



Dedicated to innovation in aerospace

NLR-CR-2020-391 | oktober 2020

# Duurzaam en Innovatief Maastricht Aachen Airport

Inventarisatie van kansen voor verduurzaming en innovatie op MAA

OPDRACHTGEVER: Dhr. Pieter van Geel



NLR – Koninklijk Nederlands Lucht- en Ruimtevaartcentrum



# Duurzaam en Innovatief Maastricht Aachen Airport

## Inventarisatie van kansen voor verduurzaming en innovatie op MAA

### Probleemstelling

Maastricht Aachen Airport is een proces gestart om te komen tot de aanvraag van een nieuw luchthavenbesluit. Om tot een nieuw luchthavenbesluit te komen is het nodig om in kaart te brengen op welke wijze de luchthaven zich kan ontwikkelen de komende jaren.

In het kader van dit traject is er behoefte aan een uitwerking naar de mogelijkheden van verduurzaming en innovaties op de luchthaven Maastricht Aachen Airport. Aan NLR is gevraagd om op onafhankelijke wijze hier onderzoek naar te doen.

### Beschrijving van de werkzaamheden

In dit rapport zijn de opties voor het verduurzamen en stimuleren van innovatie op de luchthaven geïnterpreteerd. Ook zijn consultaties gehouden met relevante stakeholders van de luchthaven, waaruit richting voor vervolgstappen is voortgekomen.

### Resultaten en conclusies

Er is op drie thema's een inventarisatie gedaan: duurzame technologie, duurzame operatie en duurzame luchthaven. Het toepassen en gebruik laten maken van duurzame technologieën kan het best worden gestimuleerd door middel van incentives. In de operatie zitten vooral kansen op het gebied van autonome en elektrische vrachtafhandeling en het emissieloos maken van voertuigen. Ook elektrisch taxiën hoort tot die opties. Voor de luchthaven zelf zijn kansen om in te zetten op circulaire economie. Daarnaast is onderzocht op welke manier MAA CO2-neutraal kan worden gemaakt. Een voorlopige mapping is gedaan van de CO2-

#### RAPPORTNUMMER

NLR-CR-2020-391

#### AUTEUR(S)

C.J. Meerstadt  
M.E. Hak  
R.J. Roosien  
N.D.K. Sutopo

#### RUBRICERING RAPPORT

ONGERUBRICEERD

#### DATUM

oktober 2020

#### KENNISGEBIED(EN)

Duurzame  
luchtvaartoperaties

#### TREFWOORD(EN)

Duurzaamheid  
Innovatie  
Proefcasus  
Stakeholders  
Toekomst

emissies. Op basis hiervan zijn aanbevelingen gedaan om CO<sub>2</sub>-neutraliteit te bereiken.

Ter afsluiting van het onderzoekstraject heeft een werkgroep plaatsgevonden met luchtvaartbetrokkenen. Hieruit is een aantal thema's en onderwerpen genoemd voor de vorming van een innovatieagenda.

De deelnemende partijen adviseren om in te zetten op de luchtvaart van morgen en te zoeken naar innovatieve kansen en oplossingen. Voor de uiteindelijke aansturing en realisatie van de thema's en speerpunten, is een samenhangende programmatische aanpak nodig (vanwege de complexiteit van verschillende thema's, vele stakeholders, en significante impact op de regio).

**NLR**

Anthony Fokkerweg 2

1059 CM Amsterdam

p ) +31 88 511 3113

e ) [info@nlr.nl](mailto:info@nlr.nl) | [www.nlr.nl](http://www.nlr.nl)



Dedicated to innovation in aerospace

NLR-CR-2020-391 | oktober 2020

# Duurzaam en Innovatief Maastricht Aachen Airport

Inventarisatie van kansen voor verduurzaming en innovatie op MAA

OPDRACHTGEVER: Dhr. Pieter van Geel

**AUTEUR(S):**

<b>C.J. Meerstadt</b>	NLR
<b>M.E. Hak</b>	NLR
<b>R.J. Roosien</b>	NLR
<b>N.D.K. Sutopo</b>	NLR

*Niets uit dit rapport mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt, op welke wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de eigenaar.*

<b>OPDRACHTGEVER</b>	Dhr. Pieter van Geel
<b>CONTRACTNUMMER</b>	1490198
<b>EIGENAAR</b>	Maastricht Aachen Airport Beheer & Infrastructuur
<b>NLR DIVISIE</b>	AOEP
<b>VERSPREIDING</b>	Beperkt
<b>RUBRICERING TITEL</b>	ONGERUBRICEERD

GOEDGEKEURD DOOR:														
AUTEUR					REVIEWER					BEHERENDE AFDELING				
C.J. Meerstadt														
DATUM					DATUM					DATUM				

# Samenvatting

Dit rapport beschrijft de mogelijkheden van duurzaam vliegen op Maastricht Aachen Airport. Daarnaast geeft dit rapport inzicht in de stappen die zijn benodigd om de luchthaven CO<sub>2</sub>-neutraal te maken.

Het eerste deel van het onderzoek focust zich op de mogelijkheden van elektrisch en duurzaam vliegen die van toepassing zijn voor MAA. Er is daarbij een onderscheid gemaakt in technologie, operaties en de luchthaven zelf. Als eerste is een inventarisatie gedaan. Vervolgens is de betekenis voor MAA onderzocht. Deel twee van het rapport concentreert zich op een CO<sub>2</sub>-neutrale luchthaven. Hiertoe is met behulp van de ACERT-tool een mapping gedaan van de CO<sub>2</sub>-emissies. De conclusies van beide onderzoeken worden hieronder beschreven.

## *Onderzoek mogelijkheden van duurzaam vliegen op en verduurzaming van MAA*

### **Duurzame technologie**

De rol van MAA als het gaat om inzet van duurzame technologie ligt vooral in het stimuleren van (het gebruik van) nieuwe technologieën. De twee meest effectieve manieren waarop MAA de inzet van nieuwe vliegt technologie kan stimuleren, zijn via tariefdifferentiatie en via het ontwikkelen van benodigde faciliteiten. Met het tweede wordt bedoeld op het aanleggen van oplaadpunten voor batterijen en tankinfrastructuur voor waterstof. Verder kan MAA bijdragen aan de ontwikkeling van nieuwe vliegt technologie door deel te nemen aan pilots en onderzoeksprojecten. Uiteindelijk zullen elektrisch vliegen en vliegen op waterstof zorgen voor de grootste reductie in operationele emissies, dus daar zou MAA met partners uit de regio een roadmap of ontwikkelplan voor op kunnen zetten.

### **Duurzame operaties**

Voor het verminderen van de CO<sub>2</sub>-voetafdruk van de luchthaven en de lokale luchtkwaliteit, is het aan te raden voor de luchthaven om een plan op te stellen om alle eigen grondvoertuigen, zoals passagiersbussen en voertuigen voor transport, in de komende jaren te vervangen door elektrische- of waterstofvoertuigen. Elektrisch taxiën biedt ook een mogelijkheid om de CO<sub>2</sub>-voetafdruk van de luchthaven te verkleinen en luchtkwaliteit te verbeteren. Een TaxiBot zou nu al ingezet kunnen worden op MAA voor vertrekkende vluchten (taxi out). Indien een extra baan zou worden aangelegd, zou het operationeel ook mogelijk zijn om een TaxiBot in te zetten bij de landing (taxi-in). Autonome vrachtafhandeling is mogelijk een interessant onderwerp voor MAA om aan pilots deel te nemen. Voor APU- en GPU gebruik kunnen regels en handhaving aangescherpt worden. De mogelijkheden van zuiniger vliegen is een kwestie om op te pakken met de luchtverkeersleiding.

### **Duurzame luchthaven**

Dit zijn grotendeels onderwerpen waar de luchthaven zelf een beleid voor kan maken, en niet afhankelijk is van stakeholder voor implementatie (al is afstemming met stakeholders natuurlijk altijd wenselijk). In het kader van de activiteiten op het gebied van circulaire economie in de regio en de provincie Limburg, is het aan te raden dat de luchthaven een plan of roadmap maakt om naar een circulaire operatie en infrastructuur toe te werken. Dit kan in parallel met het aansluiten bij initiatieven zoals Limburg Circulair. Voor klimaatbestendigheid en biodiversiteit is het ook aan te raden om doelen te stellen en te rapporteren.

Het toewerken naar een duurzaam multimodaal netwerk is een onderwerp waarvoor de luchthaven wel afhankelijk is van stakeholders, met name op het gebied van lange termijn mobiliteitsplannen voor de regio.

## Onderzoek CO2-neutraal MAA

### Aanbevelingen

Allereerst is het aan te bevelen dat MAA op basis van de informatie in dit rapport en eventueel vervolgwerk besluit op welke innovaties ingezet gaat worden, en welke maatregelen gestimuleerd worden waar nodig maar niet concreet in geïnvesteerd worden. De volgende stap is om op het gebied van duurzaamheid doelen te zetten, en hier ook over te communiceren op de website en op de luchthaven. Deze doelen kunnen gezet worden in overleg met stakeholders.

Op het gebied van CO2-neutraliteit, zou lidmaatschap van het ACA-programma een mooie kans kunnen zijn voor MAA om consequent emissies bij te houden en conform de ACA-levels doelen te stellen richting een geaccrediteerde CO2-neutrale luchthaven.

### Vervolgstappen

De in dit rapport beschreven opties voor innovatie en verduurzaming van de luchtvaart bij de luchthaven MAA zijn in een werkgroep besproken met een aantal partijen.

### Ambitie

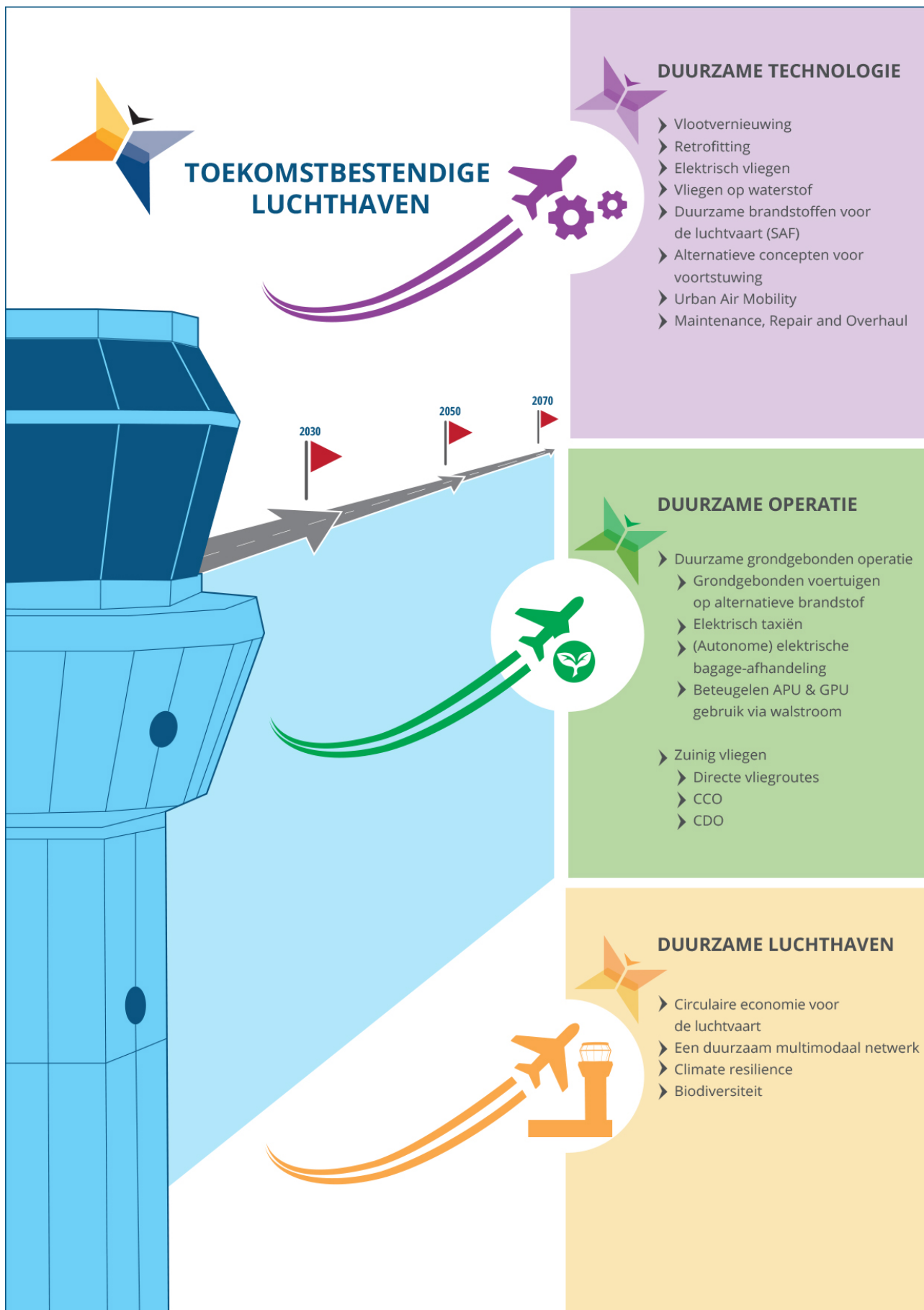
Aan het einde van vornoemde werkgroep werd de volgende gezamenlijke conclusie/ambitie geformuleerd: *“Het is verstandig en wenselijk om in te zetten op MAA als centrum van de luchtvaart voor morgen. Om dat te bewerkstelligen gaan we op zoek naar innovatieve kansen en oplossingen die in de context en sterkte van MAA komen te liggen. We gaan niet actief inzetten op datgene waar men elders al mee bezig is.”*

### Innovatieagenda

Er is een aantal thema's en onderwerpen genoemd als mogelijke kandidaat voor een nog op te stellen innovatieagenda. De onderwerpen in willekeurige volgorde zijn als volgt:

- Klimaatneutrale grondactiviteiten in 2030
- Alternatieve brandstoffen (waterstof/synthetische brandstoffen)
  - Productie
  - Opslag
  - Infrastructuur
- Strategisch partnership Flugplatz Aachen – Merzbrück (RWTH) – MAA: elektrisch vliegen
- Smart Logistics: MAA als proeftuin voor autonome vrachtafhandeling
- Onderwijsprogramma/doorlopende leerlijnen (ACC/MBO/HBO/TU): onderwijs integratie

De deelnemende partijen adviseren om in te zetten op de luchtvaart van morgen en te zoeken naar innovatieve kansen en oplossingen. Voor de uiteindelijke aansturing en realisatie van de thema's en speerpunten, is een samenhangende programmatische aanpak nodig (vanwege de complexiteit van verschillende thema's, vele stakeholders, en significante impact op de regio).





# Inhoudsopgave

<b>Afkortingen</b>	<b>9</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>10</b>
1.1 Aanleiding onderzoek	10
1.2 Scope	10
1.3 Leeswijzer	10
1.4 COVID-19 en de luchtvaart	11
<b>2 Luchtvaart en duurzaamheid</b>	<b>12</b>
2.1 Invloed van luchtvaart op het klimaat	12
2.1.1 Emissies	12
2.1.2 Gevolgen van klimaatverandering	15
2.1.3 Toewerken naar duurzame luchtvaart	16
2.2 Duurzaamheid op Maastricht Aachen Airport	18
<b>3 Situatieschets Maastricht Aachen Airport</b>	<b>19</b>
<b>4 Duurzame technologie</b>	<b>21</b>
4.1 Vlootvernieuwing	21
4.1.1 Effect op geluid, emissies en veiligheid	23
4.1.2 Betekenis voor MAA	24
4.1.3 Tijdlijn	25
4.2 Retrofitting	26
4.2.1 Effect op geluid, emissies en veiligheid	26
4.2.2 Betekenis voor MAA	27
4.2.3 Tijdlijn	27
4.3 Elektrisch vliegen	28
4.3.1 More Electric Aircraft	28
4.3.2 (Hybride-)elektrische voortstuwing	28
4.3.3 Effect op geluid, emissies en veiligheid	30
4.3.4 Betekenis voor MAA	32
4.3.5 Tijdlijn elektrisch vliegen	33
4.4 Vliegen op waterstof	36
4.4.1 Waterstof brandstofcellen	37
4.4.2 Directe verbranding van waterstof	38
4.4.3 Productiemethodes en duurzaamheid	39
4.4.4 Effect op geluid, emissies en veiligheid	40
4.4.5 Betekenis voor MAA	40
4.4.6 Tijdlijn	41
4.5 Duurzame brandstoffen voor de luchtvaart (SAF)	43
4.5.1 Biobrandstoffen	44
4.5.2 Synthetische kerosine	44
4.5.3 Effect op geluid, emissies en veiligheid	45

4.5.4	Betekenis voor MAA	45
4.5.5	Tijdlijn	46
4.6	Alternatieve concepten voor voortstuwing	47
4.6.1	Methaan (LNG)	47
4.6.2	Ionisatie	47
4.6.3	Effect op geluid, emissies en veiligheid	48
4.6.4	Betekenis voor MAA	49
4.6.5	Tijdlijn	49
4.7	Urban Air Mobility	50
4.7.1	Effect op geluid, emissies en veiligheid	51
4.7.2	Betekenis voor MAA	51
4.7.3	Tijdlijn	52
4.8	Maintenance, Repair and Overhaul (MRO)	53
4.8.1	Additive manufacturing	53
4.8.2	MRO voor alternatieve voortstuwing	53
4.8.3	Waterinjectie bij proefdraaien	54
4.8.4	Inspectie met drones	55
4.8.5	Predictive Maintenance	55
4.8.6	Digital twin	55
4.8.7	Koppeling met Maintenance Boulevard	56
4.8.8	Effect op geluid, emissies en veiligheid	56
4.8.9	Betekenis voor MAA	58
4.8.10	Tijdlijn	58
<b>5</b>	<b>Duurzame operatie</b>	<b>60</b>
5.1	Duurzame grondgebonden operatie	60
5.1.1	Grondgebonden voertuigen op alternatieve brandstof	60
5.1.2	Elektrisch taxiën	60
5.1.3	(Autonome) elektrische bagage- en vrachtafhandeling	63
5.1.4	Beteugelen APU & GPU gebruik via walstroom	64
5.1.5	Effect van de maatregelen op geluid, emissies en veiligheid	64
5.1.6	Betekenis voor MAA	68
5.1.7	Tijdlijn	69
5.2	Zuinig vliegen	70
5.2.1	Directe vliegroutes	70
5.2.2	CCO	70
5.2.3	CDO	70
5.2.4	Effect op geluid, emissies en veiligheid	71
5.2.5	Betekenis voor MAA	72
5.2.6	Tijdlijn	72
<b>6</b>	<b>Duurzame luchthaven</b>	<b>73</b>
6.1	Circulaire Economie voor de luchtvaart	73
6.1.1	Life Cycle aanpak	74
6.1.2	Afvalmanagement op luchthavens	75
6.1.3	Voorbeelden van implementatie circulaire economie op luchthavens	76

6.1.4	Effect op geluid, emissies en veiligheid	77
6.1.5	Betekenis voor MAA	77
6.1.6	Tijdlijn	78
6.2	Een duurzaam multimodaal netwerk	79
6.2.1	Duurzame reisopties voor de korte afstanden	79
6.2.2	Vervoer van- en naar de luchthaven	79
6.2.3	Effect op geluid, emissies en veiligheid	80
6.2.4	Betekenis voor MAA	80
6.2.5	Tijdlijn	80
6.3	Climate resilience	82
6.3.1	Acties voor de luchthaven	82
6.3.2	Voorbeelden van Climate Resilience programma's op andere luchthavens	83
6.3.3	Effect geluid, emissies en veiligheid	83
6.3.4	Betekenis voor MAA	83
6.3.5	Tijdlijn	84
6.4	Biodiversiteit	85
6.4.1	Voorbeelden van toepassingen op andere luchthavens	85
6.4.2	Reeds uitgevoerde inventarisatie effect MAA op natuur	86
6.4.3	Effect op geluid, emissies en veiligheid	86
6.4.4	Betekenis voor MAA	87
6.4.5	Tijdlijn	87
<b>7</b>	<b>Tijdljn duurzaamheid &amp; innovatie</b>	<b>88</b>
<b>8</b>	<b>CO<sub>2</sub>-neutraal MAA</b>	<b>89</b>
8.1	Categoriseren van CO <sub>2</sub> -uitstoot	89
8.1.1	Scope 1: Emissies binnen de controle van het luchthavenbedrijf	89
8.1.2	Scope 2: De energievoorziening	90
8.1.3	Scope 3: Activiteiten gerelateerd aan de luchthaven	90
8.2	Reeds geïnventariseerde uitstoot op MAA	91
8.3	CO <sub>2</sub> -emissies MAA	92
8.3.1	Leemten in informatie	92
8.3.2	Berekening en resultaat CO <sub>2</sub> -emissies MAA 2019	92
8.4	Route naar CO <sub>2</sub> -neutraliteit	94
8.4.1	Scope 3	94
8.4.2	Scope 1&2	94
8.5	Non-CO <sub>2</sub> emissies	96
<b>9</b>	<b>Conclusies</b>	<b>98</b>
<b>10</b>	<b>Innovatieve en duurzame luchtvaart op MAA – de vervolgstappen</b>	<b>100</b>
<b>11</b>	<b>Referenties</b>	<b>102</b>
<b>Appendix A</b>	<b>ACERT input</b>	<b>109</b>

## Afkortingen

ACRONIEM	OMSCHRIJVING
ACI	Airport Council International, organisatie die zich inzet voor de belangen van luchthavens
ADS-B	Automatic dependent surveillance—broadcast; technologie waarbij vliegtuigen hun positie vaststellen op basis van satelliet gegevens en vervolgens uitzenden
AIP	Aeronautical Information Publication
AMAN	Arrival Management - planningsproces
APU	Auxiliary Power Unit; levert stroom in het vliegtuig wanneer de motoren uit zijn
ATM	Air Traffic Management - Luchtverkeersleiding
CANSO	Civil Air Navigation Services Organisation, organisatie die zich inzet voor de belangen van luchtverkeersleidingsorganisaties
BIC-gebied	Brainport Innovatie Campus
CCO	Continuous Climb Operation - <b>continu klimprofiel</b>
CDO	Continuous Descent Operation - <b>continu daalprofiel</b>
CORSIA	Carbon Offsetting en Reduction Scheme for International Aviation
DMAN	Departure Management - planningsproces
Ft	Foot (1 ft is 0.3048 meter).
EU ETS	Europese Emissiehandelssysteem
GBAS	Ground-based Augmentation Systems - grond geassisteerde GPS
GGD	Gemeentelijke Gezondheidsdienst
GPS	Global Positioning System
GPU	Ground Power Unit; levert stroom aan een vliegtuig tijdens de afhandeling op de grond.
GSE	Ground Service Equipment
ICAO	International Civil Aviation Organisation, luchtvaartorganisatie van de Verenigde Naties o.a. belast met de wereldwijde harmonisering van de luchtvaart
IenW	Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
LHB	Luchthavenbesluit
LTO-cyclus	Landing-and-take-off-cyclus. Eén LTO-cyclus is de combinatie van de landing, het vertrek en het taxiën van een vliegtuig. Een LTO bestaat uit 2 bewegingen.
LTO-emissies	Emissies tijdens het opstijgen, klimmen, dalen, landen en taxiën van het vliegtuig (landing-and take-off) tot 3.000 voet (1.827 meter).
MER	Milieu Effect Rapportage
NADP	Noise Abatement Departure Procedure
NLR	Nederlands Lucht- en Ruimtevaartcentrum
PBN	Performance Based Navigation
RIVM	Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu
RNAV	Area Navigation
SBAS	Satellite-based Augmentation Systems - satelliet geassisteerde GPS
TNO	Nederlandse Organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek
VCNS	Virtual Community Noise Simulator
WUR	Wageningen University & Research

# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding onderzoek

Maastricht Aachen Airport is een proces gestart om te komen tot de aanvraag van een nieuw luchthavenbesluit. Om tot een nieuw luchthavenbesluit te komen is het nodig om in kaart te brengen op welke wijze de luchthaven zich kan ontwikkelen de komende jaren. Daarnaast is recentelijk de Ontwerp-Luchtvaartnota uitgebracht, waarin het huidige kabinet een strategische visie presenteert voor de Nederlandse luchtvaart van 2020-2050. Daar wordt over regionale luchthavens gezegd dat deze zich moeten ontwikkelen in de lijn met de regio waarin ze liggen. Participatie van verschillende stakeholders zoals omwonenden, bedrijfsleven en lokale overheden in de totstandkoming van ontwikkelingsplannen vormt daarin een belangrijk onderdeel.

Gedeputeerde Staten hebben hiertoe de heer Pieter van Geel opdracht gegeven de provinciale vertaling van de Luchtvaartnota voor Maastricht Aachen Airport (MAA) op innovatieve wijze met de regio, via participatie en overleg met de omgeving (omwonenden en maatschappelijke organisaties, experts, bedrijven en overheden) te doen. Daarbij is een passende weging van de verschillende belangen gevraagd om zo tot het best haalbare advies te komen over de ontwikkeling van Maastricht Aachen Airport tot een toekomstbestendige en duurzame luchthaven.

In het kader van dit traject is er behoefte aan een uitwerking naar de mogelijkheden van verduurzaming en innovaties op de luchthaven Maastricht Aachen Airport. Aan NLR is gevraagd om op onafhankelijke wijze hier onderzoek naar te doen.

## 1.2 Scope

De scope van het onderzoek wordt afgebakend door twee onderzoeksvragen. Deze zijn vastgesteld door MAA en de Provincie Limburg in samenspraak met de verschillende stakeholders.

Deze onderzoeksvragen luiden als volgt:

1. *Welke ontwikkelingen zijn er rondom elektrisch en eventueel andere vormen van duurzamer vliegen en wat is daarvan het effect op geluid, geluidhinder, luchtkwaliteit, klimaat, slaapverstoring, geuroverlast en veiligheid? Welke innovaties in de luchtvaarsector zijn er en zijn van betekenis voor MAA?*
2. *Welk duurzaamheidsmaatregelen zijn nodig om MAA als luchthaven CO<sub>2</sub> neutraal te maken?*

De onderzoeksvragen worden integraal beantwoord in het rapport. De hoofdstukken 2 t/m 7 behandelen onderzoeksvraag 1. Hoofdstuk 8 gaat in op onderzoeksvraag 2.

## 1.3 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt een korte introductie gegeven over duurzaamheid binnen de luchtvaart. Vervolgens bevat hoofdstuk 3 een situatieschets van MAA. De hoofdstukken 4, 5 en 6 geven een overzicht van innovaties in verschillende domeinen; in hoofdstuk 4 worden innovaties op technisch vlak beschreven, in hoofdstuk 5 duurzame

operaties en in hoofdstuk 6 de duurzame luchthaven. In hoofdstuk 7 wordt een tijdlijn gegeven van de verwachte ontwikkeling van alle behandelde maatregelen. Daarna wordt in hoofdstuk 8 beschreven wat er nodig is om van MAA een CO2-neutrale luchthaven te maken. Het rapport sluit af met conclusies in hoofdstuk 9. Na de conclusies is een extra hoofdstuk toegevoegd met een aanzet voor een concrete innovatieagenda voor een duurzaam MAA. Dit is geschreven op basis van de workshop die is gehouden met diverse betrokkenen uit de omgeving van MAA.

## 1.4 COVID-19 en de luchtvaart

Dit rapport is opgesteld ten tijde van de COVID-19 pandemie, die heeft geleid tot vergaande veranderingen in vele industrieën, waaronder de luchtvaart. Door de internationale reisbeperkingen en het afzeggen van evenementen nam de vraag naar passagiersvluchten drastisch af. Vliegverkeer voor passagiers heeft op MAA stilgelegen van medio maart tot 30 juni, het vrachtverkeer heeft wel door kunnen gaan in deze tijd.

Het is onduidelijk hoe de verspreiding van COVID-19 zich zal ontwikkelen en hoe de vraag naar vliegverkeer zal veranderen in de toekomst. Het is buiten scope van dit project om hier onderzoek naar te doen. Waar het voor de hand ligt dat de pandemie effect zal hebben op een maatregel wordt dit benoemd.

## 2 Luchtvaart en duurzaamheid

Luchtvaart en duurzaamheid worden steeds vaker in één zin genoemd. Dit komt voornamelijk doordat de noodzaak om de luchtvaart te verduurzamen steeds prominenter wordt. De reden hiervoor is de invloed die de luchtvaart heeft op het klimaat, natuur en de gezondheid van de mens. In de volgende paragrafen wordt kort ingegaan op de invloed die luchtvaart heeft op klimaat, natuur en de gezondheid van de mens.

### 2.1 Invloed van luchtvaart op het klimaat

Vliegtuigen stoten gassen en deeltjes uit in de hoge troposfeer en lagere stratosfeer (de hoogte waarop subsonisch wordt gevlogen, ca 9-13 km). De belangrijkste emissies die een impact hebben op het klimaat zijn CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, H<sub>2</sub>O, SO<sub>x</sub>, HC en roetdeeltjes. (Wuebbles, 2010) Deze gassen en deeltjes beïnvloeden de concentratie van atmosferische broeikasgassen, waaronder koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>), ozon (O<sub>3</sub>) en methaan (CH<sub>4</sub>). Daarnaast dragen deze gassen en deeltjes bij aan de vorming van condens sporen (contrails), en ook de vorming van cirruswolken wordt versterkt. Al deze effecten dragen bij aan klimaatverandering. Daarnaast hebben emissies ook invloed op de leefomgeving van mens en natuur.

#### 2.1.1 Emissies

Tijdens een vlucht komen emissies vrij door de verbranding van een brandstof. Ook voorafgaand aan de vlucht komen emissies vrij. Zo produceren de grondafhandelingsprocessen emissies, maar ook als het vliegtuig aan de grond staat, wanneer er wordt getankt en geladen met passagiers en vracht, zijn er verschillende processen die emissies produceren. ICAO heeft voor verbrandingsemissies vier categorieën onderscheiden (ICAO, 2011):

1. Vliegtuigemissies;
2. Vliegtuig handling emissies;
3. Infrastructurele of stationaire bronnen;
4. Verkeer van voertuigen.

De grootste bijdrage in emissies komt van de vlucht zelf. Bij verbranding van vliegtuigbrandstoffen in de motor ontstaan de volgende emissies: koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>), waterdamp (H<sub>2</sub>O), stikstofoxiden (NO<sub>x</sub>), zwaveloxiden (SO<sub>x</sub>), koolmonoxide (CO), onverbrande koolwaterstoffen (HC), fijnstof en ultrafijnstof (PM en UFP) en roetdeeltjes. Tot slot worden voornamelijk rondom luchthavens ook vluchtige organische stoffen (VOC, Volatile Organic Compounds) in de atmosfeer losgelaten door het vervluchtigen van chemicaliën tijdens tanken en de-icing.

##### 2.1.1.1 Effecten van emissies op het klimaat

Vliegtuigmotoren en grondvoertuigen stoten voornamelijk waterdamp (H<sub>2</sub>O) en kooldioxide (CO<sub>2</sub>) uit. H<sub>2</sub>O en CO<sub>2</sub> zijn niet relevant voor de luchtkwaliteit, maar zijn wel broeikasgassen; ze dragen bij aan de klimaatverandering.

Het gas kooldioxide (CO<sub>2</sub>) is het belangrijkste langlevende broeikasgas in de atmosfeer van de aarde, en daarmee de belangrijkste oorzaak van de klimaatopwarming. Kooldioxide vangt zonlicht in en zet dat om in warmte. Dit effect is onafhankelijk van de hoogte in de atmosfeer. Sinds de industriële revolutie is de concentratie van dit gas snel toegenomen, en neemt dit nog steeds sneller toe. De voornaamste oorzaak is de mens: het gebruik van fossiele brandstoffen en ontbossing. Kooldioxide veroorzaakt ook verzuring van de oceaan omdat het oplost in water om koolzuur te vormen. Door de opwarming daalt ook het CO<sub>2</sub>-absorptie vermogen van de oceanen, wat het CO<sub>2</sub> gehalte in de atmosfeer hoger doet zijn.

Waterdamp is, net als CO<sub>2</sub>, een broeikasgas. In tegenstelling tot CO<sub>2</sub>, heeft water verschillende verschijningsvormen (en bijbehorende klimaateffecten): als gas, als vloeistof en als vaste vorm (ijskristallen). Lokale condities in de atmosfeer bepalen de verschijningsvorm en die kunnen (nog) niet goed worden voorspeld. Afhankelijk van de temperatuur, concentratie en de aanwezigheid van condensatiekernen kan waterdamp wel of geen wolkenvorming veroorzaken met additionele klimaatimpact. Op grote hoogte spelen NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub> en PM<sub>2,5</sub> een rol bij het triggeren van waterdamcondensatie tot wolkenvorming. PM<sub>10</sub> en PM<sub>2,5</sub> zijn fijnstof waarvan de moleculen respectievelijk een diameter hebben van minder dan 10 micrometer en 2.5 micrometer. Wolken fungeren overdag als een zonnescherm dat koelt, en 's-nachts als een deken die afkoeling verhindert.

Een kenmerkend verschil met CO<sub>2</sub> is dat ook de hoogte waarop waterdamp wordt uitgestoten van belang is. Waterdamp op lagere hoogte (tot ongeveer 8 km, en ruim beneden de huidige vlieghoogtes van 12 km) verdwijnt sneller dan CO<sub>2</sub> uit de atmosfeer (in enkele maanden in plaats van tientallen jaren). Het sneller verdwijnen van waterdamp uit de atmosfeer resulteert in een lagere concentratie en daarmee een kleinere klimaatimpact. Een dergelijke lagere impact vergt operationele en technologische aanpassingen aan de luchtverkeersleiding en ook aan de vliegtuigontwerpen waarbij geoptimaliseerd moet worden voor deze lagere vlieghoogtes.

De stoffen die vrijkomen hebben naast klimaatimpact ook een effect op de luchtkwaliteit in de omgeving. Een verslechterde luchtkwaliteit kan effect hebben op de gezondheid.

### 2.1.1.2 Luchtkwaliteit en de effecten van emissies op de gezondheid

De lokale luchtkwaliteit is afhankelijk van de concentraties van stoffen in de atmosfeer op leefniveau<sup>1</sup> die de gezondheid en het milieu negatief kunnen beïnvloeden. Naast vliegactiviteiten zijn deze stoffen ook afkomstig van grondgebonden activiteiten, zoals voertuigen op het platform. Luchtkwaliteit wordt uitgedrukt in relatie tot de grenswaarden (maximum toegestane waarden) die wet- en regelgeving aan deze concentraties stelt. NO<sub>2</sub>, fijnstof (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>), ozon en ultrafijnstof zijn van belang voor de (lokale) luchtkwaliteit (Dusseldorp, 2015).

#### **NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> en ultrafijnstof**

Er zijn tal van stoffen die van invloed kunnen zijn op de luchtkwaliteit. In Nederland worden in de praktijk echter alleen de concentraties van stikstofdioxide (NO<sub>2</sub>) en fijnstof (PM<sub>10</sub> en PM<sub>2,5</sub>) meegenomen voor de luchtkwaliteit. PM<sub>10</sub> bestaat uit deeltjes met een typische diameter kleiner dan 10 micrometer, PM<sub>2,5</sub> uit deeltjes met een diameter kleiner dan 2,5 micrometer. Daarnaast wordt ook ultrafijnstof (UFP) onderscheiden. Ultrafijnstof is het bestanddeel van fijnstof (PM<sub>0,1</sub>) met de allerkleinste afmeting: kleiner dan 0,1 micrometer.

<sup>1</sup> 1,5 meter boven de grond



De effecten van fijnstof op de gezondheid van mensen is onder andere door de Gezondheidsraad onderzocht. Langdurige blootstelling aan fijnstof kan de volgende effecten hebben (Gezondheidsraad, 2018) (Janssen et al, 2011):

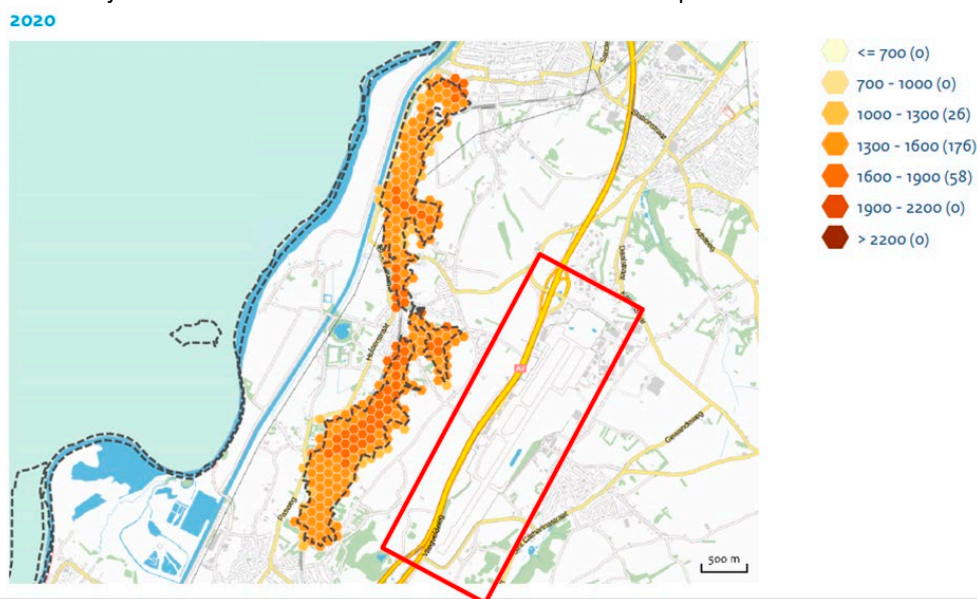
- sterfte of kortere levensduur; en/of
- hart- en vaatziekten, vaatvernauwing, verhoogde hartslag en bloedstolling; en/of
- longkanker, COPD, verminderde longfunctie, astmatische klachten of verergering daarvan, toename van luchtwegklachten zoals hoesten, kortademigheid en piepen.

