



# Parlement en Wetenschap

## TOEKOMST VERDUURZAMING LUCHTVAART

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

Auteurs: dr. Ing. Paul Peeters (lector Academie voor Toerisme, NHTV internationaal hoger onderwijs Breda), ir. Joris Melkert BBA (docent luchtvaarttechniek, Faculteit Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek, TU Delft).

juni 2018

### Inleidend

In het kader van de versterking van haar kennispositie heeft de vaste commissie voor Infrastructuur en Waterstaat van de Tweede Kamer verzocht een wetenschappelijke factsheet op te stellen over de actuele ontwikkelingen en prognose van technologische ontwikkelingen en innovatie op het gebied van verduurzaming van de luchtvaart.

### Centrale vraagstelling

De Kamer heeft behoefte aan een actueel inzicht in de stand van zaken en de prognose van technologische ontwikkelingen en innovatie op het gebied van verduurzaming van de luchtvaart (klimaat, luchtkwaliteit en geluid). Daarbij zou zij zowel inzicht willen 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.

### Hoofdboodschappen

1. Bij een ongewijzigd trendscenario zal de luchtvaart ergens tussen 2070 en 2100 alle emissies die volgens de doelstelling van het Parijse klimaatakkoord nog mogelijk zijn opsouperen. Daarna zijn dan negatieve emissies nodig.
2. Internationale maatregelen zijn vooralsnog onvoldoende ambitieus en effectief om luchtvaart-emissies wereldwijd binnen de Parijse doelstelling te kunnen houden.
3. Wat betreft geluid blijkt dat technologie de ontwikkeling van het aantal vliegbewegingen op Schiphol weet te compenseren, maar dat de ervaren hinder de afgelopen paar jaar toegenomen lijkt te zijn en dat bijvoorbeeld stiltegebieden onder mogelijk zwaar druk staan door vliegtuigeluid. Wat betreft luchtkwaliteit blijkt uit zowel Nederlands als internationaal onderzoek vooral ultrafijnstof een potentieel groot probleem voor de volksgezondheid op te leveren.
4. Alhoewel vliegtuigen continu beter worden, worden er geen technische verbeteringen voorzien die het klimaatprobleem bijtijds op kunnen lossen.
5. Luchtvaart kan mogelijk wel wereldwijd binnen de Parijse doelemissiepaden blijven op basis van een zwaar pakket aan maatregelen bestaande uit verminderde groei, alle beschikbare technologie, de planmatige invoering van synthetische e-fuels en integratie van luchtvaart in alle langeafstandsmobiliteit.
6. Afgezet tegen de wereldbevolking vliegt de Nederlander significant meer dan de gemiddelde wereldburger.
7. Er is geen eenvoudige manier om de luchtvaart duurzaam te maken; een 'silver bullet' ontbreekt. Maatregelen kunnen zijn:
  - Significant meer onderzoek en ontwikkeling
  - Het vervangen van oude vliegtuigen door schonere en stillere vliegtuigen is vooral effectief voor geluid en luchtkwaliteit.
  - Betere operationele procedures (inclusief herindelingsluchtruim 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.
- Afhankelijk van het gehele maatregelenpakket, de groei van de wereldwijde luchtvaart sterk afremmen of tot stilstand brengen.

## 1. Inleiding

Wereldwijd is sprake van aanhoudende groei van de luchtvaart. Ook het aantal vluchten van en naar Nederlandse luchthavens laat de afgelopen jaren weer een groei zien die vergelijkbaar is met de rest van de wereld. Deze groei veroorzaakt een steeds groter spanningsveld met duurzaamheid. Bij Schiphol loopt de groei inmiddels aan tegen de grenzen van de afgesproken capaciteit van 500.000 vluchten per jaar. Op middellange termijn vergt voortgaande groei van Schiphol grote infrastructurele investeringen en een forse aanpassing van de indeling van het Nederlandse luchtruim. Al was het alleen maar voor de handhaving van het huidige veiligheidsniveau. De 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.

Wereldwijd waren er in 2017 in totaal 74 miljoen vliegtuigbewegingen in de commerciële luchtvaart en werden ongeveer 4,1 miljard passagiers vervoerd. In Nederland waren dat 646 duizend vliegtuigbewegingen en 76,2 miljoen passagiers. Dat is 0,87% van het wereldtotaal in vliegtuigbewegingen en 1,86% van het aantal passagiers wereldwijd. Afgezet tegen de wereldbevolking vliegt de Nederlander daarmee significant meer dan de gemiddelde wereldburger.

### 1.1. Vraagstelling

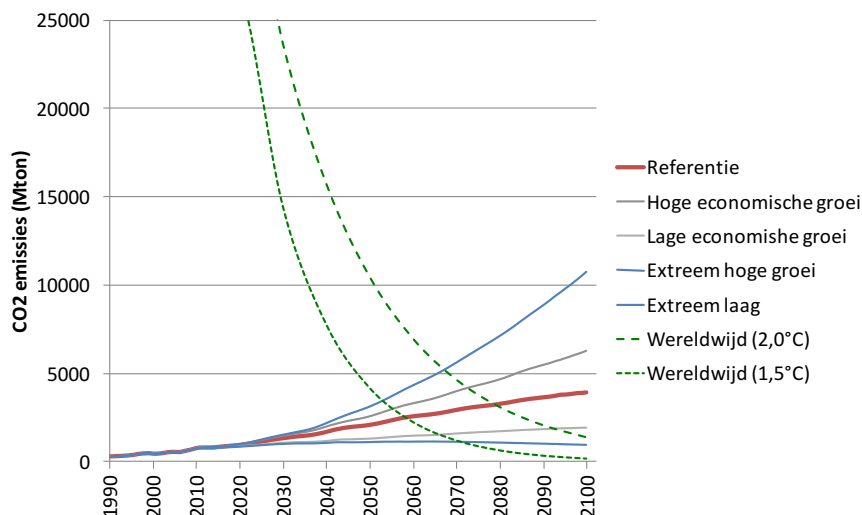
De Kamer heeft behoefte aan een actueel inzicht in de stand van zaken en de prognose van technologische ontwikkelingen en innovatie op het gebied van verduurzaming van de luchtvaart (klimaat, luchtkwaliteit en geluid). Daarbij zou zij zowel inzicht willen hebben in (de verwachte) technische mogelijkheden 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 de vakliteratuur als het over kosten en baten gaat, geven we voornamelijk enkele (veelal kwalitatieve) indicaties voor mogelijke kosten en nemen liever geen verantwoordelijkheid voor bedrijfseconomische uitspraken. Deze laatste hangen ook in sterke mate af van flankerend beleid.

