis nu *chapter 4*. In 2014 is in ICAO verband ook al een nieuwe norm afgesproken, *Chapter 14* en die geldt voor alle vliegtuigtypen die vanaf 2020 worden gecertificeerd. Het toegestane geluidsniveau is een functie van de massa van het vliegtuig. Een zwaarder vliegtuig mag meer geluid produceren dan een lichter vliegtuig.

Naast het gebruiken van modernere en minder lawaaiige vliegtuigen is er ook winst te behalen met het uitvoeren van geluidsarme procedures. Voor de nadering en landing zijn zogenaamde *Continuous Descent Approaches* (CDA) de aangewezen weg om geluid te reduceren. Dat betekent dat vanaf het moment dat de kruishoogte wordt verlaten het vliegtuig een continue

daalvlucht uitvoert. Het voordeel is dat de motoren op een laag vermogen draaien en daardoor zeer beduidend minder geluid produceren. Er hoeft dan geen gas bijgegeven te worden om een stukje horizontaal te vliegen. Het uitvoeren van dergelijke naderingen vergt voldoende ruimte in het luchtruim. Tijdens piekuren is die ruimte vaak niet aanwezig en is de verkeersleiding gedwongen vliegtuigen toch stukken horizontaal te laten vliegen. Wanneer het totale volume wordt verlaagd, zoals het ministerie wil, komt er meer ruimte voor dergelijke procedures. Nu gebeurt dit eigenlijk alleen na 11 uur 's avonds.

Tijdens de start zijn er ook verschillende mogelijkheden. Men kan een vliegtuig na de start gelijk door laten klimmen naar kruishoogte. Een andere optie is een vliegtuig na de initiële klim een stuk horizontaal te laten vliegen waarbij de snelheid toeneemt. In het eerste geval is men sneller op hoogte maar is de voorwaartse snelheid wat beperkter. Dat betekent dat de geluidsbelasting langer op een kleiner oppervlak wordt geconcentreerd. Bij de tweede optie is de hoeveelheid geluid wat hoger maar is de tijdsduur wat korter. Over het algemeen wordt de tweede methode als wat minder hinderlijk ervaren door omwonenden. Het uitvoeren van deze procedures is ook weer afhankelijk van de beschikbare ruimte in de lucht. Daarnaast zullen vliegtuigen niet starten met maximaal vermogen als dat niet nodig is. Het benodigde vermogen wordt bepaald door de beschikbare baanlengte, het gewicht van het vliegtuig en het weer. Starten met gereduceerd vermogen geeft minder geluid, minder emissies en verlengt ook de levensduur van de motoren.

4.2 Sectorplannen vanuit de ruimte

De afgelopen jaren is de sector met diverse plannen gekomen. Het plan 'Slim en Duurzaam' zag in 2018 het licht (Luchtvaart Nederland, 2018) en kreeg in 2022 een update (Luchtvaart Nederland, 2022). Het behandelt de luchtvaart in zeven thema's van het optimaliseren van vliegroutes & procedures, via de inzet van duurzame brandstoffen en de evolutionaire en revolutionaire ontwikkeling van techniek tot de inzet van de trein, emissieloze luchthavens en verduurzaming van het verkeer van en naar de luchthavens. Voorts bracht de luchtvaartsector een actieagenda uit met tien 'commitments' (Luchtvaart Nederland, 2024) op milieugebied. Interessant is dat in 2023 Schiphol ook een notitie uitbracht, het 8-punten plan (Schiphol, 2023), dat op een aantal punten flink verschilt van de tien *commitments*. Met name op het gebied van de capaciteit van Schiphol (de luchthaven wil krimp), nachtvluchten (Schiphol wil een uitgebreidere nachtsluiting) en zakenjets (Schiphol wil die weren) zijn de verschillen opvallend.

4.3 Luchtvaartnota 2020-2050

Op verzoek van de Tweede Kamer is een beleidsnota voor de luchtvaart ontwikkeld voor de periode 2020-2050. Deze Luchtvaartnota probeert een nieuwe koers voor de luchtvaart te geven. Het streven is om via deze nota alle aspecten van de luchtvaart meer met elkaar in balans te brengen. Dit betreft de volgende aspecten:

1. Veiligheid in de lucht en op de grond
2. De (internationale) bereikbaarheid van Nederland
3. Een aantrekkelijke en gezonde leefomgeving
4. Een duurzame luchtvaart

Het opstellen van deze nota en de ambities die hierin gegeven zijn, zijn uniek in de wereld. Het is ook voor het eerst dat leefbaarheid expliciet en sturend wordt meegenomen in het luchtvaartbeleid. Ook het adaptieve karakter van de nota is bijzonder. Men geeft nu al aan dat dit een agenda is voor de komende vijf jaar maar dat deze daarna geactualiseerd zal worden. Dit kan bijvoorbeeld als er in het internationale speelveld een nieuwe situatie ontstaat.

De nota gaat nog uit van een klimaat neutrale luchtvaart vanaf 2070, terwijl het UNFCCC (*United Nations Framework Convention on Climate Change*) op basis van het Akkoord van Parijs vraagt om netto nul-emissies in 2050. Dat geldt ook voor de Europese Green Deal en het Europese klimaatplan *Fit for 55*. Hoewel het wereldwijde aandeel van luchtvaart in CO₂-emissies zo'n 2,5% is en in huidige klimaatverandering 3,5% (Lee et al., 2021) een relatief bescheiden bijdrage levert aan de opwarming van de aarde, zal dit deel zowel absoluut als relatief de komende decennia toenemen tenzij drastische maatregelen worden genomen. Het aandeel van de Nederlandse luchtvaart (van de luchtvaartmaatschappijen wereldwijd) in de CO₂ was in 2019 8,9%, in 2022 7,2% en zal naar verwachting in 2024 rond de 11% komen te liggen, deels doordat de totale Nederlandse emissies hard dalen. De vraag is dan of de maatregelen en ambities uit de nota sterk en hoog genoeg zijn, vooral ook in het licht van de CO₂ budget en plafond discussie beschreven in paragrafen 2.1 en 4.3.1.