Momenteel voert het RIVM in samenwerking met TNO op Schiphol een grootschalig en meerjarig onderzoek uit naar de gezondheidseffecten van langdurige blootstelling aan (ultra)fijnstof rondom de luchthaven. De resultaten daarvan worden in 2021 verwacht. Deze resultaten zijn niet een-op-een te gebruiken voor MAA, maar kunnen wel een indicatie geven van de gezondheidseffecten.

### 2.1.1.3 Effecten van emissies op de natuur

De gassen en deeltjes die vliegtuigen uitstoten hebben naast hun effect op het klimaat ook effect op bos- en natuurgebieden. Zo is de depositie van onder andere stikstofoxiden ( $\text{NO}_x$ ) schadelijk voor de natuur wanneer deze waarde boven het kritische depositieniveau komt. Het kritische depositieniveau geeft aan boven welk niveau veranderingen in vegetatie plaats zullen vinden. Plantensoorten kunnen hierdoor verdwijnen, waardoor de soortenrijkdom achteruitgaat. Het vrijkomen van deze deeltjes wordt niet alleen veroorzaakt door luchtvaart; ook onder andere de landbouw, het wegverkeer en energiecentrales zorgen voor de uitstoot van  $\text{NO}_x$  met depositie als gevolg (Leefomgeving, 2010). Dit vermindert de kwaliteit en biodiversiteit van bos- en natuurgebieden (Bal, Beije, van Dobben, & van Hinsberg, 2007).

In Nederland zijn er 166 zogeheten Natura 2000 gebieden. Dit zijn beschermde natuurgebieden waarin bepaalde diersoorten en hun leefomgeving beschermd worden om de biodiversiteit te behouden. In Figuur 1 is het Natura 2000 gebied Bunder- en Elsloërbos te zien met bijbehorende de  $\text{NO}_x$  depositiewaarden afgebeeld die berekend zijn voor het jaar 2020, van alle bijdragende bronnen. Deze waarden (rechts in de figuur) zijn gegeven in mol/ha/jaar en de waarden tussen de haakjes duiden het totaal aantal hectares aan voor die depositiewaarden.



Figuur 1: Natura 2000 gebied Bunder- en Elsloërbos te zien met bijbehorende de  $\text{NO}_x$  depositiewaarden (PAS-bureau, 2017)

Twee kilometer ten oosten van dit Natura 2000 gebied is Maastricht Aachen Airport met rood omlijnd. De activiteiten op Maastricht Aachen Airport dragen ook bij aan de stikstofdepositie in dit Natura 2000 gebied. Voor veranderingen in activiteiten dienen milieueffectrapportages (MER) opgesteld te worden. Hiervoor wordt onderzocht welk effect de nieuw voorgenomen situatie heeft op het milieu, waaronder op de stikstofdepositie in het gebied. Hiervoor worden NO<sub>x</sub> emissies die uitgestoten worden in een afgebakend gebied rondom de luchthaven tot aan 3.000 ft meegerekend. Op deze manier wordt nagegaan of er een toename is in NO<sub>x</sub>-emissies door de voorgenomen situatie en of deze nog binnen de toegestane depositiemarges vallen. Voor de voorgenomen activiteit in 2024 (het "LHB-scenario MAA-2024") is bijvoorbeeld berekend dat de maximale toename in het Natura2000 gebied Bunder- en Elsloërbos 0,34mol/ha/jaar is, waarmee de toegestane hoeveelheid stikstofdepositie voor deze voorgenomen activiteit niet overschreden is.

Naast de effecten van stikstof kan (ultra)fijnstof de gezondheid van dieren en planten aantasten. Op de dagelijkse tot jaarlijkse tijdschaal zorgt vliegtuiggeluid voor een verstoring van dieren in het wild. Dit kan effect hebben op zang van vogels (Gil, Honarmand, Pascual, Perez-Mena, & Macias Garcia, 2015), broedpatronen van insecten en vogels (New South Wales, 2003), bloeddruk van kleine zoogdieren (Chesser, Caldwell, & Harvey, 1975) en botsingen met vogels (Allan, 2000) en herten (Biondi, Belant, Martin, DeVault, & Wang, 2011). Ook kan SO<sub>x</sub> (met NO<sub>x</sub>) zorgen voor zure regen. De gevolgen van klimaatverandering kunnen vergaande gevolgen hebben voor de huidige staat van het ecosysteem. Naar alle verwachtingen zal de opwarming van het Noordelijk halfrond een vermindering in biodiversiteit teweegbrengen in bos- en natuurgebieden (NASA, 2011).

#### 2.1.1.4 Geurhinder

Zoals hiervoor aangegeven stoot een vliegtuigmotor en andere brandstofmotor-aangedreven voertuigen kleine hoeveelheden zogenaamde vluchtige organische stoffen uit. Dit zijn restproducten van (onverbrande) kerosine. Deze kunnen leiden tot geurhinder op en nabij de luchthaven. Voor geur gelden provinciale grenswaarden. De Provincie Limburg heeft echter geen expliciet lokaal geurbeleid (Kenniscentrum InfoMil, n.d.).

## 2.1.2 Gevolgen van klimaatverandering

Het gevaar van klimaatverandering is dat het zodanig geleidelijk gaat, dat de omvang van de gevolgen niet op tijd duidelijk wordt. Eerst zullen lokale effecten van klimaatverandering merkbaar worden. Dit is sterk afhankelijk per regio: voor Nederland wordt een hogere temperatuur verwacht, met de sterkste opwarming in de extremen (koudste en warmste periodes). Dit vertaalt zich in minder vorstdagen en meer tropische nachten. Neerslag en extreme neerslagintensiteit zullen toenemen. Er zal ook meer hagel en onweer zijn, evenals meer droogte in de warme seizoenen (Ligtvoet, 2015).

De scenario's van IPCC wijzen uit dat de lange termijn wereldwijde gevolgen van de opwarming van de aarde alle individuen zullen treffen. Het IPCC voorspelt onomkeerbare gevolgen zoals verdere stijging van temperaturen, verzuring van de zee, gebrek aan drinkwater en extreme weersincidenten zoals orkanen en grootschalige branden. Dit zal zorgen voor conflicten om water, voedsel en leefgebied. Sommige regio's zullen onbewoonbaar worden, waardoor miljoenen klimaatvluchtelingen ontstaan. De wereldwijde voedselvoorziening zal in gevaar gebracht worden door verlies van biodiversiteit en veranderd klimaat. De risico's zijn het grootste voor ontwikkelingslanden. De beschreven

effecten zijn op sommige plekken in de wereld al merkbaar. Het IPCC rekent voor de meeste gevolgen tot en met 2100 (IPCC, 2014).

Deze potentiële gevolgen hebben ertoe geleid dat wereldwijd wordt toegewerkt naar een duurzamere luchtvaart. Dit wordt gedaan door nieuwe typen van voortstuwing te ontwikkelen, zoals elektrische voortstuwing, alternatieve brandstoffen maar ook beleid om te sturen op een verduurzaming van de luchtvaart. Op nationaal niveau wordt ook aan de weg getimmerd op dit onderwerp. In de volgende paragraaf wordt dit verder toegelicht.

### 2.1.3 Toewerken naar duurzame luchtvaart

Wereldwijd komt duurzaamheid, en dan met name het reduceren van koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>) emissies, steeds prominenter op de agenda te staan. Ook de luchtvaartsector staat onder een kritisch vergrootglas, waardoor aandacht voor duurzaamheid steeds belangrijker wordt voor een toekomstbestendige bedrijfsvoering. Vliegverkeer is volgens de IPCC verantwoordelijk voor 3.5% van de opwarming van de aarde door menselijke bronnen (Lee D. , 2009). Door de verwachte groei van de luchtvaart ten opzichte van andere sectoren en de uitdagingen voor grootschalige verduurzaming, wordt verwacht dat dit percentage zal groeien over tijd. Daarom zullen luchtvaartmaatschappijen, vliegtuigfabrikanten, luchthavens, luchtvaartdienstverleners en de petrochemische industrie de handen ineen moeten slaan om uitstoot van broeikasgassen in de luchtvaart terug te dringen.

Ook in Nederland wordt gewerkt aan de verduurzaming van de luchtvaart. De twee meest toonaangevende documenten voor de verduurzaming van de Nederlandse luchtvaart zijn op het moment de **Ontwerp-Luchtvaartnota** en **Slim en Duurzaam**. In de Ontwerp-Luchtvaartnota worden vooral in de hoofdstukken 4 (een gezonde, aantrekkelijke leefomgeving) en 5 (duurzame luchtvaart) onderwerpen gerelateerd aan duurzaamheid aangekaart. De aanbevelingen en conclusies uit deze hoofdstukken worden meegenomen en waar nodig benoemd in dit hoofdstuk.

Slim en Duurzaam is het actieplan van de Nederlandse Luchtvaartsector, Brancheorganisaties en Kennisinstellingen. Hierin wordt een stappenplan uitgewerkt voor een absolute reductie van CO<sub>2</sub>-emissies in 2030 tot het CO<sub>2</sub>-emissieniveau van 2005. Het stappenplan stelt ook de ambitie om de CO<sub>2</sub>-uitstoot van grondgebonden luchtvaartactiviteiten in 2030 terug te brengen tot nul. Dit stappenplan is opgedeeld in de volgende acties:

1. Het optimaliseren van vliegroutes & procedures;
2. Het stimuleren van schone vliegtuigen via luchthavengelden;
3. De inzet van duurzame brandstof;
4. Radicale vlootvernieuwing;
5. De inzet van trein en andere duurzame modaliteiten op korte afstanden;
6. Het realiseren van een emissieloze luchthaven;
7. Een snelle, efficiënte en duurzame 'first & last mile'.

Op het eerste gezicht springen vooral actiepunten 2 (stimuleren schone vliegtuigen) en 6 (realiseren van emissieloze luchthaven) eruit qua relevantie voor luchthavens. Echter speelt de luchthaven ook een essentiële faciliterende rol op alle andere punten; zo kan een revolutionair elektrisch vliegtuig niet opladen als de luchthaven geen oplaadpunten heeft en speelt de luchthaven ook een belangrijke rol in de vliegroutes en –procedures rondom opstijgen en landen. Daarom wordt in dit rapport ook aandacht besteed aan de faciliterende rol die een luchthaven zoals MAA zou kunnen hebben.

Naast eerdergenoemde documenten is er de **Duurzame Luchtvaarttafel** (vallend onder de sectortafel Mobiliteit van het nationale klimaatakkoord). Hier schuiven sectorpartijen, kennisinstellingen, brancheorganisaties en maatschappelijke organisaties aan. De Duurzame Luchtvaarttafel heeft het **Ontwerpakkoord Duurzame Luchtvaart** opgeleverd in februari 2019.

Binnen dit Ontwerpakkoord zijn verschillende werkgroepen vastgesteld, waaronder een werkgroep die zich richt op hybride-elektrisch vliegen. Inmiddels heeft deze werkgroep een actieplan opgesteld ten behoeve van hybride-elektrisch vliegen (**AHEV**). Dit actieprogramma kent drie roadmaps (AHEV - Nationaal Actieprogramma Hybride Elektrisch Vliegen, 2020):

1. Grondgebonden operaties;
2. General Aviation;
3. Commerciële luchtvaart.

Zo heeft de roadmap Grondgebonden operaties als doelstellingen om in 2030 de grondgebonden emissies met 100% te hebben gereduceerd en elektrisch taxiën als standaardprocedure te hebben. Voor General Aviation is het doel om alle binnenlandse luchtvaart in 2050 emissieloos te laten zijn. Voor de commerciële luchtvaart is een van de doelstellingen dat in 2050 alle korte-afstandsvluchten vanuit Nederland tot ongeveer 500 km volledig elektrisch wordt uitgevoerd.

Naast de nationale plannen hebben verschillende luchthavens hun eigen duurzaamheidsagenda. Voor luchthavens wordt een duurzame operatie steeds belangrijker omdat (zeker in Europa) hun “social license to operate” er toenemend van af hangt. Dit houdt in dat de belanghebbenden van luchthavens, zoals overheden, omwonenden en passagiers duurzaamheid een steeds belangrijkere randvoorwaarde vinden voor het bestaansrecht van de luchthaven. Dit is ook terug te zien in de strategie van luchthavens; zo heeft Schiphol het doel gesteld om in 2030 CO<sub>2</sub>-neutraal en afvalvrij te zijn (Schiphol, 2020), heeft Gatwick Airport net een Decade of Change (2010-2020) afgerond (Gatwick Airport, 2020). Het Noorse Avinor voert de groep aan die alle binnenlandse vluchten in Noorwegen vanaf 2040 elektrisch wil maken (Schaafsma, 2009) (Avinor, 2019).

## 2.2 Duurzaamheid op Maastricht Aachen Airport

Momenteel wordt duurzaamheid op verschillende manieren geadresseerd door MAA en partijen rondom de luchthaven. Er is nog wel ruimte om verdere invulling te geven aan dit thema. In deze paragraaf worden enkele voorbeelden genoemd van reeds lopende acties om de luchthaven te verduurzamen.

### **LED-verlichting**

Allereerst zal in 2020 alle halogeenverlichting rondom de luchthaven worden vervangen door duurzame ledverlichting. Hiermee wordt het energieverbruik verminderd. Ook wordt er gekeken naar de beste locaties om zonnepanelen te plaatsen.

### **Duurzaam pakketcentrum**

Een ander project dat gerealiseerd is op de luchthaven, is het duurzaam pakketcentrum dat DHL in 2019 op het terrein van de luchthaven heeft geopend; alle energievoorziening is hernieuwbaar (zonnepanelen en restwarmte) en regenwater wordt opgevangen voor het spoelen van de toiletten en het wassen van de DHL-voertuigen.

### **Onderzoek verduurzaming gebouwen**

In 2018 is een onderzoek uitgevoerd naar het verduurzamen van MAA, dat gericht was op de gebouwen. In dit onderzoek is het energieverbruik van de luchthaven bepaald, de potentie voor het plaatsen van zonnepanelen gekwantificeerd en zijn gebouwanalyses uitgevoerd. Hier kwam de doelstelling voor de luchthaven uit voort om CO<sub>2</sub>-en energieneutraal te zijn in 2025. In dit onderzoek is echter niet gekeken naar luchtvaartspecifieke aspecten van verduurzaming, of überhaupt naar de airside. In de hiernavolgende hoofdstukken wordt ook aandacht geschonken aan om op deze aspecten CO<sub>2</sub>-neutraliteit te bereiken. (Kemp & Mertens, 2018)

### **Walstroom en pre-conditioned air**

Walstroom en pre-conditioned air worden geïnstalleerd op de luchthaven om geluid en emissies ten gevolge van APU-gebruik te reduceren. De installatie hiervan is naar verwachting gereed uiterlijk eind 2020.

### 3 Situatieschets Maastricht Aachen Airport

Maastricht Aachen Airport (MAA) bestaat sinds 1945, toen het werd opgericht als landingsvliegveld voor de geallieerden aan het einde van de tweede wereldoorlog. Momenteel is MAA in gebruik als regionale luchthaven en is een van de vijf Nederlandse luchthavens van nationale betekenis.

#### Passagiers- en vrachtvervoer

In 2019 vlogen ruim 400.000 passagiers via MAA van of naar hun bestemming. Luchtvaartmaatschappij Corendon is een belangrijke speler in het vervoeren van passagiers van en naar MAA. Naast het vervoeren van passagiers richt MAA zich ook op het faciliteren van cargovluchten. Hiervoor zijn twee cargoterminals ingericht. De vracht wordt voornamelijk ingevlogen door full-freighters. Bellyvracht en luchtvracht van integrators vallen buiten het bereik van MAA ten gevolge van de relatief korte runway en de ban op nachtvluchten. In 2019 waren er 14.085 vliegbewegingen, waarvan bijna 6.000 met vliegtuigen die zwaarder zijn dan 6.000 kilo (grote luchtvaart). Door deze vliegtuigen werden 435977 passagiers vervoerd en 111.457 ton vracht (CBS, 2020). Naast de grote luchtvaart doet ook een substantieel aandeel kleine luchtvaart MAA aan.

Het grootste deel van de vluchten dat op MAA plaatsvindt met middelgrote of grote vliegtuigen zijn commercieel passagiersvervoer (door Corendon of Ryanair) of vrachtvluchten. Het meest voorkomende toestel voor de passagiersvluchten is de Boeing 737-800. De bestemmingen waar het meest op wordt gevlogen zijn Griekenland, Spanje, Italië en Turkije. Voor vrachtvluchten geldt dat de Boeing 747-400, Boeing 777, Airbus A330 en de ATR72 het meest wordt ingezet. Veel van deze vrachtvluchten gaan naar Turkije, Jordanië, de UAE, Rusland en de UK.

#### Overige bedrijvigheid

Op het gebied van MRO is Maastricht Maintenance Boulevard een samenwerkingsinitiatief met als doel het ontwikkelen en leveren van innovatieve concepten voor vliegtuigonderhoud. De samenwerking bestaat uit 30+ bedrijven die samenwerken op of rond Maastricht Aachen Airport.

De volgende diensten worden geleverd:

- One-stop-shop vliegtuigonderhoud
- Neus tot staartdiensten
- Geïntegreerde reparatieoplossingen voor componenten
- Uitwisseling en roteerbare poolbeschikbaarheid
- Samengestelde MRO
- Oppervlaktebehandeling en gespecialiseerde processen
- Niet-destructieve tests en inspectie-oplossingen op maat
- Engineering en certificering
- Services voor permanente luchtwaardigheidsbeheerorganisaties (CAMO)
- EASA Part 145 en 147 gecertificeerde dienstverleners
- Pilottraining en certificering
- Opleiding en opleiding van technici.

Er zijn ook verschillende vliegscholen en andere general aviation bedrijven die MAA als uitvalsbasis gebruiken. Voorbeelden hiervan zijn Cycloon, Vliegen boven Limburg en Avion Training.

#### Milieugebruiksruimte

Het Aanwijzingsbesluit voor Maastricht is op 27 december 2004 vastgesteld. Op 27 oktober 2011 is een Beslissing op Bezwaar (BOB 2011) genomen met betrekking tot de Aanwijzing 2004. Dit heeft geleid tot het vaststellen van nieuwe

Ke-contouren. De BOB 2011 is weer vervangen door een Omzettingsregeling, waarin de in de BOB 2011 vastgestelde milieugebruiksruimte gelijk is gebleven. Wel is de milieugebruiksruimte op een andere manier vastgelegd, namelijk op basis van Lden grenswaarden in plaats van Ke- en Bkl-contouren. De handhavingspunten bevinden zich op 100 meter afstand van de baankoppen en nabij woonkernen. De Ke- en Bkl-contouren worden nog wel gebruikt om de beperkingsgebieden voor bouw van woningen en andere geluidsgevoelige objecten vast te leggen. Zodra het nieuwe luchthavenbesluit wordt vastgesteld, is het de bedoeling dat het beperkingengebied op basis van een Lden (56 dB(A))-contour wordt vastgelegd. Hetzelfde geldt voor de plaatsgebonden-risicocontouren (PR-contouren) inclusief de daarbij behorende beperkingsgebieden.

## 4 Duurzame technologie

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de technische ontwikkelingen die momenteel plaatsvinden in de (duurzame) luchtvaart en welke daarvan relevant zijn voor MAA. De ontwikkelingen worden beschreven over een tijdlijn van 2020-2030 en 2030-2050.

De volgende onderwerpen worden behandeld:

- Vlootvernieuwing
- Retrofitting
- More Electric Aircraft
- (Hybride-)elektrisch;
- Vliegen op waterstof;
- Duurzame brandstoffen voor de luchtvaart (SAF);
- Alternatieve voortstuwingsconcepten
- Urban Air Mobility.
- Maintenance, Repair and Overhaul

### 4.1 Vlootvernieuwing

Vlootvernieuwing kan worden gezien als incrementele verbeteringen van bestaande vliegtuigtypes. Vlootvernieuwing is voor luchtvaartmaatschappijen een manier om duurzamer (in de brede zin van het woord) te vliegen.

Luchtvaartmaatschappijen kunnen om verschillende redenen kiezen om een nieuwer vliegtuig(type) aan te schaffen:

- De vraag is toegenomen en er kan een extra toestel worden ingezet
- De vraag is toegenomen en er kan een (iets) groter toestel worden ingezet
- Economische overwegingen: een nieuw vliegtuig is goedkoper in operatie en/of onderhoud dan een ouder vliegtuig, waarbij vervanging uiteindelijk netto winst kan opleveren
- Een vliegtuig wordt geweerd door regelgeving op luchthavens (bijvoorbeeld op basis van geluidsnormen).

Voor de luchthaven en omwonenden kunnen nieuwe vliegtuigtypes voordeel opleveren op het gebied van geluid en emissies. Zo is de brandstofefficiëntie van vliegtuigen door de jaren heen verbeterd door gebruik van nieuwere motoren, verbeterde aerodynamica en toepassing van lichtere materialen in vliegtuigen. Ook met betrekking tot de geluidniveaus op de grond zijn met deze nieuwe generatie vliegtuigtypes verbeteringen gerealiseerd. In meerdere opzichten is het daarom positief om deze types in de dagelijkse operatie van een luchthaven te hebben. (Rijksoverheid, 2020)

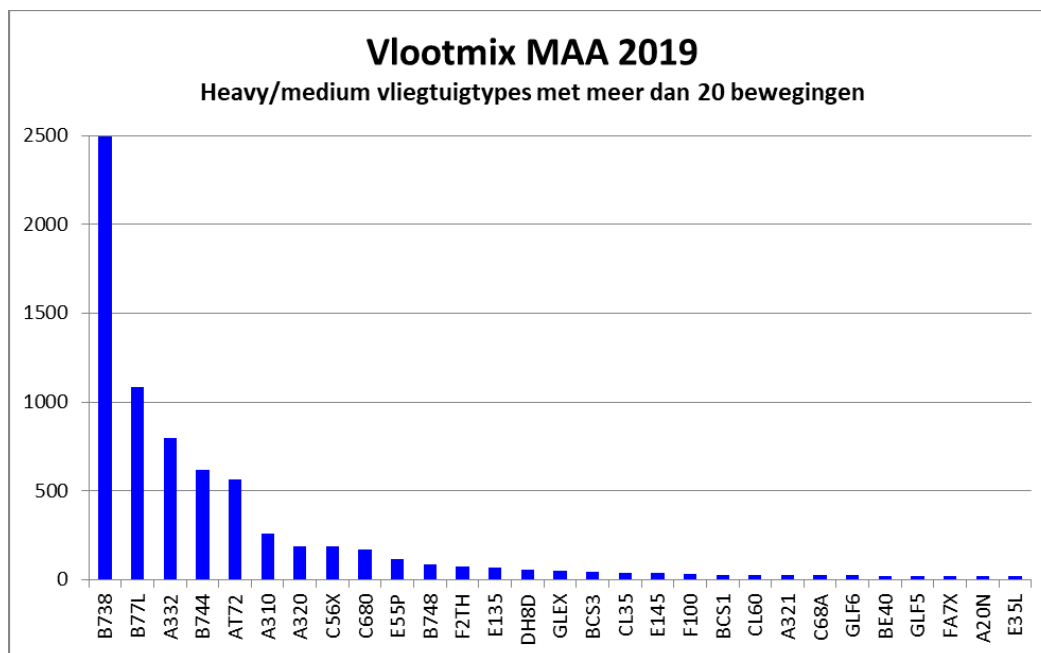
Vliegtuigfabrikanten Boeing, Airbus en Embraer hebben alle drie een nieuwe generatie vliegtuigen in productie genomen. Vliegtuigen van deze nieuwe generatie worden sinds 2017-2018 door luchtvaartmaatschappijen opgenomen in hun vliegtuigvloot.

#### **Vlootmix MAA**

In onderstaande figuur is de vlootmixverdeling weergegeven van MAA in het jaar 2019. Het betreft hier de zwaardere vliegtuigtypes: de gewichtsklassen heavy (136 ton en zwaarder) en medium (tussen 7 en 136 ton). Onderstaande types, die vaker dan 20 bewegingen hadden in 2019, representeren 95% van al het heavy en medium verkeer.



Zoals is op te maken uit de figuur, is het meest gebruikte type de Boeing 737-800, gevolgd door de B777-200LR.



Figuur 2: Vlootmix Maastricht Aachen Airport 2019

Wanneer deze vlootsamenstelling wordt vergeleken met gegevens uit voorgaande jaren, zijn de volgende verschuivingen te zien:

- Daling van het aantal vliegbewegingen met B747-400;
- Toename van B777-200 (drie luchtvaartmaatschappijen die veel met B747-400 op MAA vlogen zetten nu steeds vaker een B777-200 in);
- Afname van vliegbewegingen met A310;
- Toename voor A330-200 (één luchtvaartmaatschappijen die voorheen met A310 op MAA vloog zet nu een A330-200 in);
- Met het type ATP wordt niet meer op MAA gevlogen;
- Het aantal vliegbewegingen met AT72 is toegenomen;
- Het aantal vliegbewegingen met A320 is toegenomen. De eerste vliegtuigen van de nieuwe generatie Airbus vliegtuigen, A320Neo en A321Neo, vlogen in 2019 op MAA;
- Het aantal vliegbewegingen met B737-800 is toegenomen.

Deze verschuivingen zijn het gevolg van vlootvernieuwing door luchtvaartmaatschappijen. Ook stimulerende maatregelen die al door de luchthaven zijn genomen hebben hieraan bijgedragen; denk hierbij aan het ontmoedigen of het verbieden van het inzetten van bepaalde types vliegtuigen.

Naast de verschuivingen die al hebben plaatsgevonden zullen ook in de nabije toekomst verdere verschuivingen plaatsvinden. Naar verwachting zal de B747-400 geheel uitgefaseerd worden. Daarnaast wordt verwacht dat Corendon en Ryanair voor de passagiersvluchten op meer dan 60% van de vluchten, die nu met B737-800 worden uitgevoerd, de B737MAX inzetten. De Airbus A320, die nu een klein aandeel heeft in de passagiersvluchten, zal deels worden vervangen door A320Neo.

## 4.1.1 Effect op geluid, emissies en veiligheid

### Geluid

Tijdens de proefcasus Eindhoven is de te verwachten geluidreductie bij overgang naar nieuwe vliegtuigtypes is in kaart gebracht tijdens de analysefase door **To70 (2018)**. Over de effecten werd daar geschreven:

*“Voor de nadering zijn de geluidniveaus van de B737 MAX en de Airbus A320/A321 NEO 1,8 tot 3,1 EPNdB lager en voor starts 2,5 tot 4,6 EPNdB. Zijwaarts van het vliegp pad zijn de niveaus 5,0 tot 6,8 dB lager. Een geluidvermindering van 3 dB komt overeen met een halvering van de geluidsintensiteit.”<sup>2</sup>*

Gelet op het feit dat het grootste deel van de civiele vloot op MAA uit B737-800 bestaat, zal bij een gelijkblijvend aantal vliegbewegingen de geluidoverlast hiervan afnemen. In de berekeningen voor het scenario met 50% reductie van het aantal gehinderden is het effect van vervanging door de B737MAX meegenomen.

Lagere geluidniveaus zullen ook positief bijdragen aan het terugdringen van slaapverstoring. Dit zal zeker niet voor alle locaties rondom de luchthaven gelden. De mate waarin dit gebeurt, is afhankelijk van de afstand tussen de waarnemer en de vlucht.

### Klimaat

Het grootste effect op klimaat zal veroorzaakt worden door de komst van de B737 MAX en de B777-200, doordat deze het grootste aandeel in B737-800 en B747-400 zal vervangen. Volgens Boeing is de B777-200 is gemiddeld ongeveer 15-20% zuiniger dan de B747-400 en de B737 MAX 20% zuiniger dan de B737-800 (ATAG, n.d.) (ICCT, 2017) Door de uitfasering van de B747-400 en toename in B777-200 door drie luchtvaartmaatschappijen die overstappen op de B777-200 neemt de CO<sub>2</sub> en waterstof uitstoot af, wat een positief effect heeft op het klimaat. Verder is de verwachting dat op MAA de A320neo types de oudere generatie A320 vervangt. Volgens de fabrikant is de A320neo 15-20% zuiniger dan zijn voorganger de A320.

De vliegtuigen zijn voornamelijk zuiniger in de kruisvluchtfase maar ook tijdens het taxiën en bij de start en landing. Per vliegbeweging vertaalt dat zich voor het klimaat in een reductie van CO<sub>2</sub> en waterdamp van zo'n 15-20%. Omdat de verwachting is dat niet 100%, maar 60% van B737-800 toestellen vervangen wordt door de B737 MAX is de CO<sub>2</sub>-reductie per vliegbeweging over de vloot van Ryanair en Corendon niet 20%, maar gemiddeld 12%. Het aandeel in A320 toestellen op MAA is zeer beperkt, dus het effect op het klimaat van de besparing door de komst van de A320neo zal zeer gering zijn.

Ook de toename in AT72 en uitfasering van ATP-vliegtuigen zal voor een positief klimaateffect zorgen, doordat de AT72 veel zuiniger is dan de ATP. Ten slotte zal de afname in de oudere generatie A310 en toename in de nieuwere generatie A330-200 voor een beperkt positief effect zorgen.

### Luchtkwaliteit

Bij de beschouwing van het effect op luchtkwaliteit gaat het vooral om de stikstofoxiden en (ultra-)fijnstofemissies van het vliegverkeer op en nabij de luchthaven. Hoewel de luchtkwaliteit afhangt van de hoeveelheid én de locatie (inclusief hoogte tot ongeveer 914m) van de emissies van het vliegverkeer, wordt bij een eerste orde vergelijking van twee vliegverkeer scenario's vaak alleen gekeken naar de hoeveelheid emissies die worden uitgestoten tijdens de zogenaamde LTO-cyclus.

<sup>2</sup> Effective perceived noise in decibels (EPNdB) is een maat voor het geluidniveau van een individuele vliegtuigpassage, welke gebruikt wordt voor de geluidcertificatie van vliegtuigen

De hoeveelheid emissies die een vliegtuigtype in de LTO-cyclus uitstoot is afhankelijk van het motortype waarmee het vliegtuig is uitgerust. Afhankelijk van de verschillende motortypen waarmee de beschouwde vliegtuigtypen op MAA kunnen worden uitgerust kan de NO<sub>x</sub>-uitstoot bij vlootvernieuwing lager (voor de A320neo) of juist hoger (voor de B737 MAX) liggen. Dit heeft (van Bokhorst & Faber, 2018) berekend voor Eindhoven Airport voor dezelfde toestellen. Hoewel op MAA andere waarden voor de LTO-cyclus zullen resulteren, is het aannemelijk dat voor deze type motoren gelijke af- en toenames zullen resulteren. Voor dit type motoren werd tevens aangenomen dat de PM<sub>10</sub> emissies gelijk blijven. Dit betekent dat, hoewel de nieuwe vliegtuigtypen zuiniger (CO<sub>2</sub>) zijn, ze mogelijk minder schoon zijn dan de vliegtuigtypen die ze vervangen voor wat betreft NO<sub>x</sub>, en even schoon voor wat betreft PM<sub>10</sub>. Dit heeft een mogelijk negatief effect op luchtkwaliteit.

### Veiligheid

Moderne vliegtuigen zijn volgens de laatste certificatie eisen gebouwd. Ook bevatten deze vliegtuigen veelal nieuwe technologie om de vliegveiligheid verder te verbeteren. Daardoor laten dit soort nieuwe vliegtuigen een betere vliegveiligheidsstatistiek zien (lagere ongevalskansen) dan eerdere generatie vliegtuigen.

## 4.1.2 Betekenis voor MAA

Luchtvaartmaatschappijen onderzoeken continu op welk moment het financieel het meest aantrekkelijk is om vlootvernieuwing door te voeren. Daarnaast kunnen sommige toestellen ook tegen een maximale levensduur aan lopen, dit speelt voornamelijk bij vrachtvliegtuigen. Het aanschaffen van nieuwe toestellen is duur, maar resulteert wel in lagere operationele en onderhoudskosten. Uiteindelijk zal vlootvernieuwing periodiek plaatsvinden, tot en met 2050.

De huidige COVID-19 crisis heeft een dubbel effect op vlootvernieuwing; aan de ene kant hebben luchtvaartmaatschappijen te maken met minder liquiditeit en grote onzekerheid en zullen grote investeringen lastiger te plannen zijn, maar aan de andere kant kunnen duurzaamheidseisen voor staatssteun er juist voor zorgen dat vlootvernieuwing versneld plaatsvindt. Zo hebben de Nederlandse en Franse overheid beiden vlootvernieuwing opgenomen in duurzaamheidseisen bij het redden van Airfrance KLM. Maatschappijen die nog voldoende reserves hebben zullen wellicht juist nu investeren in hun vloot, om zo met een concurrentievoordeel uit de pandemie te komen.

De luchthaven kan, binnen de wettelijke bepalingen die zijn vastgelegd in de Wet luchtvaart, vlootvernieuwing stimuleren door tariefdifferentiatie toe te passen in de landingsgelden. Hierbij wordt dan voor meer luidruchtige en/of meer vervuilende vliegtuigen een hoger tarief gerekend terwijl de stillere/schonere vliegtuigen korting ontvangen. Een dergelijke aanpak wordt gehanteerd op meerdere luchthavens, bijvoorbeeld Schiphol, Brussel en Gatwick. Het effect van deze maatregel hangt af van meerdere factoren (zoals lopende leasecontracten en kostenoverwegingen) die een rol spelen bij luchtvaartmaatschappijen om te komen tot inzet van vliegtuigen.

Om te voorkomen dat luchthavens met de laagste landingsgelden de oudere vliegtuigen houden, zal de (Europese) overheid hierin regulerend moeten optreden.

De kosten voor het doorvoeren van een stuurmaatregel in de vorm van gedifferentieerde landingsgelden kunnen worden gezien als kosten van de dagelijkse operatie van de luchthaven.

### 4.1.3 Tijdlijn

Luchtvaartmaatschappijen onderzoeken continu op welk moment het financieel het meest aantrekkelijk is om vlootvernieuwing door te voeren. Daarnaast kunnen sommige toestellen ook tegen een maximale levensduur aan lopen, dit speelt voornamelijk bij vrachtvliegtuigen. Het aanschaffen van nieuwe toestellen is duur, maar resulteert wel in lagere operationele en onderhoudskosten. Uiteindelijk zal vlootvernieuwing periodiek plaatsvinden, tot en met 2050.

De huidige COVID-19 crisis heeft een dubbel effect op vlootvernieuwing; aan de ene kant hebben luchtvaartmaatschappijen te maken met minder liquiditeit en grote onzekerheid en zullen grote investeringen lastiger te plannen zijn, maar aan de andere kant kunnen duurzaamheidseisen voor staatssteun er juist voor zorgen dat vlootvernieuwing versneld plaatsvindt. Zo hebben de Nederlandse en Franse overheid beiden vlootvernieuwing opgenomen in duurzaamheidseisen bij het redden van Airfrance KLM. Maatschappijen die nog voldoende reserves hebben zullen wellicht juist nu investeren in hun vloot, om zo met een concurrentievoordeel uit de pandemie te komen.

## 4.2 Retrofitting

Retrofitting is het vervangen van sommige onderdelen van een bestaand vliegtuig waardoor brandstofbesparing, geluidsreductie of emissiereductie kan worden behaald. De laatste jaren is vooral veel winst behaald door toepassing van winglets, het upgraden van motoren en vernieuwde avionica.

Voorbeelden van retrofitting zijn:

- **Nieuwe winglets**<sup>3</sup>: deze verlagen de weerstand rondom de vleugeltips waardoor brandstof wordt bespaard doordat de tipwervels plaatselijk worden verminderd. Veelal gaat dit gepaard met minder geluidsoverlast: vliegtuigen hebben een lager startgewicht doordat ze minder brandstof mee hoeven te nemen. Daarnaast zorgen de minder krachtige tipwervels voor verminderde geluidproductie.
- **Performance Improvement Packages**<sup>4</sup> (PIPs): deze verlagen het brandstofverbruik en/of de onderhoudskosten.
- **Herinrichting van de cabine**: meer stoelen, comfort, en gewichtsreductie. Dit gebeurt veelal met het groot onderhoud en wordt door veel maatschappijen uitgevoerd. Hierdoor kunnen meer passagiers per vlucht worden vervoerd, en/of brandstof worden bespaard.
- **Nieuwe avionica**:<sup>5</sup> dit kan leiden tot een meer optimale vluchtuitvoering wat resulteert in een besparing op brandstof.
- **Minder verflagen of toepassing van weerstand verminderende verf**: Vliegtuigen krijgen tijdens groot onderhoud vaak een nieuwe verflaag, met minder lagen. Naar weerstand verminderende verf wordt onderzoek gedaan.
- **Vervanging van onderdelen**: het vervangen door een lichtere versie van het onderdeel. Bijvoorbeeld door gebruik te maken van composieten materialen. Hiermee wordt gewicht en dus brandstof bespaard. De ontwikkeling van deze onderdelen is tijdrovend en vergt certificatie.
- **Antennes met minder weerstand**. Door de grote vraag naar on-board internet en telefoon neemt de hoeveelheid antennes toe op een vliegtuig en wordt het belangrijker om de weerstand hiervan te verlagen; hiernaar wordt onderzoek verricht.
- **Wegnemen A320 fluittoon**. Op de A320 kan een geluidreducerende component worden aangebracht, de zogeheten “vortex generator” die de hoge fluittoon reduceert (tot 4 dB) die kenmerkend is voor de A320.

### 4.2.1 Effect op geluid, emissies en veiligheid

De effecten op geluid, luchtkwaliteit, klimaat en slaapverstoring zijn per retrofit erg verschillend. Dat komt omdat het een grote diversiteit aan maatregelen betreft. Daarnaast kan niet elke retrofit op elk vliegtuigtype worden toegepast. De meeste van bovengenoemde maatregelen besparen brandstof en dragen daarmee bij – zij het soms heel beperkt – aan een verbetering van de luchtkwaliteit en het verminderen van de klimaatimpact. Wanneer een efficiëntieverbetering behaald kan worden via een retrofit, leidt dit namelijk tot brandstofbesparing en een bijbehorende vermindering in emissies van verbrandingsproducten. Echter kan een brandstofbesparing ook leiden tot hogere verbrandingstemperaturen en -drukken in de motor, doordat dit voor een efficiëntere verbranding van de brandstof zorgt. Indien dit het geval is, kan de NO<sub>x</sub> uitstoot juist toenemen, doordat deze uitstoot afhankelijk is van de

<sup>3</sup> Een winglet is een meestal opstaande verlenging van de vleugeltip.