### 1.2. Duurzaamheidsproblemen van de luchtvaart

#### *Klimaatverandering*

Wereldwijd draagt luchtvaart 2,5% bij aan CO<sub>2</sub> emissies en gemiddeld 4,9% aan klimaatverandering, waarbij dat laatste getal ergens tussen 2-14% wordt geschat (Lee et al., 2010). 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 het Parijse klimaatakkoord ergens tussen het jaar 2070 en 2090, wat betekent dat daardoor de doelen van het Parijse akkoord onhaalbaar worden (Peeters, 2017). Een probleem bij klimaatverandering is dat de veroorzaker (emissies van broeikasgassen) geen directe relatie heeft met de klimaatverandering zelf (toename van de temperatuur). Die laatste is alleen direct gerelateerd aan de totale hoeveelheid CO<sub>2</sub> in de atmosfeer. Wanneer dus de emissies met 10% omlaag gaan, dan vertraagt dat het tempo van klimaatverandering met ongeveer 10%, maar het klimaat blijft veranderen. De Parijse doelstellingen vergen dat uiteindelijk de broeikasgasemissies nul worden of deels zelfs negatief (door opslag).



Figuur 1: Ontwikkeling van de lange-termijn wereldwijde CO<sub>2</sub> emissies van luchtvaart en de in de twee Parijse doelscenario's afgesproken emissies voor alle sectoren samen. Bron: (Peeters, 2017), vergelijk ook (Anderson et al., 2007; Owen et al., 2010).

### Geluidhinder

In 2015 ondervonden 4,1 miljoen inwoners van de EU een geluidsbelasting van meer dan 55 dB L<sub>den</sub> (dag, avond en nacht gewogen) als gevolg van de luchtvaart (EEA, 2018). In Nederland werden in 2016 zo'n 48.500 mensen door meer dan 55 dB L<sub>den</sub> belast als gevolg van de luchthaven Schiphol (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2017). 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). Op basis van nog lopend onderzoek bij de TU Delft lijkt het erop dat in Nederland de geluidsemissie rond Schiphol het afgelopen decennium inderdaad zijn gedaald, terwijl het aantal vliegbewegingen tot twee jaar geleden gelijk is gebleven en alleen de afgelopen jaren is toegenomen. Dat is in lijn met de Europese bevindingen. Het is de verwachting dat na de zomer de eerste resultaten van het onderzoek van TU Delft beschikbaar zullen komen.

Een meestal weinig belicht aspect van vliegtuiggeluid vormt de invloed op de geluidsbeleving van gebieden zoals 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 et al., 2015).

Tenslotte is het goed om te bedenken dat de relatie tussen de geluidsdruk gemeten in dB niet zo'n sterk verband heeft met de ervaren hinder. Zo vinden Breugelmans et al. (2016) dat het percentage van de bevolking dat ernstige hinder ervaart bij 55 dB L<sub>den</sub> 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<sub>den</sub>, de limiet voor stiltegebieden.

### 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 NO<sub>x</sub> 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 aantoonen 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. Nader onderzoek naar deze kwestie loopt nog enkele jaren (RIVM, 2017). Uit internationaal onderzoek blijkt echter al duidelijk dat de concentraties van ultrafijnstof met een factor 3-5 hoger kunnen liggen onder de aanvliegeroutes van vliegtuigen vergeleken met gebieden die niet onder zo'n aanvliegeroute liggen maar een vergelijkbare verkeerssituatie op de grond kennen (Riley et al., 2016). Onze conclusie uit een en ander is dat vliegtuigen potentieel een forse invloed op de emissies van fijnstof en de luchtkwaliteit en gezondheid van mensen kunnen hebben.

## 2. Technologische ontwikkelingen

### 2.1. Historisch perspectief

Als je de ontwikkelingen in de luchtvaart bekijkt sinds de invoering van de straalmotor medio jaren 50 dan zijn die ronduit spectaculair. Zowel het brandstofverbruik als de geluidsproductie per passagiers-kilometer zijn substantieel gedaald. Figuur 2 in paragraaf 4.1 geeft de ontwikkeling van de benodigde energie (=brandstofverbruik) voor het vervoeren van één stoel over een afstand van één kilometer. Het brandstofverbruik is één op één gekoppeld aan de uitstoot van CO<sub>2</sub>. As men rekent aan de uitstoot van CO<sub>2</sub> van het vervoer van passagiers per vliegtuig en het vervoer per auto en daarbij de gemiddelde bezettingsgraad voor lange afstanden in ogenschouw neemt dan zijn vliegtuigen per afgelegde kilometer inmiddels niet veel minder zuinig als de gemiddelde auto. Het grote verschil tussen auto's en vliegtuigen is echter dat mensen met vliegtuigen, door de hoge snelheid, veel grotere afstanden afleggen, waardoor de emissies per reis voor de gemiddelde autovakantie 56 kg CO<sub>2</sub> veroorzaakt en de gemiddelde vliegvakantie 820 kg (Eijgelaar et al., 2016).

Wat betreft geluid zijn de vliegtuigen in de loop van de tijd ook significant stiller geworden. Sinds de introductie van de straalmotor zijn vliegtuigen ongeveer 25 dB stiller geworden. De gebruikte decibelschaal is een logaritmische schaal. Dat betekent dat elke vermindering van 3 dB een steeds weer een halvering van het geluid betekent.

Ook nu nog is elke nieuwe generatie vliegtuigen weer in de orde van 3 dB stiller dan de vorige generatie. Bijvoorbeeld zien we dat de nieuwe A320NEO-vliegtuigen ongeveer 4 dB stiller zijn dan oudere generaties A320 vliegtuigen. Dat zien we in de praktijk ook terug op Schiphol. Door voortdurende vlootvernieuwing neemt de netto geluidsproductie nog steeds af.