4.3.1 CO₂-plafond

Een van de aspecten die voortkomen uit de Luchtvaartnota is het instellen van een CO₂-plafond. Middels dit plafond wordt de totale CO₂-uitstoot van de luchtvaart beperkt. Dit is an sich een interessante benadering van het CO₂-probleem. De praktische uitvoering gaat wel de nodige aandacht vragen. De uitvoering zou zich richten op het koppelen van de in Nederland getankte kerosine, via de daadwerkelijk getankte kerosine of via modelberekeningen. Dit is een makkelijke keuze want het rechtstreeks meten van de echte CO₂-uitstoot is niet mogelijk, maar omdat de verbranding van 1 kg kerosine altijd leidt tot de uitstoot van 3,16 kg CO₂. Als de hoeveelheid afgenomen brandstof goed wordt bijgehouden, kun je daaruit de hoeveelheid CO₂ exact berekenen. Echter, brandstof kan ook van elders worden meegenomen – het zogenaamde tankering - waardoor de feitelijke emissies voor alle vluchten vertrekkend van de vijf Nederlandse luchthavens te laag wordt ingeschat. Volgens een PBL-studie hiernaar (Peeters, Uitbeijerse, Geilenkirchen, & Peerlings, 2021) laat zien dat strategisch gedrag van luchtvaartmaatschappijen – dus minder meer tanken voor vluchten naar Nederlandse luchthavens - kan leiden tot een onderschatting van de werkelijke CO₂ met 25%. Daarom beveelt het PBL aan om de optie om de CO₂-emissies te berekenen op basis van de bekende vliegpaden van alle vluchten vanuit Nederland verder uit te werken. In dat soort berekeningen zijn de marges hooguit enkele procenten.

Het bijhouden van een CO₂-plafond zal leiden tot het opzetten van een complex administratief systeem. Juridisch gezien moet de verantwoordelijkheid bij een Nederlandse rechtspersoon gelegd worden. De luchthaven is dan de meest voor de hand liggende rechtspersoon. Echter, een luchthaven heeft zelf geen vliegtuigen die CO₂ uitstoten. Het zijn de luchtvaartmaatschappijen die de luchthaven aandoen die de CO₂ uitstoten. Een luchthaven heeft daar maar beperkt grip op. Praktische uitvoerbaarheid is een belangrijke voorwaarde voor succes van deze regeling. Twee recente studies laten zien dat het in de Luchtvaartnota opgenomen CO₂-plafond vanuit een gezichtspunt van eerlijke verdeling van de lasten en lasten rondom de toekenning van het CO₂-budget leidt tot aanzienlijk lagere emissie-plafonds (Grebe et al., 2024; NLR, 2024). Wanneer uitgegaan wordt van een emissiereductie die de kans om onder de 1,5°C of 2,0°C te blijven op 50-66% te houden, wat door sommige wetenschappers als een zeer groot risico wordt gezien dat klimaatverandering uiteindelijk desastreuze vormen aanneemt, blijkt dat er ruimte voor maximaal tussen de vluchten vanaf Schiphol ergens tussen de 211.000 en 480.000 vluchten uitkomt. Een essentiële factor hierbij is de verhouding tussen Europese en ICA (intercontinentale) bestemmingen. Op dit moment is 80% Europees. Wanneer je het aandeel ICA op 20% laat in het meest klimaatvriendelijke scenario en onder veronderstelling van bijmengverplichting van SAF en technologische verbeteringen, kom je in 2030 op 211.000 vluchten uit om binnen het plafond te blijven. Wanneer je echter twee derde van de ICA vluchten uit de bestemmingen haalt kom je op ruimte voor 447.000 vluchten.

Of een CO₂-plafond echt knellend zal worden voor de capaciteit van de luchtvaart zal sterk af gaan hangen welke keuze er gemaakt gaat worden voor het beschikbare CO₂-budget. Als dit op het niveau van de uitstoot van 2019 gezet wordt, al dan niet met een steeds verder dalend niveau, dan zal eerder de geluidsproductie van vliegtuigen beperkend gaan worden.

4.3.2 Bijmengverplichting

Een andere maatregel die in de Luchtvaartnota genoemd wordt is een bijmengverplichting voor duurzame brandstoffen (tot 14% in 2030). Dit is een belangrijke stap die de vicieuze cirkel van beperkte beschikbaarheid en hoge kosten zou kunnen doorbreken. Belangrijk is wel dat een dergelijke maatregel op Europese schaal wordt ingevoerd. Anders zal ook hier strategisch gedrag gaan plaatsvinden zoals tankering, waarbij men met extra goedkope niet-gemengde brandstof op Schiphol aankomt zodat minder dure brandstof voor de terugvlucht nodig is. Ook kan het prijsverschil negatieve effecten op de Nederlandse concurrentiepositie hebben al is ook duidelijk dat de brandstofprijzen op Schiphol tot de laagste van Europa behoren (Peeters et al., 2021), wat ruimte biedt om de kosten op te vangen.

4.3.3 (Technische) ontwikkelingen

Nederland is een uniek luchtvaartland. Al heel lang beschikken we over een bijna complete "infrastructuur". Die begint bij opleidingsinstituten op MBO, HBO en WO-niveau. Daarnaast wordt er hoogwaardig wetenschappelijk onderzoek gedaan op o.a. de TU Delft en bij het Koninklijk Nederlands Luchtvaartcentrum (NLR) en TNO. Dan beschikken we ook over een uitgebreide

maakindustrie die als toeleverancier de sector belevt. En er zijn ook nog de gebruikers in de vorm van luchthavens, luchtvaartmaatschappijen en de Koninklijke Luchtmacht. Deze infrastructuur kan met een goed beleid nog beter benut worden. Met een goed onderbouwd en goed gefinancierd nationaal onderzoeksprogramma kan er beter worden aangesloten bij de Europese programma's.

Een stap in de goede richting vormt het project "Luchtvaart in transitie", dat het Groiefonds co-financiert. In dit programma worden diverse belangrijke technische ontwikkelingen die eerder beschreven zijn ondersteund. Ook de "Human Capital Agenda" krijgt de nodige aandacht om zo blijvend te kunnen zorgen voor voldoende geschoold personeel voor de sector.