<sup>4</sup> Een Performance Improvement Package betreft een pakket verbeteringen op onder meer het gebied van vliegtuig aerodynamica en motoren.

<sup>5</sup> Avionica betreft de elektronica in het vliegtuig.

verbrandingstemperatuur en -druk. Dit zorgt op lage hoogtes rond de luchthaven voor een negatief effect op luchtkwaliteit en op hogere hoogtes (kruisvlieghoogte) voor een negatief effect op het klimaat.

Sommige retrofits hebben een ander doel dan prestatieverbeteringen, bijvoorbeeld onderhoudskosten verlagen. In dit geval is er geen effect op emissies en klimaat.

De retrofits hebben geen invloed op de vliegveiligheid aangezien deze geen negatieve gevolgen mogen hebben op het type certificaat. In sommige gevallen moet het vliegtuig deels opnieuw worden gecertificeerd zoals bij de installatie van winglets.

## 4.2.2 Betekenis voor MAA

Maastricht Aachen Airport heeft belang bij de implementatie van retrofits door luchtvaartmaatschappijen omdat geluid en emissies gereduceerd kunnen worden. Echter is het uitdagend voor de luchthaven om hierop te sturen. Net zoals bij vlootvernieuwing, kan de luchthaven eventueel toepassing van retrofits stimuleren door tariefdifferentiatie toe te passen in de landingsgelden, binnen de wettelijke bepalingen die zijn vastgelegd in de Wet Luchtvaart. Dit kan een korting zijn op de landingsgelden wanneer bepaalde retrofits zijn toegepast. Het effect van deze maatregel hangt af van meerdere factoren (zoals lopende leasecontracten en kostenoverwegingen) die een rol spelen bij luchtvaartmaatschappijen in de overweging een vliegtuig wel of niet te retrofitten.

## 4.2.3 Tijdlijn

Retrofitting zal naar verwachting in de toekomst beschikbaar blijven voor reeds uitgebrachte vliegtuigmodellen, omdat er vanuit het verdienmodel van luchtvaartmaatschappijen altijd vraag zal zijn naar manieren om zuiniger te vliegen. Ook wanneer radicaal vernieuwende vliegtuigmodellen verschijnen, is de verwachting dat er ook daar om de paar jaar retrofits voor beschikbaar komen, omdat de kennis zich snel blijft ontwikkelen na uitbrengen van het vliegtuig. Daarom is het voor 2020, 2030, 2040 en 2050 de verwachting dat er retrofits beschikbaar zullen zijn voor modellen die ouder dan vijf jaar zijn.

## 4.3 Elektrisch vliegen

Deze sectie beschrijft de ontwikkelingen op het gebied van elektrisch vliegen. De verschillende typen voortstuwing komen aan bod, alsmede de impact die dat heeft op de luchthaveninfrastructuur.

### 4.3.1 More Electric Aircraft

Elektrificering binnen de luchtvaart hoeft niet meteen te leiden tot een volledig elektrisch aangedreven vliegtuig. Er wordt op grote schaal gewerkt aan het ontwikkelen van More Electric Aircraft (MEA); conventioneel aangedreven vliegtuigen waarin hydraulische en pneumatische processen worden geëlektrificeerd. Voorbeelden van systemen die geëlektrificeerd worden zijn het environmental control system, het flight control system, het landingsgestel, de remmen op de wielen, de vorstbescherming en de straalomkeerders. In de eerste plaats is dit concept aantrekkelijk omdat elektrische systemen voordelen bieden ten opzichte van hydraulische en pneumatische systemen op het gebied van onderhoud en betrouwbaarheid. Daarnaast kan het elektrificeren ook bijdragen aan gewichtsbesparing. De Boeing 787, Airbus A350 en F35 Joint Strike Fighter zijn voorbeelden van huidige vliegtuigen waar More Electric systemen geïmplementeerd zijn (Roland Berger, 2017).

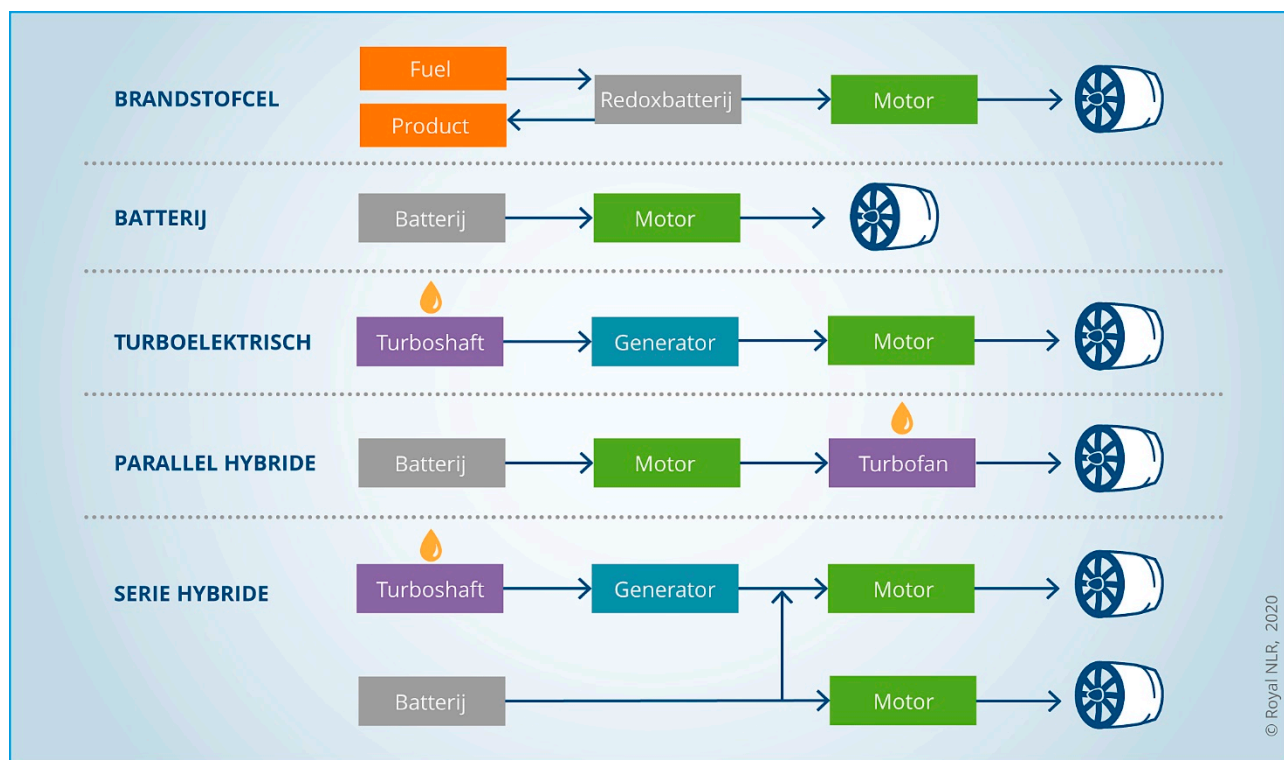
### 4.3.2 (Hybride-)elektrische voortstuwing

Momenteel zijn voortstuwingssystemen in de luchtvaart voornamelijk gebaseerd op de thermale decompositie (verbranding) van koolwaterstoffen. Brandstof wordt verbrand in pistonmotors of gasturbines waarmee mechanisch vermogen wordt gegenereerd. Dit mechanisch vermogen drijft een aerodynamisch voortstuwingmechanisme aan, meestal een propeller of fan. Na verbranding worden de reststoffen in de atmosfeer losgelaten. Dit is negatief voor de omgeving en de klimaateffecten van luchtvaart, maar het heeft een positief effect op prestatie van het vliegtuig omdat gewicht afneemt gedurende de vlucht.

Een elektrisch voortstuwingssysteem kan stuwkracht genereren via omzetting van elektrische energie in mechanische energie, waarmee een propeller of fan wordt aangedreven. Een vaste batterij of brandstofcel zou een volledig elektrisch systeem kunnen aandrijven, echter vormen energiedichtheid en vermogen in dit geval een beperking. Dit geldt vooral tijdens het opstijgen wanneer een grote stuwkracht vereist is om voldoende lift te genereren. Met de huidige batterijsystemen lijken hybride systemen daarom op korte termijn een realistischer voortstuwingconcept. In deze paragraaf worden een aantal hybride en volledig elektrische voortstuwingconcepten toegelicht.

#### 4.3.2.1 Aandrijvingen (hybride-)elektrisch vliegen

Voor een hybride-elektrische aandrijving zijn verschillende configuraties mogelijk. In deze paragraaf worden de mogelijke configuraties besproken, namelijk brandstofcelssystemen, batterijen, turbo-elektrisch, parallel-hybride en serieel-hybride (Hepperle, 2012).



Figuur 3: Type voortstuwingsmechanismes voor (hybride-)elektrisch vliegen

#### 4.3.2.2 Batterijsystemen

In een batterijsysteem is het elektrisch vermogen direct beschikbaar. Efficiëntie wordt beperkt door de cycli van laden en ontladen en kleine systeemverliezen. In de meeste gevallen blijft de massa van het systeem gelijk, behalve bij air-breathing batterijen zoals Li-O<sub>2</sub>. Door de toenemende druk op verschillende sectoren om te elektrificeren wordt er wereldwijd hard gewerkt om batterijtechnologie en daarmee o.a. de specifieke energie (Wh/kg) te verbeteren. Voor een Boeing 737 wordt geschat dat een batterij van 800 Wh/kg nodig zou zijn om 500 nautical miles te vliegen (926 km), terwijl onze huidige best presterende batterijen rond de 250Wh/kg pieken. (Derei & Meerstadt, 2019) Volledig elektrisch vliegen tot vier personen is al wel gedemonstreerd.

#### 4.3.2.3 Turbo-elektrische systemen

In een turbo-elektrisch systeem wordt de mechanische energie van een stoom- of gasturbine omgezet in elektrische aandrijving door middel van een generator. Een voordeel hiervan is dat je turbine los kunt koppelen van propeller of fan. Dit biedt mogelijkheden voor systemen als distributed electric propulsion, waar meerdere fans over de breedte van de vleugel verspreid zijn. Dit heeft voordelen voor de prestaties van het vliegtuig omdat aerodynamica en gewichtsverdeling rond de vleugel verder kunnen worden geoptimaliseerd. Turbo-elektrische systemen kunnen worden aangedreven door conventionele brandstof of directe verbranding van waterstof.



#### 4.3.2.4 Hybride-elektrisch

Er zijn twee configuraties voor een hybride-elektrisch systeem: parallel of in serie geschakeld. In het parallel geschakelde systeem wordt het vermogen van een turbofan aangevuld door een batterij en elektromotor, voor de directe aandrijving van fans. Het in serie geschakelde systeem bestaat uit een turboshaft met generator, naast een batterij die energie levert. De energie uit allebei deze bronnen drijft fans aan via bijbehorende elektromotoren. Voor veel vluchtfases is de turbofan nog de belangrijkste bron voor voortstuwingsenergie. Tijdens de kruisvlucht kan mogelijk eerder volledig op het elektrische systeem overgegaan worden vanwege de lagere energiebehoefte wanneer niet geklommen hoeft te worden.

### 4.3.3 Effect op geluid, emissies en veiligheid

#### Geluid

Van verschillende configuraties, die mogelijk worden gemaakt door elektrische motoren, wordt verwacht dat het de geluidsniveaus reduceert. Een voorbeeld hiervan is distributed propulsion (verspreide voortstuwing) waarbij meerdere elektromotoren over de breedte van de vleugel zijn gemonteerd. Dat dit ook de ervaren hinder reduceert is aannemelijk, maar nog niet definitief aangetoond. In eerder onderzoek op het NLR is een eerste orde berekening gemaakt van het potentiële effect op geluid, deze berekening toonde aan dat dit concept mogelijk voor een aanzienlijke geluidreductie kan zorgen.

Dat geluidsniveaus afnemen betekent niet direct dat hinder ook afneemt. Het geluid dat elektrische vliegtuigen zullen produceren kan anders van aard zijn dan het geluid van conventionele vliegtuigen, wat betekent dat de hinder bij een gelijk geluidsniveau daadwerkelijk anders kan zijn. Ook als we ervan uit gaan dat dit type vliegtuigen stiller is dan grotere conventionele vliegtuigen betekent dat niet direct dat de totale geluidsbelasting in een jaar lager zal zijn. Doordat er met kleinere en stillere vliegtuigen meer vluchten moeten worden uitgevoerd, om alle passagiers te vervoeren, kan de totale geluidsbelasting mogelijk alsnog hoog uitvallen. Dit is sterk afhankelijk van het verschil in geluidsniveaus en hoeveel vluchten er daadwerkelijk nodig zijn. Omdat het geluid van elektrische vliegtuigen mogelijk anders van aard zal zijn is het nog niet duidelijk of de bestaande dosis-effect relatie, waarmee hinder kan worden bepaald, in dat geval nog toepasbaar is.

Een toenemend aantal vliegtuigen kan tot een situatie leiden waarbij met grotere frequentie vliegtuigen over een bepaald gebied vliegen. Dit kan ervoor zorgen dat de stille perioden afnemen (tijd tussen twee hoorbare vliegtuigen).

#### Klimaat

*More electric aircraft:* de gewichtsbesparing door elektrificatie van systemen leidt ook tot brandstofbesparing. Hierdoor wordt er minder CO<sub>2</sub> en H<sub>2</sub>O uitgestoten, wat een positief effect heeft op klimaatverandering.

De uitstoot tijdens de vlucht wordt met 100% gereduceerd met volledig elektrisch vliegen met batterijsystemen. Echter is dit niet het geval wanneer men naar de volledige levenscyclus van een batterij kijkt. Bij het opwekken van de benodigde energie om de batterijen op te laden, komt namelijk nog CO<sub>2</sub> vrij. Een mitigerende maatregel is om de batterijen op te laden met hernieuwbare energie dat bijvoorbeeld door de luchthaven (eventueel elders) wordt opgewekt.

*Turbo-elektrische systemen*

Een distributed turbo-elektrisch systeem kan het brandstofverbruik tot 20% verminderen wanneer er tevens gebruik wordt gemaakt van de boundary layer ingestion methode (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2016). Bij deze methode wordt er zo gevlogen, dat de instromende lucht in de motoren een zo laag mogelijke snelheid hebben, zodat er minder voortstuwingsvermogen nodig is voor stuwkracht generatie. Bij een distributed turbo-elektrisch systeem wordt door de distributie van de voortstuwing de stuwkracht opgewekt door heel veel lucht en een relatief kleine verhoging van de snelheid.

#### *Hybride-elektrisch*

Door gebruik te maken van een Electrically Assisted Propulsion System (EAPS) turbofan, kan een emissiereductie van 5.5% behaald worden, met een NOx emissie reductie van 3.7%. Dit heeft een positief effect op het klimaat (Ang, Gangoli Rao, Kanakis, & Lammen, 2019).

De Boeing Sugar VOLT, is een truss-based wing hybride vliegtuig. Deze maakt gebruik van twee hybride turbofans die conventionele brandstof verbranden bij het opstijgen. Vervolgens schakelt het over naar de elektrische systemen om de motoren aan te drijven tijdens het vliegen. Dit systeem kan de emissies met 70% verminderen ten opzichte van huidige vliegtuigen van gelijke klasse (2019).

### **Luchtkwaliteit**

#### *Elektrisch vliegen met batterijsystemen:*

Elektrisch vliegen neemt de NOx emissies tijdens de volledige vlucht weg, waardoor de elektrische vliegtuigen niet bijdragen aan de lokale luchtkwaliteit.

#### *Turbo-elektrische systemen:*

Door verbeterde aerodynamica en optimale gewichtsverdeling rond de vleugel, kan met dit systeem efficiënter worden opgestegen en geland. Hierdoor zou er brandstof bespaard kunnen worden en minder NOx uitgestoten kunnen worden. Dit heeft een beperkt effect op luchtkwaliteit.

#### *Hybride-elektrisch:*

Een EAPS-systeem kan de emissies op en rondom een luchthaven verminderen doordat het gebruikt kan worden voor elektrisch taxiën en doordat er minder brandstof benodigd is bij het opstijgen en landen. Hierdoor neemt de uitgestoten NOx af, wat de lokale luchtkwaliteit verbetert.

De uitstoot tijdens het opstijgen is met de Boeing Sugar VOLT relatief minder, doordat de vleugel een grote aspect ratio heeft: hierdoor heeft het een kortere startbaan nodig. Hiermee wordt er minder NOx uitgestoten, wat een positief effect heeft op de lokale luchtkwaliteit. Let wel, deze vermindering is te danken aan de grote aspect ratio, niet aan het hybride elektrische systeem.

### **Veiligheid**

Wat betreft vliegveiligheid staat elektrisch vliegen (inclusief hybride oplossingen) deels nog in de kinderschoenen. Voor verkeersvliegtuigen zijn er nog certificatiestandaarden beschikbaar. Er is wel ervaring opgedaan met grote batterijen als noodvoorziening op de B787. Dit is niet zonder problemen gegaan aangezien er diverse 'battery runaways' zijn geweest die het vliegtuig zelfs tijdelijk aan de grond heeft gezet. In de toekomst zullen elektrische verkeersvliegtuigen aan dezelfde hoge standaarden als conventionele vliegtuigen moeten voldoen.

## 4.3.4 Betekenis voor MAA

MAA is (logischerwijs) momenteel ingericht om capaciteit te bieden aan luchtvaartmaatschappijen die met de kerosine-aangedreven vliegtuigen opereren. De general aviation activiteiten rondom de luchthaven zijn wellicht sneller te elektrificeren dan het grootschalige passagiersvervoer; zeker vlieglessen of pleziervluchten lenen zich erg goed voor elektrificering.

Een verandering in de manier van vliegen, of het ontwerp van vliegtuigen kan ertoe leiden dat de inrichting van het vliegveld moet worden aangepast. Naast de nodige investeringen en operationele aanpassingen, biedt elektrisch vliegen natuurlijk ook kansen voor de luchthaven; emissies van broeikasgassen en wellicht ook geluid kunnen fors teruggedrongen worden.

### 4.3.4.1 Impact op luchthaveninfrastructuur

#### 4.3.4.1.1 Opstelplaatsen

Vliegtuigopstelplaatsen bieden vliegtuigen van een bepaalde grootte ruimte op de luchthaven om te kunnen parkeren en afgehandeld te worden. Een groot deel van deze opstelplaatsen is ingericht voor grote vliegtuigen (groter of gelijk aan B737). In het geval dat veel vliegtuigen van deze grootte worden vervangen door een groter aantal kleinere vliegtuigen zullen er meer opstelplaatsen moeten worden gecreëerd om het toegenomen aantal vliegtuigen onder te brengen, indien het aantal passagiers ongeveer gelijk blijft. Dit kan deels mogelijk gemaakt worden door de opstelplaatsen te verkleinen.

#### 4.3.4.1.2 Energie infrastructuur

Ingebruikname van kleine elektrische vliegtuigen, ter vervanging van grotere conventionele vliegtuigen, zal betekenen dat een deel van de kerosineafname komt te vervallen. Dit heeft mogelijk invloed op de hoeveelheid brandstofwagens die op de luchthaven nodig is. Minder grondverkeer heeft over het algemeen een positieve impact op de veiligheid en capaciteit op een luchthaven. In plaats van kerosine zal gebruik worden gemaakt van elektriciteit, hiervoor zal de elektrische infrastructuur van de luchthaven aangepast moeten worden. De energievraag van de luchthaven, specifiek ook de piekbehoefte, zal toenemen. Het elektriciteitsnetwerk zal uitgebreid moeten worden om laadstations te voorzien en er moet om technische en economische redenen een plan gemaakt worden voor piekmanagement. Ook moet oplaadinfrastructuur geplaatst worden. Dit kan voor de luchthaven een belangrijke keuze zijn; de infrastructuur moet ervoor zorgen dat de meest gangbare elektrische vliegtuigen van de toekomst op MAA kunnen opladen. Hoe deze infrastructuur eruitziet, is afhankelijk van de manier van opladen; direct opladen of een batterijwissel.

#### 4.3.4.1.3 Opladen en batterijwissel

In het geval dat batterijen niet gemakkelijk uit het vliegtuig kunnen worden gehaald, zullen oplaadstations moeten worden geplaatst bij de opstelplaatsen. Het vliegtuig zal dan tijdens de laadtijd aan de opstelplaats gebonden zijn, wat mogelijk negatieve effecten heeft op de omdraaitijd en daarmee de capaciteit van de luchthaven. Wanneer met 120 KW wordt geladen, wordt voor een theoretisch vliegtuig voor 70 personen een oplaadtijd van 1,5h-3h voorzien. (MAHEPA, 2019) Als snelladen op eenzelfde vermogen als de auto-industrie zou worden toegepast (tot 350 KW), zou deze tijd verkort kunnen worden. Voor de benodigde grootte van de opstelplaats kan een oplaadpunt een positieve impact hebben in vergelijking met de huidige situatie. Omdat er geen grote brandstofwagens naast het vliegtuig hoeven te manoeuvreren kan de opstelplaats mogelijk qua grootte beperkt worden.

Een ander concept is de *battery swap*. Hierbij worden batterijpakketten buiten het vliegtuig opgeladen en vervolgens ter vervanging van de gebruikte batterijen geplaatst in het vliegtuig. Het voordeel hiervan is dat enkel op een centrale plek de oplaadinfrastructuur moet worden opgezet en de luchthaven minder ingrijpend hoeft te worden veranderd. Een ander bijkomend voordeel is kortere omdraaitijd door het wegnemen van de oplaadtijd. Anderzijds kan het verwisselen van batterijen een operationele hindernis vormen, vanwege grote afmetingen en gewichten en het feit dat het vliegtuig waarschijnlijk vrij van passagiers moet zijn op het moment van opladen. Het heen en weer rijden van grote batterijpakketten (toename verkeer) heeft ook een negatieve impact op de operatie en veiligheid.

#### 4.3.4.1.4 Capaciteit op de luchthaven

De capaciteit van een vliegveld is sterk afhankelijk van eigenschappen van de luchthaven, maar ook van het soort vliegtuigen dat er op opereert. In het geval van MAA zijn zowel passagiers- als vrachtvluchten significant, waardoor er veel verschillende types vliegtuigen vliegen.

De turbulentie die vrijkomt bij een startend vliegtuig kan voor onveilige situaties zorgen. Om die reden zijn regels opgesteld over de separatie in de tijd tussen vliegtuigen van verschillende gewichtsklassen. Als de verdeling van vliegtuigen verandert op een vliegveld kan de doorstroomcapaciteit daarmee ook veranderen. Op een vliegveld waar maar één soort gewichtsklasse opereert kan de minimale tijdseparatie worden toegepast. Echter, wanneer op een vliegveld veel kleine en grote vliegtuigen naast elkaar opereren moeten er vaker grotere separaties worden toegepast.

Doordat op MAA relatief weinig vluchten vlak achter elkaar opstijgen, zal het vliegen van deze kleinere toestellen niet direct impact hebben op de capaciteit van de luchthaven. Zeker als het gaat om lesvluchten of pleziervluchten die worden *vervangen* door een elektrische variant, blijft het separatievraagstuk hoogstwaarschijnlijk identiek. Wanneer in de verdere toekomst, bijvoorbeeld 2030, grotere (hybride-)elektrische voertuigen op MAA zouden vliegen, zal op een slimme manier naar de verdeling van vluchten moeten worden gekeken. Ook hier echter biedt het relatieve rustige schema van MAA ruime mogelijkheden.

Een andere factor die de capaciteit van een luchthaven bepaalt is het vermogen om een bepaald aantal vliegtuigen af te handelen (schoonmaken, catering, tanken/opladen, etc.). Het vervangen van een aantal grote conventionele vliegtuigen voor een veelvoud kleinere elektrische vliegtuigen kan betekenen dat er meer afhandelsactiviteiten moeten plaatsvinden. Dit is uiteraard afhankelijk van de benodigde stappen in de afhandeling van dit type vliegtuigen. Gezien de aanwezigheid van verschillende MRO-bedrijven zou dit juist ook een kans zijn voor dit soort bedrijven om hier in te gaan specialiseren. Meer daarover in paragraaf 4.8.

### 4.3.5 Tijdlijn elektrisch vliegen

#### 4.3.5.1 Overzicht ontwikkelaars (hybride-)elektrische vliegtuigen

De eerste testen met elektrisch vliegen gaan zo ver terug als 1884 toen Tissandier een Siemens elektrische motor monteerde op een luchtschip. Door de jaren heen zijn er meer voorbeelden geweest, zoals Fred Militky die in 1940 begon met pogingen om kleine vliegtuigen te elektrificeren en uiteindelijk in 1973 een bemand elektrisch vliegtuig kon realiseren. In de afgelopen jaren is interesse naar elektrisch vliegen enorm toegenomen en wordt het commercieel aantrekkelijk om deze technologie te ontwikkelen en op te schalen. Dit komt zowel door technologische vooruitgang

buiten de luchtvaart, de druk op de luchtvaartsector om te voldoen aan eisen op het gebied van milieu impact, als door ontwikkelingen die zijn gemaakt door bedrijven binnen de luchtvaart (Roland Berger, 2017).

Inmiddels heeft de huidige staat der technologie kleine bedrijven en startups in staat gesteld om de eerste kleine elektrische sport- en trainingsvliegtuigen te maken. Momenteel wordt er door verschillende partijen steeds meer onderzoek gedaan naar de wijze waarop dit kan worden doorvertaald naar grotere vliegtuigen.

Allereerst de meest bekende OEMs: Boeing heeft een aandeel in verschillende elektrisch vliegende startups. Airbus heeft het E-Fan-X pilot project, een R&D onderzoek naar elektrische voortstuwing, in april 2020 afgeblazen.

Daarnaast verschijnen er steeds meer startups die gericht zijn op elektrisch vliegen. Een aantal is hier opgesomd en beknopt omschreven (Derei & Meerstadt, 2019):

- Eviation, een Israëlische startup, ontwikkelt Alice, een 9-zits elektrisch vliegtuig dat voor 95% uit composietmaterialen bestaat. De batterij wordt een aluminium-air met lithium polymeer buffer. De eerste vlucht staat gepland voor 2020.
- Zunum Aero, gesponsord door Boeing, mikt erop om hun ZA10 6-12 passagiersvliegtuig in 2020 voor het eerst te vliegen. Vleugelbatterijen worden aangedreven door een 1MW gasturbine.
- Wright Electric is de partner van Easyjet in een ambitieus plan om een elektrisch vliegtuig met 180 stoelen te ontwikkelen. Het korte termijn doel is om het technische concept te bewijzen in een 9-zitter.
- VoltAero werkt aan Cassio, een hybride-elektrisch vliegtuig voor 4-9 passagiers met twee 60 kW tractor motoren op de vleugels en een hybride module in de staart.
- Zero-Avia werkt aan een vliegtuig voor 19 passagiers, volledige aandrijving door waterstofbrandstofcellen. Een aangepast Piper Malibu Mirage testbed zal waarschijnlijk 480 km kunnen vliegen op twee vleugel-gemonteerde waterstoftanks.
- Ampaire heeft een Cessna 337 Skymaster omgebouwd om een parallel-hybride voortstuwingssysteem te hebben.
- Het Britse Faradair ontwikkelt een Bio Electric Hybrid Aircraft voor 18 passagiers. De verwachting is dat het product in 2025 gecertificeerd zal worden voor civiele luchtvaart.
- Het Zwitserse H55 ontwikkelt certificeerbare elektrische voortstuwing voor CS-23 toestellen. Hun eerste project is een geheel elektrische tweezitter met een 90 kW maximum, 65 KW continu vermogen.
- Het van Oorsprong Australische MagniX maakt elektromotoren voor verschillende vliegtuigen. De eerste die heeft gevlogen is een de Havilland Canada DHC-2 beaver.
- VerdeGo Aero bouwt in een samenwerking met Continental Airlines geïntegreerde verspreide elektrische voortstuwingssystemen om Jet-A CDS-300 motoren heen.

Met duurzaamheid hoog op de agenda, de huidige discussies over het vervangen van vluchten voor treinreizen en een toekomstig klein elektrisch vliegtuig kan een scenario worden geschetst waarbij een overheid luchtvaartmaatschappijen verplicht om vluchten op korte afstanden enkel nog elektrisch uit te voeren. Noorwegen heeft al de ambitie om vanaf 2040 alle binnenlandse vluchten elektrisch uit te voeren (Avinor, 2019). Hoe elektrisch vliegen zich de komende jaren zal ontwikkelen, is afhankelijk van de businesscase voor luchtvaartmaatschappijen, vraag vanuit passagiers, de eigenschappen van de eerste elektrische vliegtuigen, de druk op verminderen van uitstoot vanuit overheden en R&D-activiteiten wereldwijd.

Hieronder wordt een visie voor de toekomst als tijdlijn gegeven, gebaseerd op beschikbare literatuur en een inschatting van het NLR.

## 2020

De Pipistrel Velis Electro tweezitter is als eerste volledig elektrische vliegtuig gecertificeerd. Deze is bedoeld voor lesvluchten en kan tot 50 minuten vliegen (hierbij is rekening gehouden met een veiligheidsreserve). Op MAA kan dit toestel ingezet worden voor vlieglessen en andere kleine general aviation vluchten. Onderzoek naar (hybride-)elektrisch vliegen vindt plaats, echter komt er toenemende aandacht voor waterstof als brandstof voor de luchtvaart op Europees niveau. Airbus heeft bijvoorbeeld in maart het E-Fan-X elektrische testbed project stopgezet om zich te focussen op waterstof.

## 2030

Inmiddels zijn er (bijna) gecertificeerde negenzitters te koop, en wordt er gewerkt aan grotere regional airlines. Voor toestellen >80 personen op middellange afstanden wordt waterstof gebruikt, dus voor deze toestellen wordt weinig gewerkt aan volledig elektrische modellen. Er zijn al nieuwe partijen ontstaan die disruptieve businessmodellen hebben ontwikkeld rondom de kleine elektrische toestellen, waardoor de operatie op de luchthaven ook verandert. Er komt ook steeds meer interesse vanuit oudere en nieuwe luchtvaartmaatschappijen om met deze negenzitters op MAA te landen. Luchthavens die rond 2025 zijn begonnen met het aanpassen van hun infrastructuur om ook elektrische toestellen te kunnen bedienen, kunnen optimaal gebruik maken van de voordelen van elektrisch vliegen op het gebied van duurzaamheid, geluid en PR.

## 2050

Volledig elektrische vliegtuigen t/m 100 passagiers zijn gecertificeerd en commercieel verkrijgbaar (Airbus, 2020). De range van deze vliegtuigen gaat tot 500 km. Voor langere afstanden wordt waterstof of een blend met synthetische kerosine gebruikt, of in sommige gevallen een "hop" gemaakt op een tussenbestemming. Op MAA is een gedeelte van het passagiersvervoer elektrisch. Veel luchthavens hebben een apart platform aan de airside waar de elektrische vliegtuigen worden afgehandeld. Om een snelle turnaround te faciliteren, worden batterijen voornamelijk geruild (battery swap) en niet opgeladen.

## 4.4 Vliegen op waterstof

Waterstof is geur-, kleur- en smaakloos, niet toxisch en niet corrosief. Het is echter wel licht ontvlambaar en explosief. Onder normale omstandigheden is het een gas maar bij extreem lage temperaturen wordt het vloeibaar. Onder atmosferische druk wordt waterstof vloeibaar bij -253 graden Celsius. Waterstof heeft bijna driemaal de energiedichtheid (per kg) van kerosine, en wordt om die reden gezien als een belangrijke optie voor duurzaam vliegen. Echter neemt waterstof volumetrisch relatief meer ruimte in beslag, waardoor er grotere opslag nodig is. Het voordeel van de hoge specifieke energie gaat daarom deels verloren door het extra gewicht van de tank en de koeling. (Sman, 2019) .

Vliegen op waterstof is decennia geleden al bewezen met een passagiersvliegtuig; in 1988 maakte de Tupolev 155 (Tu155) zijn eerste vlucht. Dit vliegtuig maakte gebruik van Kuznetsov NK-88 motoren waarin de waterstof direct werd verbrand. Opslag van waterstof vond plaats in cryogene (koude) opslagtanks, waarin de waterstof vloeibaar wordt en daardoor minder ruimte nodig heeft dan in gasvorm. Er zijn ongeveer 100 vluchten mee gemaakt.



*Figuur 4: Tupolev 155. Bron:*

*[https://www.reddit.com/r/WeirdWings/comments/d9zskv/tupolev\\_tu155\\_a\\_modified\\_tu154\\_that\\_became\\_the/](https://www.reddit.com/r/WeirdWings/comments/d9zskv/tupolev_tu155_a_modified_tu154_that_became_the/)*

Aan het begin van deze eeuw heeft Boeing ook een waterstof testbed ontwikkeld; de Fuel Cell Demonstrator Airplane of Theator Airplane. Dit was een omgebouwd tweezits vliegtuigje, op basis van de Dimona van Diamond Aircraft Industries. De energie werd geleverd door vloeibare waterstof (cryogeen opgeslagen) in een brandstofcel, dat vervolgens een elektrisch voortstuwsysteem aandreef. Dit testvliegtuig heeft in februari 2008 voor het eerst gevlogen. In 2010 werd er voor het eerst gevlogen met de Rapid 200-FC, een ander experimenteel vliegtuig waarin gasvormige waterstof werd gebruikt in een brandstofcel. Dit vliegtuigje was het resultaat van het ENFICA-FC project, gefinancierd door de Europese Commissie.

Ondanks dat de techniek dus al veelvuldig bewezen is, zijn passagiersvluchten op waterstof nog toekomstmuziek. Er is namelijk geen commercieel passagiersvliegtuig beschikbaar. Echter lijkt het erop dat de Research & Development voor waterstofvliegen versneld gaat worden; de EU zet namelijk fors in op waterstof en benoemd dit ook als belangrijke energiedrager om emissies in de luchtvaartsector te verkleinen (European Commission, 2020).

Airbus heeft in september 2020 een drietal waterstofconcepten gepresenteerd, in de Zero-e (zero emission) werkstroom. Dit zijn twee grotere toestellen (een turbofan met conventionele vorm en motorconfiguratie en een blended wing body met verspreide voortstuwing) en één kleiner toestel, een turbofan vliegtuig (Airbus, 2020).

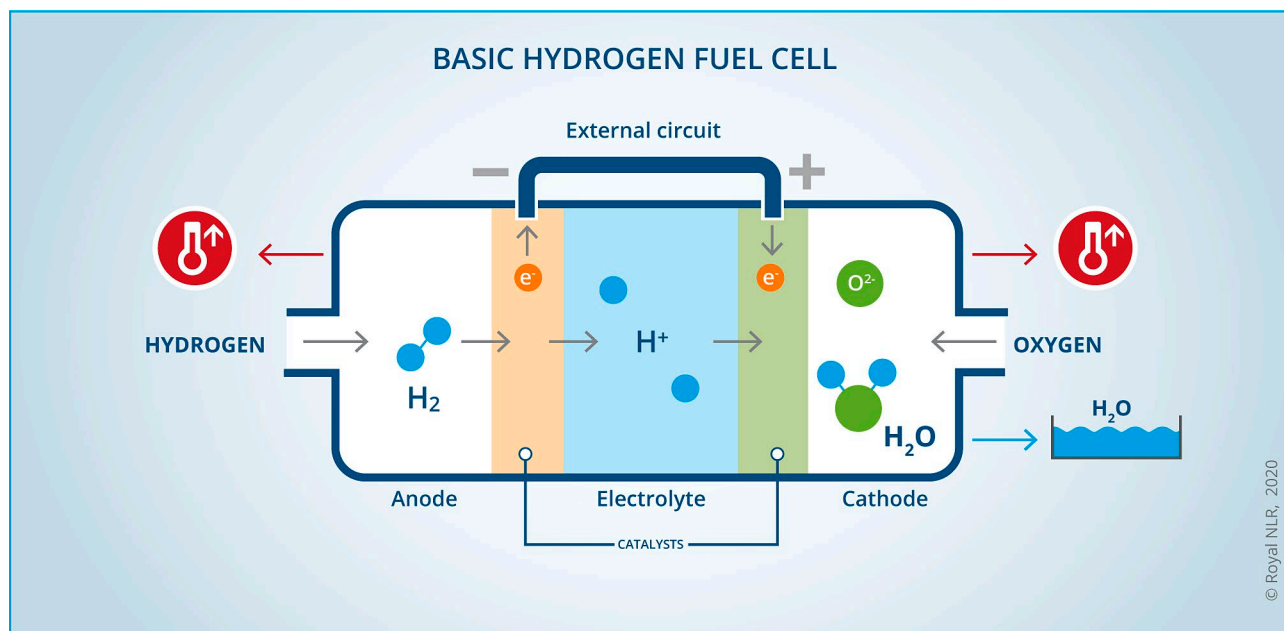
Waterstof kan op twee manieren toegepast worden als brandstof voor de luchtvaart: via directe verbranding of via een brandstofcel. Het kan ook een grondstof zijn voor synthetische kerosine, waar meer over te vinden is in het hoofdstuk duurzame brandstoffen voor de luchtvaart (4.5).

In dit hoofdstuk wordt de stand van zaken en de prognose voor waterstofvliegen besproken.

#### 4.4.1 Waterstof brandstofcellen

In een brandstofcel vindt een reactie plaats bij de anode, de negatieve pool, waarbij elektronen vrijkomen. Deze reizen via een stroomdraad naar de kathode; deze stroom elektronen is de elektrische energie die de brandstofcel genereert. Eenmaal aangekomen bij de positieve pool vindt er weer een chemische reactie plaats waarbij de elektronen worden gebonden.