### 2.2. Fabrikanten

Het aantal vliegtuigfabrikanten is de afgelopen decennia drastisch gereduceerd. Voor grote passagiersvliegtuigen (>100 passagiers) zijn alleen Boeing en Airbus over gebleven. De orderportefeuilles van beiden zijn voor ongeveer de komende zeven jaar gevuld. Het portfolio van vliegtuigen dat wordt aangeboden is voor beiden ruwweg 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 veiligheidsniveau's. 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 mogelijk een middellange afstandsvliegtuig van Boeing (MoM, Middle-of-Market). Voor de wat kleinere vliegtuigen (orde van grootte 100 passagiers) zijn er ook maar twee grote fabrikanten over gebleven, Embraer en Bombardier. 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 maar is voorlopig nog niet commercieel leverbaar omdat het certificatieproces nog niet is afgerond.

### 2.3. 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 daarom ook niet eenvoudig en relatief duur elk jaar de nieuwste vliegtuigen te kunnen kopen.

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 is de gemiddelde winst 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.

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.

## 3. Bestaand beleid (juridische aspecten)

De ICAO ontwikkelt internationaal regelgeving voor de veiligheid en de milieuprestaties van vliegtuigen. Deze zijn in normen vastgesteld en elk vliegtuig en/of motortype dient te worden gecertificeerd en daarbij aan te tonen binnen deze normen te blijven. Aan de certificatieprocedure voor milieunormen worden dezelfde hoge eisen gesteld als voor vliegveiligheid. De werkwijze van ICAO is dat via CAEP (Civil Aviation Environmental Project) drie werkgroepen normen op stellen voor geluid (WG-1), motoremissies (WG-2) en CO<sub>2</sub> uitstoot (WG-3). Dit gebeurt in samenwerking tussen industrie, overheden, luchtvaartbelangenorganisaties en maatschappelijke organisaties (met name ICSA, International Coalition for Sustainable Aviation). Het niveau van de norm wordt steeds zodanig gekozen dat deze het meest kosteneffectief is: de grootste vermindering van milieubelasting per vliegtuig of motor per € kosten voor de industrie. Een andere voorwaarde is dat de norm niet *'technology forcing'* is, oftewel niet een bepaalde nieuwe technologie voor alle fabrikanten afdwingt.

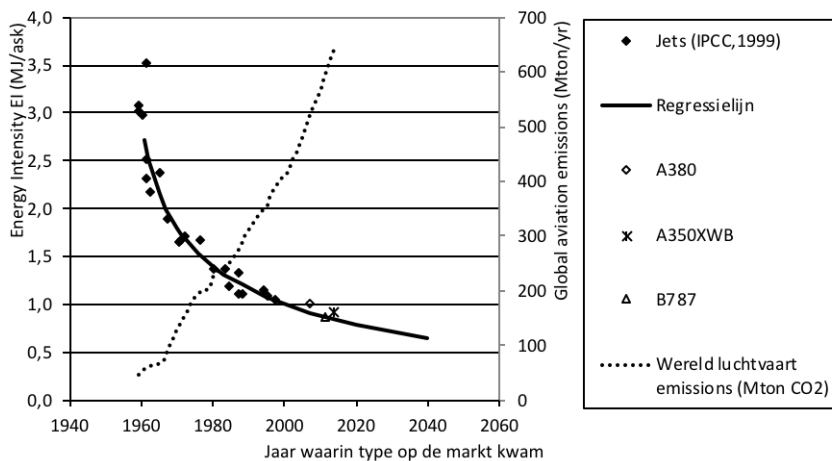
Deze normen worden elke 5 tot 10 jaar aangescherpt, afhankelijk, van de technologische vooruitgang. Individuele landen, voor Nederland via de Europese luchtwaardigheidsautoriteit EASA, nemen deze regels over en kunnen ze tot op zekere hoogte aanscherpen. De nieuwste ronde aanscherpingen van geluid en motoremissies en de introductie van een PM norm (deeltjes) en een CO<sub>2</sub> norm voor de EU worden 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 CO<sub>2</sub> 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. De ICAO maatregelen bestaan eruit dat luchtvaartmaatschappijen vanaf ongeveer 2023 vrijwillig en vanaf 2028 verplicht de totale emissies niet meer zullen laten groeien. Dit kan o.a. door de inzet van schonere vliegtuigen. Als dit niet lukt door de inzet van betere vliegtuigen dan zullen de extra CO<sub>2</sub> emissies boven het niveau van 2020 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 CO<sub>2</sub> emissies hebben, maar mogelijk meer op geluid en luchtkwaliteit.

Om een bewijs van luchtwaardigheid te krijgen moeten vliegtuigen niet alleen voldoen aan technische eisen maar moet ook het geproduceerde geluid beneden een bepaald vastgelegd niveau blijven. Hiervoor is internationale regelgeving vastgelegd door de ICAO. 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. Die norm zal leidend worden voor de komende jaren. 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 dus stillere 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 weinig 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.

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 de omwonenden. Het uitvoeren van deze procedures is ook weer afhankelijk van de beschikbare ruimte in de lucht.



Figuur 2: Ontwikkeling van de brandstofefficiëntie van vliegtuigtypen 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% beter dan de voorgaande generatie. Ook nu nog worden vliegtuigen gemiddeld 1-1,5% per jaar beter in de zin van brandstofverbruik en dus emissies. Het grote probleem is dat dit echter niet genoeg is, zoals Figuur 2 duidelijk illustreert. Dat komt door snelle groei van de luchtvaart met 4-5% per jaar. Een groei van 5% per jaar betekent een verdubbeling elke 15 jaar. 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 et al., 2016; Peeters, 2017).

## 4.2. Revolutionaire techniek

### *Andere lay-out 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 waar in de passagiers en de bemanning plaats nemen. Aan deze romp worden twee vleugels bevestigd die de benodigde draagkracht leveren en ook dienen als opslagplaats voor de brandstof. 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 heel erg ver geoptimaliseerd en voldoet zeer goed. Er wordt echter ook al heel veel 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. Er zijn voordelen aan te wijzen voor een dergelijke configuratie. 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. Daar komt bij dat waarschijnlijk de belangrijkste reden voor het niet invoeren van een dergelijk nieuwe configuratie is dat het ontwikkelen van een dergelijk nieuw vliegtuig grote economische risico's met zich mee zal brengen. Met de huidige kleine marges voor de sector en de goed gevulde orderportefeuilles van de fabrikanten is er geen enkele fabrikant die dit risico zal nemen. Een dergelijk ontwikkelingsprogramma zal namelijk naar alle waarschijnlijkheid enkele tientallen miljarden euro's kosten. Een zelfde redenering geldt voor allerlei andere mogelijke configuraties.