4.4 Suggesties nieuw beleid

Het huidige beleid, zoals verwoordt in de Luchtvaartnota, is mogelijk niet meer adequaat om de balans tussen de belangen van luchtvaartbedrijven, luchtvaartmaatschappijen en Schiphol en van de Nederlandse economie en de belangen van omwonenden (geluid, luchtkwaliteit), werkenden (gezondheid) en toekomstige generaties (klimaat, energie) te vinden. Dat het hier mis gaat blijkt wel uit het voornemen van de minister om niet langer de overschrijding van wettelijke geluidsnormen te gedogen (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2022) en, als gevolg daarvan, een *Balanced Approach* procedure voor een vermindering van de maximale capaciteit naar 452.500 in Brussel aan te vragen en nog altijd een reductie naar 440.000 als doelstelling te houden (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2023b). De 440.000 beoogt om alle indicatoren voor hinder en ernstige hinder en slaapverstoring met 20% omlaag te brengen en voortaan binnen de vigerende wetgeving te opereren.

Maar mogelijk zijn er meer maatregelen nodig om die balans op orde te brengen en te voldoen aan internationale milieuafspraken, de zorgplicht aangaande gezondheid en mensenrechten en de belangen van de sector. Hieronder benoemen en beschrijven we een aantal zaken die de komende tien jaar de agenda zullen bepalen:

1. Het economisch belang van Schiphol

Waar studies in het verleden vaak concludeerden dat groei van Schiphol goed is voor de Nederlandse economie en brede zin (Maatschappelijke baten en kosten), is deze conclusie recenter gaan schuiven. Zo concludeerde het adviesbureau CE Delft in 2021 (Juijn, Blom, de Vries, Faber, & Grebe, 2021) dat groei altijd leidt tot welvaartsverlies en krimp onder bepaalde omstandigheden tot welvaartswinst. Recenter vonden Koopmans et al. (2023) dat krimp van de luchthaven naar 440.000 volgens het plan van de minister netto geen maatschappelijke kosten oplevert. Een tweede scenario, waarin vooral voor CO₂ extra maatregelen zijn verondersteld, levert een positief saldo voor de maatschappelijke kosten en baten. Daarbij moet worden aangetekend dat de kostenreductie op geluidsgebied aanzienlijk lager zijn dan in het krimpscenario en dat derhalve de kans groot is dat Schiphol de geluidsnormen blijft overtreden.

In een uitspraak van 20 maart 2024, bepaalde de rechtbank in Den Haag dat de Staat binnen een jaar het gedogen van geluidsnormoverschrijdingen moet staken op grond van het Europese Verdrag van de Rechten van de mens (Rechtbank Den Haag, 2024). Daarom moet men het nog langer systematisch overschrijden van niet volledig adequate normen als een niet langer begaanbaar pad te beschouwen. Uiteindelijk bepaalt goed samenspel van technische vlootvernieuwing, vliegprocedures, capaciteitstoekenning, aandeel nachtvluchten, verbeterde normstelling en beter inzicht in de relaties tussen geluidsdruk en ervaren hinder en gezondheidsschade de hoeveel ruimte die er op Schiphol is. De kans dat deze ruimte de komende decennia boven de 500.000 vluchten komt schatten we niet hoog in.

2. Klimaat

De inrichting van het CO₂-plafond voor de Nederlandse luchtvaart vergt een eenduidige indicator, die het beste is gebaseerd op het na de vlucht berekenen van de exacte vluchtgegevens (route, hoogte, snelheid, belading in aantal passagiers en tonnen vracht) en gedetailleerde gegevens van het gebruikte vliegtuig (type, variant, motortype). De hoogte van het plafond verdient een nadere aanscherping op basis van recente studies. De handhaving kan het beste worden geïntegreerd in de capaciteitsplanning van Schiphol en de andere luchthavens, waarbij een eventuele feitelijke afwijking in een voorgaand jaar wordt verrekend. De mate waarin het CO₂-plafond de capaciteit van de luchthavens belemmert, wordt grotendeels bepaald door de mate

waarin de luchtvaartsector er in slaagt de vloot te vernieuwen, voldoende *e-fuels* te verkrijgen en zuiniger te vliegen.

3. Luchtkwaliteit

Uit recente studies blijkt dat het aandeel van vliegtuigemissies in de luchtkwaliteit voor *Particulate Matter* (PM) en zeer zorgwekkende stoffen (ZZS) in de bredere omgeving gering is. Maar op Schiphol zelf en het platform, is dit aanzienlijk en heeft ook gevolgen voor de gezondheid van de werknemers op de luchthaven. Wat voor de bredere omgeving niet wordt meegerekend is het geheel aan emissies van alle activiteiten en verkeer die verband houden met de luchthavens. Het lijkt verstandig dit ook beter in beeld te brengen en in ieder geval mee te rekenen bij veranderingen van de capaciteit van de luchthavens en het bepalen van de bredere gevolgen daarvan.

4. Geluid

De *bottomline* voor het geluidsdossier vormt het door de minister ingezette beleid, waarin de staat zich houdt aan de geluidswetgeving en zorg draagt voor adequate normstelling en meting en handhaving daarvan. Voorts dient de overheid de belangen van de functie van de luchthaven Schiphol, de mate van hub-functie, af te wegen tegen de geluidshinder en gezondheidsgevolgen voor omwonenden. In het verleden werd daarbij te veel prioriteit aan de hub-functie gegeven, zonder dat goed duidelijk was welk algemeen belang daarmee werd gediend.

5. Ruimtelijke ordening en huisvesting

In de afgelopen decennia prevaleerde de ruimtebehoefte van de luchthaven boven die van andere sectoren in de regio. Zo blokkeert de luchthaven op vele plekken de woningbouw omdat de geluidsnormen op die plekken niet voldoen aan de wet. In dergelijke discussie wordt nooit bekeken of de geluidsdruk niet kan worden verminderd ten behoeve om zo ruimte te creëren voor toekomstige woningen. Ook lukte het Schiphol pas om een geldige Natuurvergunning te verkrijgen nadat het stikstofrechten had onttrokken aan de agrarische sector. Dit laat zien dat impliciet het belang van de kapitaalkrachtige luchtvaart boven dat van individuele boeren gaat.