In het geval van een brandstofcel, ontbindt bij de negatieve pool waterstof ( $H_2$ ) in twee waterstofionen ( $H^+$ ). Via het zogenaamde elektrolyt midden in de brandstofcel reizen deze waterstofionen naar de positieve pool, waar ze met zuurstof reageren tot water ( $H_2O$ ). Een brandstofcel op basis van waterstof produceert dus water. In het geval van een vliegtuig, zou dit water opgeslagen moeten worden, of eventueel naar buiten worden verspreid.



Figuur 5: Chemische werking van een waterstof brandstofcel. Bron: <https://www.h2sys.fr/en/technologies-2/fuel-cell-systems/>

Tabel 1 is afkomstig uit het NLR rapport "vliegen op waterstof" en geeft een overzicht van de kansen en knelpunten van vliegen op waterstof.

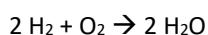


Tabel 1: Kansen en knelpunten voor waterstofbrandstofcellen

Kansen	Knelpunten
<b>Geen directe emissies naar de atmosfeer bij het gebruik van brandstofcellen</b>	Water moet hergebruikt of opgeslagen worden aan boord van het vliegtuig
<b>Integratie met meerdere systemen aan boord van het vliegtuig (APU, watervoorziening en inerte lucht)</b>	Laag TRL-niveau
<b>Mogelijkheid om de vliegafstand te vergroten, momenteel vaak toegepast in de kleine luchtvaart en UAV-markt</b>	Te zwaar om momenteel brandstofbesparing op te leveren voor langeafstandsvluchten
<b>Te gebruiken in combinatie met elektromotoren voor hogere efficiëntie</b>	Toepassingen mogelijk in de volgende generatie vliegtuigen (over 15-20 jaar), de efficiëntie van brandstofcellen ligt momenteel rond de 50%

#### 4.4.2 Directe verbranding van waterstof

Naast het gebruik in een brandstofcel, kan waterstof ook direct verbrand worden in een vliegtuigmotor. Dit is de manier waarop de Tupolev 155 waterstof als energiedrager gebruikte. De chemische reactie hiervoor is:



De huidige motoren kunnen in principe gebruikt worden om met waterstof te vliegen, maar er moeten wel een aantal aanpassingen worden gedaan. Alle onderdelen zoals pompen en kleppen moeten ontwikkeld worden voor toepassingen met waterstof. Voordat waterstof de motor in gaat moet het ook opgewarmd worden, omdat de opslag cryogeen (zeer koud) plaatsvindt. Een belangrijk onderdeel van de benodigde aanpassingen is dan ook de grote tank die nodig is om de benodigde hoeveelheid waterstof op te slaan en de isolatie daarvan.

Vereiste veranderingen in het ontwerp van een vliegtuig om waterstof te verbranden in de motoren (Sman, 2019):

- Integreren van cilindrische of sferische tanks boven de cabine of achter in de cabine
- De tankstructuur ondersteunen en fairings ontwikkelen
- Nieuw brandstofsysteem en brandstoftoevoersysteem:
- Nieuwe pompen, kleppen, drukregelaars en sensoren
- Isolatie voor de tank en de leidingen
- Regeltechniek systemen voor het controleren van de druk en temperatuur
- Aanpassingen aan de motor

De kansen en knelpunten die voor directe verbranding van waterstof worden gesignaleerd in het NLR rapport “Vliegen op waterstof”, staan in Tabel 2. (Sman, 2019)

Tabel 2: Kansen en knelpunten voor directe verbranding van waterstof

Kansen	Knelpunten
<b>Geen CO<sub>2</sub>-emissies naar de atmosfeer bij verbranding</b>	Uitstoot van waterdamp en NO <sub>x</sub> bij verbranding in de motor. Onzekerheid over de effecten op het klimaat van waterdamp en wolkenformaties bij de verbranding van waterstof op hoogte
<b>Veiligheid van de passagiers kan gewaarborgd worden</b>	Efficiëntie neemt af door groter oppervlakte van de romp om brandstoftanks te accommoderen
<b>De romp en de motor kunnen aangepast worden om op waterstof te vliegen</b>	Het lege gewicht van het vliegtuig neemt toe door het gewicht van de tanks en de operationele kosten voor vliegtuigmaatschappijen nemen toe

### 4.4.3 Productiemethodes en duurzaamheid

Waterstof is het meest voorkomende element in het universum, echter komt het niet voor in de vorm H<sub>2</sub> maar gebonden aan andere atomen. Waterstof als energiedrager (H<sub>2</sub>) kan verkregen worden door gebruik van elektriciteit, aardgas of andere koolwaterstoffen.

#### 4.4.3.1 Groene waterstof: productie op basis van hernieuwbare energie

Groene of hernieuwbare waterstof wordt geproduceerd met hernieuwbare energie, meestal via elektrolyse. Bij elektrolyse wordt water ontleed in zuurstof en waterstof. Er zijn verschillende technieken voor elektrolyse. Topsector Energie ziet in elektrolyse kansen voor het Nederlandse bedrijfsleven en potentieel voor emissiereductie. Alkalische elektrolyse en PEM-elektrolyse (Proton Exchange Membrane) bieden volgens hen op korte termijn de meeste kansen (Topsector Energie, 2018). Groene waterstof is zeer puur; er komen over het algemeen slechts waterstofmoleculen in voor. Daarom is groene waterstof in veel industrieën bruikbaar (TNO, 2020).

Wanneer biomassa op hoge temperatuur wordt gebracht en gasvorming optreedt, wordt ook waterstof geproduceerd. Dit kan, afhankelijk van de energiebron voor het verhitten, ook onder groene waterstof vallen. In 2017 was ongeveer 5% van de wereldwijd geproduceerde waterstof via elektrolyse geproduceerd. (Shell, 2017)

#### 4.4.3.2 Grijs waterstof: productie uit koolwaterstoffen

De meest gebruikte grijze waterstofproductiemethode is Steam Methane Reforming, of SMR. In SMR wordt stoom onder hoge druk bij aardgas gebracht. In de reactie die volgt komen waterstof en het broeikasgas CO<sub>2</sub> vrij. Omdat uit wordt gegaan van een fossiele grondstof (aardgas) en er CO<sub>2</sub> vrijkomt, is grijze waterstof via SMR niet duurzaam te noemen. Echter zijn de kosten van waterstofproductie via SMR lager dan productie via elektrolyse, waardoor het overgrote deel van waterstof nog steeds op deze manier wordt geproduceerd. In 2017 was dit 68%. (Shell, 2017) Onder grijs waterstof vallen ook productietechnieken die olie of kolen als grondstof hebben, zoals respectievelijk plasma reforming en coal gasification. In 2017 was wereldwijd het aandeel waterstof geproduceerd vanuit kolen 11%, en vanuit olie 16%. (Shell, 2017)

#### 4.4.3.3 Blauwe waterstof: Grijze productie waarvan de koolstof wordt afgevangen

Wanneer een groot deel (80-90%) van de CO<sub>2</sub> die geproduceerd wordt bij SMR wordt afgevangen, is er sprake van blauwe waterstof. (TNO, 2020) In dit geval is de totale hoeveelheid broeikasgassen lager dan bij grijze waterstof, alleen wordt er nog steeds gebruik gemaakt van een fossiele grondstof, waardoor er opgeslagen koolstof uit de aardkorst vrijkomt. De energiesector lobbyt voor acceptatie van blauwe waterstof als duurzaam, omdat het momenteel meer kosteneffectief is dan elektrolyse en het nu al op grote schaal (uit fossiele grondstoffen) gemaakt kan worden. Als tussenstap naar groene waterstof is het in ieder geval zonder twijfel wenselijker dan grijze waterstof.

## 4.4.4 Effect op geluid, emissies en veiligheid

### Geluid

Bij gebruik van waterstof voor directe verbranding in de motor zullen de geluidniveaus naar verwachting niet veranderen.

### Klimaat

Zoals in tabel 2 aangegeven wordt er geen CO<sub>2</sub> uitgestoten bij de verbranding van waterstof wat een positief effect heeft op klimaatverandering. Waterdamp en NO<sub>x</sub> worden wel nog uitgestoten, maar in mindere mate dan bij de verbranding van kerosine. De vorming van condensstrepen is afhankelijk van de temperatuur van de gemengde uitgestoten lucht met de omgevingslucht en de vochtigheidsgraad ervan. Hoewel er wel waterstof wordt uitgestoten, is de temperatuur waarmee de gassen in de atmosfeer uitgestoten worden lager, wat de kans op condensstrepen kan verkleinen. Door afname in NO<sub>x</sub> uitstoot, neemt ook de vorming van het broeikasgas ozon af, wat een positief effect heeft op klimaatverandering.

### Luchtkwaliteit

Door de verbranding van waterstof wordt er minder NO<sub>x</sub> uitgestoten dan bij de verbranding van kerosine. Dit heeft een positief effect op de lokale luchtkwaliteit.

### Veiligheid

Het gebruik van waterstof als brandstof in vliegtuigen zal alleen kunnen worden toegepast wanneer dit concept aan de huidige, strenge certificatie eisen voor vliegveiligheid kan voldoen. Hiervoor is nog veel onderzoek nodig.

## 4.4.5 Betekenis voor MAA

Aangezien waterstof momenteel de hernieuwbare energie lobby domineert, is de kans aanzienlijk dat er vliegtuigen op waterstof zullen komen. Dit zal ook operationele veranderingen met zich mee brengen, en de eisen aan luchthaveninfrastructuur zullen ook anders worden. Hieronder staan een aantal domeinen beschreven die kunnen veranderen wanneer waterstofvliegen geïmplementeerd zou worden. Door hier vroeg op in te spelen, kan MAA zich strategisch positioneren voor deze nieuwe toestellen.

### 4.4.5.1 Verwachte adaptie waterstof op MAA

Het wordt verwacht dat vliegen op waterstof efficiënt zal zijn op de korte en middellange vliegafstanden. Kijkend naar de bestemmingen voor passagiersvluchten vanaf MAA, zouden alle passagiersvluchten op MAA in theorie op waterstof uitgevoerd kunnen worden. Of dit ook daadwerkelijk zal gebeuren, zal worden bepaald door de samenkomst van de technologieontwikkelingen en bijbehorende business case, wetgeving en de infrastructuur die de luchthaven biedt.

#### 4.4.5.2 Waterstof infrastructuur

Waterstof moet cryogeen (bij zeer lage temperatuur) en/of onder hoge druk worden opgeslagen. Door de hoge druk wordt waterstof in principe altijd in ronde of ovale tanks opgeslagen. Afhankelijk van de verwachte hoeveelheid vluchten, zou MAA dus in een gekoelde hogedruktank kunnen investeren. Indien er plannen zijn om grondverkeer op waterstof te laten rijden op de korte termijn, zou de tank al gebruikt kunnen worden voordat er commerciële vliegtuigen op waterstof beschikbaar zijn.

Vliegtuigen moeten vanuit deze centrale opslag waterstof kunnen tanken. Het tanksysteem zou de koude temperatuur en hoge druk waaronder de waterstof bewaard wordt moeten waarborgen tijdens de overdracht naar het vliegtuig, en faciliteren dat het tanken veilig gebeurt.

#### 4.4.5.3 Waterstofproductie

Via elektrolyse, het proces dat is uitgewerkt in 4.4.3.1, kan waterstof geproduceerd worden op basis van hernieuwbare energie en water. Er zou een elektrolyse faciliteit op de luchthaven geplaatst kunnen worden, waardoor de luchthaven zelf waterstof kan produceren. Naast het feit dat dit commercieel interessant zou kunnen zijn om te verkopen aan luchtvaartmaatschappijen (een nieuwe inkomstenstroom), scheelt dit ook CO<sub>2</sub> omdat de waterstof niet vervoerd hoeft te worden, en scheelt het voertuigbewegingen op de luchthaven.

#### 4.4.6 Tijdlijn

Deze paragraaf geeft een visie voor de toekomst gebaseerd op beschikbare literatuur en een inschatting van het NLR.

##### 2020

Waterstof voor de luchtvaart komt in een stroomversnelling door de focus op waterstof in de Green Deal en wereldwijd beleid. In 2020 zijn de meningen nog verdeeld over of de toekomst ligt in brandstofcellen of directe verbranding van waterstof. De klimaateffecten van waterdamp op grote hoogte vertalen zich in opwarming door het versterkende opwarmende karakter van waterdamp en in opwarming door nachtelijke condensstreepvorming en in afkoeling door condensstreepvorming overdag. Er moet nader onderzocht worden wat het netto-effect zal zijn van de uitgestoten waterdamp door vliegen op waterstof.

##### 2030

Waterstofbrandstofcellen hebben het gewonnen van directe verbranding van waterstof door gunstigere milieueffecten. Rond 2030 wordt een 50-zitter regional aircraft op brandstofcellen gecertificeerd, met een range van ongeveer 1500 km. In het ontwerp van het vliegtuig zit een systeem geïntegreerd om tijdens de vlucht water in grote druppels of ijsklontjes uit te stoten, waardoor de watermoleculen in vloeibare of vaste vorm vallen tot lage hoogtes, voordat ze tot dampvorm overgaan. Luchthavens hebben een waterstoftank en veilige tankinfrastructuur nodig om dit toestel te kunnen accommoderen.

##### 2050

Er zijn waterstofstoestellen beschikbaar voor ongeveer 150 passagiers tot 2500 km range ongeveer. Omdat de beperking volumetrisch is, kan een luchtvaartmaatschappij een trade-off maken tussen aantal passagiers en range; met minder passagiers is het totale gewicht lager en kan er meer waterstof opgeslagen worden waardoor het vliegtuig

verder kan, en andersom kan een vliegtuig met kleinere tanks weer meer passagiers meenemen op korte range. Waarschijnlijk zullen fabrikanten hier flexibiliteit in aanbieden, zodat luchtvaartmaatschappijen kunnen optimaliseren voor hun operatie. Luchthavens hebben in 2050 rond het terrein een waterstofproductiefaciliteit op hernieuwbare energie, of een deal met een industriële partij in de buurt (zoals Chemelot voor MAA).

## 4.5 Duurzame brandstoffen voor de luchtvaart (SAF)

Het zal zeker nog 5-10 jaar duren voor er commercieel op elektriciteit of waterstof gevlogen wordt met meer dan 19 passagiers. Voorlopig zullen dus nog steeds koolwaterstoffen gebruikt worden in de luchtvaart. Een oplossing waar in theorie morgen mee begonnen zou kunnen worden om de uitstoot te verminderen omdat er niets veranderd hoeft te worden aan het vliegtuig, is het gebruik van duurzame vliegtuigbrandstoffen. Deze brandstoffen worden ook wel Sustainable Aviation Fuels (SAF) genoemd.

SAF wordt door (IATA, 2020) gedefinieerd als: *Fuel for aviation with an alternative feedstock to crude oil. In this case non-conventional or advanced fuels, and includes any materials or substances that can be used as fuels, other than conventional, fossil-sources (such as oil, coal, and natural gas). It is also processed to jet fuel in an alternative manner.*

Als SAF wordt verbrand is de CO<sub>2</sub>-uitstoot lager dan wanneer fossiele koolwaterstoffen worden verbrand. Dit komt omdat SAF tijdens de productie atmosferische koolstof heeft opgenomen, waardoor de totale balans minder vervuילend is. Over de gehele levenscyclus wordt de koolstofreductie door het gebruik van SAF geschat op 60% of meer.

Voor 2010 voorspelden (ATAG, 2009) en (IATA, 2008) beide dat in 2020 10-15% van alle verbruikte vliegtuigbrandstof SAF zou zijn. Echter, op dit moment in 2020, telt SAF-verbruik slechts op tot <1% van de wereldwijde vraag naar vliegtuigbrandstof (IATA, 2020). Dit wordt veroorzaakt door zowel problemen met het aanbod (niet beschikbaar zijn van grote volumes) als problemen met de vraag (luchtvaartmaatschappijen kunnen de prijspremie voor SAF niet dekken en de huidige ticketprijzen handhaven). Deze problemen versterken elkaar in een vicieuze cirkel ( (Dichter, Henderson, Riedel, & Riefer, 2020).

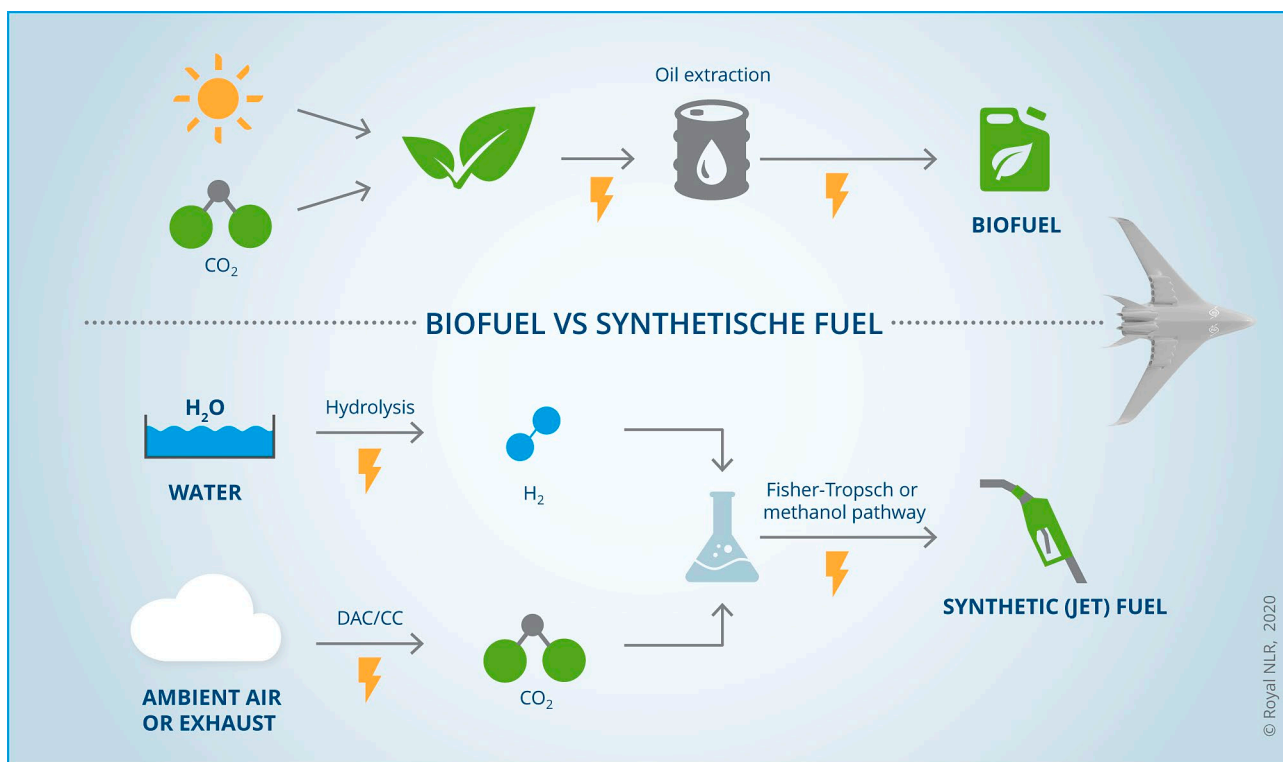
In Nederland gebeurt er veel op SAF-gebied. De wereldleider in SAF, SkyNRG, is in Amsterdam gevestigd. Ook Neste en Shell, die beiden vestigingen in Nederland hebben, hebben plannen voor het opschalen van SAF-productie. Er worden ook productiefaciliteiten gebouwd; SkyNRG heeft de investeringen rond om in Delfzijl een SAF-fabriek te bouwen en op Rotterdam The Hague Airport gaat een consortium van partijen een synthetische kerosinefabriek neerzetten. Vertegenwoordigers van Nederlandse industrie en wetenschap komen een aantal keer per jaar samen in de "Werkgroep Duurzame Brandstoffen" die door het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat is opgezet.

SAF kan drop-in zijn, wat betekent dat de chemische eigenschappen zo dicht bij die van fossiele kerosine liggen dat het in conventionele straalmotoren kan worden gemengd met fossiele kerosine. Als alternatief kan SAF non-drop-in zijn, wat betekent dat de chemische samenstelling aanzienlijk verschilt van die van fossiele kerosine en dat aanpassingen aan de motor nodig zijn om het te gebruiken.

SAF's kunnen grofweg worden onderverdeeld in twee categorieën:

1. Biobrandstoffen, die voornamelijk worden geproduceerd uit organische materialen die tijdens hun leven kooldioxide hebben opgenomen
2. Synthetische brandstoffen, die worden geproduceerd uit anorganisch kooldioxide (CO<sub>2</sub>) en waterstof (H<sub>2</sub>).

Een schematische weergave van het verschil in grondstoffen tussen biokerosine en synthetische kerosine is weergegeven de volgende figuur.



Figuur 6: Biokerosine vs synthetische kerosine

#### 4.5.1 Biobrandstoffen

In het geval van biobrandstoffen, wordt organisch materiaal omgezet in brandstof. Het organisch materiaal in kwestie kan van veel verschillende grondstoffen (feedstocks) worden gemaakt, zoals landbouwresten, huisafval, algen, gebruikte olie of rioolslib. Afhankelijk van de grondstof, wordt soms ter discussie gesteld hoe duurzaam biobrandstoffen zijn. Ontbossing, het in gevaar brengen van voedselvoorziening, arbeidsomstandigheden en effecten op het lokale ecosysteem zijn voorbeelden van aspecten waar aandacht aan besteed moet worden bij het selecteren van grondstoffen voor biobrandstoffen. De duurzaamheidseisen voor biobrandstoffen staan vastgelegd in de REDII-richtlijn (European Commission, 2019). Uiteindelijk is de totale hoeveelheid grondstoffen limiterend voor de hoeveelheid biokerosine die gemaakt kan worden.

#### 4.5.2 Synthetische kerosine

Synthetische brandstoffen, of e-fuels, voor de luchtvaart worden gemaakt uit anorganische grondstoffen. Momenteel worden waterstof en synthetische kerosine gezien als de meest kansrijke e-fuels. Aangezien waterstof al uitgebreid wordt behandeld in paragraaf 4.4, zal deze paragraaf in gaan op synthetische kerosine.

Voor synthetische kerosine zijn drie hoofdingrediënten nodig: waterstof, koolstofdioxide en (hernieuwbare) energie. Op hoofdlijnen verloopt de productie van synthetische kerosine als volgt: waterstof en koolstofdioxide worden eerst samengevoegd tot methaan, waarna steeds langere koolwaterstofketens gemaakt worden.

Hoe duurzaam synthetische kerosine is, hangt af van een aantal factoren. Ten eerste is het van belang dat hernieuwbare energie is gebruikt in het syntheseproces. Ten tweede kan ook waterstof op verschillende manieren geproduceerd worden, zoals beschreven in paragraaf 4.4. Wanneer grijze waterstof gebruikt wordt, zijn alsnog fossiele koolwaterstoffen gebruikt als grondstof en is de uiteindelijke brandstof minder duurzaam. Tot slot is de herkomst van de koolstofdioxide van belang. Wanneer deze afkomstig is uit een industrieel proces of het opwekken van energie door middel van verbranding van fossiele brandstoffen, zogenaamde recycled carbon, is er geen CO<sub>2</sub> opgenomen uit de atmosfeer, waardoor de brandstof ook minder duurzaam is.

De energiebehoefte van het scheiden van koolstofdioxide uit de lucht, het produceren van waterstof en het produceren van koolstofketens uit deze twee grondstoffen is limiterend voor de hoeveelheid synthetische kerosine die gemaakt kan worden.

### 4.5.3 Effect op geluid, emissies en veiligheid

#### Geluid

Geen effect, de verbranding van SAFs geeft eenzelfde geluid als de verbranding van reguliere kerosine.

#### Klimaat

Omdat in het productieproces van SAFs CO<sub>2</sub> is opgenomen, hebben SAFs minder effect op het klimaat wanneer ze verbrand worden dan kerosine. SAFs bevatten ook minder verontreinigingen, waardoor de hoeveelheid SO<sub>x</sub>, metalen en fijnstof die vrijkomt bij verbranding minder is. Doordat er minder fijnstof vrijkomt, vindt er minder kristalvorming plaats, waardoor de kans op condensstrepen afneemt.

#### Luchtkwaliteit

Omdat SAFs bevatten minder verontreinigingen bevatten, waardoor de hoeveelheid SO<sub>x</sub>, metalen en fijnstof die vrijkomt bij verbranding minder is, zal luchtkwaliteit enigszins verbeteren bij aanzienlijk gebruik van SAF. Voorlopig is SAF gebruik nog <1% in de luchtvaart (er wordt geen SAF getankt op Maastricht), dus zal het verschil moeilijk waar te nemen zijn.

#### Veiligheid

SAF kan afgehandeld worden als reguliere (fossiele) kerosine, dus zullen er bij het aanbieden van SAF om te tanken geen grote veranderingen optreden op het gebied van veiligheid. Wanneer er on-site SAF geproduceerd zou worden, zou dit kunnen veranderen.

### 4.5.4 Betekenis voor MAA

SAFs kunnen een kans bieden voor MAA om de Scope 3-emissies (zie 8.1) te verkleinen doordat de netto uitstoot van opstijgende vliegtuigen verminderd wordt.

Een belemmering is dat het momenteel nog niet mogelijk is om SAF apart aan te bieden op een luchthaven; zoals het nu werkt koopt een luchtvaartmaatschappij de emissiereductie-rechten van een energiebedrijf (in Nederland meestal SkyNRG) maar wordt er vervolgens gewoon getankt met de (fossiele) jet fuel die aanwezig is op de luchthaven. In de huidige constructie kan de luchthaven hoogstens luchtvaartmaatschappijen aanmoedigen om SAF (of beter gezegd de



emissiereductie-rechten) te kopen. Dit kan gerealiseerd worden door bijvoorbeeld tariefdifferentiatie of via een aanbod dat de luchthaven een percentage van de meerprijs ten opzichte van fossiele kerosine betaalt.

Deze constructie zou natuurlijk kunnen veranderen, wanneer er fysiek SAF aanwezig is op de luchthaven. Dit zou of extern aangeleverd kunnen worden, of on-site kunnen worden gemaakt. Zowel biofuel als synthetische jet fuel zouden in theorie op de luchthaven gemaakt kunnen worden. Voor de biofuel zouden gemeentelijk afval, rioolslib of landbouwafval een optie kunnen zijn als grondstof. Dit zou mooi kunnen passen in provinciale plannen op het gebied van circulaire economie. Voor synthetische brandstof zou een samenwerking aangegaan kunnen worden met Chemelot, waarin er direct CO<sub>2</sub> aangeleverd wordt vanuit de fabriek om jet fuel van te maken. Ook zou de CO<sub>2</sub> direct uit de lucht gevangen kunnen worden (Direct Air Capture; DAC). Dat is waar Rotterdam the Hague Airport momenteel aan werkt in hun pilot plant voor synthetische kerosine (Rotterdam the Hague Airport, 2019).

### 4.5.5 Tijdlijn

Deze paragraaf geeft een visie voor de toekomst gebaseerd op beschikbare literatuur en een inschatting van het NLR.

#### 2020

Biokerosine is verkrijgbaar in kleine hoeveelheden, maar wordt nog niet op commerciële schaal geproduceerd in Nederland. Synthetische kerosine is nog niet verkrijgbaar. Via het KLM Corporate Biofuels programma wordt door KLM biobrandstof ingekocht waarvan de emissiereductie rechten gaan naar deelnemende bedrijven. SkyNRG werkt aan het creëren van een markt voor SAF.

#### 2030

In 2023 is de eerste fabriek voor biokerosine in Nederland geopend door SkyNRG, waarna er voor 2030 twee fabrieken bij zijn gekomen vanuit andere energiebedrijven. De laatste die is geopend richt zich op het produceren van synthetische kerosine, dat momenteel nog duurder is dan biokerosine maar politiek in trek. Vliegen op SAF is nog steeds duurder dan op fossiele kerosine, maar de toenemende koolstoftaks en slimme businessmodellen zorgen ervoor dat de prijs steeds dichterbij komt. Omdat er nu steeds meer SAF beschikbaar is, vinden passagiers het ook steeds belangrijker dat luchtvaartmaatschappijen SAF gebruiken. Dit zorgt er ook voor dat luchthavens via hun deals met energiebedrijven concurreren om de in Nederland geproduceerde SAF aan te bieden. Tot slot heeft ASTM de 50% maximale bijmengratio verlegd naar 75% wanneer de brandstof aan bepaalde chemische eisen voldoet.

#### 2050

In 2050 vinden kortere vluchten plaats met alternatieve voortstuwing, maar is SAF nog steeds hard nodig om de vluchten op langere afstanden met minimale emissies plaats te laten vinden. Deze SAF is, zeker in Nederland, overwegend synthetisch. Inmiddels wordt deze niet meer gemaakt van gerecycled carbon, maar alleen via direct air capture. Luchthavens bieden allen (bijna) alleen maar SAF aan.

## 4.6 Alternatieve concepten voor voortstuwing

Deze paragraaf beschrijft een aantal concepten voor alternatieve voortstuwing van vliegtuigen die momenteel minder in de aandacht staan dan elektrisch- en waterstofvliegen. Aangezien er ook aanzienlijk minder onderzoeksgelden worden gestoken in deze ideeën is het onzeker of ze ooit commercieel geproduceerd gaan worden. Om die reden worden deze technologieën beknopt beschreven.

### 4.6.1 Methaan (LNG)

Vliegen op methaan (of LNG in vloeibare vorm) is niets nieuws. De technische haalbaarheid ervan is al meermaals bewezen, voor het eerst in 1980 met een omgebouwde Beech Sundowner die aangepast was met een methaantank en wat aanpassingen aan de motor. Ook de Tupolev Tu155 (Zie Figuur 4) is gebruikt voor testvluchten op methaan, leidend tot succesvolle testvluchten op trajecten zoals Moskou-Nice. (NASA, 1980)

Methaan, of CH<sub>4</sub>, is de kleinste en minst complexe koolwaterstof. Methaan of eventueel methanol (dit hangt af van reactie-omstandigheden en chemische balans) is het eerste product wanneer koolstofdioxide en waterstof met elkaar reageren (met externe energie input). Net zoals waterstof is methaan een gas, dat onder cryogene omstandigheden vloeibaar is en veel minder volume inneemt. Zo zou het ook opgeslagen worden aan boord van een vliegtuig.

Methaan is aanwezig als fossiele grondstof, of het kan synthetisch geproduceerd worden uit CO<sub>2</sub> en H<sub>2</sub>. Wanneer methaan wordt verbrand in een vliegtuigmotor, heeft het de volgende voordelen ten opzichte van kerosine:

- Schonere verbranding (minder CO<sub>2</sub>, geen SO<sub>x</sub>, nauwelijks UFP)
- In principe kosteneffectiever per vlucht, alleen wordt er (passagiers)ruimte opgegeven aan de cryogene tank
- Hogere energiedichtheid per massa eenheid dan kerosine (lagere energiewaarde per volume-eenheid)
- Kan CO<sub>2</sub>-negatief geproduceerd worden als synthetische kerosine via direct air capture/gerecycled koolstof

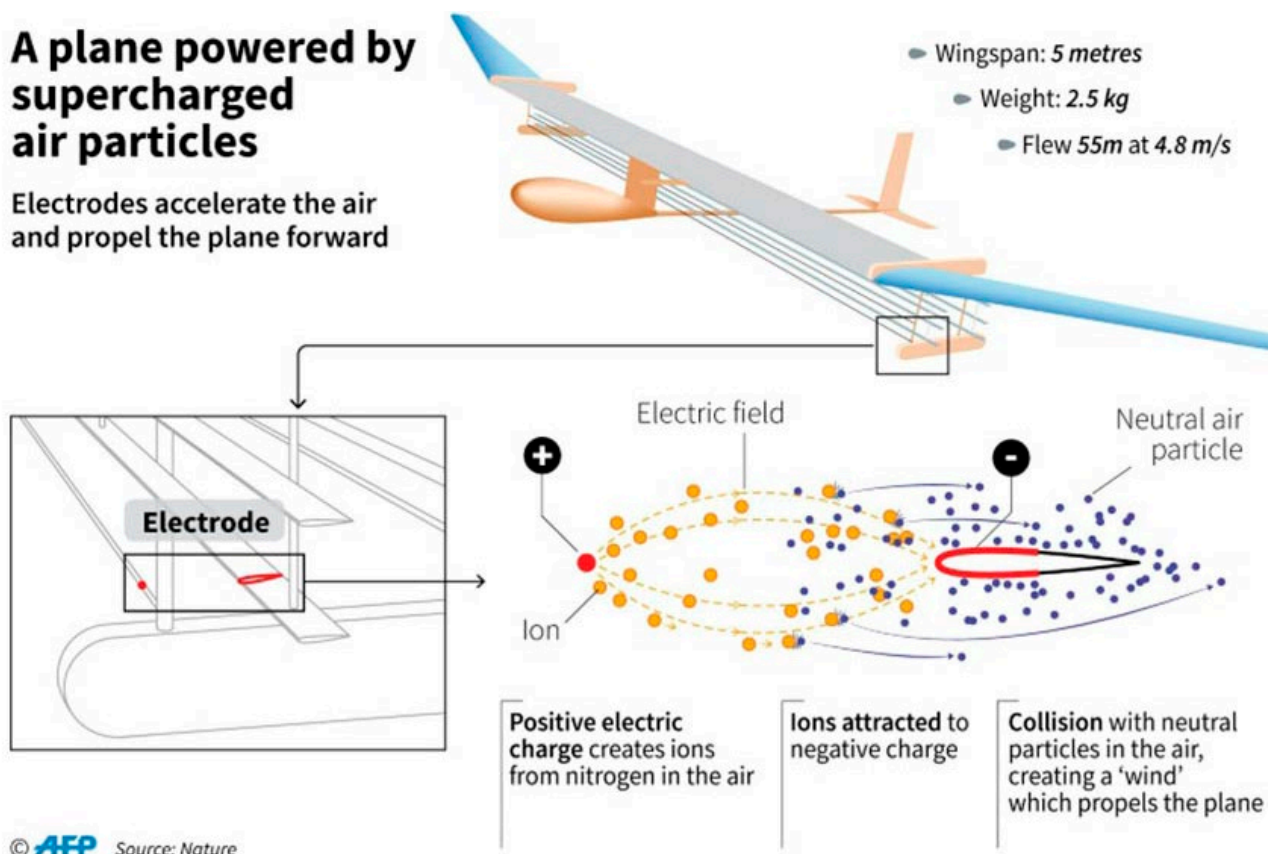
Echter deelt methaan veel van deze voordelen met waterstof, en aangezien waterstof een ingrediënt is voor non-fossiele methaan en géén CO<sub>2</sub> produceert bij verbranding, ziet de industrie waterstof toch als kansrijker. Ook geldt voor methaan, net zoals waterstof, dat het niet in de lijn der verwachting ligt dat er lange afstandsvluchten mee gemaakt kunnen worden in verband met de extreem grote tankvolumes die daarvoor nodig zouden zijn.

### 4.6.2 Ionisatie

De Amerikaanse universiteit MIT maakte in 2019 een testvlucht met een schaalmodel van het eerste vliegtuig zonder bewegende onderdelen, op basis van ionisatie. De zogenaamde “ion-drive-aircraft” heeft een brede, smalle vleugel, waaronder de voortstuwing plaatsvindt aan de hand van meerdere sets elektrodes. Luchtdeeltjes worden per set elektrodes eerst positief geladen via een eerste elektrode, waardoor de deeltjes stromen naar een volgende negatieve elektrode verder in de vleugel. In dit proces nemen ze ook neutrale luchtdeeltjes mee. Dit creëert een ionische wind tussen twee vleugels, waarmee een stuwkracht wordt gegenereerd. Het concept is schematisch weergegeven in Figuur 7, waar ook het proces van de geïoniseerde luchtstroom wordt weergegeven (Xu, 2018).

## A plane powered by supercharged air particles

Electrodes accelerate the air and propel the plane forward



Figuur 7: Concept van een ionisch aangedreven vliegtuig (Xu, 2018)

### 4.6.3 Effect op geluid, emissies en veiligheid

#### Geluid

Het is nog niet duidelijk wat het effect op geluid zal zijn van de verschillende technieken in dit hoofdstuk.

#### Klimaat

*Methaan:* In de verbranding van methaan wordt er minder CO<sub>2</sub> uitgestoten ten opzichte van kerosine, en geen SO<sub>x</sub> en nauwelijks UFP. De reductie in CO<sub>2</sub>-emissies heeft een positief effect op het klimaat. Doordat er geen en nauwelijks UFP wordt uitgestoten, worden er vindt er minder kristallisering plaatst in de uitlaatstroom van het vliegtuig. Hierdoor neemt de kans op condensstreep vorming af. Dit heeft een positief effect op het klimaat.

Door de hoge temperaturen en drukken die aanwezig zijn in motoren, wordt er NO<sub>x</sub> gevormd uit N<sub>2</sub> en O<sub>2</sub> moleculen in de lucht. Een hogere druk en temperatuur zorgt voor een hogere mate van NO<sub>x</sub> vorming. De verbrandingstemperatuur van methaan is hoger dan die voor kerosine, wat ervoor kan zorgen dat er meer NO<sub>x</sub> gevormd wordt bij de verbranding van methaan. Deze NO<sub>x</sub> moleculen zorgen op korte termijn voor de vorming van de broeikasgas ozon (O<sub>3</sub>), wat bijdraagt aan de opwarming van de aarde.

#### Ionisatie:

Deze vorm van voortstuwing reduceert naar verwachting de emissies met 100% ten opzichte van conventionele vliegtuigen en heeft dus een positief effect op het klimaat in vergelijking met de huidige situatie. (Aviation Clean Air, 2020)

**Luchtkwaliteit****Methaan:**

De reductie in UFP en afwezigheid van SOx heeft een positief effect op de lokale luchtkwaliteit. De toename in NOx heeft echter een negatief effect op de lokale luchtkwaliteit.

**Ionisatie:**

Deze vorm van voortstuwing reduceert de emissies met 100% ten opzichte van conventionele vliegtuigen en heeft dus een positief effect op lokale luchtkwaliteit.