### *Zonnevliegtuigen*

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 m<sup>2</sup> 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 et al. (2016) over dergelijke ‘technologische mythes’.

### *Elektrisch vliegen*

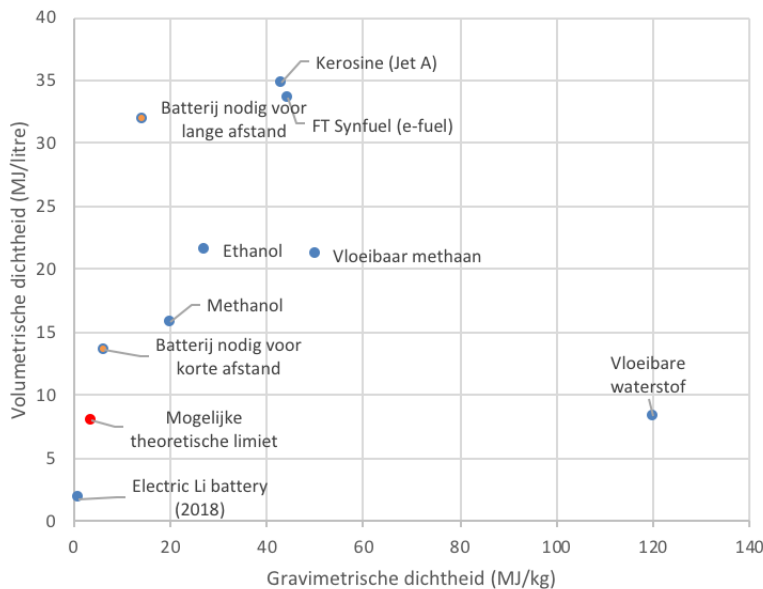
Elektrisch vliegen is een van de mogelijke alternatieven die wordt onderzocht en ook al op beperkte schaal wordt uitgevoerd. Het kritieke punt hierbij is de accu. Voor de luchtvaart spelen niet alleen de veiligheid en de kosten een rol maar zeer zeker ook de zogenaamde energiedichtheid. De energiedichtheid zegt hoeveel energie er kan worden opgeslagen in een kilo accu. Op dit moment kan er ongeveer 50 keer minder energie in een kilo accu worden opgeslagen dan in een kilo kerosine (zie Figuur 3). De verwachting is dat batterijen nog geruime tijd zullen verbeteren maar dat daar mogelijk een limiet op zit na een factor drie<sup>1</sup>. Wel is het zo dat de elektrische motor twee tot drie keer zo

<sup>1</sup> Zie <https://www.quora.com/Is-it-true-that-battery-energy-density-improves-5-8-per-year-Does-this-represent-an-average-or-is-it-a-consistent-trend-each-year-Do-these-improvements-increase-the-cost-What-has-been-the-trend-if-any-regarding-energy-to-weight-ratio>.

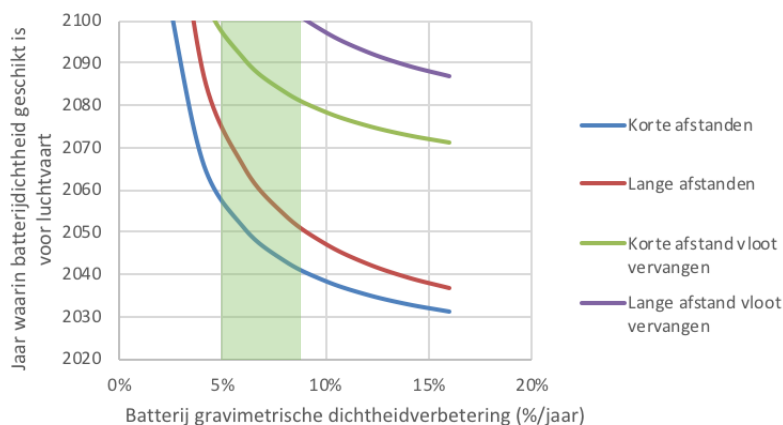
efficiënt is vergeleken met een turbinemotor en daardoor is ongeveer een derde van de energie in de batterij nodig. Daar komt helaas weer bij dat het gewichtsvoordeel (en dus ook een voordeel in benodigde energie) dat een vliegtuig ervaart gedurende de vlucht door de verbranding van kerosine, niet geldt voor vliegtuigen met accu's. De accu's 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 derhalve een accu nodig is die 7 keer meer energie per kg bevat dan de huidige generatie accu's; voor lange afstanden is dat zo'n 15 keer. Deze benodigde verbeteringen maken elektrisch vliegen voor de grote luchtvaart technisch gezien voorlopig onmogelijk. Figuur 4 laat zien dat een volledige vervanging van de vloot voor korte afstanden niet eerder dan 2080 is te voorzien en voor lange afstanden pas rond 2100.

Voor de kleine luchtvaart is elektrisch vliegen wel een oplossing voor een emissievrije toekomst. Elektrisch vliegen zal overigens niet stil zijn omdat de propeller van het vliegtuig een aanzienlijke hoeveelheid geluid zal produceren.



Figuur 3: Overzicht van de energiedichtheid met betrekking tot gewicht en volume voor kerosine, alternatieve brandstoffen en batterijen (huidige batterij gebaseerd op Zhang & Yao, 2015).



Figuur 4: implementatie van elektrisch vliegen als functie van het tempo waarin de dichtheid van batterijen groter wordt. Historische tempo varieerde tussen 5% en 8% per jaar (de groene band).



Op dit moment wordt door Airbus, Rolls-Royce en Siemens ook gewerkt aan een hybride oplossing. Daarbij wordt voor 90% op kerosine gevlogen die wordt gebruikt om elektriciteit op te wekken om elektromotoren aan te drijven. Het effect ervan is dus niet heel groot, maar de je hoeft niet decennia te wachten tot de juiste accu er is. De besparing op de emissies is echter beperkt.

Nog een andere optie is om de accu te vervangen door brandstofcellen gevoed met waterstof. Ook dit is mogelijk met bestaande technologie en kan dus decennia eerder worden gerealiseerd dan batterij-vliegtuigen.