6. Hub-beleid

Het belang van de hub is vanuit het verdienmodel van KLM evident. Ook draagt het hub-systeem bij aan het realiseren van zoveel mogelijk verbindingen met behulp van één of twee overstappen naast directe verbindingen. Dit is een belangrijke verworvenheid van Schiphol die niet veel andere landen ook hebben. Op dit moment is ongeveer 40% van alle mensen passagiers op een transfer-passagier die alleen maar overstapt. Bij de KLM ligt dit percentage op zo'n 70%. Van belang is om zich te realiseren dat de Nederlandse vakantieganger in verreweg de meeste gevallen direct zonder overstappen naar de bestemming vliegt, zeker binnen Europa.

7. Integraal internationaal reisbeleid

De huidige discussie over alternatieve vervoerwijzen concentreert zich vooral op de trein. De milieuvoordelen van zo'n overstap zijn groot omdat bijvoorbeeld een passagier op de Eurostar slechts enkele kilogrammen emissies veroorzaakt tussen Amsterdam en Londen, terwijl een vlucht gemiddeld op 50 kg komt. Bij elkaar zijn kan ongeveer 10% van de vluchten naar nabijgelegen luchthavens worden vervangen door een bestaande treinverbinding. Beleidsmatig kan men internationaal treinvervoer bevorderen door de markt te helpen betere informatie en boekingsmogelijkheden te ontwikkelen en door een gelijk fiscaal speelveld te creëren, door de Luchtvaartnota uit te breiden tot een internationale reisnota, door de verdere aansluiting van Nederland op het HSL-net voortvarend ter hand te nemen (met name in oostelijke en noordelijke richting).

Toch levert door treinen vervangen bij het huidige reisgedrag (herkomstmarkten en vakantiebestemmingskeuze) nog relatief weinig emissiereductie op omdat het om korte afstanden gaat. Daarom is het belangrijk om alle mogelijkheden voor een ander reispatroon te bekijken. Het gaat dan ten eerste om het verminderen van afstanden bijvoorbeeld door het hoger belasten van lange afstanden. Dat heeft direct forse invloed op de emissies en vergroot het aandeel vluchten onder de 1500 km, een afstand waarop andere vervoerwijzen een rol gaan spelen. Naast de trein, zou daarbij vooral ook naar de eigen auto moeten worden gekeken die sneller een goed alternatief vormt ook op langere afstanden. Bovendien zit de auto op een veel sneller en zekerder transitie pad naar nul-emissies dan de luchtvaart. Elektrische treinen zijn nog aanzienlijk verder op die transitie en bieden vaak al (bijna) nul emissies.

Hoewel in de perceptie alle treinen erg duur zijn, blijkt in de praktijk dat sterk afhankelijk te zijn van waar je heen reist en hoe 'slim' je bent met het boeken. Boekingssystemen voor internationale vluchten zijn veel beter en verder ontwikkeld dan die voor internationale treinreizen. Treinen naar Parijs en Londen zijn niet alleen vaak erg duur maar ook vaak uitverkocht. Daaruit blijkt dat het aanbod veel te gering is voor de marktvraag. In plaats van eindeloos te herhalen dat treinen te duur zijn, zou men beter de discussie aangaan waarom het aanbod (het aantal treinen) niet sneller wordt uitgebreid. Dat heeft een dubbel effect; de concurrentie met het vliegtuig verbetert en het vergroot het aandeel schone reizen in het totaal aantal reizen. Voorts zou er een duidelijker link gelegd kunnen worden tussen het luchtvaartbeleid en het (inkomend) toerismebeleid en met name de (milieu-)gevolgen daarvan. Het NBTC zit al op die lijn, onder andere doordat ze het nul-emissies *Envisioning 2030* scenario (Peeters & Papp, 2023) ondersteunt zou daarbij een 'carbon-check' kunnen hanteren bij de strategische marktontwikkeling van het toerisme naar Nederland en prioriteit kunnen leggen bij het ontwikkelen van meer nabije bronmarkten die over land (per auto, trein, etc.) naar Nederland kunnen reizen.

8. Revolutionaire technologie.

In een sector waarin slechts twee vliegtuigfabrieken de dienst uitmaken, waarbij op dit moment de Europese fabriek een duidelijke voorsprong heeft, vormen beslissingen om nieuwe vliegtuigen op basis van revolutionaire technologie te ontwikkelen een existentieel bedrijfsrisico. Overheden kunnen hierin een rol spelen door alleen nog bij te dragen aan ontwikkeling van revolutionaire technologie, of techniek die de kansen voor revolutionaire techniek verbeteren. Op basis daarvan ligt ondersteuning van nieuwe aandrijving, met name brandstofcellen, elektrische motoren en waterstoftechnologie voor de hand naast inspanningen om propellers of zeer grote elektrisch aangedreven fans, lichtere constructies, sterkere materialen en betere aerodynamische en verbeterde vliegtuigconfiguraties. Maar bijvoorbeeld typische doorontwikkeling van op kerosine werkende motoren ligt dan niet voor de hand net zomin als het ontwikkelen van een nieuwe versie van een conventionele vliegtuigconfiguratie met kerosine-motoren. De ontwikkeling van batterijen ligt niet voor de hand, omdat de kans op succes erg gering is binnen de luchtvaart.

9. Niet-CO₂-effecten

Niet-CO₂-effecten zouden in beginsel in het Nederlandse luchtruim kunnen worden verminderd door bij het kiezen van route en vlieghoogte – met name van Nederland overvliegende vliegtuigen - rekening te houden met de kans op contrail vorming. Een studie naar het effect daarvan (op klimaat, andere emissies, economisch, veiligheid, juridische aspecten) en voor situaties waarin alleen Nederland dit toepast of bijvoorbeeld de gehele EU, verdient aanbeveling. Omdat de CO₂-emissies door deze maatregelen toe zullen nemen, is deze maatregel vooral klimaateffectief in samenhang met de grootschalige invoering van nul-emissies *e-fuels*.

4.5 Kansen Nederlandse industrie

We hebben in Nederland weliswaar geen grote vliegtuigfabriek meer maar wel veel toeleverende industrie:

- Een grote luchtvaartindustrie: conceptueel en detail vliegtuigontwerp, productie.
- Brandstofcel-industrie
- Waterstof technologie en industrie
- *E-fuel* industrie en kennis
- Vormen een spil in het Europese luchtvaartnetwerk met mogelijkheden als marktleider voor distributie van waterstof en *e-fuels*.