**Veiligheid**

Het is nog niet duidelijk wat het effect op vliegveiligheid zal zijn van de verschillende technieken in dit hoofdstuk. Er zullen nieuwe certificatie eisen moeten worden opgesteld.

**4.6.4 Betekenis voor MAA**

Aangezien het nog onduidelijk is of deze technologieën verder uitgewerkt gaan worden, zijn ze momenteel niet relevant voor MAA om op te acteren. Het is wel aan te raden om de innovatieve ontwikkelingen op voortstuwingsgebied in de gaten te blijven houden, om te zorgen dat de masterplanning en strategische projecten aansluiten op de trends in de luchtvaartindustrie.

**4.6.5 Tijdlijn**

Deze paragraaf geeft een visie voor de toekomst gebaseerd op beschikbare literatuur en een inschatting van het NLR.

**2020**

De focus voor het verduurzamen van de luchtvaart ligt op elektrische- en waterstofvoortstuwing. Op universiteiten en onderzoeksinstituten wordt ook gewerkt aan nieuwe technieken, maar hier is lang niet zo veel interesse voor als voor waterstof en elektrisch.

**2030**

Een paar nieuwe concepten zijn gepresenteerd, maar de waterstoflobby en reeds geboekte vooruitgang op het gebied van elektrisch vliegen zorgen ervoor dat deze initiatieven niet door ontwikkelen.

**2050**

Naar alle waarschijnlijkheid wordt er gevlogen op batterijen (korte afstand), waterstof (middellange afstand) en SAF (lange afstand).

## 4.7 Urban Air Mobility

Urban Air Mobility of UAM krijgt momenteel veel aandacht als radicaal nieuwe vorm van luchtvaart. UAM omvat allerlei vormen van luchtvaart in het lagere luchtruim boven en rondom steden waarbij mensen of goederen vervoerd worden. Eigenlijk bestaat UAM al sinds de introductie van de helikopter in steden. Zo waren er in de jaren 60 en 70 populaire lijndiensten met helikopters tussen de stad en de luchthaven. Stijgende olieprijs en enkele in het oog springende ongevallen hebben deze markt eind jaren 70 de nek omgedraaid. Op basis van een eerder gedane literatuurstudie (Roosien & Bussink, 2018) worden hieronder de belangrijkste inzichten gedeeld.

De hernieuwde aandacht voor UAM komt voort uit grote vooruitgang op gebied van elektromotoren, motor controllers en accutechnologie. Technieken uit de drone-wereld worden met behulp van grote investeringen uit onder andere de tech-sector opgeschaald om UAM mogelijk te maken. Consultants en onderzoekers voorspellen enorme aantallen en gouden bergen: de totale marktomvang bij volledige uitrol werd in 2018 door Porsche Consultancy geschat op 230 miljard dollar, in 2035 wordt de markt geschat op ongeveer 21 miljard dollar (Porsche Consulting, 2018, p. 20). Inmiddels zijn er meer dan 300 concepten in ontwikkeling. Het merendeel hiervan bestaat enkel op de computer, maar concepten van o.a. Airbus, Boeing, Ehang en Volocopter hebben al meerdere vluchten met imposante Vertical Take-off and Landing (VTOL) voertuigen gemaakt.



*Figuur 8: Volocopter boven de Marina Bay, Singapore. Foto van Nikolay Kazakov voor Volocopter*

De potentie van UAM is nog grotendeels onbekend. Diensten die in eerste instantie te verwachten zijn, zijn een shuttle-service tussen luchthaven en een hotel in de stad, vluchten voor VIPS en (rijke) toeristen en vervoer van organen of andere ladingen met hoge spoed. Ook voor de hulpdiensten biedt UAM interessante oplossingen.

In alle gevallen belooft UAM een toename van flexibiliteit, tegen lagere kosten (in geld of tijd) en met minder negatieve impact dan een vergelijkbare helikopter.

### 4.7.1 Effect op geluid, emissies en veiligheid

De herontdekking van UAM is nieuw terrein. Zowel de toepassingen als de aantallen bewegingen zijn nog zeer speculatief. Dit maakt het lastig om de impact op geluid, emissies en veiligheid in te schatten. Hieronder volgen algemene overwegingen over de impact van UAM op deze thema's.

#### Geluid

Drones en UAM-voertuigen zijn beduidend stiller dan helikopters. Echter daar waar bewoners geen helikopters gewend zijn, zal een toename van UAM-verkeer als negatief beleefd worden. Wanneer een elektrische VTOL een politie- of traumahelikopter kan vervangen of wanneer er minder bestelbussen en vrachtwagens nodig zijn voor transport van pakketjes, kan er wel een positieve impact bereikt worden. Momenteel is NLR betrokken bij diverse onderzoeken waarbij de geluidsimpact van drones en UAM gemeten en berekend wordt. Ook wordt onderzoek gedaan naar hoe luchtvaart geluid zich verplaatst en beleefd wordt in een stedelijke omgeving.

#### Klimaat

Drones en UAM-voertuigen zijn vaak voorzien van een elektrische aandrijflijn. Dit zorgt voor een volledige reductie van de lokale uitstoot van CO<sub>2</sub>, mits hernieuwbare energie wordt gebruikt tijdens het opladen. De klimaatimpact hangt af van hoe veel bestaande verplaatsingen met fossiele brandstoffen er vervangen kunnen worden door een elektrisch alternatief. De productie van met name accu's vormt wel nog een uitdaging. Naast de directe voordelen biedt UAM mogelijk een springplank voor andere vormen van elektrische luchtvaart.

#### Luchtkwaliteit

De elektrische aandrijflijnen zorgen ook voor een reductie van de uitstoot van (ultra)fijnstof. Ook hier hangt de impact af van hoeveel bestaande verplaatsingen met fossiele brandstoffen er vervangen kunnen worden door een elektrisch alternatief.

#### Veiligheid

Drones en UAM maken gebruik van nieuwe technologie, dit brengt inherent risico's met zich mee. De luchtvaart wordt streng gereguleerd om dit soort risico's te beheersen. De verwachte toename van bewegingen zorgt voor een absolute toename in het aantal ongevallen, tenzij het veiligheidsniveau (nog) hoger gelegd zal worden. Bij onbemande luchtvaarttuigen in een stedelijke omgeving of anderzijds kwetsbare omgeving zal externe veiligheid in plaats van vliegveiligheid bepalend worden.

### 4.7.2 Betekenis voor MAA

Maastricht is geen Singapore en MAA is geen Changi Airport, toch kan ook MAA te maken krijgen met drones en UAM. Denk hierbij aan logistieke operaties met drones en onbemande vrachtvliegtuigen, vipvervoer tussen MAA en de MECC tijdens TEFAF of aan grensoverschrijdende operaties door hulpdiensten. MAA is in de regio een logische hub voor zowel kleine onbemande drones als grote bemande VTOLs.

Kleinere drones dienen ingepast te worden in het luchtruim; dit is met name een uitdaging voor de luchtruimindeling en voor de luchtverkeersleiding. Op de grond dienen er faciliteiten voor de logistiek, het opladen van accu's en onderhoud ontwikkeld te worden.

Grotere voertuigen zullen vanuit het perspectief van MAA qua verkeersafhandeling grotendeels gelijk zijn aan conventionele vliegtuigen of helikopters. Enkel wanneer er autonomie wordt toegepast ontstaan er verschillen. Dit zal op de kortere termijn niet voorkomen. Door de alternatieve aandrijflijnen op waterstof of accu's zijn er op gebied van oplaad- en onderhoudsfaciliteiten wel ontwikkelingen nodig.

### 4.7.3 Tijdlijn

Over de verwachte tijdlijn bestaat veel discussie en onduidelijkheid. Rondom 2025 worden de eerste commerciële voorbeelden van UAM verwacht. Pas richting 2035 zullen deze een relevante factor worden. Verregaande autonomie wordt niet voor 2050 verwacht. Ontwikkelingen op gebied van drones gaan sneller. Nog dit jaar worden de Europese Common Drone Rules ingevoerd. Deze maken onbemande operaties mogelijk in diverse soorten luchtruim onder een enkele Europese regelgeving. Dit stelt het Rijk, de Provincie en gemeentes voor uitdagingen op gebied van zonerings: waar mogen drones opereren en waar niet? Momenteel wordt er vooral geëxperimenteerd en zijn de operaties boven bewoond gebied nog zeer beperkt, maar dit zal de komende 10 jaar snel veranderen.

## 4.8 Maintenance, Repair and Overhaul (MRO)

Maintenance, Repair and Overhaul (MRO) vormt een belangrijk onderdeel van de bedrijvigheid op MAA. Ook op dat gebied wordt flink geïnnoveerd. Deze paragraaf gaat in op een aantal voorbeelden hiervan en wat hiervan de betekenis kan zijn voor MAA.

### 4.8.1 Additive manufacturing

Additive manufacturing is de industriële naam voor 3D-printen, waarbij eventueel ook hittebehandelingen worden toegepast naast het printen. In de luchtvaart groeit de markt voor additive manufacturing, omdat het in vergelijking met andere productietechnieken vaak tijd en geld scheelt, en sterke en efficiënte eindproducten oplevert. Uit duurzaamheidsoogpunt is 3D-printen ook aantrekkelijk; doordat een onderdeel wordt opgebouwd in plaats van gefreesd is er minimale verspilling. Verder zijn materiaalresten vanuit andere processen relatief gemakkelijk te verwerken tot 3D-printfilament. Ook hoeven onderdelen niet meer als backup in stock gehouden te worden omdat een benodigd onderdeel te allen tijde geprint kan worden. Dit scheelt materiaal en ruimte. Tot slot kunnen bij additive manufacturing innovatieve gewichtsbesparingen gerealiseerd worden, via technieken als *part consolidation* en *lattice structures*.

Voor luchtvaartmaatschappijen kan additive manufacturing voor MRO-doeleinden aantrekkelijk zijn omdat onderdelen on-demand geprint kunnen worden, waar nu voor sommige onderdelen de hoofdprijs gevraagd wordt als een luchtvaartmaatschappij het echt nodig heeft. Daarnaast bespaart on-demand printen ruimte in de inventaris, en is het materiaalefficiënt. Voor de luchthaven is de ruimtebesparing ook gunstig, en biedt additive manufacturing een manier om on-site kringlopen te sluiten; wellicht kunnen aluminium resten van het oude onderdeel hergebruikt worden om het nieuwe onderdeel te printen.

Uitdagingen aan additive manufacturing zijn de lage hoeveelheid producten die tegelijk geprint kunnen worden en de limitaties die het (vaste) formaat van de printer heeft voor het maken van de onderdelen.

### 4.8.2 MRO voor alternatieve voortstuwing

Wanneer er vliegtuigen met verschillende soorten voortstuwing gebruik zullen maken van de luchthaven, zal dit zorgen voor andere behoeftes ten aanzien van MRO. Deze paragraaf noemt enkele voorbeelden waarop ingespeeld kan worden.

#### 4.8.2.1 Onderhoud aan batterijen en elektrische powertrain

Batterijvliegtuigen zullen andere onderhoudsbehoeftes hebben dan toestellen met een ICE (verbrandingsmotor). MAA zou zich kunnen positioneren als kennishub voor MRO van elektrische vliegtuigen, daarbij kennis opdoend over batterijcellen, koelingssystemen en de elektrische powertrain.



#### 4.8.2.2 Onderhoud aan oplaadinfrastructuur

Niet alleen de vliegtuigen en batterijen, maar ook de oplaadfaciliteiten (battery swap of stekker) kunnen onderhoud en regelmatige checks vergen. Hiervoor kan geleerd worden van de automotive industrie.

#### 4.8.2.3 Onderhoud aan cryogene waterstoftanks

Wanneer waterstof vervoerd wordt in een vliegtuig, zal dit hoogst waarschijnlijk cryogeen gebeuren, bij lage temperatuur en hoge druk. Onder deze omstandigheden is waterstof vloeibaar. De opslagtanks vereisen dus systemen die hoge druk en lage temperatuur (via isolatie) waarborgen. MRO partijen kunnen hierop inspelen door kennis te vergaren op het gebied van de onderhoudsbehoeftes van cryogene tanks.

### 4.8.3 Waterinjectie bij proefdraaien

Na onderhoud of reparaties aan vliegtuigmotoren, moeten deze volgens de protocollen getest worden door middel van proefdraaien. Hierbij komen verbrandingsproducten vrij zoals CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> en (ultra)fijnstof. Maastricht Aachen Airport beschikt over een proefdraaiplaats voor vliegtuigen. Onderhoudsbedrijven gebruiken de proefdraaiplaats om vliegtuigmotoren te testen na onderhoud of reparatie. Een andere locatie op de luchthaven (het C-platform) wordt ook gebruikt voor het proefdraaien. De omgevingsvergunning voor milieu (milieuvergunning) van Maastricht Aachen Airport staat nu alleen het proefdraaien van propellermotoren (turboprops) toe. Er is behoefte om ook het proefdraaien met straalmotoren mogelijk te maken omdat steeds meer straalmotoren in onderhoud worden gegeven bij de onderhoudsbedrijven.

Het concept van een waterinjectie, waarbij water onder hoge druk in de luchtstroom van de motoruitlaat van een straalmotor wordt gespoten, is aanvankelijk ontwikkeld om geluidsreducties te realiseren tijdens het proefdraaien bij straalvliegtuigen. Echter is het aannemelijk dat verschillende verbrandingsproducten ook worden afgevangen. Van (ultra)fijnstof, CO<sub>2</sub> en SO<sub>x</sub> is bekend dat ze door water (gedeeltelijk) kunnen worden afgevangen. Een waterinjectie zou de milieueffecten van proefdraaien dus kunnen beperken. Dit is nog uitermate experimenteel en reductie van emissies is nog niet gemeten.

Voor militaire vliegtuigen (F-16) is een waterinjectie tijdens het proefdraaien succesvol getest door het NLR in samenwerking met de Koninklijke Luchtmacht. (Bos, 2010) Deze methode zou ook kunnen worden toegepast op het proefdraaien van (civiele) straalvliegtuigen. Hiertoe is nog wel (experimenteel) onderzoek nodig om het toepasbaar te maken voor de veelgebruikte vliegtuigtypen die op MAA worden proefgedraaid.



Figuur 9: Proefopstelling voor waterinjectie op de jetblast van een F-16 die aan het proefdraaien is (Bos, 2010)

#### 4.8.4 Inspectie met drones

Het uitvoeren van inspecties met drones is een opkomende innovatie binnen MRO. De drones vliegen om het vliegtuig en een *image recognition algorithm* herkent of er onregelmatigheden zijn aan het exterieur van een vliegtuig. Op deze manier wordt de check ook altijd precies hetzelfde uitgevoerd. Inspectie per drone is aanzienlijk sneller dan een menselijke controle (tien keer sneller volgens MRO-bedrijf Donecle). Er kan meteen automatisch een rapport gegenereerd worden, wat ook weer manuren uitspaart. (Donecle, 2020)

#### 4.8.5 Predictive Maintenance

Predictive maintenance is een innovatie op basis van Artificial Intelligence (AI), die de onderhoudsbehoeftes van vliegtuigen voorspelt. Aan de hand van één of meerdere vaste parameter(s), zoals geluid, beeld of routes gevlogen, wordt een algoritme getraind op bestaande datasets, bestaande uit de eerder genoemde parameter(s) en welke onderhoudsbehoefte of defecten zich op een zeker moment voordeden. Indien genoeg training data beschikbaar is, zal het algoritme steeds beter worden om aan de hand van de input parameter(s) te voorspellen wat voor een onderhoud of defecten de luchtvaartmaatschappij bij het vliegtuig tegen gaat komen.

#### 4.8.6 Digital twin

Een digital twin is een digitale versie van een specifiek vliegtuig. Met deze 'digitale tweeling' kan een luchtvaartmaatschappij de levenscyclus van een bepaald vliegtuig parallel aan de werkelijkheid simuleren om potentiële problemen te voorspellen en op te lossen. In de luchtvaartindustrie kunnen digital twins de vorm aannemen van virtuele, driedimensionale, werkende modellen van een echt vliegtuig of delen van het vliegtuig, zoals een motor. Digital twins van een bepaald vliegtuigmodel stellen ingenieurs in staat om experimenten uit te voeren met behulp van de virtuele versie van het vliegtuig om het effect op het vliegtuig te voorspellen. Met behulp van Internet of Things-locatie- en sensorgegevens kunnen ingenieurs het digitale tweelingvliegtuig onderwerpen aan dezelfde weersomstandigheden en omgevingen die ze verwachten dat het model in de echte wereld zal ervaren.

## 4.8.7 Koppeling met Maintenance Boulevard

Ideeën voor MRO-innovaties kunnen in samenwerking met Maastricht Maintenance Boulevard worden uitgevoerd. Maastricht Maintenance Boulevard is een samenwerkingsinitiatief met als doel het ontwikkelen en leveren van innovatieve concepten voor vliegtuigonderhoud. De samenwerking bestaat uit 30+ bedrijven die samenwerken op of rond Maastricht Aachen Airport.

De volgende diensten worden geleverd:

- One-stop-shop vliegtuigonderhoud
- Neus tot staartdiensten
- Geïntegreerde reparatieoplossingen voor componenten
- Uitwisseling en roteerbare poolbeschikbaarheid
- Samengestelde MRO
- Oppervlaktebehandeling en gespecialiseerde processen
- Niet-destructieve tests en inspectie-oplossingen op maat
- Engineering en certificering
- Services voor permanente luchtwaardigheidsbeheerorganisaties (CAMO)
- EASA Part 145 en 147 gecertificeerde dienstverleners
- Pilottraining en certificering
- Opleiding en opleiding van technici.

Maastricht Maintenance Boulevard richt zich primair op de markt voor regionale en zakenvliegtuigen, zowel voor nieuwe als voor niet in productie zijnde vliegtuigen. De brede kennis en expertise van de verschillende deelnemers stelt Maastricht Maintenance Boulevard in staat om op maat gemaakte en innovatieve oplossingen te leveren voor elke onderhoudsbehoefte. (NAG, 2020)

## 4.8.8 Effect op geluid, emissies en veiligheid

### Geluid

Tijdens de proef met waterinjectie tijdens proefdraaien voor een F-16 is voor laagfrequent geluid (de bastonen) een geluidsreductie van ca. 10 dB gemeten (NLR, 2010). Voor hoogfrequent geluid is een reductie van 20 tot 30 dB waarschijnlijk haalbaar. De geluidsreductie voor andere typen vliegtuigen is nog onbekend, omdat dit nog niet is onderzocht.

Om slaapverstoring tegen te gaan is vooral het tijdstip van het proefdraaien een belangrijke factor. Indien het (incidenteel) voorkomt dat proefdraaien in de avonduren moet gebeuren, zal er sprake zijn van slaapverstoring. De eerdergenoemde reductie van 10 dB is zeker merkbaar voor het menselijk gehoor. In hoeverre waterinjectie bij proefdraaien de slaapverstoring daadwerkelijk kan doen afnemen, moet worden onderzocht. Daarbij speelt de afstand van de woning tot de luchthaven een grote rol.

Van de overige MRO-onderwerpen kent alleen het gebruik van drones een geluidaspect. In de nabijheid van de luchthaven kan hierdoor een nieuwe vorm van geluidhinder ontstaan. Momenteel is NLR betrokken bij diverse onderzoeken waarbij de geluidsimpact van drones gemeten en berekend wordt.

## Klimaat

### *Additive manufacturing*

Additive manufacturing biedt een manier om on-site kringlopen te sluiten, waardoor aluminium resten van oude onderdelen bijvoorbeeld niet afgevoerd hoeven te worden. Dit scheelt transportkosten en ook de bijkomende CO<sub>2</sub> uitstoot.

### *Waterinjectie bij proefdraaien*

Door waterinjectie bij proefdraaien is bekend dat CO<sub>2</sub> gedeeltelijk afgevangen kan worden. Hoewel erg beperkt, heeft dit een positief effect op het klimaat.

### *Inspectie met drones*

Behalve dat de inspectie de tijdsefficiëntie van de onderhoudsmomenten verhoogt, is er geen direct klimaateffect merkbaar.

### *Predictive maintenance en digital twin*

Door toepassing van predictive maintenance en digital twins kunnen onderhoudsmomenten geoptimaliseerd worden. Zo wordt er enerzijds tijdig onderhoud uitgevoerd, en anderzijds ook niet eerder dan nodig is. Door deze optimalisatie kan er bespaard worden op onderhoudsmomenten en worden deze alleen uitgevoerd wanneer deze echt nodig zijn. Dit scheelt onder andere transport naar en van de onderhoudslocatie, waardoor minder CO<sub>2</sub> wordt uitgestoten.

Door de geoptimaliseerde onderhoudsmomenten, kunnen degraderende motoren eerder onderworpen worden aan onderhoud. De degradatie van motoren kan resulteren in een hoger brandstofverbruik. Door onderhoudsmomenten te optimaliseren, blijven de motoren optimaal presteren en wordt inefficiëntie door degradatie vermeden. Door degradatie van motoren kunnen prestaties van vliegtuigmotoren tot 10% verminderen (Ziya Sogut, Yalcin, & Hikmet Karakoc, 2017).

## Luchtkwaliteit

### *Additive manufacturing*

Door het sluiten van on-site kringlopen middels additive manufacturing, hoeven aluminiumresten van oude onderdelen niet meer afgevoerd te worden. Hierdoor nemen de uitstootgassen door transport af, wat een positief effect op luchtkwaliteit kan hebben.

### *Waterinjectie bij proefdraaien*

Door waterinjectie bij proefdraaien is bekend dat NO<sub>x</sub>, (ultra-)fijnstof en SO<sub>x</sub> gedeeltelijk afgevangen kunnen worden door water. Dit heeft een positief effect op luchtkwaliteit.

### *Inspectie met drones*

Behalve dat de inspectie de tijdsefficiëntie van de onderhoudsmomenten verhoogt, is er geen direct luchtkwaliteit effect merkbaar.

### *Predictive maintenance en digital twin*

Door toepassing van predictive maintenance en digital twins kunnen onderhoudsmomenten geoptimaliseerd worden. Door deze optimalisatie kan er bespaard worden op onderhoudsmomenten en worden deze alleen uitgevoerd wanneer deze echt nodig zijn. Dit scheelt onder andere transport naar en van de onderhoudslocatie, waardoor minder NO<sub>x</sub> en waterdamp wordt uitgestoten, wat een positief effect op luchtkwaliteit heeft.

## Veiligheid

### *Waterinjectie bij proefdraaien*

Als de opstelling niet goed blijft staan, kunnen onderdelen los raken, waardoor er schade kan ontstaan aan het vliegtuig, aan andere apparatuur of mensen zich kunnen verwonden. Het waterinjectiesysteem zal daarom, vanwege de grote krachten die mogelijk op het systeem komen te staan, stevig moeten worden verankerd in de grond en de constructie zal de krachten die er op werken aan moeten kunnen met een ruime belastingmarge.

De waterdamp die ontstaat, kan een invloed hebben op de lokale zichtcondities die sterk gereduceerd kunnen worden. Een eerste inschatting is echter dat het water voor een deel verdampt vanwege de hoge temperaturen van de uitlaatstraal. Een deel zal echter ook als waterdamp in de nabije omgeving worden verspreid en neerslaan. De opstelling zal voldoende stand tot baan moeten hebben om te zorgen dat de waterdamp niet lokaal op de baan komt en daar voor vermindering van het zicht kan zorgen.

Tijdens dagen met vorst kan de waterdamp neerslaan als ijs of bevroren aan de grond. Dit kan lokaal gladde condities veroorzaken welke een risico kunnen vormen voor taxiënde vliegtuigen (aannemend dat de waterdamp niet neerslaat op de baan zelf).

## 4.8.9 Betekenis voor MAA

Aangezien er forse milieu-, tijds- en geldwinst voor luchtvaartmaatschappijen (en in zekere zin luchthavens) te behalen valt door MRO-innovaties toe te passen, is het aantrekkelijk voor MAA om dit aan te bieden aan luchtvaartmaatschappijen. Er zou van Maastricht een MRO-innovatie hub gemaakt kunnen worden in samenwerking met de Maintenance Boulevard; dit zou bijvoorbeeld de vorm aan kunnen nemen van de gezamenlijke aanschaf van apparatuur voor additive manufacturing, of een gezamenlijk project voor digitalisering in MRO via regionale fondsen.

Aangezien MAA zelf geen onderhoudspartij is, is een samenwerking waarin MAA een faciliterende rol speelt aan te raden, en zullen investeringen vanuit de luchthaven beperkt blijven.

## 4.8.10 Tijdlijn

Deze paragraaf geeft een visie voor de toekomst gebaseerd op beschikbare literatuur en een inschatting van het NLR.

### 2020

De MRO-sector wordt steeds innovatiever, zeker ook rondom Maintenance Boulevard. Op het gebied van additive manufacturing en digital twins worden pilotprojecten aangegaan.

### 2030

Luchtvaartmaatschappijen verwachten innovatie van MRO partijen, en voor de MRO partijen zorgt het voor een kostenefficiënte operatie. Dit heeft ertoe geleid dat de technologieën in dit hoofdstuk inmiddels vaste prik geworden zijn. Drones zijn een vast onderdeel geworden van onderhoudsinspecties, machine learning is volledig geïntegreerd voor het voorspellen van onderhoudsbehoefte en failures en additive manufacturing hoort ook bij het standaardrepertoire.

**2050**

Inmiddels is het mogelijk en zelfs de norm om volledig circulaire MRO aan te bieden, waarbinnen alle materialen zich in een kringloop bevinden. Veel MRO taken zijn geautomatiseerd. Vliegtuigen bevatten inmiddels ook zelfhelende materialen.

## 5 Duurzame operatie

### 5.1 Duurzame grondgebonden operatie

Het verduurzamen van de grondgebonden operatie is een van de ambities die wordt genoemd in het Ontwerp Actieprogramma Hybride Elektrisch Vliegen (AHEV - Nationaal Actieprogramma Hybride Elektrisch Vliegen, 2020). Dit programma is ontstaan vanuit het Ontwerpakkoord Duurzame Luchtvaart. Een van de ambities van het programma is om in 2030 de emissies van grondgebonden luchtvaartoperaties met 100% te reduceren.

Op de korte termijn (tot 2025) bestaat dat uit het testen en door ontwikkelen van de mogelijkheden rondom elektrisch taxiën en het aanpassen van laad- en energie-infrastructuur. Op de langere termijn (2026-2029) worden de grondoperaties zero emissie gemaakt, inclusief het afhandelen van bagage, om uiteindelijk in 2030 een volledig zero emissie grondgebonden operatie te bereiken.

In het AHEV-programma worden verschillende initiatieven benoemd die in de komende tien jaar zullen worden ondernomen om die ambitie te realiseren. Tegelijkertijd is het natuurlijk luchthaven-specifiek wat wel en niet kan. In deze sectie zal worden ingegaan op de mogelijke opties voor verduurzaming van de grondgebonden operatie op MAA.

#### 5.1.1 Grondgebonden voertuigen op alternatieve brandstof

MAA bezit bussen, auto's, heftrucks, sneeuwvegers en vrachtauto's. Daarnaast zijn er ook voertuigen op de luchthaven die het bezit zijn van derden.

Verschillende luchthavens werken aan hun koolstofvoetafdruk door grondgebonden voertuigen op elektriciteit of waterstof te laten rijden. Dit kunnen passagiersbussen, bagagevoertuigen en voorzieningsvoertuigen voor het vliegtuig zijn. Enkele voorbeelden van elektrisch- of waterstof aangedreven grondvoertuigen op luchthavens zijn:

- Waterstofbrandstofcel bussen op Incheon International Airport. (International Airport Review, 2020)
- Waterstofbrandstofcel bussen tussen de twee luchthavens van Shanghai. (Bergenson, 2020)
- Schiphol werkt samen met Connexion om vervoer met meer dan 100 volledig elektrische bussen aan te bieden van, naar en rond de luchthaven. (Schiphol Airport, 2020)
- Het bedrijf Packmule biedt alle soorten grondvoertuigen elektrisch aan voor grondafhandelaren. (Packmule, 2020)

Om elektrische of waterstof voertuigen te faciliteren, moet de luchthaven zorgen dat de juiste oplaadfaciliteiten aanwezig zijn op plekken die zo goed mogelijk in de operatie passen.

#### 5.1.2 Elektrisch taxiën

Vliegtuigen taxiën van en naar de startbaan met behulp van de (hoofd-)motoren. Hoewel de motoren hiervoor maar een laag vermogen nodig hebben, blijft het een relatief inefficiënte manier van verplaatsing die tegelijkertijd ook geluid produceert. Om brandstof en geluid te besparen wordt soms op één in plaats van meerdere motoren getaxied, maar dit is niet voor alle types mogelijk. Er zijn dan ook een aantal technologieën in ontwikkeling die een meer

elektrische taxi operatie mogelijk maken, zodat de hoofdmotoren pas vlakbij de startbaan gestart hoeven worden. Dit bespaart brandstof en daarmee emissies. Ook is elektrisch taxiën stiller en valt er mogelijk tijdswinst te behalen in het omkeerproces.

Grofweg zijn er twee manieren van elektrisch taxiën te onderscheiden:

1. Door middel van een (hybride)-elektrische push-back tractor waarmee het vliegtuig wordt gesleept. Bijvoorbeeld "TaxiBot".
2. Door middel van een elektromotor in het neuswiel van het vliegtuig waarmee het vliegtuig kan taxiën. Bijvoorbeeld "WheelTug".

Momenteel is alleen TaxiBot direct beschikbaar. Het tweede concept, WheelTug, bevindt zich in de laatste fase van het certificatieproces. Airbus en Safran werkten in het verleden ook aan een soortgelijk concept, maar zijn daarmee gestopt.

### TaxiBot

De TaxiBot is een diesel hybride-elektrische push-back tractor die het vliegtuig niet alleen omdraait, maar ook tot aan de startbaan kan slepen<sup>6</sup>. Het bijzondere aan de TaxiBot is dat de piloot de vliegtuig-TaxiBot-combinatie tijdens het slepen bestuurt vanuit de cockpit. Vlakbij de startbaan wordt de TaxiBot ontkoppeld en kan de vliegtuigmotor gestart worden. De TaxiBot rijdt zonder vliegtuig terug voor een volgende sleepbeweging. In principe kan de TaxiBot ook landende vliegtuigen van de baan naar de opstelplaats slepen, maar daar wordt om operationele redenen voorlopig van afgezien; het aankoppelen van de TaxiBot zou tot gevaarlijke opstoppingen bij de landingsbaan kunnen leiden. De TaxiBot is op Frankfurt operationeel getest bij enkele Lufthansa vliegtuigen. Ook loopt er momenteel een pilot op Schiphol waarbij de TaxiBot wordt getest. De TaxiBot is gecertificeerd voor het slepen van narrow-body vliegtuigen (Airbus A320-familie en Boeing 737), een wide-body variant is in ontwikkeling.



Figuur 10: TaxiBot wordt momenteel operationeel getest op Schiphol. (Bron afbeelding: Schiphol)

### Wheeltug

WheelTug heeft een systeem ontwikkeld waarbij het neuswiel wordt voorzien van een elektromotor. Deze motor wordt door de vliegtuig- Auxiliary Power Unit (APU) van stroom voorzien. De piloot kan het systeem vanuit de cockpit bedienen met een aparte joystick. Het WheelTug-systeem maakt het mogelijk om zonder tussenkomst van een pushback tractor te manoeuvreren op het platform. Door de lage snelheid is het systeem minder geschikt voor lange taxibewegingen en ook is het systeem niet gecertificeerd voor baankruisingen. Deze bewegingen worden zoals

<sup>6</sup> Dit wordt operationeel slepen of operationeel taxiën genoemd



gebruikelijk gedaan met behulp van de hoofdmotoren. Het systeem kan zowel bij aankomende als vertrekkende bewegingen worden gebruikt. WheelTug wordt gecertificeerd voor B737NG vliegtuigen. Voor grotere vliegtuigen die lange afstanden vliegen is dit systeem minder aantrekkelijk; het extra gewicht kost meer brandstof dan dat het oplevert aan winst tijdens het taxiën.



*Figuur 11: WheelTug, een systeem met elektromotor dat in het neuswiel is geïntegreerd.  
(Bron afbeelding: deingenieur.nl)*

### Operationele beperkingen

NLR heeft recent een impact assessment uitgevoerd naar elektrisch taxiën op een middelgrote Europese luchthaven. Deze resultaten zijn nog niet gepubliceerd. De belangrijkste, algemene bevindingen worden hieronder genoemd.

Beide concepten kennen significante operationele en bedrijfstechnische beperkingen. Zo is de technologie voorlopig alleen voor narrow-body vliegtuigen beschikbaar wat de toepasbaarheid op de vloot op MAA beperkt. Het gebruik van de technologie wordt verder beperkt door de noodzakelijke opwarm- en afkoeltijden van de vliegtuigmotoren (variërend van twee tot vijf minuten). Tijdens het opwarmen en afkoelen moeten de vliegtuigmotoren blijven draaien en biedt elektrisch taxiën geen voordelen. Ook kan het langer duren voordat een motorstoring opgemerkt wordt doordat de motoren later gestart worden. De te behalen brandstofbesparing en milieuwinst hangen uiteindelijk sterk af van de vloot, luchthavenconfiguratie en baangebruik.

De concepten zelf hebben ook de nodige technische voor- en nadelen. TaxiBot voor- en nadelen:

- De TaxiBot vereist geen aanpassingen aan het vliegtuig en is toepasbaar op alle types binnen een bepaalde gewichtscategorie. De TaxiBot is geschikt voor vliegtuigen van de Airbus A320-familie en de Boeing 737; samen verantwoordelijk voor 36% van het verkeer op MAA in 2019<sup>7</sup>.
- Doordat de maximumsnelheid vergelijkbaar is met een normale operatie kan het systeem op de hele (uitgaande) taxibeweging inclusief baankruisingen worden toegepast. Wel zorgt het concept voor extra verkeer op de luchthaven doordat de TaxiBot na het slepen terug moet. Op luchthavens met een relatief laag aantal vliegbewegingen zoals MAA is dit minder relevant dan op drukke vliegvelden zoals Schiphol. De extra bewegingen zorgen ook voor een grotere vraag naar bestuurders van de sleepvoertuigen.
- Het concept is een financiële kans voor grondafhandelaren, maar vereist wel een significante investering die ze lang niet altijd zullen kunnen maken.
- Ten slotte vormt het afkoppelen van de TaxiBot nabij de startbaan een logistieke uitdaging.

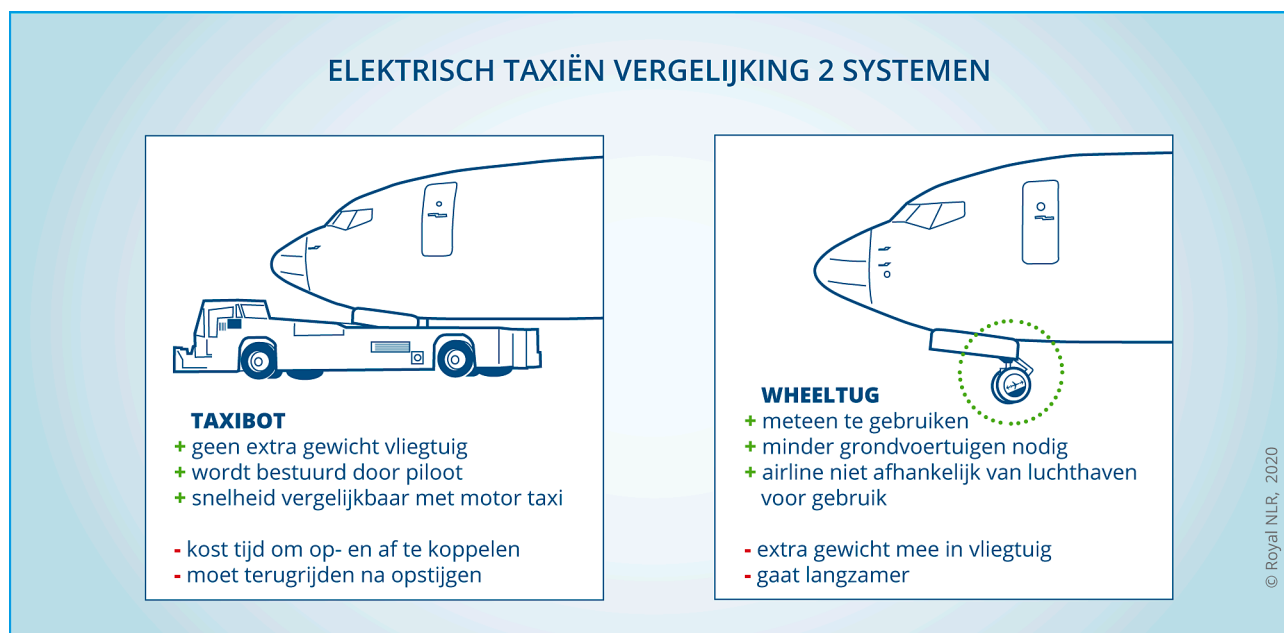
<sup>7</sup> FANOMOS data export

WheelTug voor- en nadelen:

- De WheelTug wordt in het vliegtuig ingebouwd en maakt een push-back tractor overbodig. Het concept wordt momenteel gecertificeerd voor de Boeing 737. In 2019 maakte dit type 33% uit van de bewegingen op MAA.
- Dit scheelt tijd en vereist minder bestuurders van de sleepvoertuigen. Ook introduceert het concept geen extra bewegingen op de luchthaven.
- Het systeem voegt gewicht toe aan het vliegtuig, wat slechts ten dele wordt gecompenseerd door minder benodigde brandstof. Ook is door de beperkte snelheid het toepassingsgebied van het systeem beperkt en is het systeem door de beperkte druk op het neuswiel minder geschikt voor hellingen of gladheid.
- WheelTug wordt aangeboden aan luchtvaartmaatschappijen via een *pay-per-use* constructie zonder vereiste investering vooraf. Verschillende maatschappijen hebben interesse getoond in het concept.