### 4.3. Alternatieve brandstoffen

De standaard brandstof in de luchtvaart is op dit moment kerosine. Dit is een brandstof die een beetje vergelijkbaar is met diesel. De hoeveelheid energie die in een kilogram kerosine zit is erg 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 huidig nadeel van kerosine is dat er relatief veel zwavel in zit. Deze zwavel is o.a. een bron van ultrafijn stof. Het RIVM is momenteel bezig met een langjarig onderzoek naar de invloed van ultrafijn stof op de gezondheid. Een probleem met veel alternatieven zoals ethanol, methanol en vloeibaar methaan, is dat hun energiedichtheid lager is dan van kerosine (zie Figuur 3). 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 maar juist veel lager voor volume. Waterstof kan naar alle waarschijnlijkheid ook gebruikt worden in de huidige generatie motoren (Kivits et al., 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, dat het gekoeld bewaard moet worden en dat het licht ontvlambaar is.

Om te voorkomen dat alles moet worden aangepast is het ook mogelijk zogenaamde “drop-in” brandstoffen toe te passen. Deze brandstoffen kunnen in het bestaande systeem van vliegtuigen en de daarbij behorende logistieke operatie gebruikt worden. Deze drop-in brandstoffen zijn gelijk aan kerosine of lijken daar zo sterk op dat dit gebruik is toegestaan. Mogelijke vormen hiervan zijn bio-kerosine, 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 CO<sub>2</sub>-uitstoot er niet door zal verminderen. Het voordeel is wel dat door het omzettingproces 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. Op dit moment is het wettelijk toegestaan om tot 50% van deze brandstoffen bij te mengen bij gewone kerosine. Het probleem op dit moment is de beperkte beschikbaarheid en de hogere kosten.

Bio-kerosine en ander biobrandstoffen zijn technisch gezien vergelijkbaar met GtL en CtL. Het voordeel van deze type brandstoffen is dat ze wel daadwerkelijk de CO<sub>2</sub>-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 6000 liter/ha (algen 60.000). Daar komt bij dat de rest de netto uitstoot van CO<sub>2</sub> lang niet omlaag gaat maar dat deze uitstoot nog steeds gebeurt op kruishoogte terwijl de opname van CO<sub>2</sub> plaats vindt op zeeniveau.

Een veelbelovend nieuw alternatief is Power-to-Liquid brandstoffen (Schmidt & Weindorf, 2016; Terwel & Kerkhoven, 2017). Hierbij wordt kerosine gemaakt door CO<sub>2</sub> uit een industriële bron (CCU; carbon capture and usage) of rechtstreeks uit de lucht te halen en de koolstofatomen daaruit los te maken. Het chemische proces is ruwweg vergelijkbaar met de productie van GtL en CtL maar de bron van de koolstofatomen is anders. De benodigde energie voor dit proces moeten uit duurzame bronnen (wind, zon, waterkracht) gehaald worden om de CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> bijna 100% (Schmidt & Weindorf, 2016). Grootste nadeel is dat de kosten tussen de twee en zes keer hoger zijn dan die van fossiele kerosine. Nadelen zijn ook hier weer de beschikbaarheid en de kosten. Er is een initiatief in Nederland om op basis van CCU een proef te gaan doen (Terwel & Kerkhoven, 2017).

## 5. Antwoorden op de gestelde detailvragen

### 5.1. Technologische aspecten

- *Wat is de stand van zaken van de technologische ontwikkelingen en innovatie op het gebied van verduurzaming van de luchtvaart? Is momenteel sprake van een nieuwe generatie duurzamere vliegtuigen die op termijn kan worden ingezet?*

In beginsel is elke nieuwe generatie vliegtuigen zuiniger dan de generatie die ze vervangt. Dat komt niet alleen omdat brandstof een fors deel van de operationele kosten van een vliegtuig vormen, zo'n 20-30%, maar ook omdat de vervoerprestaties van een vliegtuig (de zogenaamde ‘payload-range’), alsook de start- en landingsbaanlengte en derhalve het aantal luchthavens waar het vliegtuig gebruik van kan maken, in hoge mate afhangen van de brandstof efficiency. Dus het antwoord is in beginsel ‘ja’. Dat neemt niet weg dat de historisch sterke verbetering van efficiency, er niet voor heeft gezorgd dat het totale brandstofverbruik is afgenomen; in tegendeel, deze is juist sterk gegroeid, maar zou uiteraard nog harder gegroeid zijn zonder de voortdurende technische verbeteringen. Dit geldt ook in grote lijnen voor geluidhinder en luchtkwaliteit.

- *Welke technologische ontwikkelingen worden de komende jaren verwacht?*

Naast de gangbare, evolutionaire ontwikkelingen in alle aspecten van een vliegtuigontwerp, aerodynamica, constructie, motortechniek met name hogere drukken en temperaturen in turbines, geared fans en dergelijke), die gemiddeld tot een ongeveer 1% per jaar verbetering leiden, is de grootste verbetering voor CO<sub>2</sub> emissies te verwachten van alternatieve brandstoffen en met name van e-fuels via het power-to-liquids proces. Voor revolutionaire nieuwe vliegtuigontwerpen (nieuwe vliegtuigconfiguraties, zeer hogesnelheidspropellers, elektrische vliegtuigen en waterstof-fuel cell-elektrische vliegtuigen), bestaat al decennia lang belangstelling, maar de verwachting is dat deze, zelfs als ze nu serieus in ontwerp worden genomen, wat nog niet het geval is, de komende decennia geen significante invloed zullen hebben op de gemiddelde vlootprestaties.

- *Hoe pakken deze technologische ontwikkelingen uit voor de korte- (continentaal) en de lange afstandsvluchten (intercontinentaal)?*

Historisch gezien ontwikkelden lange-afstandsvliegtuigen zich iets sneller dan die voor korte afstanden en de verwachting is dat dat wel zo zal blijven.

- *Welke internationale 'best practices' op het gebied van verduurzaming van de luchtvaart kunnen in de Nederlandse context worden gerealiseerd?*

Wanneer de luchtvaart geïsoleerd wordt bekeken, dan zijn er relatief weinig mogelijkheden voor verduurzaming op het gebied van brandstofefficiency en klimaatverandering. De beste optie is dan om vanuit Nederland de ontwikkeling van e-fuels voortvarend ter hand te nemen. In een eerste fase kan daarbij worden voortgebouwd op een CCU (Carbon capture and usage) strategie, bijvoorbeeld voortbouwend op een bestaand initiatief van Hoogovens en de luchtvaart sector (Terwel & Kerkhoven, 2017). Voor geluid en luchtkwaliteit zijn ook geen doorbraken te verwachten. Sterker nog, bijvoorbeeld propfan (en elektrisch vliegen) zouden ook tot meer lawaai kunnen leiden; elektrisch vliegen is wel goed voor luchtkwaliteit rond luchthavens.