De combinatie van al deze takken van relevante industrie biedt veel mogelijkheden. Deze worden nu onvoldoende benut voor het verduurzamen van de luchtvaart. Een passend overheidsbeleid zou hier enerzijds kunnen zorgen voor belangrijke stappen richting duurzame luchtvaart. Maar ook anderzijds zou dit onze concurrentiepositie kunnen versterken.

4.6 Vliegbelasting

Sinds 2021 geldt in Nederland weer een vliegbelasting. Deze is met ingang van 2023 fors verhoogd, van € 7,95 naar € 26,43 per ticket. Het bereik van deze belasting is beperkt tot vertrekkende passagiers ouder dan 2 jaar. Transferpassagiers zijn uitgesloten van deze belasting. Ook passagiers in vliegtuigen met een gewicht van minder dan 8.616 kg zijn uitgesloten van deze belasting. De vorm is een zogenaamde vlaktaks die niet discrimineert tussen soorten

vluchten. In andere landen, zoals Duitsland weegt de gevlogen afstand mee in het tarief. Uitgaande van het principe "de vervuiler betaalt" is dat een eerlijker variant. Koopmans et al. (2023) hebben de effecten op maatschappelijke kosten en baten onderzocht van een afstandafhankelijke vliegbelasting. Het blijkt dat het invoeren daarvan leidt tot minder emissies. Dit wordt met name veroorzaakt doordat ene dergelijke maatregel zal leiden tot minder langeafstandsvluchten. Met name deze vluchten leveren een grote bijdrage aan de CO₂-uitstoot. Deze vluchten bedragen ongeveer 20% van het aantal vluchten maar zijn wel verantwoordelijk voor 80% van de emissies. Door dit zwaarder te belasten zal er een verschuiving naar kortere afstanden plaats gaan vinden. Een additioneel voordeel is dat die kortere afstanden bevoegen worden met kleinere vliegtuigen die minder geluid produceren. Het is wel belangrijk dat ook transferpassagiers belasting gaan afdragen. Ook Emmerink, Burghouwt, and Boonekamp (2024) pleiten hiervoor. Daarnaast is ook het belasten van de lokale hinder (geluid en LTO-emissies) te overwegen. Gegevens om dit uit te voeren zijn in openbare databases van EASA te vinden.

Een dergelijke maatregel zal ook leiden tot verschuivingen in de markt. Met name KLM zal hiervan hinder gaan ondervinden en ook de directe verbondenheid van Nederland zal waarschijnlijk gaan afnemen. Dat kan weer consequenties hebben voor het vestigingsklimaat. Een dergelijke maatregel kan daarom het best geleidelijk worden ingevoerd om schokeffecten te voorkomen.

In de planmaking voor de totstandkoming voor de vliegbelasting was er afgesproken dat de opbrengsten van de vliegbelasting zouden terugvloeien naar de sector om de verduurzaming te versnellen. Dit is in het daarna gesloten regeerakkoord van het Kabinet Rutte 4 bevestigd. Deze maatregel is echter nooit geëffectueerd. Dit vinden wij een gemiste kans. Met een dergelijke regeling zou Nederland belangrijke stappen kunnen maken op het gebied van verduurzaming van de luchtvaart. Daarnaast zou Nederland zich daarmee naast de buurlanden zoals Duitsland, Engeland en Frankrijk kunnen plaatsen die allemaal een structurele regeling hebben voor het versterken van het onderzoek op het gebied van luchtvaart. Wij adviseren om dit plan alsnog uit te gaan voeren.

Referenties

- Airbus. (2023). ZEROe. Towards the world's first zero-emission commercial aircraft. Retrieved 12-11-2021, from <https://www.airbus.com/en/innovation/low-carbon-aviation/hydrogen/zeroe>
- Alonso, J., Catalano, F., Cumpsty, N., Eyers, C. J., Goutines, M., Grönstedt, T., Hileman, J., Joselson, A., Khaletskii, I., Mavris, D., Ogilvie, F., Ralph, D., Sabnis, J., Wahls, R., & Zingg, D. (2018). *Independent expert integrated technology goals assessment and review for engines and aircraft. 2017 independent expert integrated review panel. DRAFT version for review*. Montreal: ICAO.
- Bartels, S., Rooney, D., & Müller, U. (2018). Assessing aircraft noise-induced annoyance around a major German airport and its predictors via telephone survey – The COSMA study. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 59, 246-258.
- Basner, M., Clark, C., Hansell, A., Hileman, J. I., Janssen, S., Shepherd, K., & Sparrow, V. (2017). Aviation Noise Impacts: State of the Science. *Noise Health*, 19(87), 41-50.
- Batteiger, V., DeBreuker, R., Dedoussi, I., Delfs, J., Dinkelacker, F., Elham, A., Garcia, S. J., Friedrichs, J., Goertz, S., & Grewe, V. (2022). Accelerating the path towards carbon-free aviation.
- Becken, S., Mackey, B., & Lee, D. S. (2023). Implications of preferential access to land and clean energy for sustainable aviation fuels. *Science of the Total Environment*, 163883.
- Becken, S., Miller, G., Lee, D. S., & Mackey, B. (2024). The scientific basis of 'net zero emissions' and its diverging sociopolitical representation. *Science of The Total Environment*, 918, 170725.
- Biello, D. (2012). Plants versus Photovoltaics: Which Are Better to Capture Solar Energy? *Scientific American*.
- Bjerregard, L. (2022). Hydrogen is coming. Aftermarket prepares for hydrogen-electric aircraft conversions, 2022, MRO20-22.
- Boeing. (2018). *Current market outlook 2018-2037*. Seattle: Boeing Commercial Airplanes. Marketing.
- Boeing. (2023). *Commercial market outlook 2022-2041*. Seattle: Boeing Commercial Airplanes. Marketing.
- Bouwer, J., Saxon, S., & Wittkamp, N. (2021). *Back to the future? Airline sector poised for change post-COVID-19*. New York: McKinsey.
- Bows-Larkin, A., Mander, S., Traut, M. B., Anderson, K. L., & Wood, F. R. (2016). Aviation and Climate Change—The Continuing Challenge. In Blockley (Ed.), *Encyclopedia of Aerospace Engineering*. New York, NY: John Wiley & Sons, Ltd.
- Bruegelmans, O., Houthuijs, D., & van Poll, R. (2016). *Inventarisatie van gezondheids- en belevingsonderzoeken (1996-2015) rondom (regionale) luchthavens van nationale betekenis* (No. RIVM Briefrapport 2016-0101). Bilthoven: Rijksinstituut voor Milieu en Volksgezondheid.
- Bruegelmans, O., Houthuijs, D., van Poll, R., Hajema, K., & Hogenhuis, R. (2017). Predicting aircraft noise annoyance: Exploring noise metrics other than Lden.
- Brewer, G. D. (1991). *Hydrogen aircraft technology*. London: CRC Press.