Ondanks bovenstaande beperkingen kunnen beide concepten leiden tot geluidsreductie en een significante besparing in de CO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub> die op de luchthaven wordt uitgestoten. Doordat de vliegtuigmotoren niet meer op het platform zelf gestart hoeven te worden, worden medewerkers van de luchthaven daarbij minder blootgesteld aan geluid en (ultra)fijnstof wat de arbeidsomstandigheden verbetert. Ten slotte is de kans op motorschade door *foreign object debris* om dezelfde reden lager.

Een vergelijking tussen de twee systemen is weergegeven in Figuur 12.



Figuur 12: Overzicht van de twee concepten voor elektrisch taxiën

### 5.1.3 (Autonome) elektrische bagage- en vrachtafhandeling

Bagage-afhandeling op regionale luchthavens verloopt vaak nog met veel menselijke afhankelijkheden en met fossiel aangedreven voertuigen. Er wordt ook gewerkt aan autonome, elektrische oplossingen, die zelfstandig en zonder operationele emissies de bagage sorteren en vervoeren rond de luchthaven. De meest bekende hiervan in Nederland

is de robot bagagewagen van Vanderlande, die getest wordt op Rotterdam The Hague Airport en binnenkort ook op Eindhoven Airport. (Future Mobility Movement, 2019) (Rooij, 2020)

Kijkend naar de schaal van de operatie, zou het voor MAA haalbaar moeten zijn om een pilot te doen op het gebied van autonome bagageafhandeling.

Het autonoom afhandelen van vracht kan voor MAA aantrekkelijk zijn, omdat de luchthaven voor ongeveer de helft van de operatie vrachtluchten afhandelt. Voor autonome vrachtafhandeling lopen voor zover bekend bij de schrijvers wereldwijd nog geen pilots op luchthavens. Er kan inspiratie gehaald worden uit de logistieke sector; bedrijven als Bol.com en CoolBlue werken al enkele jaren met robots die pakketten samenstellen, optillen en vervoeren van A naar B. MAA zou met een dergelijk project een leidende rol kunnen nemen in innovatie van vrachtafhandeling.

## 5.1.4 Beteugelen APU & GPU gebruik via walstroom

De Auxiliary Power Unit (APU) is een kleine gasturbine die meestal in de staart van het vliegtuig is gemonteerd. De APU wordt gebruikt om de elektrische systemen aan boord van energie te voorzien, om de airconditioning te laten draaien en om de hoofdmotoren van 'bleed air' te voorzien ten behoeve van het opstarten van deze motoren. In geval dat de hoofdmotoren zijn uitgeschakeld kan de APU ook worden ingezet als voorziening van pneumatische druk voor de pneumatische systemen aan boord van het vliegtuig. Tijdens laden en lossen wordt gebruik gemaakt van walstroom. Voor de voorbereidingen van vertrek en na aankomst wordt nog wel gebruik gemaakt van de APU.

Een alternatief voor de APU is de GPU. Een ground power unit (GPU) is een dieselaggregaat dat stroom levert aan een vliegtuig wanneer de hoofdmotoren en de APU zijn uitgeschakeld, bijvoorbeeld tijdens het laden en lossen. Ook de GPU produceert geluid en emissies, die als hinderlijk kunnen worden ervaren.

Omdat gebruik van de APU en GPU significante uitstoot van onder andere CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> en fijnstof veroorzaakt, is het voor de lokale luchtkwaliteit en de carbon footprint van activiteiten rondom de luchthaven wenselijk als APU gebruik wordt ingeperkt. Daarnaast draagt APU en GPU gebruik ook bij aan hinder. Op MAA worden luchtvaartmaatschappijen om deze redenen gestimuleerd de APU niet langer dan noodzakelijk te gebruiken. Het handhaven van APU gebruik kan een uitdaging zijn voor luchthavens, omdat luchtvaartmaatschappijen zelf de APU aan of uit zetten, en er aan de buitenkant van het vliegtuig niets zichtbaar is. Via geluidsmetingen of infrarood kan er alsnog op gehandhaafd worden. (Maastricht Aachen Airport, 2019).

## 5.1.5 Effect van de maatregelen op geluid, emissies en veiligheid

### 5.1.5.1 Geluid

#### E-taxi

Doordat de vliegtuigmotoren niet meer op het platform zelf gestart hoeven te worden medewerkers van de luchthaven en omwonenden minder blootgesteld aan geluid (en emissies).

### **TaxiBot**

In geval van de TaxiBot zal ook het geluidsniveau tijdens de taxi-out-fase dalen. Voor omwonenden dichtbij het luchthaventerrein zal dit mogelijk tot een verbetering leiden, afhankelijk van de locatie; een deel van de taxifase zullen de motoren nog steeds gebruikt moeten worden. Het geluid van het vliegtuig bij landing of vertrek (*take-off*) blijft vergelijkbaar.

Een studie uit 2016 (Baumann & Katja, 2016) heeft het geluid van een Boeing 737-500 gemeten tijdens een sleepbeweging met een TaxiBot. De meting vond plaats over een afstand van 100 meter, met een minimumafstand van 22,5 meter tussen vliegtuig en microfoon. Het gemiddelde geluidsniveau van deze sleepbeweging was 80,8 dB ( $LA_{eq}$ ), het piekniveau was 86,3 dB ( $LA_{max}$ ). Beide waarden waren significant lager dan het gemeten referentiescenario waarbij het taxiën werd uitgevoerd zonder sleepvoertuig, op de hoofdmotoren: 94,0 dB ( $LA_{eq}$ ) en 102,9 dB ( $LA_{max}$ ). Grofweg kan worden gesteld dat de geluidreductie zo'n 10-20 dB(A) is wanneer TaxiBot wordt toegepast.

### **WheelTug**

De WheelTug is helaas niet getest in hetzelfde onderzoek, wel is de TaxiBot los gemeten (zonder vliegtuig). Door deze waarden van de meting met gesleept vliegtuig door TaxiBot af te trekken kan het geluidsniveau van een sleepbeweging met een WheelTug-systeem geschat worden. Deze waarden komen uit op 80,6 dB ( $LA_{eq}$ ) en 86,2 dB ( $LA_{max}$ ). Let wel, hierbij wordt geen rekening gehouden met het feit dat de APU, die de WheelTug aandrijft, harder moet werken en daarbij meer geluid zal maken dan wanneer deze enkel de elektrische systemen en klimaatbeheersing aandrijft.

Het dichtstbijzijnde dorpje Schietecoven ligt op ruim 100 meter van de baan van MAA, grofweg vergelijkbaar met de afstand van de uitgevoerde metingen. Omdat uiteindelijk de hoofdmotoren zullen moeten worden gestart, inclusief de benodigde warming-up tijd, is de verwachting dat voor de bewoners van bijvoorbeeld Schietecoven het effect van e-taxi minder groot is, wanneer wordt gestart vanuit het zuiden. In dat geval heeft vooral Ulestraten profijt van deze technologie. Wanneer wordt gestart vanuit het noorden, zal de benodigde warming-up tijd waarschijnlijk grotendeels de benodigde taxitijd beslaan, waardoor het effect voor geluidbelasting nihil is.

In 3.1.4.1 is tevens genoemd dat elektrisch taxiën geen voordeel heeft tijdens het warmdraaien en afkoelen van de motoren, dus in deze periodes zal er geen winst geboekt kunnen worden door elektrisch taxiën. Doordat deze periodes wegvallen op de al vrij korte taxitijd voor de taxi-out, zal de emissiebesparing door elektrisch taxiën op MAA relatief klein zijn.

### **Betugelen APU- en GPU-gebruik via walstroom**

Geluid van de APU en GPU worden geproduceerd op het luchthaventerrein. Dat wil zeggen dat dit geluid met name hinder oplevert voor omwonenden die in de directe omgeving van de luchthaven wonen, waardoor het reduceren van dit geluid hinderreductie kan geven voor een beperkt aantal omwonenden. De hoeveelheid geluid die door omwonenden wordt waargenomen hangt af van de ligging van de woning ten opzichte van de luchthaven, maar bijvoorbeeld ook van de weersomstandigheden en van het type geluid (geluid met een hoge frequentie is over het algemeen minder goed hoorbaar op grotere afstand van de geluidbron dan laagfrequent geluid).

## Klimaat en luchtkwaliteit

### E-taxi

Bij elektrisch taxiën worden de hoofdmotoren korter ingezet. Dit zorgt voor een CO<sub>2</sub>-, H<sub>2</sub>O-, en NO<sub>x</sub>-besparing op de luchthaven. De besparing wordt echter beperkt door operationele beperkingen en doordat er een hybride-elektrische sleeptoractor ingezet wordt (TaxiBot) of de APU een elektromotor aandrijft (WheelTug).

In de eerdergenoemde NLR impact assessment naar elektrisch taxiën op een middelgrote Europese luchthaven is met inachtneming van de operationele beperkingen de CO<sub>2</sub>- en NO<sub>x</sub>-besparing berekend in vergelijking tot een conventionele taxi-out-beweging. De besparing werd tussen de 20% en 30% geschat, waarbij de TaxiBot iets beter leek te presteren. Let wel, dit geldt enkel voor vertrekkende vliegtuigen in de *medium* gewichtscategorie. In vergelijking tot MAA was de gemiddelde taxi-out tijd langer en de baancomplexiteit hoger waardoor de besparing vermoedelijk lager uit valt op MAA.

In 3.1.4.1 is tevens genoemd dat elektrisch taxiën geen voordeel heeft tijdens het warmdraaien en afkoelen van de motoren, dus in deze periodes zal er geen winst geboekt kunnen worden door elektrisch taxiën. Doordat deze periodes wegvallen op de al vrij korte taxitijd, zal de emissiebesparing door elektrisch taxiën op MAA relatief klein zijn.

### Betugelen APU & GPU gebruik via walstroom

Voor operaties op grote Europese velden is onderzocht dat in huidige operaties de totale CO<sub>2</sub>-emissies door de APU tot 40% verminderd kunnen worden ten opzichte van ongelimiteerd APU gebruik, waarbij gebruik van walstroom en pre-conditioned air bij aankomst en vertrek gecombineerd worden met APU gebruik (Aviation, 2018). Zo wordt er op MAA gebruik gemaakt van walstroom tijdens het laden en lossen, maar wordt er tijdens de voorbereidingen voor vertrek en na aankomst nog wel gebruik gemaakt van de APU. Bij verdere optimalisatie van APU gebruik kan dit nog verder gereduceerd worden.

Om de reductiepotentie op MAA verder te onderzoeken, moet er een onderscheid gemaakt worden in APU gebruik bij aankomst en bij vertrek van vluchten. Bij vertrek en aankomst is de APU nog nodig voor het opwarmen en afkoelen van de motoren. Per vertrek of landing maken piloten op Maastricht Aachen Airport momenteel ongeveer 15 minuten lang gebruik van de APU.

Na aankomst, tijdens het laden en lossen, is de APU niet meer nodig en kan er volledig gebruik worden gemaakt van walstroom en pre-conditioned air. In dit geval is de emissiereductie voor CO<sub>2</sub>, Nox, HC en PM10 100%.

Voor vertrekkende vluchten is de berekening van de reductie wat complexer, omdat de APU nog wel benodigd is voor het opstarten van de motoren. Voor het opstarten en opwarmen van de motoren is ongeveer 2 tot 5 minuten nodig. Bij gebruik van de APU gedurende 5 minuten in plaats van 15 minuten, kunnen de APU-emissies dus tot één derde gereduceerd worden. In onderstaande tabellen is dit weergegeven voor de GTCP85-129, een representatieve APU voor de Boeing 737-800 die veel op MAA vliegt<sup>8</sup>.

*Tabel 3: Fuel flow en emissie indices (EI) voor CO<sub>2</sub>, Nox, CO en HC voor APU type GTCP85-129. De waardes voor de fuel flow en emissie indices voor Nox, CO en HC zijn genomen uit (Fleuti & Hofmann, 2005). Voor de emissie index voor CO<sub>2</sub> is een gemiddelde waarde genomen uit (Zhang, Huang, Liu, & Li, 2019)*

APU type	Fuel Flow (kg/h)	CO <sub>2</sub> (g/kg)	Nox (g/kg)	CO (g/kg)	HC (g/kg)
GTCP85-129	86.00	3.155	4.63	17.86	1.13

<sup>8</sup> <http://www.b737.org.uk/apu.htm>

Tabel 4: Per 15 minuten en 5 minuten zijn het brandstof verbruik en de emissies van CO<sub>2</sub>, Nox, CO en HC weergegeven voor APU type GTCP85-129

Tijd APU in gebruik	Brandstof verbruik (kg)	CO <sub>2</sub> (g)	Nox (g)	CO (g)	HC (g)
15 minuten	21.5	67.73	99.55	383.99	24.30
5 minuten	7.17	22.58	33.18	128.00	8.10

Uit de analyses van Eurocontrol en AOA blijkt dat de emissies door APU gebruik veel gereduceerd kunnen worden bij gebruik van walstroom en pre-airconditioned air. Dit heeft een effect op de lokale luchtkwaliteit, maar omdat het gebruik van de APU tijdens vertrek en aankomst een relatief korte tijd beslaat van de volledige vlucht, zal gemeten over een totale vlucht, de bijdrage aan reductie van klimaateffecten klein zijn.

## Veiligheid

### E-taxi

Systemen die vastzitten aan het vliegtuig zoals de Wheeltug worden gecertificeerd als een extensie op het normale type certificaat van het vliegtuig. Dat betekent dat het systeem aan allerlei strenge veiligheidseisen moet voldoen alvorens het gebruikt mag gaan worden. Er zullen dan ook operationele procedures worden ontwikkeld voor het gebruik van het systeem. Dit waarborgt de veiligheid. Systemen zoals de Wheeltug worden nog niet operationeel gebruikt. Er is daarom nog maar weinig ervaring met mogelijke problemen die tot veiligheidsrisico's kunnen leiden voor het vliegtuig. De maximale taxisnelheden die met een Wheeltug systeem gehaald kunnen worden, liggen een stuk lager dan wat het vliegtuig normaal kan halen. In het geval dat het vliegtuig snel van de baan af moet, zal de hoofdmotor gebruikt moeten worden. Het snel moeten kruisen van de baan is op Maastricht Airport geen issue aangezien dat over het algemeen niet gebeurt.

Systemen zoals de TaxiBot zijn niet geïntegreerd met het vliegtuig. Echter het systeem werkt zo dat de vlieger met de standaard besturingssystemen van het vliegtuig (bijvoorbeeld de tiller) het systeem bedient. Het remmen bijvoorbeeld vindt plaats door het activeren van het normale remsysteem van het vliegtuig maar het feitelijke remmen doet de TaxiBot. De TaxiBot stuurt, trekt en remt het vliegtuig alleen maar onder input van de vliegers.

Systemen als de TaxiBot mogen alleen worden gebruikt wanneer de vliegtuigfabrikant en de gecertificeerde autoriteit van het vliegtuigtype dit hebben goedgekeurd. Hierbij is het belangrijk dat het systeem geen (ongemerkte) schade aan het neuswiel systeem kan aanbrengen. Er komt op dit moment steeds meer operationele kennis beschikbaar in het gebruik van dit systeem uit testprojecten op onder andere Frankfurt en Schiphol. Een punt van zorg is wel, dat wanneer het systeem niet werkt terwijl het vliegtuig een baan aan het oversteken is, het mogelijk kan resulteren in een runway incursion. Echter baankruisingen komen niet voor op Maastricht Airport.

Een TaxiBot kan net als elk ander voertuig gebruikmaken van de runway om zich te verplaatsen. Het is niet nodig om een taxibaan te hebben. Operaties van voertuigen op de runway kunnen wel het runway incursion risico verhogen. Uiteindelijk kan de luchtverkeersleiding om die reden besluiten om TaxiBot niet op de runway toe te laten.

De TaxiBot wordt vooralsnog alleen voor de taxi-out gebruikt. Nadat het vliegtuig de startbaan heeft bereikt wordt de TaxiBot losgekoppeld van het vliegtuig en teruggedreven door een bestuurder. Aan boord van de TaxiBot bevindt zich in het huidige ontwerp nog steeds een bestuurder die als backup dient en ook het voertuig weer terugrijdt. Er zijn plannen om dat geheel autonoom te laten gebeuren zonder bestuurder. Dit introduceert echter nieuwe risico's die met de huidige technologie nog niet afdoende gemitigeerd kunnen worden.

De TaxiBot introduceert extra bewegingen van voertuigen op en of rond de runway. Dit kan het risico van botsingen op de grond en runway incursions doen toenemen. Dit hangt mede af van de drukte op de luchthaven.

Naast effecten tijdens het taxiën heeft eTaxi ook effecten op het platform. Doordat de vliegtuigmotoren niet meer op het platform zelf hoeven te worden gestart is de kans op motorschade door *foreign object debris* (FOD) om dezelfde reden lager.

## 5.1.6 Betekenis voor MAA

De rol die MAA zou kunnen nemen, verschilt per innovatie behandeld in dit hoofdstuk.

### 5.1.6.1 Duurzame grondgebonden voertuigen

MAA heeft directe invloed op de voertuigen die van de luchthaven zelf zijn. Dit zijn voornamelijk passagiersbussen. Er kan een doel gesteld worden dat vanaf een bepaald jaartal geen voertuigen van de luchthaven zelf nog op fossiele brandstof rijden. Op de voertuigen van grondafhandelaren heeft MAA geen directe invloed. Via gunstigere concessies voor duurzamere grondoperaties kan de luchthaven stimuleren dat grondafhandelaren kiezen voor voertuigen op elektriciteit of waterstof.

### 5.1.6.2 Elektrisch taxiën

Stimuleren van de toepassing van elektrisch taxiën kan in de vorm van realistische quota, waarbij reductie van grondgebonden kerosineverbruik wordt opgelegd. Ook kan de luchthaven gebruikmaken van tariefdifferentiatie, waarbij vliegtuigen die uitgerust zijn met e-taxi systemen een lager tarief betalen dan vliegtuigen die op de motoren taxiën. Daarnaast kan de aanschaf van e-taxi systemen zoals Taxibot door de overheid worden gesubsidieerd of mogelijk worden gemaakt in de vorm van een duurzaamheidslening, die wordt afbetaald door middel van bespaarde kosten. Voordat elektrisch taxiën wordt gestimuleerd, dient echter wel uitgezocht te worden hoe groot de reductie van emissies (en geluidsoverlast) in het specifieke geval van MAA zou zijn.

Op MAA is de gemiddelde taxitijd ongeveer zes minuten bij vertrek (en negen minuten na landing) (Eurocontrol, 2020). Gebruiksrichtlijnen van de motoren vereisen dat de motoren bij vertrek drie tot vijf minuten warmdraaien en bij aankomst twee minuten afkoelen. Gedurende deze periode heeft elektrische taxiën geen voordeel aangezien het taxivermogen nagenoeg gelijk is aan het stationair vermogen van de hoofdmotoren.

Daarnaast zijn er nog twee andere operationele beperkingen. Om gevaarlijke opstoppingen bij de landingsbaan te voorkomen kan de TaxiBot voorlopig enkel bij vertrekkende vluchten ingezet worden. Met een extra weg langs de landingsbaan zou dit verholpen kunnen worden. In verband met de lage snelheid van het WheelTug-systeem kan deze niet gebruikt worden bij baankruisingen of wanneer het de verkeerstroom zou belemmeren. Daarmee is dat systeem vooral geschikt voor gebruik op het platform.

### 5.1.6.3 Beteugelen APU gebruik

Maastricht is al actief in het inperken van APU en GPU gebruik. Om de hinder ten gevolge van APU-gebruik in te perken, worden luchtvaartmaatschappijen gestimuleerd de APU niet langer dan noodzakelijk te gebruiken. Naast regels over de duur van het APU-gebruik, kan zowel het APU-gebruik als GPU-gebruik nog verder worden gereduceerd door de volgende maatregelen: het gebruiken van walstroom en pre-conditioned air en (e-)GPU-gebruik. De installatie van walstroom is gepland voor 2020 (Maastricht Aachen Airport, 2019). Tijdens laden en lossen wordt dan gebruik gemaakt van walstroom. Voor de voorbereidingen van vertrek en na aankomst wordt nog wel gebruik gemaakt van de APU. Aan de zijde van Ulestraten zijn elektrische systemen geplaatst die zowel de geluid- als (geur)emissies van zowel de APU als de GPU grotendeels wegnemen. Voor het (vracht)platform aan de Noordoostzijde van de luchthaven wordt een mobiel hybride systeem gekocht dat de geluidsoverlast aanzienlijk vermindert.

Als er twijfels zijn over hoe goed de instructies over APU gebruik door luchtvaartmaatschappijen opgevolgd worden, zou MAA kunnen experimenteren met infraroodtechniek om waar te nemen wanneer vliegtuigen de APU aan hebben staan.

## 5.1.7 Tijdlijn

Deze paragraaf geeft een visie voor de toekomst gebaseerd op beschikbare literatuur en een inschatting van het NLR.

### 2020

Innovatie van grondoperaties is in volle gang bij de Nederlandse luchthavens; waterstof- of elektrische bussen komen steeds meer voor, er vindt een operationele e-taxi proef plaats op Schiphol en de bagage operatie wordt ook langzaam aangepast. E-taxi is door de commissie Remkes specifiek genoemd als te nemen maatregel tegen stikstofuitstoot rondom luchthavens, waardoor er in Den Haag veel interesse voor is.

### 2030

Alle grondvoertuigen zijn elektrisch. Hierdoor is het gunstig dat MAA zelf elektriciteit op kan wekken met zonnepanelen. Inmiddels is de e-taxi techniek doorontwikkeld, waardoor het operationeel een aantrekkelijker concept is geworden. Er wordt gewerkt aan concepten om de vliegtuigmotor opwarmtijd te verkleinen waardoor e-taxi meer emissiereductie oplevert. Verder gaat bagageafhandeling autonoom.

### 2050

Grondoperaties zijn volledig autonoom; er komen bijna geen mensen op het platform en de aprons. E-taxi is alleen nog maar nodig voor de lange afstandsvluchten op SAF, want bij de andere vluchten is taxiën al uitstootvrij.



## 5.2 Zuinig vliegen

Zuinig vliegen betekent dat vliegtuigen een bepaalde procedure volgen waarbij zo min mogelijk brandstof wordt verbruikt. Daarnaast kan ook worden bezuinigd op brandstof door kritisch te kijken naar de routes die worden gevlogen. Door goede afspraken te maken met de luchtverkeersleiding van verschillende gebieden kan zuiniger worden gevlogen. Enkele procedures worden hier kort uitgelicht.

### 5.2.1 Directe vliegroutes

Directe vliegroutes zijn vliegroutes die zo recht mogelijk van A naar B gaan op de kaart, dus zo min mogelijk horizontale inefficiënties bevatten. Voorbeelden van onderdelen van de vliegroute die kunnen zorgen voor inefficiëntie zijn afgesproken aanvlieg- en opstijgroutes om hinder te voorkomen, bochten om een bepaald stuk luchtruim te vermijden en bochten om ander vliegverkeer inclusief veiligheidsmarges te accommoderen. Een manier om de inefficiëntie te kwantificeren, is de gevlogen afstand in het horizontale vlak te vergelijken met de theoretische grootcirkelafstand tussen de plek van opstijgen en landen. Het verschil tussen deze twee afstanden als percentage van de theoretische afstand is een manier om horizontale inefficiëntie te kwantificeren.

### 5.2.2 CCO

Continuous Climb Operations (CCO) houdt in dat een vliegtuig stijgt volgens een continu klimprofiel dat is aangepast aan de prestaties van het vliegtuig en de externe omstandigheden, om de initiële kruishoogte te bereiken met minimaal brandstofverbruik. Verder kan CCO als voordelen hebben dat er minder communicatie nodig is tussen flight crew en ATC en mogelijke vermindering van geluid door thrust optimalisatie. Het is ongunstig als de CCO-klim wordt onderbroken; dit wordt soms geëist van luchtverkeersleiding om te voldoen aan separatieregels tussen opvolgende vliegtuigen. Uiteindelijk heeft veiligheid de hoogste prioriteit binnen de luchtvaart, dus is een slimme luchtruimindeling waarbij de separatieminima worden gehandhaafd, maar CCO (en CDO) ook zo vele mogelijk aangehouden kunnen worden het doel om naar te streven. (ICAO, 2009)

### 5.2.3 CDO

Continuous Descent Operations (CDO) houdt in dat vliegtuigen aan komen vliegen volgens een continu dalende vliegroute, zonder rechte fragmenten. Op deze manier kan de motor op lage stuwkracht bediend worden en is brandstofverbruik minimaal. Het optimale verticale pad is afhankelijk van het type vliegtuig, het gewicht, de wind, temperatuur, icing omstandigheden en andere dynamische factoren. Het optimale verticale pad kan, maar hoeft niet, door een computer berekend worden (het vertical navigation (VNAV) onderdeel van het Flight Management System (FMS)), waaruit een optimale startlocatie van het daaltraject volgt. Het maximale voordeel per individuele vlucht wordt behaald als het vliegtuig zo hoog mogelijk blijft tot de start van de optimale daalroute.

Voornamelijk de luchtverkeersleiding speelt een belangrijke rol in het faciliteren van CDO. Wanneer de keuze er is om of de CCO van een opstijgend vliegtuig, of de CDO van een dalend vliegtuig te onderbreken, wordt ervoor gekozen om de CCO te onderbreken omdat het dalende vliegtuig al in motorstand idle is gezet en daarom het risico loopt op instabiel aanvliegen wanneer onverwacht een uitwijkmanoeuvre gemaakt moet worden. (ICAO, 2010)

## 5.2.4 Effect op geluid, emissies en veiligheid

### Geluid

Door het hoger aanvliegen en gereduceerd motorvermogen zijn de geluidniveaus lager (Commissie MER, 2016). Voor bijvoorbeeld de Boeing 737-800 is het geluidniveau bij een CDO onder het passerende vliegtuig tot maximaal 14 dB(A) lager dan bij een nadering met een horizontaal segment op een hoogte van 2.000 ft. Links en rechts van de vliegbaan worden kleinere afnames berekend. De grootste afnames worden bereikt op 20 tot 25 km voor de luchthaven, al hangt de locatie met de grootste afnames in de praktijk af van de lengte van het horizontale segment (de grootste afname wordt bereikt nabij het punt waar het horizontale segment begint).

### Klimaat

Bij zowel CCO als CDO wordt er volgens een continu klim- of dalprofiel gevlogen met een minimaal brandstofverbruik. Hierdoor neemt de uitstoot van CO<sub>2</sub> en H<sub>2</sub>O af wat een positief effect heeft op het klimaat. Echter betekent een brandstoffefficiëntie operatie niet dat ook de hoeveelheid uitgestoten NO<sub>x</sub> afneemt, omdat deze meer afhankelijk is van de temperaturen en drukken in de motor. De totale emissiereductie hangt af van huidige operaties en dit moet voor de aanvlieg en vertekroutes van MAA nog nader onderzocht worden.

### Luchtkwaliteit

Een CCO-klim houdt een klim in met een minimaal brandstof verbruik. Door minder brandstofverbruik neemt ook de uitstoot van PM en UFP af, wat een positief effect heeft op het klimaat. De verandering in Nox uitstoot voor de CCO-klimprofielen vanaf MAA dienen nader onderzocht te worden.

Bij Maastricht volgt het vliegtuig bij de CDO-nadering en bij de 2000 ft (609 meter) nadering alleen boven de 2000 ft een verschillend vliegpad (zie het rapport "Stiller en Schoner MAA", paragraaf 3.2.8). Emissies tot de 3000ft worden meegenomen in de berekeningen van de luchtkwaliteit, dus het verschil in de naderingen tussen de 2000ft en 3000ft moet hierbij in acht genomen worden.

De CDO-nadering wordt uitgevoerd met (gemiddeld) minder vermogen dan een nadering die ook horizontale gedeeltes bevat. Dat betekent dat de motoren in een CDO-nadering minder brandstof verbruiken. Omdat het brandstofverbruik recht evenredig is met de CO<sub>2</sub>-uitstoot betekent dit dat er in de CDO-nadering minder CO<sub>2</sub> wordt uitgestoten. Er zijn vele studies gedaan naar de CO<sub>2</sub>-reductie door uitvoering van een CDO-nadering. (Alam, et al., 2010) geeft aan dat de CO<sub>2</sub> reductie ergens tussen de 160 en 470 kg ligt voor een korte tot middellange afstandsvlucht. Tevens is berekend dat met een CDO-nadering de NO<sub>x</sub>-uitstoot met 11.6% kan worden verminderd. Daarmee heeft een CDO-nadering een gunstig effect op het klimaat.

De uiteindelijke emissiereductie door invoering van de CDO-nadering hangt af van de relatieve besparing t.o.v. de huidige naderingsprocedures en of de CDO-nadering de huidige naderingsprocedures compleet vervangt, of dat de naderingsprocedures naast elkaar worden uitgevoerd. Hiervoor is nader specifiek onderzoek nodig voor Maastricht Aachen Airport.

### Veiligheid

CDO's worden al vrij lang gevlogen zonder dat dit tot grote veiligheidsproblemen heeft geleid. Van belang is dat de werkbelasting van de vliegers niet al te veel wordt verhoogd. Sterk variërende windcondities kunnen sneller resulteren in een onstabiele nadering tijdens een CDO. Hedendaagse vliegtuigen beschikken over technologische oplossingen die de vliegers verder helpen om een CDO veilig en gemakkelijk te kunnen vliegen. Dit helpt te voorkomen dat een nadering onstabiel wordt tijdens het vliegen van een CDO.

## 5.2.5 Betekenis voor MAA

Directe vliegroutes, CCO en CDO worden vanuit de luchtverkeersleiding van MAA reeds nagestreefd, in balans met veiligheid en afspraken met de omgeving op het gebied van geluid.

## 5.2.6 Tijdlijn

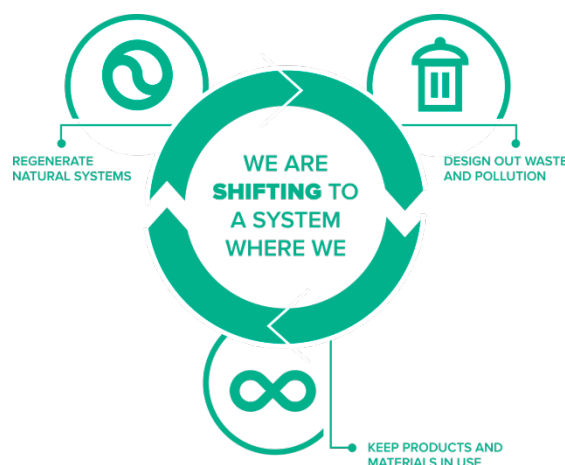
Voor 2020, 2030 en 2050 geldt dat het zuinig vliegen een steeds belangrijker prestatie criterium zal worden voor de luchtverkeersleiding.

## 6 Duurzame luchthaven

Dit hoofdstuk staat stil bij een aantal onderwerpen dat wereldwijd steeds belangrijker wordt voor de verduurzaming van de luchthaven. De onderwerpen worden kort uitgewerkt, waarna aangegeven wordt hoe andere luchthavens deze concepten reeds in de bedrijfsvoering geïmplementeerd hebben. Tot slot wordt de koppeling gemaakt voor MAA.

### 6.1 Circulaire Economie voor de luchtvaart

In onze huidige omgang met grondstoffen is het de gewoonte om primaire hulpbronnen te oogsten, producten te produceren, te gebruiken en weg te gooien; “Take, make, use, dispose”. Afval wordt voor het grootste deel verbrand of gestort en als recycling wordt uitgevoerd, zijn de verkregen materialen over het algemeen van lagere waarde dan het originele product. Uitstoot in productie, transport en onderhoud van producten wordt niet altijd meegenomen in het ontwerp. Deze aanpak geldt niet alleen voor fysieke producten, maar ook voor onze niet-hernieuwbare benadering van energie en water. Dit model is een lineaire economie.



Figuur 13: Concepten Circulaire Economie (Ellen MacArthur Foundation)

Naarmate de vraag naar hulpbronnen toeneemt en het einde van de aanvoer in zicht komt, is dit model niet langer haalbaar. Onze samenlevingen moeten overschakelen van een lineaire economie naar een nieuwe aanpak waarbij we ons verbruik van hulpbronnen beperken en in staat zijn om ze na gebruik te regenereren. Zo’n model is een circulaire economie, waarbij grondstofkringlopen, zoals water, energie en materialen, zoveel mogelijk worden gesloten.

Hergebruik, delen, hernieuwbare energie, kwaliteit, duurzaamheid, modulariteit, ontwerp voor recycling en koppelprocessen om verlies van materialen of energie te voorkomen zijn belangrijke begrippen binnen de circulaire economie. (Ellen MacArthur Foundation, 2013). Aangezien veel grondstoffen waar we momenteel op vertrouwen de kritieke beschikbaarheid naderen, is het van cruciaal belang dat maatregelen in de circulaire economie in alle sectoren worden uitgevoerd. (European Commission, 2014). Bovendien zal een circulaire economie op de lange termijn economisch winstgevender zijn. (Lewandowski, 2016).

Aangezien hernieuwbare energie is opgenomen in de benadering van de circulaire economie en de productie (en transport) van producten en materialen over het algemeen koolstofintensief is, zal de implementatie van een

circulaire economie ook bijdragen tot het verminderen van de uitstoot van broeikasgassen. Al met al sluit het concept van de circulaire economie aan bij de Brundlandt definitie van duurzame ontwikkeling (World Commission on Environment and Development, 1987):

*“Een ontwikkeling die voorziet in de behoeften van het heden zonder het vermogen van toekomstige generaties om in hun eigen behoeften te voorzien in gevaar te brengen”.*

Het overgrote deel van luchthavens heeft nog geen (openbaar) plan voor het implementeren van circulaire economie maatregelen. Dit is een gemiste kans, aangezien het integreren van acties en ambities in een circulaire economie actieplan een effectieve methode is om de inspanningen van de onderneming op het gebied van verantwoord ondernemen te structureren en te kwantificeren. Dit kan luchthavens betere milieuprestaties opleveren, economische besparingen realiseren, de banden met de omgeving versterken en een krachtige boodschap voor externe communicatie opleveren.

In de volgende sectie wordt een aantal aspecten van circulaire economie voor luchthavens beschreven. Deze aspecten zijn de Life Cycle aanpak en Afvalmanagement op luchthavens.

### 6.1.1 Life Cycle aanpak

Een kernonderdeel van de circulaire economie filosofie, is om de gehele levenscyclus van een product, gebouw of project mee te nemen in de evaluatie ervan. Hiermee worden de emissies en het materiaalgebruik van grondstofwinning tot ontmanteling en afvalverwerking meegenomen.

Twee veelgebruikte life cycle toepassingen zijn de Life Cycle Inventory (LCI) en Life Cycle Assessment (LCA). LCI is de methodologiestap waarbij een inventaris wordt gemaakt van in- en uitstroom voor een productsysteem. Dergelijke stromen omvatten input van water, energie en grondstoffen, en lozingen naar lucht, land en water. De inventaris kan gebaseerd zijn op literatuuronderzoek of op processimulatie.

De LCA gaat één stap verder dan alleen het inventariseren van de grondstofstromen; dit is een methodologie voor het beoordelen van milieueffecten die verband houden met alle stadia van de levenscyclus van een commercieel product, proces of dienst. Zo worden in het geval van een vervaardigd product de milieueffecten beoordeeld vanaf de winning en verwerking van grondstoffen (*cradle*), via de fabricage, distributie en gebruik van het product tot de recycling of definitieve verwijdering van de materialen waaruit het bestaat (*grave*).

Een LCA-studie omvat een grondige inventarisatie van de energie en materialen die nodig zijn in de gehele waardeketen van het product, proces of dienst, en berekent de overeenkomstige emissies naar het milieu. LCA beoordeelt dus cumulatieve potentiële milieueffecten. Het doel is om het algehele milieuprofiel van het product te documenteren en te verbeteren.

#### 6.1.1.1 Embodied carbon

*Embodied carbon* is de uitstoot van een gebouw of bouwwerk die in de levenscyclus van gebruikte materialen verborgen zit. Dit houdt in dat de CO<sub>2</sub>-emissies die zijn vrijgekomen bij het maken van bouw materiaal en het uiteindelijk ook weer afbreken van het gebouw worden meegenomen opgeteld.

Embodied carbon komt voort uit de LCA, en is voor luchthavens een relevante circulaire economie metriek. Om het te berekenen, wordt nagegaan hoeveel broeikasgassen in de toeleveringsketen vrijkomen van *cradle to grave*, wat de meest volledige keten is. *Cradle to grave* omvat de winning van materialen uit de grond, transport, raffinage, verwerking, montage, in gebruik (van het product) en tenslotte de sloop en de afvalverwerking van de materialen.

*Embodied carbon* krijgt steeds meer aandacht van zowel industrie als de overheid, waar nu erkend wordt dat belichaamde CO<sub>2</sub>-emissies een groot deel uitmaken van de emissies van de bouwsector. In feite is het vaak 20-50% (belichaamde + operationele) CO<sub>2</sub>-uitstoot van een nieuw gebouw over de hele levensduur. Dit is al een aanzienlijk deel en zal alleen maar toenemen naarmate de thermische normen van nieuwe gebouwen verbeteren.

Door voor gerecyclede materialen of materialen met een lage CO<sub>2</sub> voetafdruk te kiezen en door modulair ontwerp, kan een luchthaven de *embodied carbon* van gebouwen, platforms en banen verkleinen. Door een externe partij kan een scan op *embodied carbon* worden uitgevoerd.

## 6.1.2 Afvalmanagement op luchthavens

Afvalmanagement op luchthavens is complex vanwege de vele betrokken stakeholders, verschillende soorten afval en lokale wetgeving (of het ontbreken daarvan). In deze paragraaf worden eerst de afvalstromen op luchthavens toegelicht.