- *Welk besparingspotentieel hebben de technologische ontwikkelingen voor de verschillende emissies (luchtkwaliteit, klimaat, geluid en brandstofverbruik)? Hoe verhoudt dat zich tot de huidige emissies en de prognoses hiervan?*

Voor klimaat/CO<sub>2</sub> emissies en brandstofverbruik: de vanuit de sector en binnen de huidige markt te verwachten verbeteringen zullen slechts een kwart van de huidige groei op kunnen vangen, met andere woorden, de emissies groeien met circa 75% van de volumegroei. Het huidige internationale beleid is naar verwachting niet in staat daar substantieel verandering in te brengen.

Niet-CO<sub>2</sub> klimaateffecten: deze zijn voor een belangrijk deel te ondervangen door vliegroutes aan te passen. Dat gaat echter ten koste van extra CO<sub>2</sub> emissies (5-10%) en ook iets hogere operationele kosten (2-3%). Onder internationale afspraken is dat dus goed mogelijk. Wat daarbij van belang is, is dat de extra CO<sub>2</sub> emissies een lange termijn bijdrage (vele generaties) zullen leveren aan klimaatverandering die niet, of slechts met zeer grote inspanningen – versneld terug te draaien zal zijn. De niet-CO<sub>2</sub> effecten zijn van kortdurende aard (dagen tot maximaal zo'n tien jaar), waardoor het de vraag is of die aangepakt moeten worden zolang dat extra CO<sub>2</sub> oplevert.

De genoemde e-fuels hebben een groot besparingspotentieel. Bij gebruik CCU is dat tot 50%, bij een systeem waarin atmosferische CO<sub>2</sub> wordt gebruikt tot bijna 100%. In een toekomst gebaseerd op e-fuels is het vermijden van niet-CO<sub>2</sub>-effecten een milieukundig gezien goede optie.

Voor geluid: voortdurende vlootvernieuwing heeft een positief effect op de geluidsproductie. De belangrijkste bron van geluid tijdens de start zijn nu nog steeds de motoren. Tijdens de nadering en landing begint zo langzamerhand het geluid dat wordt geproduceerd door de omstroming van romp en vleugels maatgevend te worden (airframe noise). Dit komt omdat de motoren in de loop der jaren significant stiller zijn geworden. Een nog betere aerodynamische vormgeving van het vliegtuig kan ook het "airframe noise" verder doen afnemen. De lange termijn ontwikkeling laat zien dat de vliegtuigen niet alleen steeds zuiniger worden maar ook steeds stiller zullen worden.

Voor emissies: de emissies van een vliegtuig zijn één op één gerelateerd aan het brandstofgebruik. Zuiniger motoren, een lager gewicht van de constructie en een betere aerodynamica leveren direct reducties in emissies op. Daarnaast liggen er nog veel kansen in het motorontwerp om de relatieve emissies, emissies per kg kerosine, ook aanzienlijk te verminderen. Voortdurende investeringen op dit vlak zijn daarom ook noodzakelijk. Dat geldt niet alleen voor de ontwikkeling van nieuwe vliegtuigtypes door fabrikanten maar ook in het fundamenteel en toegepast onderzoek. Daarnaast kunnen ook een optimalisatie van de gevlogen routes een significant effect hebben (tot zo'n 10%). Niet alleen een herindelings van het Nederlands luchtruim kan daar aan bijdragen maar ook de invoering van de Single European Sky. Op dit moment wordt er op veel vluchten nog steeds onnodig "omgevlogen".

## 5.2. 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 zowel burger- als vrachtluchtvaart?

*Antwoorden op de vraag hoe de techniek zich kan ontwikkelen zijn niet eenvoudig te geven en economische gevolgen daarvan zelfs nog lastiger. In onderstaande tabel hebben we de belangrijkste mogelijkheden op een rijtje gezet met tijdspaden en - deels kwalitatief - enige opmerkingen over de kosten.*

Technologie	Effect	Ontwikkeltijd	Luchtvaart-brede implementatie	Economie
Evolutionaire technologie	2050-2100: 1,0%/jr-0,7%/jr	Stapsgewijs per generatie ca 15% per 15-25 jaar	Voortdurend	Intern deel luchtvaartstelsel
Revolutionaire vliegtuig configuraties	zo'n 10-20% additionele efficiëntieverbetering	20-30 jaar	na 2060 maar vergt nu significante investeringen in fundamenteel en toegepast onderzoek.	In beginsel kan dit binnen sector; probleem is het risico van de vele tientallen miljarden ontwikkelkosten per type plus aanpassingen infrastructuur
Elektrisch vliegen (batterij)	100% mits 100% duurzame energiebronnen	Korte afstand: 20-40 jaar Lange afstand: 30-60 jaar	Korte afstand: na 2080 Lange afstand: na 2100	Volledige invoering brengt mogelijk honderden miljarden ontwikkelkosten
Elektrisch vliegen (Waterstof, brandstofcel)	100% mits 100% duurzame energiebronnen	Korte afstand: 20 jaar Lange afstand: 20 jaar	Korte afstand: na 2050 Lange afstand: na 2080	Volledige invoering brengt mogelijk honderden miljarden ontwikkelkosten
Biobrandstoffen	40-80%	geen voor 1 <sup>ste</sup> en 2 <sup>de</sup> generatie; 10 jaar voor 3 <sup>de</sup> (bv algen)	2-3% vervanging per jaar	Brandstofkosten circa 1% tot 10% per jaar omhoog in 2-3% vervanging per jaar pad
e-fuels (PtL)	95-100% mits duurzame bronnen	via CCU: 5 jaar via CCA: 10-15 jaar	2-3% vervanging per jaar; in 30 tot 50 jaar volledige vervanging. Op dit vlak zou Nederland een voortrekkersrol kunnen spelen.	Brandstofkosten circa 2% tot 18% per jaar omhoog in 2-3% vervanging per jaar pad
Aanpassing vliegprocedures ter vermindering niet-CO <sub>2</sub> klimaateffecten en "omvliegen"	Circa 40% klimaat-effect; noot: circa 10% toename CO <sub>2</sub>	afhankelijk internationale regelgeving (10 jaar?)	afhankelijk internationale regelgeving (10 jaar?) Invoering van de Single European Sky is daarbij gewenst.	Circa 3-10% extra operationele kosten

### 5.3. Maatregelen overheid

- *Welke belemmeringen zijn er om te komen tot een duurzamere luchtvaart? Welke mechanismen hebben een negatieve invloed op de effectiviteit van nieuwe technologieën en overheidsmaatregelen?*

De belangrijkste belemmering voor meer revolutionaire (configuratie, elektrisch vliegen, waterstof) dan evolutionaire technologische ontwikkeling vormen de existentiële<sup>2</sup> bedrijfsrisico's verbonden aan ontwikkeling van dergelijke technologie binnen het bestaande duopolie (Airbus en Boeing).