- Cames, M., Harthan, R. O., Füssler, J. r., Lazarus, M., Lee, C. M., Erickson, P., & Spalding-Fecher, R. (2016). *How additional is the Clean Development Mechanism? Analysis of the application of current tools and proposed alternatives* (No. CLIMA.B.3/SERI2013/0026r). Berlin: Öko-Institut.
- Dahlmann, K., Grewe, V., Matthes, S., & Yamashita, H. (2023). Climate assessment of single flights: Deduction of route specific equivalent CO₂ emissions. *International Journal of Sustainable Transportation*, 17(1), 29-40.
- Delgado Gosálvez, M., van Ham, J., Joosten, S., Juschus, d., Nieuwerth, G., van Pelt, T., Smit, L., Takken, M., Wang, Y., & Ziere, T. (2018). *Green Flying. Final Report*. Delft: TU Delft.
- Dobruszkes, F., & Efthymiou, M. (2020). When environmental indicators are not neutral: Assessing aircraft noise assessment in Europe. *Journal of Air Transport Management*, 88, 101861.
- Dubois, T., Massy-Beresford, H., Norris, G., Warwick, G., & Batey, A. (2023). Getting Concrete. *Aviation Week & Space Technology*, 94-97.
- EASA. (2017). Notice of Proposed Amendment 2017-01. Implementation of the CAEP/10 amendments on climate change, emissions and noise (No. NPA 2017-01). Cologne: European Aviation safety Agency.
- EASA, EEA, & EUROCONTROL. (2023). *European Aviation Environmental Report 2022* (No. ISBN: 978-92-9210-225-8): European Environmental Agency.
- Eaton, J., Naraghi, M., & Boyd, J. G. (2023). Market capabilities and environmental impact of all-electric aircraft. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 124, 103944.
- EEA. (2018). Aviation and shipping — impacts on Europe's environment TERM 2017: Transport and Environment Reporting Mechanism (TERM) report (No. EEA Report No 22/2017). Copenhagen: European Environmental Agency.
- Eijgelaar, E., Peeters, P. M., de Bruijn, K., & Dirven, R. (2016). *Travelling large in 2015. The carbon footprint of Dutch holidaymakers in 2015 and the development since 2002* (No. ISBN: 978-90-819011-7-8). Breda: NHTV University for Applied Sciences in collaboration with NBTC-NIPO Research.
- Emmerink, R., Burghouwt, G., & Boonekamp, T. (2024). Verhoog belasting op langsafstandsvluchten. *ESB, In press*, 1-3.
- Epstein, A. H., & O'Flarity, S. M. (2019). Considerations for Reducing Aviation's CO₂ with Aircraft Electric Propulsion. *Journal of Propulsion and Power*, 35(3), 572-582.
- Eurocontrol. (2023). Use of sustainable aviation fuels in European States (ECAC) and airports. from <https://www.eurocontrol.int/shared/saf/>
- Europe, A. (2022). Developing an Airport. Net Zero Carbon Roadmap. Summary of existing roadmaps. Brussels: To70.
- Flottau, J. (2023). Big Bets. Airbus targets both new conventional and hydrogen platforms for 2035 even as supply chain constraints will limit its growth for years. *Aviation Week & Space Technology*, 34-37.
- Flottau, J. (2024). No more slipups. Boeing must focus 100% on quality and safety metrics. *Aviation Week & Space Technology*, 123.
- Geraedts, S., Brand, E., Dean, T. R., Eastham, S., Engberg, Z., Hager, U., Langmore, I., McCloskey, K., Ng, J. Y.-H., & Platt, J. C. (2023). A scalable system to measure contrail formation on a per-flight basis. *arXiv preprint arXiv:2308.02707*.
- GGD GHOR. (2022). Belevingsonderzoek geluidhinder en slaapverstoring luchtvaart 2020. Gezondheidsmonitor Volwassenen en Ouderen 2020. Utrecht: GGD GHOR.
- Grebe, S., Faber, J., Juijn, D., Meijer, C., de Vries, M., Heijink, M., & Rooijers, F. (2024). *Carbon budget aviation* (No. 23.230219.146). Delft: CE Delft.
- Grebe, S., & Raphaël, S. (2023). Aviation Non-CO₂ estimator (ANCO). A tool for quantifying the non-CO₂ climate impact of aviation (No. 23.220402.096). Delft: CE Delft.
- IATA. (2020). *World air transport statistics 2020* (No. ISBN 978-92-9264-122-1). Montreal-Geneva-London: International Air transport Association.
- IPCC. (2018). *Global Warming of 1.5 °C. Special Report* (No. ISBN 978-1-5264-6112-). Cambridge UK: Cambridge University Press.
- IPCC. (2022). Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (No. doi: 10.1017/9781009157926): Intergovernmental Panel on Climate Change.
- de Jong, S., Antonissen, K., Hoefnagels, R., Lonza, L., Wang, M., Faaij, A., & Junginger, M. (2017). Life-cycle analysis of greenhouse gas emissions from renewable jet fuel production. *Biotechnology for Biofuels*, 10(1), 64.
- Juijn, D., Blom, M., de Vries, J., Faber, J., & Grebe, S. (2021). *MKBA groei- en krimp Schiphol. Analyse van groei en krimp voor welvaart van Nederland en Schipholregio* (No. 21.210158.095). Delft: CE Delft.
- Kemper, D., Peeters, B., Hooghwerff, J., & Ummels, R. (2022). Aircraft noise policy in surrounding countries in relation to the WHO advice on aircraft noise. The Hague: To70.
- Keuken, M., Moerman, M., Zandveld, P., Henzing, B., Brunekreef, B., & Hoek, G. (2014). Ultrafijn stof rondom Schiphol. In woonwijken van Amsterdam en Amstelveen zijn concentraties van ultrafijn stof verhoogd. *Tijdschrift Lucht*, 6, 8-11.
- Kivits, R., Charles, M. B., & Ryan, N. (2010). A post-carbon aviation future: Airports and the transition to a cleaner aviation sector. *Futures*, 42(3), 199-211.
- Koopmans, C., Behrens, C., Blom, M., van Eck, G., Grebe, S., Jongeling, A., Juijn, D., Konijn, S., Meijer, C., & Heblj, S. (2023). *Schiphol: krimpen of verduurzamen?* (No. SEO-rapport 2023-27). Amsterdam: SEO, CE Delft, NLR, Significance.
- Lee, D., Fahey, D., Skowron, A., Allen, M., Burkhardt, U., Chen, Q., Doherty, S., Freeman, S., Forster, P., & Fuglestedt, J. (2021). The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric Environment*, 244, 117834/117831-117829.
- Lee, D. S., Allen, M. R., Cumpsty, N., Owen, B., Shine, K. P., & Skowron, A. (2023). Uncertainties in mitigating aviation non-CO₂ emissions for climate and air quality using hydrocarbon fuels. *Environmental Science: Atmospheres*.