### 6.1.2.1 Afvalstromen op een luchthaven

Op luchthavens zijn de volgende soorten afval aanwezig (ICAO, 2019):

- **Gemeentelijk vast afval (Municipal Solid Waste)**  
Dagelijkse items die worden gebruikt en weggegooid, van de passagiersterminal, huurders, luchtvaartmaatschappijen en vracht.
- **Bouw- en sloopafval (Construction and Demolition Debris)**  
Afval van landontginning, ontgraving, bouw of sloop.
- **Afval van binnenlandse vluchten (“deplaned” afval)**  
Afval van vliegtuigen; voedsel, verpakkingen enz.
- **Internationaal afval (Category 1)**  
Afval van internationale vluchten of de terminals die internationale vluchten bedienen. Wetgeving verschilt aanzienlijk per land. Risico op introductie van plantenplagen, ziekten en andere verontreinigingen.
- **Composteerbaar en biologisch afbreekbaar afval**  
Afval zoals voedsel, restjes van voedselbereiding, tuinieren, indien gescheiden.
- **Gevaarlijk en industrieel afval**  
Oliën, oplosmiddelen, ander chemisch afval van wassen, schoonmaken, tanken, verf, metaalwerk.
- **Toiletafval**  
Hygiëne en volksgezondheid zijn belangrijke overwegingen voor toiletafval.

Afvalbeheer op luchthavens is vaak sterk gedecentraliseerd; dit betekent dat het ophalen, sorteren en behandelen van afval niet via één contract voor de hele luchthaven wordt geregeld. Als alle luchtvaartmaatschappijen, ANSP's, afhandelaren, cateringbedrijven en vrachtbedrijven hun eigen afvalregeling hebben, kunnen er honderden

afzonderlijke afvalcontracten zijn. Dit is inefficiënt (logistiek en qua emissies) en bemoeilijkt het afvalbeheer, met name inspanningen om de afvalscheiding te verbeteren. Een eerste te overwegen maatregel zou daarom kunnen zijn het afvalbeheer voor de hele luchthaven te centraliseren via één contract, inclusief doelstellingen voor scheiding en recycling.

Dit sluit aan bij een ander probleem dat luchthavens kunnen tegenkomen bij afvalbeheer; huurders stimuleren om minder afval te produceren en bij de bron te scheiden. In een gecentraliseerd afval inzamelsysteem kunnen huurders rechtstreeks worden gefactureerd voor het afval dat ze leveren, een 'pay-as-you-throw'-systeem. Om niet alleen de stok, maar ook de wortel te implementeren, kunnen huurders die het minste afval produceren of de hoogste recyclingpercentages behalen, worden beloond met prijzen, advertentieruimtes elders op de luchthaven en promotionele berichtgeving op sociale media van de luchthaven.

Bij elke afvalbeheerstrategie is het een belangrijke factor in het slagen of mislukken van het opleiden en motiveren van passagiers, personeel en huurders om deel te nemen. Instrumenten die luchthavens hiervoor hebben, huren een speciale coördinator voor afval / recycling / circulaire economie in, die zorgt voor duidelijke informatievoorzieningen op prullenbakken en die personeel en huurders opleidt.

### 6.1.3 Voorbeelden van implementatie circulaire economie op luchthavens

Ook op luchthavens is er meer aandacht voor duurzaamheid; hoewel dit geografisch sterk blijkt te variëren. Er zijn al voorbeelden van luchthavens die de circulaire economie in hun bedrijf hebben geïntegreerd:

- San Francisco International Airport streeft naar een 'Closed-Loop Campus' met maatregelen zoals het stoppen van de verkoop van plastic flessen, slimme gebouwen en het doneren van al het overgebleven voedsel. Ook hebben ze hun Boarding Area B via LCA software ontworpen om minimale *embodied carbon* te bevatten.
- Schiphol Airport voert verschillende circulaire-economieprojecten uit, zoals een belichting als een service pilot, en zet zich in om in 2030 zero waste te zijn. Daarnaast wordt circulariteit steeds belangrijker in de aanbesteding van projecten; zo heeft Schiphol Vrachtgebouw 18 kosten- en materiaalneutraal laten demonteren, waarna het gebouw in zijn geheel weer opgebouwd is voor de nieuwe eigenaar.
- London Gatwick Airport heeft een eigen afvalverwerkingsfaciliteit, en is de enige luchthaven die gecertificeerd is om on-site Category 1 afval uit vliegtuigen te verwerken (tot bio-energie). Dit bespaart £750,000 per jaar.
- Hong Kong International Airport neemt actief deel aan het circulaire economieplan van de stad Hong Kong door te investeren in recycling (Ecopark Tuen Mun), een voedselreddingsprogramma, zonne-energie en testprojecten voor e-taxi.

De verwachting is dat circulaire economie voor veel overheden steeds belangrijker gaat worden. Zo is het ook een pijler van de Europese green Deal (European Commission, 2020). Het is aannemelijk dat luchthavens ook toenemend circulaire economie principes zullen implementeren.

## 6.1.4 Effect op geluid, emissies en veiligheid

### Geluid

De omschakeling naar een circulaire economie heeft geen impact op de geluidbelasting rond een luchthaven.

### Klimaat

Door een circulaire economie te implementeren op een luchthaven, wordt deze minder afhankelijk van externe resources. Bij het uitvoeren van een LCI bijvoorbeeld, wordt er rekening gehouden met de grondstofstromen en kan het benodigde transport afnemen voor invoer van grondstoffen, waardoor er CO<sub>2</sub> wordt bespaard. Dit heeft een positief effect op het klimaat. Bij het uitvoeren van een LCA wordt daarbij ook nog gekeken naar de milieueffecten die alle levenscyclus stadia met zich meenemen. Factoren onder milieueffecten zijn onder andere uitstoot van PM, UFP, geurhinder en uitstoot van broeikasgassen.

Centralisatie van het afvalbeheer van een luchthaven via een contract verbetert de efficiëntie van het proces en resulteert daarbij in minder emissies. Dit heeft een positief effect op het klimaat.

### Luchtkwaliteit

Over het algemeen zullen maatregelen voor circulaire economie in de luchtvaart neutraal of positief uitpakken voor lokale luchtkwaliteit. Ook centralisatie van het afvalbeheer via een contract heeft een positief effect op lokale luchtkwaliteit, door een reductie in emissies veroorzaakt door het afvalbeheer.

### Veiligheid

De omschakeling naar een circulaire economie heeft geen directe impact op de vliegveiligheid rond een luchthaven. Wel moet bij gebruik van circulaire materialen gelet worden op brandveiligheid. Het bouwen van eigen afvalverwerkingsvoorzieningen zou wellicht ook veiligheidsoverwegingen met zich mee brengen.

## 6.1.5 Betekenis voor MAA

De provincie Limburg werkt momenteel aan een Beleidskader Circulaire Economie en een bijbehorend actieprogramma (Provincie Limburg, 2020). Ook zijn 20+ Limburgse bedrijven verenigd binnen Limburg Circulair, een samenwerking rondom een circulaire campus. (Limburg Circulair, 2020) Een eerste stap voor MAA zou zijn om contact te zoeken met deze initiatieven en betrokken te zijn in de lokale initiatieven voor circulaire economie.

Voor toekomstige bouw en renovatie rondom de luchthaven, is het aan te raden om circulariteit tot een belangrijke metriek in het aanbestedingsproces te maken. Ter illustratie: een nieuwe runway kan op basis van bouwresten gemaakt worden. Het ontwerp, de materiaalkeuze en de bouw van nieuwe infrastructuur kan allemaal geoptimaliseerd worden om zo min mogelijk grondstoffen te gebruiken en emissies in de gehele levenscyclus te minimaliseren.

Om tot een gehele circulaire economie strategie te komen voor het luchthavenbedrijf, is het aan te raden om eerst alle materiaalstromen en de embodied carbon van de luchthaven in huidige vorm in kaart te brengen. Aan de hand van dit overzicht kunnen maatregelen en doelen gesteld worden, en stakeholders betrokken worden.



## 6.1.6 Tijdlijn

Deze paragraaf geeft een visie voor de toekomst gebaseerd op beschikbare literatuur en een inschatting van het NLR.

### 2020

Circulariteit is (in ieder geval in west Europa) een opkomend begrip, en verschillende luchthavens hebben ook al plannen om hun prestaties op dit gebied te verbeteren. Echter zijn het vaak nog losse projecten, en is circulariteit nog geen integraal onderdeel van de luchthavenoperatie.

### 2030

Circulariteit is een belangrijke maatstaf voor de prestaties van een luchthaven, en het is steeds beter geïntegreerd in masterplanning en dagelijkse operatie. Ook stakeholders van de luchthaven hebben er steeds meer belang bij om circulair te zijn.

### 2050

Luchthavens in Nederland worden geacht volledig circulair te zijn.

## 6.2 Een duurzaam multimodaal netwerk

De luchthaven van de toekomst staat niet op zichzelf als luchtvaartportaal, maar is ingebed in een breder transportnetwerk. Zo kunnen reizigers vanuit alle kanten efficiënt naar en van de luchthaven reizen, en worden duurzame vervoersopties op verschillende afstanden aangeboden. Een regionale luchthaven wordt wellicht geen multimodale hub als portaal voor alle soorten transport, maar MAA zou zeker in gesprek kunnen gaan met de provincie over de plannen op het gebied van connectiviteit, om meer koppelingen met andere transportmodaliteiten te bewerkstelligen. Voorbeelden van andere modaliteiten die op de luchthaven kunnen aansluiten zijn: (elektrische en/of gedeelde) auto's, metro, (internationale) trein, bus en fietsdeelprogramma's. In de toekomst kan dit wellicht worden uitgebreid met hyperloop, urban air mobility en zelfrijdende auto's.

In dit hoofdstuk worden twee kanten van een duurzaam multimodaal netwerk uitgelicht; duurzame reisoorties voor de korte afstanden, waardoor passagiers naar MAA blijven komen, maar (een deel van) hun reis met minder uitstoot kunnen maken en het vervoer van passagiers en werknemers van en naar de luchthaven.

### 6.2.1 Duurzame reisoorties voor de korte afstanden

Gezien de maatschappelijke druk in Nederland en Europa om uitstoot te verminderen en het weinig duurzame imago dat vliegen heeft, is de verwachting dat vliegen op korte afstanden ontmoedigd gaat worden. Het kan als luchthaven dus strategisch zijn om sterke links te hebben met andere vervoersmiddelen, waardoor passagiers op de luchthaven blijven komen.

### 6.2.2 Vervoer van- en naar de luchthaven

Het vervoer van passagiers en werknemers van en naar de luchthaven heeft invloed op de CO<sub>2</sub> uitstoot van de luchthaven en de voorkeur van passagiers om MAA te kiezen als luchthaven. MAA is momenteel voor passagiers en werknemers bereikbaar per auto of met de bus per lijn 30 (Maastricht-Sittard) die iedere 30 minuten vertrekt. De meest nabijgelegen NS-treinstations zijn Beek-Elsloo en Bunde. Vanaf NS-station Maastricht (waar ook OV-fietsen worden verstrekt) is de luchthaven per fiets bereikbaar binnen 35 minuten, echter wordt er op de website van MAA geen informatie gegeven over bereikbaarheid per fiets of de mogelijkheden om een fiets te stallen.

De luchthaven zou de volgende manieren kunnen overwegen om passagiers en werknemers te stimuleren om duurzame keuzes te maken in hun vervoer van en naar de luchthaven;

- Priority check-in of een kopje koffie aanbieden voor passagiers die met hun ov-chipkaart naar de luchthaven zijn gekomen. Dit wordt reeds geïmplementeerd op San Francisco Airport. Voor werknemers zou dit voordeel verwerkt kunnen worden in gunstige reiskostenvergoeding.
- Een fietsendeel-/huur programma opzetten tussen de luchthaven en het centrum van Maastricht, en bovenstaande voordelen ook aan fietsers verstrekken.
- Voor werknemers een carsharing benefits programma zoals Togethr aanbieden, waarmee punten gespaard kunnen worden wanneer medewerkers samen reizen.

### 6.2.3 Effect op geluid, emissies en veiligheid

#### Geluid

Het versterken van het multimodale netwerk rond Maastricht zal naar verwachting geen- of een positieve invloed hebben op de geluidsoverlast van omwonenden.

#### Klimaat

De totale uitstoot van de luchthaven zal verminderen wanneer er duurzame reisopties worden aangeboden om naar en van de luchthaven te reizen. Dit heeft een positief effect op het klimaat.

#### Luchtkwaliteit

De luchtkwaliteit van een luchthaven wordt bepaald door emissies in een bepaald afgebakend gebied tot 3000ft hoogte. Hierbij wordt rekening gehouden met emissies op omliggende wegen van en naar de luchthaven van wegverkeer. De luchtkwaliteit zal verbeteren wanneer minder passagiers met de auto naar de luchthaven komen, doordat de NOx-emissies, PM en UFP-emissies zullen afnemen.

#### Veiligheid

Wanneer de andere modaliteiten niet op het terrein van de airside komen, wordt geen effect op veiligheid verwacht.

### 6.2.4 Betekenis voor MAA

Om de emissies van de luchthavenoperatie terug te dringen en passagiers nog beter van dienst te zijn, zou de luchthaven de opties gegeven onder 6.2.2 nader kunnen onderzoeken.

De luchthaven kan zelf een rol nemen in het stimuleren van duurzame reisopties, maar om daadwerkelijk nieuwe verbindingen aan te leggen waarmee de luchthaven meer modaliteiten aan kan bieden, zal de luchthaven afhankelijk zijn van stakeholders zoals het Ministerie IenW, de provincie Limburg, de gemeente Maastricht, de NS en Arriva/Connexion.

Het is aan te raden voor de luchthaven om op de hoogte te blijven van de plannen die regionaal spelen op het gebied van vervoer, om ook te kunnen lobbyen voor een goede verbinding wanneer er in de toekomst eventueel plannen komen voor hogesnelheidstreinen, hyperloop of deelprogramma's voor zelfrijdende auto's.

### 6.2.5 Tijdlijn

Deze paragraaf geeft een visie voor de toekomst gebaseerd op beschikbare literatuur en een inschatting van het NLR.

#### 2020

MAA is bereikbaar met de bus, met de fiets of met de auto.

#### 2030

In overleg met de provincie Limburg wordt gewerkt aan een integraal mobiliteitsplan waarbinnen MAA een multimodale hub wordt. MAA heeft een programma geïntroduceerd dat medewerkers en passagiers stimuleert om met het OV naar de luchthaven te komen.

**2050**

MAA is via verschillende vervoersmiddelen verbonden met de rest van het land en verschillende plekken in Europa. Via luchttaxi's kunnen passagiers on-demand van deur tot deur. MAA kan ook als vertrekpunt worden gebruikt om met de hyperloop internationaal te reizen.

## 6.3 Climate resilience

Climate resilience, of klimaatbestendigheid, is de mate waarin een plek, stad, bedrijf of instantie bestand is tegen de gevolgen van klimaatverandering. Door de intensiteit en hoge tijdsdruk van de luchthavenoperatie, is klimaatbestendigheid bijzonder relevant voor luchthavens. De centrale aspecten van klimaatverandering, die relevant zijn voor luchthavens, zijn (Burbridge, 2017):

- Overstromingen en zeespiegelstijging: Dit kan leiden tot overstroming van landingsbanen en taxibanen, verlies van toegang tot vervoer over land en overstroming van elektrische infrastructuur.
- Verhoogde neerslag: Voor de luchthaven heft dit gevolgen voor capaciteit/vertraging, er kan overstroming van landingsbanen en taxibanen plaatsvinden, evenals overstroming van elektrische infrastructuur.
- Toename convectief weer (sterke stijging van lucht): Dit kan op de luchthaven leiden tot verhoogde vertraging/ verlies van capaciteit en gebrek aan capaciteit op afleidende luchthavens.
- Hogere zomertemperaturen: Voor de luchthaven kan dit leiden tot veranderingen in de vraagpatronen in de zomer, hitteschade aan infrastructuur en verhoogde koelingsvereisten.
- Veranderingen in windrichting: Dit kan leiden tot verhoogde zijwind met bijbehorende capaciteitsimplicaties, potentiële procedureveranderingen en potentiële veranderingen in geluidsverdeling.

Hoe gevoelig een luchthaven is voor deze weersveranderingen is sterk afhankelijk van locatie, baanconfiguratie en bezetting.

### 6.3.1 Acties voor de luchthaven

Op basis van Burbridge (2017) en ACI World (2018) zijn door NLR de volgende stappen opgesteld voor een luchthaven om klimaatbestendigheid op te bouwen:

1. Wijs intern een verantwoordelijk persoon of team aan voor klimaatadaptatie.
2. Breng de lokale omstandigheden in kaart; wat is de verwachting voor klimaatverandering op de locatie van de luchthaven, hoe ver ligt de luchthaven boven zeeniveau en wat gebeurt er al op regionaal niveau aan klimaatadaptatie?
3. Voer een risicoanalyse uit voor de huidige operationele procedures en bestaande infrastructuur onder de verwachte veranderde klimaatcondities. Dit moet periodiek herhaald worden.
4. Begin naar aanleiding hiervan met het ontwikkelen en plannen van mitigerende maatregelen en het meenemen van klimaatadaptiviteit in het uitbreiden en vernieuwen van de luchthaveninfrastructuur, in overeenstemming met de risicoanalyse en de algemene bedrijfscontinuïteitsplannen en noodplanning.
5. Ontwikkel efficiënte communicatielijnen met actoren binnen en buiten de luchthaven om in het geval van een klimaatgerelateerd voorval efficiënt te kunnen handelen. Breng partijen die regionaal verantwoordelijk zijn voor weermonitoring, klimaatanalyse en rampenbeheer op de hoogte van de uitkomsten van de risicoanalyse en de belangen van de luchthaven.
6. Blijf de relevante actoren binnen en buiten de luchthavens via presentaties en workshops informeren over de klimaatbestendighedsstrategie die volgt uit stap 2, 3, 4 en 5.

## 6.3.2 Voorbeelden van Climate Resilience programma's op andere luchthavens

Een uitgebreid overzicht van welke acties luchthavens nemen voor klimaatbestendigheid, is te vinden in de ACI policy brief "Airports' resilience and adaptation to a changing climate". (ACI World, 2018) Enkele voorbeelden (uit 30+) zijn;

- Avinor heeft een *comprehensive climate risk assessment* voor al haar vliegvelden laten uitvoeren.
- Stewart Airport heeft permeabele pavement laten leggen om stormwater sneller af te voeren.
- Copenhagen Airport heeft een *vulnerability assessment* laten uitvoeren, en heeft een noodplan opgesteld voor extreme regen.
- Singapore Changi heeft een nieuwe terminal 5 m boven zeeniveau laten bouwen en het waterafvoersysteem verbeterd.
- In Brisbane is de nieuwe baan gebouwd om volledig climate adaptable te zijn, evenals de auto mall.
- John F Kennedy Airport in New York heeft de *design guidelines for climate resilience* geïmplementeerd, en tide gates geplaatst.

## 6.3.3 Effect geluid, emissies en veiligheid

### Geluid

Over het algemeen zullen maatregelen voor climate resilience neutraal uitpakken voor geluid en slaapverstoring.

### Klimaat

Over het algemeen zullen maatregelen voor climate resilience neutraal of positief uitpakken voor klimaat. Wanneer een luchthaven niet klimaatbestendig is, kan het zijn dat in de loop van de tijd met klimaatverandering, de operaties op de luchthaven minder efficiënt zullen verlopen, door bijvoorbeeld strenge weersomstandigheden waar de luchthaven niet omheen kan plannen. Door hier wel op in te spelen, zorgt een luchthaven ervoor dat de operaties met de tijd mee zo efficiënt mogelijk blijven.

### Luchtkwaliteit

Over het algemeen zullen maatregelen voor climate resilience neutraal of positief uitpakken voor lokale luchtkwaliteit.

### Veiligheid

Over het algemeen zullen maatregelen voor climate resilience neutraal of positief uitpakken voor vliegveiligheid.

## 6.3.4 Betekenis voor MAA

Een klimaatbestendige bedrijfsvoering is verstandig vanuit risico-oogpunt, het toont toekomstbestendigheid. Om deze reden wordt het voor geldverstrekkers ook steeds belangrijker dat een bedrijf de risico's die klimaatverandering met zich meebrengen voor de operatie in kaart heeft gebracht, en de mitigatie voldoende heeft uitgedacht. (IADB, 2019) In de volgende strategische cyclus van MAA, is het om deze redenen aan te raden om een klimaatbestendigheidshoofdstuk mee te nemen, aan de hand van de stappen in 6.3.1.

MAA en de provincie hebben reeds analyses uit laten voeren op het gebied van afwatering. Hieruit bleek dat de luchthaven hoog ligt, en omliggende dorpen vooral last zullen hebben van de afwatering vanuit de luchthaven in het geval van extreme regenval. Hiertoe zijn door MAA maatregelen genomen om stormwater op te slaan.

### 6.3.5 Tijdlijn

Deze paragraaf geeft een visie voor de toekomst gebaseerd op beschikbare literatuur en een inschatting van het NLR.

#### 2020

De eerste effecten van klimaatverandering worden merkbaar in Nederland, en daarmee komt ook steeds meer aandacht voor klimaatadaptiviteit. MAA heeft nog geen klimaatadaptiviteitsplan.

#### 2030

Het klimaat is verder veranderd; het is het hele jaar door consequent warmer dan voorheen en er zijn meer incidenten van intense regenval en storm. We hebben in geen jaren kunnen schaatsen. Het wordt voor investeerders en andere stakeholders steeds belangrijker dat een luchthaven een klimaatadaptiviteitsbeleid heeft, omdat er meerdere incidenten zijn geweest waar Europese luchthavens overstromingen hebben gehad na extreme weersincidenten of niet bestand bleken tegen de hoogste zomertemperaturen.

#### 2050

Luchthavens hebben een klimaatverantwoordelijke (of zelfs een klimaatteam bij grote luchthavens) die anticipeert op klimaatadaptiviteit.

## 6.4 Biodiversiteit

Luchthavens kunnen op een aantal manieren van invloed zijn op de biodiversiteit in de omgeving. Dit valt in grote lijnen in te delen in effect op planten en effect op dieren.

### Effect op planten

De gassen en deeltjes die vliegtuigen uitstoten hebben naast hun effect op het klimaat ook effect op bos- en natuurgebieden. Zo is de depositie van onder andere stikstofoxiden (NO<sub>x</sub>) schadelijk voor de natuur wanneer deze waarde boven het kritische depositieniveau komt. Het kritische depositieniveau geeft aan boven welk niveau veranderingen in vegetatie plaats zullen vinden. Plantensoorten kunnen hierdoor verdwijnen, waardoor de soortenrijkdom achteruit gaat. Het vrijkomen van deze deeltjes wordt niet alleen veroorzaakt door luchtvaart; ook onder andere de landbouw, het wegverkeer en energiecentrales zorgen voor de uitstoot van NO<sub>x</sub> met depositie als gevolg. Dit vermindert de kwaliteit en biodiversiteit van bos- en natuurgebieden. (Bal, Beije, van Dobben, & van Hinsberg, 2007)

Naast de effecten van stikstof kan (ultra)fijnstof de gezondheid van dieren en planten aantasten. Ook kan SO<sub>x</sub> (met NO<sub>x</sub>) zorgen voor zure regen. Ook de effecten van klimaatverandering, mede ten gevolge van de luchtvaart, kunnen vergaande gevolgen hebben voor de huidige staat van het ecosysteem. Naar alle verwachtingen zal de opwarming van het Noordelijk halfrond een vermindering in biodiversiteit teweegbrengen in bos- en natuurgebieden. (NASA, 2011)

### Effect op dieren

Op de dagelijkse tot jaarlijkse tijdschaal zorgt vliegtuiggeluid voor een verstoring van dieren in het wild. Dit kan effect hebben op zang van vogel, broedpatronen van insecten en vogels, bloeddruk van kleine zoogdieren en botsingen met vogels en herten. (New South Wales, 2003) (Chesser, Caldwell, & Harvey, 1975) (Allan, 2000) (Biondi, Belant, Martin, DeVault, & Wang, 2011) Ook kan verlies of aantasting van de habitats van diersoorten optreden wanneer een luchthaven uitbreidt, en kan het afschrikken of controleren van dieren rondom de luchthaven zorgen voor gedragsveranderingen, leidend tot veranderingen in het ecosysteem.

### 6.4.1 Voorbeelden van toepassingen op andere luchthavens

Verschillende luchthavens hebben al programma's opgezet om het effect van de luchthavenoperatie op de biodiversiteit zo veel mogelijk te voorkomen, of zelfs de biodiversiteit te bevorderen. Enkele voorbeelden hiervan zijn:

- Via het programma "Bees: guardians of the environment" zet Vinci Airports zich in voor biodiversiteit. Het programma omvat het plaatsen van bijenkorven rond negen luchthavens en het informeren van passagiers en luchthavenmedewerkers over biodiversiteit. Via dit programma versterkt Vinci Airports ook hun inzet om het negatieve effect van hun luchthavens op biodiversiteit te verminderen, bijvoorbeeld door de gangbare methodes voor het managen van dieren en het gebruik van pesticiden te onderzoeken en opnieuw vorm te geven. (Vinci, 2018)
- Vanuit Hong Kong International Airport lopen meerdere programma's voor biodiversiteit en conservatie. Zo steunt de luchthaven onderzoek naar de Chinese White Dolphin, werd bij de uitbreiding van de luchthaven een populatie van een zeldzame kikkersoort opgebouwd en vervolgens vrijgelaten en is onderzoek gedaan naar non-native plant- en diersoorten rond de luchthaven. (Hong Kong International Airport, 2020)



- Sydney Airport heeft in de *Environment Strategy 201-2024* twee doelen vastgesteld voor biodiversiteit:
  - *Identify, preserve and, where practicable, enhance significant native flora, fauna and biodiversity habitat on the airport*
  - *Appropriately manage and control exotic species and species which present a risk to aircraft safety*
 Om naar deze doelen toe te werken, is het *Sydney Airport's Wetlands Management Plan* opgesteld om de biodiversiteit in de drassige gebieden rondom de luchthaven te bevorderen, en het *Wildlife Management Plan* om dieren weg te houden uit de directe omgeving van de luchthaven. (Sydney Airport, 2020)
- Gatwick Airport werkt nauw samen met de Sussex Wildlife Trust om de dieren, insecten, bijen en planten in de 75 hectare green space om de luchthaven te laten floreren. Voor dit werk heeft de luchthaven meerdere prijzen in ontvangst mogen nemen. (International Airport Review, 2020)

## 6.4.2 Reeds uitgevoerde inventarisatie effect MAA op natuur

Een verkenning van de effecten die de luchthavenoperatie heft op de natuur, is opgetekend in het rapport "Effecten van veranderingen in het vliegverkeer van en naar luchtvaartterrein Maastricht Aachen Airport in relatie tot de vigerende natuurwetgeving Bijdrage in de beslissing op bezwaar 2011 (BOB)" d.d. 31 maart 2011 van Bureau Waardenburg. Uit het natuurrapport van Bureau Waardenburg blijkt met betrekking door de vaststelling van het BOB2011 er geen sprake is van:

- negatieve effecten op soorten en habitats (met een instandhoudingsdoel) in Natura 2000-gebieden (Natuurbeschermingswet 1998);
- aantasting van de gunstige staat van instandhouding van beschermde soorten uit de Flora- en faunawet;
- een effect op wezenlijke waarden en kenmerken van de Ecologische Hoofdstructuur (tegenwoordig Natuurnetwerk Nederland).

Op grond van gepubliceerd onderzoek zijn bij vlieghoogtes lager dan 3.000 ft en op afstanden van minder dan 2 km versturende effecten van de grote burgerluchtvaart te verwachten. In gebieden met vlieghoogtes tussen 2.000 en 3.000 ft kunnen op grond van beschikbare kennis milde vormen van verstoring worden verwacht en in gebieden met vlieghoogtes lager dan 2.000 ft ook zwaardere vormen van verstoring. De oorzaak van effecten heeft een visuele en/of een auditieve component. Op grond van de huidige kennis kan hier geen nader onderscheid tussen beide worden gemaakt. (Maastricht Aachen Airport, 2020)

## 6.4.3 Effect op geluid, emissies en veiligheid

### Geluid

Maatregelen om de biodiversiteit te verbeteren hebben geen impact op de geluidbelasting rond een luchthaven.

### Klimaat

Over het algemeen zullen maatregelen om de biodiversiteit te verbeteren neutraal of positief uitpakken voor het klimaat.

### Luchtkwaliteit

Over het algemeen zullen maatregelen om de biodiversiteit te verbeteren neutraal of positief uitpakken voor lokale luchtkwaliteit.

## **Veiligheid**

Maatregelen om de biodiversiteit te verbeteren kunnen een impact hebben op de vliegveiligheid rond een luchthaven wanneer dit zou resulteren in een sterke toename van vogelpopulaties.

### **6.4.4 Betekenis voor MAA**

Indien de omliggende natuur en het concept van biodiversiteit vanuit de luchthaven en/of haar stakeholders van aanzienlijk belang wordt geacht, kan een programma, werkgroep of samenwerking op het gebied van biodiversiteit worden opgezet, zoals het geval is bij de luchthavens beschreven in 6.4.1. Een logische partner hiervoor zou Natuurmonumenten of Staatsbosbeheer kunnen zijn. Er kan ook een koppeling gemaakt worden met educatie, waardoor scholen in de omgeving betrokken kunnen worden. Dit kan ook een manier zijn voor de luchthaven zijn om de toegevoegde waarde aan de omgeving verder te demonstreren.

### **6.4.5 Tijdlijn**

In 2020, 2030 en 2050 zal biodiversiteit een belangrijk onderdeel blijven van de inbedding van een luchthaven in de natuurlijke en stedelijke omgeving.

## 7 Tijdelijk duurzaamheid & innovatie

De tijdlijnen die los zijn beschreven zijn voor alle innovaties, staan beknopt opgesomd in Tabel 5.

Tabel 5: Overzicht tijdlijnen duurzaamheid & innovatie

	2020	2030	2050
<b>Vlootvernieuwing</b>	Vloot wordt periodiek vernieuwd, MAA kan stimuleren	Vloot wordt periodiek vernieuwd, MAA kan stimuleren	Vloot wordt periodiek vernieuwd, MAA kan stimuleren
<b>(Hybride) Elektrisch vliegen</b>	Pipistrel Velis Electro eerste gecertificeerd elektrisch vliegtuig	Gecertificeerde negenzitters in gebruik, operatie verandert. Oplaainfrastructuur nodig.	
<b>Waterstofvliegen</b>	Veel aandacht voor waterstof voor de luchtvaart.	50 zitter regional aircraft, opslag- en tankinfrastructuur nodig.	Vliegtuigen beschikbaar voor <150 passagiers, 2500 km range.
<b>Alternatieve voortstuwingsconcepten</b>	Soms nieuwe concepten, maar focus op waterstof en elektrisch.	Initiatieven niet doorontwikkeld.	Korte afstand: batterijen Middellang: waterstof Lang: SAF Dus geen nieuwe concepten
<b>Duurzame brandstoffen</b>	Weinig SAF beschikbaar.	Eerste fabrieken geopend in NL, grotere percentages bijmengen.	SAF wordt gebruikt voor lange afstanden is overwegend synthetisch.
<b>Urban Air Mobility</b>	Veel visies en plannen, nog geen commerciële operaties.	Eerste commerciële toepassingen	UAM heeft een rol in het stedelijk gebied.
<b>Duurzame MRO</b>	Maintenance Boulevard bezig met innovatie	Meer drone inspecties en additive manufacturing.	MRO volledig circulair en grotendeels autonoom.
<b>Duurzame grondgebonden operaties</b>	Steeds meer innovatie in grondoperaties	Machine learning steeds belangrijker	Volledig autonome grondoperaties
<b>Zuinig vliegen</b>	Belangrijk voor luchtverkeersleiding	Belangrijk voor luchtverkeersleiding	Belangrijk voor luchtverkeersleiding
<b>Circulaire Economie</b>	Circulaire economie komt op, opgenomen in landelijk en provinciaal beleid	Circulaire economie is eenprestatiecriteria voor luchthavens.	Luchthavens zijn 100% circulair.
<b>Multimodaal netwerk</b>	MAA bereikbaar met bus, trein, fiets, auto	In overleg met de regio zijn er meer vervoersmiddelen toegevoegd om MAA te bereiken.	MAA hyperloop knooppunt.
<b>Climate Resilience</b>	Eerste effecten klimaatverandering merkbaar	Climate resilience plan steeds belangrijker voor investeerders en stakeholders.	Team of persoon die zich bezig houdt met klimaatadaptiviteit op MAA.
<b>Biodiversiteit</b>	Biodiversiteit belangrijk voor inbedding luchthaven in de omgeving.	Biodiversiteit belangrijk voor inbedding luchthaven in de omgeving.	Biodiversiteit belangrijk voor inbedding luchthaven in de omgeving.

## 8 CO<sub>2</sub>-neutraal MAA

CO<sub>2</sub>-neutraliteit houdt in dat een bedrijf, evenement of operatie (netto) geen uitstoot van koolstofdioxide veroorzaakt. Door CO<sub>2</sub>-neutraliteit als doel te stellen, kan een luchthaven gericht werken aan het verminderen van emissies en concrete ambities communiceren naar passagiers en stakeholders. Vaak leveren de acties om tot minder uitstoot te komen ook economische voordelen op. Dit hoofdstuk geeft aan waar de luchthaven nu staat (voor zo ver de data aangeleverd is) en welke maatregelen er zijn om naar een CO<sub>2</sub>-neutraal MAA toe te werken aan de hand van de structuur van het Airport Carbon Accreditation (ACA) programma van ACI World. Per scope (zoals gedefinieerd in het ACA-programma) wordt behandeld hoe MAA kan toewerken naar CO<sub>2</sub>-neutraliteit.

Binnen het ACA-programma hebben 56 luchthavens de classificatie “carbon neutral” gekregen, waaronder Bangalore, Gatwick, Budapest, Eindhoven en London City. Voor deze classificatie mag wel CO<sub>2</sub> gecompenseerd worden.

### 8.1 Categoriseren van CO<sub>2</sub>-uitstoot

CO<sub>2</sub>-uitstoot is te groeperen in verschillende categorieën. Het Greenhouse Gas Protocol (GHGP) heeft voor alle bedrijven en operaties drie emissiedomeinen of scopes vastgesteld, welke hieronder voor een luchthaven zijn uitgewerkt. Het GHGP groepeerde de directe emissies in Scope 1, emissies door opwekken van elektriciteit in Scope 2 en andere indirecte emissies in Scope 3. Daarnaast kan ook rekening gehouden worden met zogenaamde “upstream activities” en “downstream activities”. De manieren waarop CO<sub>2</sub> wordt uitgestoten in de operatie van een luchthaven varieert van taxiënde vliegtuigen tot het verwarmen of koelen van het pand en van de auto’s van passagiers tot de zakelijke reizen van luchthavenmedewerkers. De maatregelen om CO<sub>2</sub>-uitstoot te verminderen zijn om deze reden ook divers. De methode van het ACA-programma volgt de categorisering van GHGP en is toegespitst op luchthavens. De scopes staan in deze paragraaf uitgelegd, met voorbeelden van de uitstoot die onder iedere scope valt (Airports Council International, 2019).

#### 8.1.1 Scope 1: Emissies binnen de controle van het luchthavenbedrijf

Onder Scope 1 vallen alle emissies die direct veroorzaakt of beïnvloed worden door het luchthavenbedrijf. Om deze reden zullen Scope 1 emissies relatief eenvoudig aan te pakken zijn voor de luchthaven, omdat de controle over deze processen bij het luchthavenbedrijf ligt. Voorbeelden van Scope 1 emissies zijn:

- Voertuigen bediend door het luchthavenbedrijf (passagiersbussen, eventuele grondoperatie voertuigen, onderhoudsvoertuigen, etc.)
- On-site afvalmanagement
- On-site afvalwatermanagement
- On-site energieopwekking
- Brandweeroefeningen

## 8.1.2 Scope 2: De energievoorziening

Deze scope omvat alle emissies veroorzaakt door externe toelevering van energie. Dit betreft bijvoorbeeld de emissies van kolen verbranden als energie uit een kolencentrale wordt gebruikt en het verstoken van gas wanneer het verwarmen van een gebouw met gas gebeurt. Voorbeelden van energieverbruik op luchthavens zijn:

- Het verwarmen van de luchthavengebouwen
- Het koelen van de luchthavengebouwen (en –apparatuur)
- Verlichting van het gehele luchthavengebied inclusief start- en landingsbanen.

## 8.1.3 Scope 3: Activiteiten gerelateerd aan de luchthaven

Deze scope bevat alle emissies uitgestoten door derden, die wel worden veroorzaakt door de activiteiten op de luchthaven. De luchthaven heeft meestal geen directe invloed op deze emissies. Voorde meeste bronnen van uitstoot is het wel mogelijk voor de luchthaven om invloed uit te oefenen door beleid; met name via het opstellen van regels, het zetten van doelen in samenspraak met stakeholders en het bieden van positieve prikkels.

Voorbeelden van Scope 3 emissies zijn:

- Landen van vliegtuigen vanaf 3000 voet
- Opstijgen van vliegtuigen tot 3000 voet
- Grondbewegingen van vliegtuigen
- APU gebruik van vliegtuigen
- Voertuigen van derden (grondafhandelaren, transportbedrijven etc.)
- Vervoer van passagiers naar de luchthaven
- Externe afvalverwerking
- Externe afvalwaterverwerking
- Zakelijke reizen van het personeel

## 8.2 Reeds geïnventariseerde uitstoot op MAA

In 2018 zijn de Scope 2 emissies van MAA op gebouwniveau (dus exclusief zaken als baanverlichting) kwantitatief in kaart gebracht door Driven by Values (DBV) door middel van een energiescan. In dit project zijn ook zonnepanelen en het gebruiken van regionale restwarmte opgenomen om naar CO<sub>2</sub>-neutraliteit te komen. Hieronder staan de belangrijkste conclusies van dit project samengevat (Kemp & Mertens, 2018) (Mertens & Kemp, 2018).