Voor batterij-elektrisch vliegen: de benodigde batterijtechniek is op dit moment volstrekt onvoldoende en kan theoretisch mogelijk niet worden gerealiseerd maar zal sowieso nog decennia op zich laten wachten. Bijdragen aan onderzoek kan nuttig zijn, maar is een zeer lange termijn oplossing.

Voor waterstof-brandstofcel-elektrisch. Hiervoor zijn geen theoretisch technische belemmeringen en de ontwikkeling van een vliegtuig zou in principe met bestaande technologie ter hand genomen kunnen worden. Nederland kan hieraan bijdragen via fondsen voor onderzoek in internationaal verband.

Biobrandstoffen kennen twee belangrijke belemmeringen: de duurzaamheid (inclusief maatschappelijk draagvlak) en de effectiviteit. Wat het eerste betreft vormen de (potentiële) conflicten tussen het verbouwen van biomassa voor biobrandstoffen ten opzichte van voedselproductie en het grote ruimtegebruik en daardoor de druk op natuur en ecosystemen. Biomassa uit afvalproducten maakt de brandstof afhankelijk van afval uit de voedingsindustrie, terwijl de verduurzaming van die industrie deels via het verminderen van afval zal lopen, waardoor het toekomstige volume van dergelijke brandstoffen onzeker is. Wat betreft effectiviteit zijn er twee problemen: bladgroen vormt in het algemeen geen efficiënte omzetter van zonne-energie in andere vormen van energie, zeker vergeleken met zonnecellen en windturbines, de benodigde landbouw leidt tot diverse vormen van broeikasgassen (methaan, verandering van landgebruik, etc.) en het proces om van de biomassa brandstof te maken kost veel energie. Dat laatste speelt bijvoorbeeld bij algen, waar een kans bestaat dat het proces op levenscyclustniveau energie kost in plaats van opbrengt (Slegers et al., 2011). Daar moet dus veel duurzame energie bij.

e-Fuels (PtL) hebben – op basis van CCU – vooralsnog geen technologische belemmeringen. Alle verschillende technologische en processtappen zijn niet alleen beschikbaar, maar ook al grootschalig toegepast in de industrie (maar voor andere doeleinden). Nederland zou hier een voortrekkersrol kunnen spelen.

- *Welke maatregelen kan de rijksoverheid nemen om verduurzaming van de luchtvaart te stimuleren en innovatie te versnellen? Welke maatregelen behoren bij uitstek tot het domein van de overheid en welke zouden door de sector zelf genomen moeten worden? Welke maatregelen zouden in Europees verband kunnen worden genomen? Welke overheidsinstrumenten bieden internationaal en nationaal de beste mogelijkheden?*

De maatregel voor meer revolutionaire ontwikkelingen liggen in het enerzijds garanderen van afzet voor de technologie (luchtvaartmaatschappijen worden sterk aangespoord het revolutionaire vliegtuig af te nemen; dat dekt het marktrisico) en afdekking van existentiële risico's voor de ontwikkelkosten. Dergelijke maatregelen vergen een wereldwijde ondersteuning.

Voor batterij-elektrisch vliegen: bijdragen aan onderzoek naar nieuwe batterijtechnologie kan hier nuttig zijn, maar het gaat om zeer lange termijn oplossingen, waarvan eigenlijk wel vaststaat dat ze te laat komen om voldoende bij te dragen aan de klimaatdoelen van Parijs.

<sup>2</sup> De investering is dermate groot dat een bedrijf, bij mislukking, het eigen voortbestaan op het spel zet.

Voor waterstof-brandstofcel-elektrisch kan Nederland bijdragen via onderzoeksfondsen in internationaal verband. Ook dit is een lange-termijn oplossing, maar met minder grote onzekerheid over de tijdsduur van implementatie.

Biobrandstoffen: huidige beleid bestaat uit onderzoek naar (experimenten met en implementatie van) biobrandstoffen (o.a. algen, 3<sup>de</sup> generatie biomassa). Een diepgravende onafhankelijke studie naar de belemmeringen op het gebied van duurzaamheid lijkt aanbevelingswaardig.

E-Fuels (PtL): deze oplossing staat pas enkele jaren in de belangstelling. Belangrijke vraagstukken hierbij zijn; hoe de huidige limiet van maximaal 50% bijmengen van synthetische brandstoffen omhoog te brengen, hoe op een kosteneffectieve manier CO<sub>2</sub> rechtstreeks uit de atmosfeer te winnen en de vraag in hoeverre de in een 2°C scenario (dus onder de Parijse afspraken) voldoende duurzame energie te vinden om de 'power' te leveren voor de omzetting van CO<sub>2</sub> in kerosine. Het energiegebruik van luchtvaart zal bij e-fuel gebruik ten minste verdubbelen. Ten slotte is de vraag wat de gevolgen zijn van de extra kosten van e-fuels ten opzichte van op olie gebaseerde kerosine. Een mogelijke overheidstaak is om het bestaande initiatief van onder andere Tata Steel en KLM te ondersteunen (Terwel & Kerkhoven, 2017). Ook ligt er een rol voor de overheid om het gebruik van e-fuels te stimuleren omdat, bij een prijsverschil van meer dan 100%, grootschalige opname in de vrije markt geen grote kans maakt. Een Europees implementatietraject (bijvoorbeeld een verplichting om x% per jaar fossiele kerosine te vervangen door e-fuels) kan een werkbaar implementatietraject bieden.

Niet-CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> emissies door deze maatregelen toe zullen nemen, is deze maatregel vooral klimaateffectief in samenhang met de invoering van e-fuels.