- Luchtvaart Nederland. (2018). Slim én Duurzaam. Actieplan Luchtvaart Nederland: 35% minder CO₂ in 2030.
- Luchtvaart Nederland. (2022). Actieplan Slim én Duurzaam. Stand van zaken. Update 2022. Amsterdam: NLR.
- Luchtvaart Nederland. (2024). Toekomstbestendige luchtvaart voor Nederland: NLR.
- Luman, R., & Soroka, O. (2024). Global aviation outlook: Air fares climb higher amid the unprecedented recovery of travel. Retrieved 07-02-2024, from <https://think.ing.com/articles/global-aviation-outlook-air-fares-climb-amid-unprecedented-recovery-of-travel/>
- Maertens, S., Grimme, W., Scheelhaase, J., & Jung, M. (2019). Options to Continue the EU ETS for Aviation in a CORSIA-World. *Sustainability*, 11(20), 5703.
- Märkl, R. S., Voigt, C., Sauer, D., Dischl, R. K., Kaufmann, S., Harlaß, T., Hahn, V., Roiger, A., Weiß-Rehm, C., Burkhardt, U., Schumann, U., Marsing, A., Scheibe, M., Dörnbrack, A., Renard, C., Gauthier, M., Swann, P., Madden, P., Luff, D., Sallinen, R., Schripp, T., & Le Clercq, P. (2023). Powering aircraft with 100% sustainable aviation fuel reduces ice crystals in contrails. *EGUsphere*, 2023(preprint), 1-37.
- Mello, F. P. d. (2024). Voluntary carbon offset programs in aviation: A systematic literature review. *Transport Policy*, 147, 158-168.
- Miller, T. R., Chertow, M., & Hertwich, E. (2023). Liquid Hydrogen: A Mirage or Potent Solution for Aviation's Climate Woes? *Environmental Science & Technology*.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2017). *Geluidsbelastingkaarten luchthaven Schiphol voor het gebruiksjaar 2016*. The Hague: Ministerie van Infrastructuur en Milieu.
- Effecten van luchtvaart op lokale luchtkwaliteit (herdruk), 30175, Nr. 1137 C.F.R. (2023a).
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2023b). *Notificatiedocument. Notificatie Europese Commissie Balanced Approach procedure Schiphol*. The Hague: Ministry of Transport and Environment.
- Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. (2021). *WDB Action programme*. The Hague: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.
- Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. (2022). *Hoofdpijnenbrief Schiphol* (No. I E NW/BSK-2022/156292). Den Haag: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.
- Molloy, J., Teoh, R., Harty, S., Koudis, G., Schumann, U., Poll, I., & Stettler, M. E. J. (2022). Design Principles for a Contrail-Minimizing Trial in the North Atlantic. *Aerospace*, 9(7), 375.
- Natuur en Milieufederatie Noord-Holland. (2017). *Versterking stiltegebiedenbeleid Noord-Holland. Eindrapport*. Zaandam: Natuur en Milieufederatie Noord-Holland.
- NLR. (2023). Concentraties zeer zorgwekkende stoffen op en rondom Nederlandse luchthavens (No. NLR-CR-2023-148). Amsterdam: NLR.
- NLR. (2024). CO₂ reduction targets for Amsterdam Airport Schiphol based on remaining IPCC CO₂ budgets up to 2050. Amsterdam: Royal NLR.
- One Planet Network. (2021). The Glasgow declaration: A commitment to a decade of tourism climate action: One Planet Network.
- Peeters, P., Eijgelaar, E., Neelis, I., & Adrichem, C. (2020). *De impact van luchtvaartgeluid op toerisme en verblijfsrecreatie. Verkennend onderzoek voor Zuid-Limburg*: Centre of sustainability, Tourism and Transport.
- Peeters, P., & Papp, B. (2023). Envisioning Tourism in 2030 and Beyond. The changing shape of tourism in a decarbonising world. Bristol: Travel Foundation.
- Peeters, P., Uitbeijerse, G., Geilenkirchen, G., & Peerlings, B. (2021). *Fuel tankering in relation to a Dutch CO₂ ceiling for aviation* The Hague: PBL.
- Peeters, P. M. (2000). *Annex I: Designing aircraft for low emissions. Technical basis for the ESCAPE project*. (No. 00.4404.17). Delft: Centrum voor Energiebesparing en Schone Technologie.
- Peeters, P. M. (2017). Tourism's impact on climate change and its mitigation challenges. How can tourism become 'climatically sustainable'? , Delft University of Technology, Delft.
- Peeters, P. M., Higham, J., Kutzner, D., Cohen, S. A., & Gösling, S. (2016). Are technology myths stalling aviation climate policy? *Transportation Research Part D*, 44, 30-42.
- Peeters, P. M., & Melkert, J. A. (2018). *Factsheet toekomst verduurzaming luchtvaart* (No. juni 2018). Den Haag: Tweede Kamer, de KNAW, NWO, VSNU en de Jonge Akademie.
- Peeters, P. M., & Melkert, J. A. (2021). *Factsheet toekomst verduurzaming luchtvaart: een actualisatie* (No. juni 2018). Den Haag: Tweede Kamer, de KNAW, NWO, VSNU en de Jonge Akademie.
- Peeters, P. M., & Middel, J. (2007). Historical and future development of air transport fuel efficiency. In R. Sausen, A. Blum, D. S. Lee & C. Brüning (Eds.), *Proceedings of an International Conference on Transport, Atmosphere and Climate (TAC); Oxford, United Kingdom, 26th to 29th June 2006* (pp. 42-47). Oberpfaffenhoven: DLR Institut für Physic der Atmosphäre.
- Pipistrel. (2024). Velis Electro, electric pioneer. Retrieved 20-03-2024, from <https://www.pipistrel-aircraft.com/products/velis-electro/>
- van Poll, R., Reedijk, M., Hoekstra, J., Swart, W., van de Kastelee, J., & Houthuijs, D. (2023). *Relaties vliegtuiggeluid – hinder en slaapverstoring 2020. Civiele en militaire vliegvelden in Nederland* (No. 10.21945/RIVM-2022-0007). Bilthoven: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu RIVM.
- Rapoza, A., Sudderth, E., & Lewis, K. (2015). The relationship between aircraft noise exposure and day-use visitor survey responses in backcountry areas of national parks. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 138(4), 2090-2105.
- Rechtbank Den Haag. (2024). *Uitspraak in de zaak RBV tegen de Staat* (No. ECLI:NL:RBDHA:2024:3734).
- Riley, E. A., Gould, T., Hartin, K., Fruin, S. A., Simpson, C. D., Yost, M. G., & Larson, T. (2016). Ultrafine particle size as a tracer for aircraft turbine emissions. *Atmospheric Environment*, 139, 20-29.
- Schäppi, R., Rutz, D., Dähler, F., Muroyama, A., Haueter, P., Lilliestam, J., Patt, A., Furler, P., & Steinfeld, A. (2022). Drop-in fuels from sunlight and air. *Nature*, 601(7891), 63-68.
- Schiphol. (2023). Kiezen voor een stiller, schoner en beter Schiphol. Meer balans met de leefomgeving. Retrieved 15-02-2024, from <https://www.schiphol.nl/nl/schiphol-group/pagina/kiezen-voor-een-stiller-schoner-en-beter-schiphol/>