Overige (flankerende) maatregelen: bevorderen internationaal treinvervoer door de markt te helpen betere informatie en boekingsmogelijkheden te ontwikkelen, door een gelijk fiscaal speelveld te creëren, door de luchtvaartnota uit te breiden naar 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), en, op de zeer korte termijn, door de belemmeringen die de directe verbinding Amsterdam-Londen in de weg staan, weg te nemen. 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 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.

Nederland zou het reeds lopende onderzoek naar de gevolgen van luchtvaart voor fijnstofemissies in internationaal verband kunnen uitbreiden en verbreden naar niet alleen de directe epidemiologische gezondheidseffecten, maar ook de relaties tussen concentraties en bronnen en de techniek om deze emissies in de motor te verminderen.

- *Welke 'best practices' op het gebied van overheidsbeleid kunnen in Nederland zelf worden gerealiseerd?*

Voor geluidhinder geeft onderzoek aan dat vooral nachtvluchten bepalen hoeveel hinder wordt ervaren (Bartels et al., 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 CO<sub>2</sub> emissies ingesteld kunnen worden.

#### 5.4. Juridische aspecten

- Welke ontwikkelingen spelen momenteel op nationaal, Europees en internationaal niveau (bijvoorbeeld via EASA en ICAO) om de luchtvaartsector te stimuleren verduurzamingsmaatregelen te nemen?

Regelgeving die betrekking heeft op het vliegtuig, de motor of de brandstof wordt niet bepaald in Nederland maar in het wereldwijde en Europese verband. Belangrijk is het te beseffen dat dat Nederland een relatief grote stem in ICAO en EASA verband heeft en die kan gebruiken om druk internationaal op te ouwen voor een transitiepad naar e-fuels, versnelde regelgeving geluid en engine emissies. Daarnaast kan Nederland zelf werken aan betere alternatieven voor luchtvaart, bredere visie op internationale mobiliteit (i.p.v. per modaliteit) en bijvoorbeeld ICT toepassingen ter vervanging van bepaalde reizen.

- Welke juridische mogelijkheden en beperkingen gelden in nationaal en internationaal verband bij het afdwingen van maatregelen in het kader van verduurzaming?

De huidige regelgeving bevindt zich op nationaal, Europees en VN (ICAO) niveau, is sterk verweven en niet altijd eenvoudig te duiden. Het VN-beleid voor luchtvaart is niet voldoende om de effecten van klimaatverandering tegen te gaan, dat wil zeggen, de emissies van CO<sub>2</sub> uiteindelijk in de tweede helft van deze eeuw naar nul te reduceren.

## Referenties

Alonso, J., Catalano, F., Cumpsty, N., Evers, C. J., Goutines, M., Grönstedt, T., Hileman, J., Joselzon, 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

Anderson, K., Bows, A., & Footitt, A. (2007). *Aviation in a low-carbon EU: A research report by The Tyndall Centre, University of Manchester*. Manchester

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. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.01.015>

Biello, D. (2012). Plants versus Photovoltaics: Which Are Better to Capture Solar Energy? *Scientific American*.

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.

Breugelmans, O., Houthuijs, D., & van Poll, R. (2016). *Inventarisatie van gezondheids- en belevingsonderzoeken (1996-2015) rondom (regionale) luchthavens van nationale betekenis* (RIVM Briefrapport 2016-0101). Bilthoven

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. doi:10.1186/s13068-017-0739-7

EASA. (2017). *Notice of Proposed Amendment 2017-01. Implementation of the CAEP/10 amendments on climate change, emissions and noise* (NPA 2017-01). Cologne

EEA. (2018). *Aviation and shipping – impacts on Europe's environment TERM 2017: Transport and Environment Reporting Mechanism (TERM) report* (EEA Report No 22/2017). Copenhagen

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* (ISBN: 978-90-819011-7-8). Breda

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. doi:10.1016/j.futures.2009.11.005
- Lee, D., Pitari, G., Grewe, V., Gierens, K., Penner, J., Petzold, A., Prather, M., Schumann, U., Bais, A., Bernsten, T., Iachetti, D., Lim, L. L., & Sausen, R. (2010). *Transport impacts on atmosphere and climate: Aviation*. *Atmospheric Environment*, 44(37), 4678-4734.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2017). *Geluidsbelastingkaarten luchthaven Schiphol voor het gebruiksjaar 2016*. The Hague
- Natuur en Milieufederatie Noord-Holland. (2017). *Versterking stiltegebiedenbeleid Noord-Holland. Eindrapport*. Zaandam
- Owen, B., Lee, D. S., & Lim, L. (2010). *Flying into the Future: Aviation Emissions Scenarios to 2050*. *Environmental Science & Technology*, 44(7), 2255-2260. doi:10.1021/es902530z
- Peeters, P. M. (2017). *Tourism's impact on climate change and its mitigation challenges. How can tourism become 'climatically sustainable'?* (PhD), Delft University of Technology, Delft.
- Peeters, P. M., Higham, J., Kutzner, D., Cohen, S. A., & Gössling, S. (2016). *Are technology myths stalling aviation climate policy?* *Transportation Research Part D*, 44, 30-42.
- 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 Physik der Atmosphäre.
- 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.
- 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. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.05.016>
- RIVM. (2017). *Plan van aanpak meerjarig onderzoeksprogramma "Gezondheidsrisico's ultrafijn stof rond Schiphol"* (Versie 21 4 2017). Bilthoven
- Schmidt, P., & Weindorf, W. (2016). *Power-to-Liquids. Potentials and Perspectives for the Future Supply of Renewable Aviation Fuel*. Dessau-Roßlau
- Slegers, P., Wijffels, R., Van Straten, G., & Van Boxtel, A. (2011). *Design scenarios for flat panel photobioreactors*. *Applied Energy*, 88(10), 3342-3353.
- Snijders, T. A., & Melkert, J. A. (2011). *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.
- Terwel, R., & Kerkhoven, J. (2017). *Climate-neutral Aviation with Current Engine Technology: The Take-off of Synthetic Kerosene Production in the Netherlands*
- Zhang, R., & Yao, E. (2015). *Electric vehicles' energy consumption estimation with real driving condition data*. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 41, 177-187. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2015.10.010>

*Disclaimer: De Jonge Akademie, KNAW, NWO en VSNU 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.*



Tweede Kamer  
DER STATEN-GENERAAL



KNAW