- Schmidt, P., & Weindorf, W. (2016). Power-to-Liquids. Potentials and Perspectives for the Future Supply of Renewable Aviation Fuel. Dessau-Roßlau: Umwelt Bundesamt.
- Schmidt, P. R., Weindorf, W., Failer, S., Astono, Y., & Ullmann, A. (2023). E-SAF: Techno-Economics of PtL and PtH2.
- Simons, D. G., Besnea, I., Mohammadloo, T. H., Melkert, J. A., & Snellen, M. (2022). Comparative assessment of measured and modelled aircraft noise around Amsterdam Airport Schiphol. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 105, 103216.
- Simorgh, A., Soler, M., González-Arribas, D., Matthes, S., Grewe, V., Dietmüller, S., Baumann, S., Yamashita, H., Yin, F., Castino, F., Linke, F., Lühns, B., & Meuser, M. M. (2022). A Comprehensive Survey on Climate Optimal Aircraft Trajectory Planning. *Aerospace*, 9(3), 1-32.
- Snijders, T. A., & Melkert, J. A. (2011 of Conference). Evaluation of Safety, performance and emissions of Synthetic Fuel Blends in an Cessna Citation II. Paper presented at the 3AF/AIAA Aircraft noise and emissions reduction symposium, , 25-27 October, 2011, Marseille, France.
- Snyder, C. (1998 of Conference). Zero-emissions aircraft? Scenarios for aviation's growth: opportunities for advanced technology. Paper presented at the NASA Environmental Compatibility Research Workshop III, Monterey, CA.
- Snyder, C. A., Berton, J. J., Brown, G. V., Dolce, J. L., Dravid, N. V., Eichenberg, D. J., Freeh, J. E., Gallo, C. A., Jones, S. M., & Kundu, K. P. (2009). Propulsion Investigation for Zero and Near-Zero Emissions Aircraft. *NASA TM-215487*.
- Suzan, S. (2023). Biofuels: from unsustainable crops to dubious waste? Brussels: T&E.
- Terwel, R., & Kerkhoven, J. (2017). Climate-neutral Aviation with Current Engine Technology: The Take-off of Synthetic Kerosene Production in the Netherlands: Topconsortium voor Kennis en Innovatie Energie & Industrie.
- The Royal Society. (2023). Net zero aviation fuels: resource requirements and environmental impacts. POLICY BRIEFING (No. ISBN: 978-1-78252-632-2). London: The Royal Society.
- Tourism Panel on Climate Change. (2023). *Tourism and Climate Change Stocktake 2023*. Malta: Tourism Panel on Climate Change,.
- Visser, S., & Hofman, T. (2022). *Footprint luchtvaart Schiphol op luchtkwaliteit* (No. RIVM-briefrapport 2022-0186). Bilthoven: RIVM.
- de Vries, R., Wolleswinkel, R. E., Hoogreef, M., & Vos, R. (2024). *A New Perspective on Battery-Electric Aviation, Part II: Conceptual Design of a 90-Seater*. Paper presented at the AIAA SCITECH 2024 Forum, Orlando (FL).
- Werij, H., van de Sanden, R., & Hoeijmakers, H. (2022). *Second opinion op factsheet en technische briefing: Toekomst verduurzaming luchtvaart* (No. I E NW/BSK-2022/28143). The Hague: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.
- Wolleswinkel, R. E., de Vries, R., Hoogreef, M., & Vos, R. (2024 of Conference). A New Perspective on Battery-Electric Aviation, Part I: Reassessment of Achievable Range. Paper presented at the AIAA SCITECH 2024 Forum, Orlando (FL).

Disclaimer: De Jonge Akademie, KNAW, NFU, NWO, TNO en UNL bemiddelen tussen parlementaire kennisvraag en wetenschappelijk kennisaanbod. De informatie in het kader van Parlement en Wetenschap is afkomstig van vooraanstaande wetenschappers, maar niet onderworpen aan peer review en niet door de wetenschapsorganisaties geverifieerd.