Aan de hand van een checklist met maatregelen op basis van de Wet Milieubeheer is een energiescan uitgevoerd. De gebouwen waarvan een energiescan heeft plaatsgevonden zijn:

1. Passagiersterminal
2. Hangar 3C
3. Werkplaats infra
4. Brandweer – loods + instructie
5. Havengebouw
6. Vrachtgebouw Noord
7. Paardenhotel (gebouw 0.3)
8. Orapportloods wegverkeer
9. Douane-gebouw (Kantoorgebouw-Noord)

In 2018 was het gecombineerde energieverbruik van deze gebouwen 25 TJ, equivalent aan 1961 ton CO<sub>2</sub>. Er is berekend dat via plaatsing van zonnepanelen en het hergebruiken van regionale restwarmte, 24 TJ uitgespaard kan worden. De overige 1 TJ (en meer) kan bespaard worden via spaarzamer gebruik van gas en energie en implementatie van zuinigere (led)verlichting. Voor het plaatsen van zonnepanelen is de aanname gedaan dat 21000 m<sup>2</sup> aan dakoppervlak beschikbaar is voor zonnepanelen.

De ambitie om in 2025 op gebouwgebied klimaatneutraal te zijn, kwam zodoende voort uit deze analyse.

## 8.3 CO<sub>2</sub>-emissies MAA

De Airport Carbon Emissions Reporting Tool, of ACERT, is een Excel gebaseerde tool om de CO<sub>2</sub>-emissies van een luchthaven te berekenen. De tool vraagt als input verschillende soorten gegevens over de luchthavengebouwen, het energieverbruik, grondvoertuigen, vliegtuigen en de reisgewoontes van passagiers, bezoekers en medewerkers. ACERT deelt deze emissies in de drie emissiescopes zoals beschreven in 8.1.

Wanneer over meerdere jaren een inventarisatie van CO<sub>2</sub>-uitstoot wordt gemaakt, geeft ACERT ook de ontwikkeling van de jaarlijkse emissies over tijd weer. Het compenseren van CO<sub>2</sub> via certificaten of het opwekken van eigen energie kan ook in ACERT worden opgenomen en zo worden doorgevoerd in de uiteindelijke CO<sub>2</sub> voetafdruk. Honderden luchthavens gebruiken ACERT om hun CO<sub>2</sub>-emissies bij te houden, waarvan een deel via deelname aan het ACA-programma.

### 8.3.1 Leemten in informatie

De volgende gegevens zijn nog niet geleverd om in ACERT ingevoerd te worden, terwijl ze wel meegenomen zouden moeten worden in een kloppende berekening:

- Hoeveelheid afval gegenereerd ieder jaar; verbrand ja/nee
- Hoeveelheid en type koelsubstantie gebruikt
- Hoeveelheid tenants (derden op terrein)
- Hoeveelheid leveringen aan tenants
- Gebouwwolume van de gebouwen op MAA
- Oppervlakte wegdek, terminals etc.

In plaats van een schatting te maken, is ervoor gekozen om deze informatie voorlopig op nul te zetten in ACERT om geen misleidende resultaten met valse zekerheid te geven.

### 8.3.2 Berekening en resultaat CO<sub>2</sub>-emissies MAA 2019

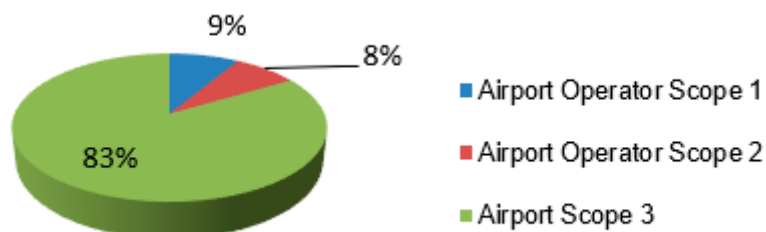
Met De Airport Carbon Emissions Reporting Tool (ACERT) van het ACA-programma is op basis van de beschikbare informatie de CO<sub>2</sub>-voetafdruk van MAA voor 2019 berekend.

***Belangrijke kanttekening: niet alle data was beschikbaar ten tijde van dit onderzoek. De data die niet is meegenomen in de berekening staat opgesomd in 8.3.1.***

De invoergegevens voor ACERT zijn weergegeven in 0. In de scopes 1, 2 en 3 ontbreken invoergegevens voor ACERT, om deze reden is de huidige uitkomst nog niet volledig. Deze uitkomst is wel opgenomen in dit rapport om een beeld te geven van de ordegrrootte (al is de absolute uitstoot nog niet juist) en de gegevens die uit ACERT gegenereerd worden.

Op basis van deze berekening, **waarin dus nog essentiële onderdelen zijn weggelaten**, is de totale CO<sub>2</sub>-voetafdruk van MAA gelijk aan 15103 ton CO<sub>2</sub>. Deze is als volgt opgebouwd:

Scope	Absolute hoeveelheid CO <sub>2</sub> (t CO <sub>2</sub> e)	Percentage
1	1714	9%
2	1560	8%
3:	16667	83%



Figuur 14: Verdeling voorlopige uitstoot MAA over de scopes, afkomstig uit ACERT

De grootste CO<sub>2</sub>-uitstoot is terug te vinden in de Scope-3 emissies. Dat is in lijn der verwachting, omdat het hier gaat om onder andere emissies van vliegtuigbewegingen op de grond (goed voor 70% van de totale CO<sub>2</sub>-emissies) en alle voertuigbewegingen van derden. Ook wanneer de ontbrekende data zal worden ingevuld, zal deze verdeling ongeveer zo blijven; kijkend naar het gemiddelde van alle luchthavens die meedoen aan het ACA-programma, zullen de emissies door activiteit van vliegtuigen rond de 90% blijven (Airport Carbon Accreditation, 2019). Om die reden zit in Scope-3 de grootste potentie om de CO<sub>2</sub>-uitstoot van de luchthaven te verlagen. De manier waarop de CO<sub>2</sub>-uitstoot kan worden verminderd, wordt in de volgende paragraaf behandeld.



## 8.4 Route naar CO<sub>2</sub>-neutraliteit

De route naar CO<sub>2</sub>-neutraliteit wordt in deze paragraaf beschreven. De stappen die hiervoor gezet kunnen worden hebben veelal te maken met duurzame en innovatieve oplossingen. In de hoofdstukken 4, 5 en 6 zijn al een aantal ontwikkelingen besproken. Per Scope wordt een aanbeveling gedaan hoe tot CO<sub>2</sub>-neutraliteit kan worden bereikt. Allereerst wordt Scope 3 behandeld, omdat deze scope bijna 90% van de luchthavenbrede emissies bevat.

### 8.4.1 Scope 3

Aangezien het grootste deel van deze emissies komt door opstijgende, landende en taxiënde vliegtuigen tot een hoogte van 3000 voet, is dit een scope die de luchthaven wel kan beïnvloeden, maar niet direct kan sturen. Hiervoor is overleg met luchtvaartmaatschappijen, grondafhandelaren en luchtverkeersleiding nodig.

Scope 3 emissies kunnen het meest significant worden verlaagd door de volgende in dit rapport besproken maatregelen:

- Vlootvernieuwing: CO<sub>2</sub>-reductie van <10% op de korte termijn, <30% op de lange termijn (Roland Berger, 2020)
- Elektrisch vliegen: potentie voor 100% reductie van vliegtuigerelateerde emissies
- Vliegen op waterstof: potentie voor 100% reductie van vliegtuigerelateerde emissies
- Duurzame brandstoffen voor de luchtvaart: geschat op 60-85% emissiereductie (SkyNRG, 2020)
- Elektrisch taxiën: Tot 10% reductie op totale vliegtuigerelateerde emissies (4% volgens Safran (2020))

De emissiereductie die gewonnen wordt met deze maatregelen hangt volledig af van de mate van toepassing. Het is in ieder geval een feit dat zo lang er nog op kerosine gevlogen wordt, deze emissies niet tot nul worden gereduceerd. De enige manier om dan naar CO<sub>2</sub>-neutraliteit te komen is door compensatie, bijvoorbeeld het kopen van certificaten voor CO<sub>2</sub>-reductie.

Voor het gedeelte van Scope 3 emissies die niet door vliegtuigen veroorzaakt worden, zijn de volgende maatregelen van belang:

- Het stimuleren dat passagiers met het openbaar vervoer of de fiets komen: <5% op totale scope 3
- Het maken van een intern beleid voor duurzamer reizen: <5% op totale scope 3
- Derden gevestigd op de luchthaven belonen voor duurzame keuzes, zoals groene energie: <5% op totale scope 3

### 8.4.2 Scope 1&2

Voor Scope 1&2 kunnen de volgende maatregelen de emissies verlagen:

- Eigen grondvoertuigen verduurzamen. Bijvoorbeeld voertuigen op waterstof of batterijen
- Met zonnepanelen genoeg energie opwekken om in de volledige vraag naar elektriciteit te voldoen
- Restwarmte gebruiken uit de regio
- Gebouwverduurzaming doorvoeren zoals aangegeven in het rapport van Driven by Values (2018).
- Afvalverwerking in overleg met afvalverwerker optimaliseren voor lagere emissies.

Omdat niet alle gegevens compleet waren voor Scope 1&2 is daar nog geen range van reductiepotentieel aangegeven.

Het is goed mogelijk voor MAA om met deze maatregelen binnen afzienbare tijd (2025 of 2030 afhankelijk van ambitieniveau en budget) CO<sub>2</sub> neutraal te worden voor Scope 1 & 2. Dit is ook het eerste niveau voor CO<sub>2</sub> neutraliteit in het ACA-programma. Zeker wanneer er meer elektriciteit wordt opgewekt via zonnepanelen dan er verbruikt wordt, is er wellicht helemaal geen CO<sub>2</sub>-compensatie nodig voor MAA om in deze scopes CO<sub>2</sub> neutraal te zijn. Een eerste stap is dan het inventariseren van de potentie voor hernieuwbare energie opwekken, waarschijnlijk via zonnepanelen. Er is al een plan om zonnepanelen aan te leggen, dus dat is een goede uitgangspositie. Een volgende stap zou zijn om een plan te maken om grondvoertuigen te vervangen door modellen zonder CO<sub>2</sub>-uitstoot. Immers is het voor de lokale luchtkwaliteit beter om zo min mogelijk emissies te produceren op en rondom het luchthaventerrein.

## 8.5 Non-CO<sub>2</sub> emissies

De vorige paragrafen richten zich op de CO<sub>2</sub>-emissies van de luchthaven. Echter zijn dit niet de enige emissies die effect hebben op het klimaat en de lokale luchtkwaliteit. Deze paragraaf beschrijft beknopt het belang van andere emissies dan CO<sub>2</sub>, zodat ook deze mee worden genomen in overwegingen rondom de milieueffecten van de luchthaven.

Recent onderzoek wees uit dat tweederde van de impact van luchtvaart op de opwarming van de aarde toe te schrijven is aan non-CO<sub>2</sub> emissies (Lee, et al., 2020). Deze bestaan uit:

- NO<sub>x</sub>
- Waterdamp
- Aerosolen
- Condensstreepvorming

De non-CO<sub>2</sub> emissies van luchtvaart zijn moeilijker te kwantificeren en te reguleren door hun non-lineaire eigenschappen. De hoeveelheid uitgestoten CO<sub>2</sub> is direct door te vertalen naar een hoeveelheid stralingsforcering en dus opwarming. De impact van non-CO<sub>2</sub> emissies is sterk afhankelijk van atmosferische variabelen en de tijd van de dag. Deze uitstootgassen hebben zowel een opwarmend als een afkoelend effect, afhankelijk van verschillende atmosferische variabelen. Tevens is de levensduur van deze gassen verschillend en daarmee ook de duur van hun impact op het klimaat.

### NO<sub>x</sub>

NO<sub>x</sub> is een gas-groep dat bestaat uit NO en NO<sub>2</sub> moleculen. Deze moleculen worden gevormd uit O en N deeltjes uit de lucht onder invloed van de hoge temperaturen en drukken bij de verbranding van kerosine in de vliegtuigmotoren. De hoeveelheid uitgestoten NO<sub>x</sub> is voornamelijk afhankelijk van de vliegtuigmotor condities (hoger bij hoge stuwkracht). De reactieproducten van de oxidatie van non-methane hydrocarbons (NMHC's) in de lucht dichtbij de grond en koolstofmonoxide (CO) en methaan (CH<sub>4</sub>) hoger in de troposfeer reageren met NO<sub>x</sub> moleculen waarna er onder bepaalde golflengtes van het inkomende zonlicht ozon wordt geproduceerd. Door de toevoeging van NO<sub>x</sub> moleculen door luchtvaart, neemt de productie van ozon toe, hierdoor warmt de aarde op. De mate hiervan is afhankelijk van achtergrondconcentraties van de reactanten en het spectrum aan golflengtes inkomend zonlicht.

Op de lange termijn zorgt NO<sub>x</sub> ook voor de afbraak van CH<sub>4</sub>, wat resulteert in afkoeling. Echter heeft onderzoek uitgewezen dat NO<sub>x</sub> nog altijd een netto opwarmend effect heeft.

De levensduur van NO<sub>x</sub> is enkele dagen tot weken, waardoor de moleculen over grote afstanden getransporteerd kunnen worden. Hierdoor is de locatie van uitstoot niet per definitie de locatie waar de impact van NO<sub>x</sub> merkbaar is. Door weer en wind worden de uitgestoten hoeveelheden NO<sub>x</sub> dus vervoerd naar gebieden met verschillende atmosferische omstandigheden en achtergrondconcentraties en is de impact op ozonvorming en methaan afbraak zeer verschillend.

### Waterdamp

Waterdamp is een zogeheten versterkend broeikasgas. Wanneer er plaatselijk sprake is van afkoeling, versterkt de uitgestoten waterdamp deze afkoeling. Wanneer er echter plaatselijk sprake is van opwarming, wat vaker voorkomt, wordt opwarming versterkt door de uitgestoten waterdamp. De levensduur van waterdamp is enkele uren tot dagen, wat betekent dat waterdamp een vrij direct effect heeft.

### **Aerosolen**

Roet (black carbon, BC) en sulfaat-aerosolen hebben een versterkend effect op de reflectiviteit van korte golven straling van wolken. De levensduur van aerosolen bedraagt enkele dagen, waardoor de aerosolen redelijk wat vervoerd kunnen worden naar andere gebieden. Hun klimaateffect is hierom niet direct effectief op de locatie van uitstoot. Er is nog veel onduidelijkheid of het een netto opwarmend of afkoelend effect heeft.

### **Condensstrepen**

Waterdamp en aerosolen zorgen ook voor de vorming van condensstrepen. Onder specifieke vochtigheidsgraden en temperaturen van de gemengde uitgestoten lucht met de omgevingslucht kunnen condensstrepen ontstaan die uren tot dagen stabiel kunnen blijven. De aerosolen vergroten de kans op condensstreepvorming doordat zij bronnen vormen voor de kristallisatie bij wolkvorming.

Condensstrepen reflecteren inkomende korte golven zonnestraling en absorberen uitgaande lange golven straling. Overdag is het effect van de reflectie van inkomende korte golven zonnestraling dominant, wat resulteert in afkoeling. 's Nachts is het effect van de absorptie van lange golven straling dominant door de afwezigheid van zonnestraling, wat resulteert in opwarming. Netto hebben condensstrepen een opwarmend effect.

### **Betrekking op MAA**

Doordat de impact van de uitstoot van non-CO<sub>2</sub> emissies afhankelijk is van plaats en tijd, is het van belang dat MAA op grotere schaal kijkt naar de mitigatie van de non-CO<sub>2</sub> effecten.

Het is belangrijk om de verschillende levensduren en de verschillende lange- en korte termijneffecten van de non-CO<sub>2</sub> emissies in achtung te nemen bij het mitigeren van deze effecten, omdat deze een groot effect hebben op het afkoelende of opwarmende karakter.

Doordat MAA geen nachtelijke vluchten heeft, is het specifieke nachtelijke klimaateffect dat voor opwarming zorgt miniem door MAA. Er kan nog veel gewonnen worden door de andere uitstootgassen te verminderen. Om dit gericht en effectief te doen dienen de effecten van de verschillende non-CO<sub>2</sub> emissies beter in kaart gebracht te worden.

## 9 Conclusies

Dit onderzoek heeft de mogelijkheden van duurzaam vliegen op Maastricht Aachen Airport verkend. Daarnaast geeft dit onderzoek inzicht in de stappen die zijn benodigd om de luchthaven CO<sub>2</sub>-neutraal te maken.

Het eerste deel van het onderzoek focuste zich op de mogelijkheden van elektrisch en duurzaam vliegen die van toepassing zijn voor MAA. Er is daarbij een onderscheid gemaakt in technologie, operaties en de luchthaven zelf. Als eerste is een inventarisatie gedaan. Vervolgens is de betekenis voor MAA onderzocht. Deel twee van het rapport concentreerde zich op een CO<sub>2</sub>-neutrale luchthaven. Hiertoe is met behulp van de ACERT-tool een mapping gedaan van de CO<sub>2</sub>-emissies. De conclusies van beide onderzoeken worden hieronder beschreven.

### Duurzame technologie

De duurzame technologieën die zijn behandeld in dit rapport zijn:

- Vlootvernieuwing
- Retrofitting
- Elektrisch vliegen
- Vliegen op waterstof
- Duurzame brandstoffen voor de luchtvaart
- Alternatieve concepten voor voortstuwing
- Urban Air Mobility
- MRO-innovaties

Aangezien de luchthaven zelf geen vliegtuigen of MRO-faciliteiten bezit, is de invloed die de luchthaven kan bieden per definitie indirect. De twee meest effectieve manieren waarop MAA de inzet van nieuwe vliegtuigtechnologie kan stimuleren, zijn via tariefdifferentiatie en via het ontwikkelen van benodigde faciliteiten. Met het tweede wordt bedoeld op het aanleggen van oplaadpunten voor batterijen en tankinfrastructuur voor waterstof. Verder kan MAA bijdragen aan de ontwikkeling van nieuwe vliegtuigtechnologie door deel te nemen aan pilots en onderzoeksprojecten. Uiteindelijk zullen elektrisch vliegen en vliegen op waterstof zorgen voor de grootste reductie in operationele emissies, dus daar zou MAA met partners uit de regio een roadmap of ontwikkelplan voor op kunnen zetten.

### Duurzame operaties

Voor een duurzame operatie zijn de volgende opties besproken:

- Grondgebonden voertuigen op alternatieve brandstof
- E-taxi
- Autonome bagage- en vrachtafhandeling
- Beteugelen APU- en GPU gebruik
- Zuinig vliegen

Voor het verminderen van de CO<sub>2</sub>-voetafdruk van de luchthaven en de lokale luchtkwaliteit, is het aan te raden voor de luchthaven om een plan op te stellen om alle eigen grondvoertuigen, zoals passagiersbussen en voertuigen voor transport, in de komende jaren te vervangen door elektrische- of waterstofvoertuigen. Elektrisch taxiën biedt ook een mogelijkheid om de CO<sub>2</sub>-voetafdruk van de luchthaven te verkleinen en luchtkwaliteit te verbeteren. Een TaxiBot zou nu al ingezet kunnen worden op MAA voor vertrekkende vluchten (taxi out). Indien een extra weg zou worden aangelegd, zou het operationeel ook mogelijk zijn om een TaxiBot in te zetten bij de landing (taxi-in).

Autonome bagageafhandeling is mogelijk een interessant onderwerp voor MAA om aan pilots deel te nemen. Voor APU- en GPU gebruik kunnen regels en handhaving aangescherpt worden. Zuinig vliegen is een kwestie om op te pakken met de LVNL.

## Duurzame luchthaven

De onderwerpen die behandeld zijn in het kader van een duurzame luchthaven zijn:

- Circulaire economie
- Duurzaam multimodaal netwerk
- Klimaatbestendigheid
- Biodiversiteit

Dit zijn grotendeels onderwerpen waar de luchthaven zelf een beleid voor kan maken, en niet afhankelijk is van stakeholder voor implementatie (al is afstemming met stakeholders natuurlijk altijd wenselijk). In het kader van de activiteiten op het gebied van circulaire economie in de regio en de provincie Limburg, is het aan te raden dat de luchthaven een plan of roadmap maakt om naar een circulaire operatie en infrastructuur toe te werken. Dit kan in parallel met het aansluiten bij initiatieven zoals Limburg Circulair. Voor klimaatbestendigheid en biodiversiteit is het ook aan te raden om doelen te stellen en te rapporteren.

Het toewerken naar een duurzaam multimodaal netwerk is een onderwerp waarvoor de luchthaven wel afhankelijk is van stakeholders, met name op het gebied van lange termijn mobiliteitsplannen voor de regio.

## CO<sub>2</sub>-neutraal MAA

De CO<sub>2</sub>-uitstoot van MAA is door ontbrekende gegevens nog niet definitief berekend op dit moment. Voor emissiescope 1 en 2, waar de luchthaven direct invloed op heeft, is het voor MAA realistisch om (afhankelijk van ambitie en budget) in 2025 of 2030 CO<sub>2</sub>-neutraal te worden. De Scope 3 emissies, die niet direct door het luchthavenbedrijf worden uitgestoten, bestaan grotendeels uit emissies van vliegtuigen. Om in deze scope werkelijk CO<sub>2</sub>-neutraliteit te bereiken zouden waterstof- of batterij voortgestuwde vliegtuigen de enige optie zijn. Om naar netto CO<sub>2</sub>-neutraliteit toe te werken, kan ook de CO<sub>2</sub>-uitstoot gecompenseerd worden. Daarnaast zou een groot zonnepark kunnen bijdragen in het bereiken van CO<sub>2</sub>-neutraliteit.

## Aanbevelingen

Allereerst is het aan te bevelen dat MAA op basis van de informatie in dit rapport en eventueel vervolgwerk besluit op welke innovaties ingezet gaat worden, en welke maatregelen gestimuleerd worden waar nodig maar niet concreet in geïnvesteerd worden. De volgende stap is om op het gebied van duurzaamheid doelen te zetten, en hier ook over te communiceren op de website en op de luchthaven. Deze doelen kunnen gezet worden in overleg met stakeholders. Dit proces is al in gang gezet. Zie ook het extra hoofdstuk 10.

Op het gebied van CO<sub>2</sub>-neutraliteit, zou lidmaatschap van het ACA-programma een mooie kans kunnen zijn voor MAA om consequent emissies bij te houden en conform de ACA-levels doelen te zetten.

## 10 Innovatieve en duurzame luchtvaart op MAA – de vervolgstappen

In de luchtvaartindustrie zullen nieuwe technologieën en -vliegsystemen de luchtvaart in de komende decennia drastisch veranderen. Om de aansluiting met de luchtvaartindustrie te behouden, zal Maastricht Aachen Airport (MAA) hierin een actieve rol moeten gaan spelen. Als onderdeel van het proces van de vertaling luchtvaartnota wordt in dit hoofdstuk stilgestaan bij innovatieve en duurzame ontwikkelingen relevant voor MAA. Deze ontwikkelingen kunnen tevens gezien worden als potentiële kansen voor MAA.

De in dit rapport beschreven opties voor innovatie en verduurzaming van de luchtvaart bij de luchthaven MAA zijn in een werkgroep besproken met een aantal partijen, waaronder een aantal van de op de luchthaven aanwezige Maintenance, Repair en Overhaul (MRO) bedrijven, vertegenwoordigers van kennisinstellingen (waaronder de RWTH en het NLR), branche organisatie luchtvaart techniek bedrijf (de NAG) en vertegenwoordigers van bewoners en milieuorganisatie (Alliantie Tegen uitbreiding MAA en Milieu Federatie).

### Ambitie

Aan het einde van voornoemde werkgroep werd de volgende gezamenlijke conclusie/ambitie geformuleerd: *“Het is verstandig en wenselijk om in te zetten op MAA als centrum van de luchtvaart voor morgen. Om dat te bewerkstelligen gaan we op zoek naar innovatieve kansen en oplossingen die in de context en sterkte van MAA komen te liggen. We gaan niet actief inzetten op datgene waar men elders al mee bezig is.”*

Startpunt van een dergelijk proces begint bij het maken van de impliciete keuze qua rolopvatting per onderwerp. Voor sommige onderwerpen kan men actief een voortrekkersrol nastreven, waarbij men op andere thema's juist bewust kan kiezen voor een reactieve aanpak. Voor MAA is het zaak om zich te onderscheiden van andere luchthavens en niet na te streven wat elders al wordt opgepakt, maar om in te zetten op niches, kansen en onderwerpen waar MAA uniek in is. We willen graag een vernieuwingsslag maken en in de Euregio een stap zetten naar verduurzaming. Daarnaast zouden de reeds aanwezige kwaliteiten van de luchthaven verder uitgebouwd moeten worden.

### Innovatieagenda

Er is een aantal thema's en onderwerpen genoemd als mogelijke kandidaat voor een – nog op te stellen – innovatieagenda. De onderwerpen in willekeurige volgorde zijn als volgt:

- Klimaatneutrale grondactiviteiten in 2030
- Alternatieve brandstoffen (waterstof/synthetische brandstoffen)
  - Productie
  - Opslag
  - Infrastructuur
- Strategisch partnership Flugplatz Aachen – Merzbrück (RWTH) – MAA: elektrisch vliegen
- Smart Logistics: MAA als proeftuin voor autonome vrachtafhandeling
- Onderwijsprogramma/doorlopende leerlijnen (ACC/MBO/HBO/TU): onderwijs integratie

De deelnemende partijen adviseren om in te zetten op de luchtvaart van morgen en te zoeken naar innovatieve kansen en oplossingen. Voor de uiteindelijke aansturing en realisatie van de thema's en speerpunten, is een samenhangende programmatische aanpak nodig (vanwege de complexiteit van verschillende thema's, vele stakeholders, en significante impact op de regio).

### *Programmatische aanpak*

Het gebruik van een programmatische aanpak zal helpen bij het effectief nastreven van de te bereiken doelen binnen de innovatieagenda. Een goed plan van aanpak, opgesteld met input van alle belanghebbenden, het aanstellen van een programmamanager, welke veel aandacht heeft voor het opbouwen van een netwerk en het integreren van de innovatie in de exploitatie van de luchthaven zijn hierbij van belang. Deze bouwstenen dienen als fundament voor de vernieuwingsslag die we in en mét de Euregio(-partners) willen gaan inzetten: een effectieve samenwerking tussen onderwijs, bedrijfsleven, het openbaar bestuur en (Eu)regionale en internationale partners.



# 11 Referenties

- (Dichter, Henderson, Riedel, & Riefer. (2020). How airlines can chart a path to zero carbon flying. *McKinsey & Company*.
- ACI World. (2018). Airports' resilience and adaptation to a changing climate.
- AHEV - Nationaal Actieprogramma Hybride Elektrisch Vliegen. (2020). *Ontwerp Actieprogramma Hybride Elektrisch Vliegen (AHEV)*. Den Haag: AHEV.
- Airbus. (2020). *Zero-e Hydrogen Concepts*. Retrieved from <https://www.airbus.com/innovation/zero-emission/hydrogen/zeroe.html>
- Airport Carbon Accreditation. (2019). *ACA Annual Report 2018-2019*. Montreal: ACI World.
- Airport Technology. (2017). *Sustainable success: Oslo Airport opens 'world's greenest' terminal*. Retrieved from <https://www.airport-technology.com/features/featuresustainable-success-oslo-airport-opens-worlds-greenest-terminal-5885304/>
- Airports Council International. (2019). *ACA Annual report 2018-2019*. Montréal.
- Alam, S., Nguyen, M., Abass, H., Lokan, C., Ellejmi, M., & Kirby, S. (2010). A Dynamic Continuous Descent Approach Methodology for Low Noise and Emission. *Digital Avionics Systems Conference (DASC)*. IEEE/AIAA.
- Allan, J. R. (2000, August). The costs of bird strikes and bird strike prevention. *Natural Resources Management and Policy Commons*, pp. 147-153.
- Ang, A. W., Gangoli Rao, A., Kanakis, T., & Lammen, W. (2019). Performance analysis of an electrically assisted propulsion system for a short range civil aircraft. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 1490-1502.
- ATAG. (2009). Beginner's Guide to Aviation Biofuels. *Air Transport Action Group*.
- ATAG. (2009). Beginner's guide to aviation biofuels.
- ATAG. (n.d.). *Case Studies - A320 Neo*. Retrieved 07 28, 2020, from Aviation Benefits Beyond Borders: <https://aviationbenefits.org/case-studies/a320neo/>
- Aviation Clean Air. (2020). Retrieved from Q&A: <https://www.aviationcleanair.com/qa.html>
- Aviation, S. (2018). *Aircraft on the Ground CO2 Reduction Programme*.
- Avinor. (2019). *Electric Aviation*. Retrieved 2020, from <https://avinor.no/en/corporate/klima/electric-aviation/electric-aviation>
- Bal, D., Beije, H. M., van Dobben, J. H., & van Hinsberg, A. (2007). *Overzicht van kritische stikstofdeposities voor natuurdoeltypen*. Ede: Ministerie van LNV, Directie Kennis.
- Baumann, S., & Katja, H. (2016). *Akustische Evaluierung elektromobiler Schlepptechnologien für Flugzeuge - Der Beitrag von TaxiBot und eSchlepper zur Reduktion von Bodemlarm am Flughafen Frankfurt*.
- Bentsen, N. S., & Felby, C. (2012). Biomass for energy in the European Union - a review of bioenergy resource assessments. *Biotechnology for Biofuels*.
- Bergenson, A. (2020). *Shanghai airports to receive service from hydrogen powered shuttle buses*. Retrieved from Hydrogen Fuel News: <https://www.hydrogenfuelnews.com/shanghai-airports-to-receive-service-from-hydrogen-powered-shuttle-buses/8539812/>
- Bergmans, D., Van Engelen, J., & Hogenhuis, R. (2010). *COSMA deliverable report 1.3 & 1.4 part 1*. Amsterdam: NLR.
- Biondi, K. M., Belant, J. L., Martin, J. A., DeVault, T. L., & Wang, G. (2011, September 22). White-tailed deer incidents with U.S. civil aircraft. *Wildlife Society Bulletin*.
- Bos, B. v. (2010). *Grondgebonden geluidsreductie (bij een F-16) door middel van waterinjectie*. NLR.
- Bosschaart, C. E. (2012). LF airport ground noise mitigation using scattering sections. *9th European Conference on Noise Control, EURONOISE 2012, 10-13 June 2012, Prague, Czech Republic*. Den Haag: TNO.

- Brisbane Airport. (2019). *Annual Sustainability Report year 2018*. Retrieved from <https://www.bne.com.au/sites/default/files/docs/2018-Sustainability-Report.pdf>
- Burbridge, R. (2017). Adapting Airports to a Changing Climate. Eurocontrol presentation.
- CBS. (2020). *Energy Balance SHeet 2019*. Statline.
- CBS. (2020, 08 21). *Statline*. Retrieved from Luchtvaart; maandcijfers Nederlandse luchthavens van nationaal belang: <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/37478hvv/table?fromstatweb>
- Chesser, R. K., Caldwell, R. S., & Harvey, M. J. (1975). Effects of noise on feral populations of *Mus musculus*. *Physiological Zoology*, pp. 323-325.
- Choi. (2011). Amine-tethered solid adsorbents coupling high adsorption capacity and regenerability for CO<sub>2</sub> capture from ambient air. *Chemistry. Sustainability. Energy. Materials*.
- Christensen, A. (2020, June 4). Assessment of Hydrogen Production Costs from Electrolysis: United States and Europe. ICCT.
- Civil Aviation Authority. (2010). *ERCD REPORT 1007 Noise Measurements of Reverse Thrust at Heathrow and Stansted Airports*. Civil Aviation Authority.
- Climate Proof Cities Consortium. (2014). *Climate Proof Cities Eindrapport*. Climate Proof Cities Consortium. Retrieved from WUR.
- Climeworks. (2018). *Capturing CO<sub>2</sub> from Air*. Retrieved from <http://www.climeworks.com/co2-removal/>
- Dedeic, A., & Derej, J. (2018). *E-taxi brandstofverbruik en CO<sub>2</sub>-uitstoot – een quick scan*. NLR.
- den Ouden, B., Kerkhoven, J., Warnaars, J., Terwel, R., Coenen, M., Verboon, T., . . . Koot, A. (2020). *Klimaatneutrale energiescenario's 2050 - Scenariostudie ten behoeve van de integrale infrastructuurverkenning 2030-2050*. Berenschot & Kalavasta.
- den Ouden, B., Lintmeijer, N., Bianchi, R., & Warnaars, J. (2018). *Richting 2050: systeemkeuzes en afhankelijkheden in de energietransitie*. Berenschot.
- Derej, J., & Meerstadt, C. J. (2019). *Elektrisch vliegen op korte afstand*. NLR.
- Dichter, A., Henderson, K., Riedel, R., & Riefer, D. (2020). *How Airlines can Chart a Path to Zero Carbon Flying*. Retrieved from McKinsey & Company: <https://www.mckinsey.com/industries/travel-logistics-and-transport-infrastructure/our-insights/how-airlines-can-chart-a-path-to-zero-carbon-flying?cid=other-eml-alt-mip-mck&hlkid=ee0f780eab5449919f9850d77af88c7f&hctky=11757718&hdpid=6f7522a2-4e18-42db-95f>
- Donecle. (2020). *Home page*. Retrieved 2020, from <https://www.donecle.com/>
- Dusseldorp, A. (2015). *Aanbevelingen voor de samenstelling en duiding*. Bilthoven: RIVM.
- EBN & Gasunie. (2017). *CO<sub>2</sub> transport en Opslag in Nederland*. in opdracht van EZK.
- EC. (2019, January 11). *Energy*. Retrieved from Renewable energy directive: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive/overview>
- EC. (2019, January 11). *Energy - biofuels*. Retrieved from Sustainability criteria: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/renewable-energy/biofuels/sustainability-criteria>
- EC. (2020, June 02). *Renewable Energy – Recast to 2030 (RED II)*. Retrieved from JEC: <https://ec.europa.eu/jrc/en/jec/renewable-energy-recast-2030-red-ii>
- Ellen Macarthur Foundation. (2013). *Towards the Circular Economy: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition. Report 1, Ellen Macarthur Foundation*.
- Eurocontrol. (2005). *Aircraft Particulate Matter Emission Estimation through all Phases of Flight - EEC/SEE/2005/0014*. Eurocontrol.
- Eurocontrol. (2020). *Taxi times winter 2019-2020*. Retrieved from [www.eurocontrol.int/publication/taxi-times-winter-2019-2020](http://www.eurocontrol.int/publication/taxi-times-winter-2019-2020)
- European Commission. (2014). *Report on Critical Raw Materials for the EU: Report of the ad hoc Working Group on*. Brussels: European Commission.

- European Commission. (2019). *Renewable Energy - Recast to 2030 (RED II)*. Retrieved from EU-EC: <https://ec.europa.eu/jrc/en/jec/renewable-energy-recast-2030-red-ii>
- European Commission. (2019). *Renewable Energy: Recast to 2030 (REDII)*.
- European Commission. (2020, July 8). *A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe*.
- European Commission. (2020). *Green Deal: Sustainable Mobility*. Retrieved from <https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal>
- Fasihi, M., Efimova, O., & Breyer, C. (2019). Techno-economic assessment of CO<sub>2</sub>direct air capture plants. *Journal of Cleaner Production*, 957-980.
- Figueroa, J. D. (2008). Advances in CO<sub>2</sub> capture technology – the US Department of Energy’s Carbon sequestration program. *Int. J. Greenhouse Gas Control* 2, 9–20.
- Fleuti, E., & Hofmann, P. (2005). *Aircraft APU Emissions at Zurich Airport*. Zurich: Unique.
- Future Mobility Movement. (2019). *Op Rotterdam The Hague Airport rijdt bagage zelf*. Retrieved from <https://futuremobilitymovement.nl/2019/08/22/zelfrijdende-bagage/>
- Gatwick Airport. (2020). *Sustainability Report*. Retrieved 2020, from <https://www.gatwickairport.com/business-community/community-sustainability/sustainability/sustainability-reports/>
- Gezondheidsraad. (2004). *Over de invloed van geluid op de slaap en de gezondheid - 2004/14*. Den Haag: Gezondheidsraad.
- Gezondheidsraad. (2018). *Gezondheidswinst door schonere lucht Nr. 2018/01*. Gezondheidsraad.
- Gil, D., Honarmand, M., Pascual, J., Perez-Mena, E., & Macias Garcia, C. (2015, March-April). Birds living near airports advance their dawn chorus and reduce overlap with aircraft noise. *Behavioral Ecology*, pp. 435-443.
- Hepperle, M. (2012). *Electric Flight – Potential and Limitations*. German Aerospace Center, Institute of Aerodynamics and Flow Technology.
- Holladay, J., Hu, J., King, D., & Wang, Y. (2009). An overview of hydrogen production technologies.
- Hong Kong International Airport. (2020). *Biodiversity*. Retrieved 2020, from <https://www.hongkongairport.com/en/sustainability/environment/biodiversity.page>
- Hydrogen Council. (2020, January). *Path to hydrogen competitiveness - A cost perspective*.
- Hydrogen Europe. (2020, May). *Green Hydrogen Investment and Support Report - Hydrogen Europe’s input for a post COVID-19 recovery plan*.
- IADB. (2019). *A Framework and Principles for Climate Resilience Metrics in Financing Operations*.
- IATA. (2008). *IATA 2008 Report on Alternative Fuels*.
- IATA. (2008). *Report on alternative fuels*.
- IATA. (2020). *Sustainable Aviation Fuels Factsheet*.
- ICAO. (2009). *Continuous Climb Operations (CCO) Manual*. Montreal: International Civil Aviation Organisation.
- ICAO. (2010). *Continuous Descent Operations (CDO) Manual*. Montreal: International Civil Aviation Organisation.
- ICAO. (2011). *Airport Air Quality Manual Doc 9889*. Quebec, Canada: ICAO.
- ICAO. (2019). *2019 Environmental Report: Destination Green, the Next Chapter*.
- ICCT. (2017, January). *The European Commission's renewable energy proposal for 2030*. ICCT.
- ICCT. (2017). *Transatlantic Airline Fuel Efficiency Ranking, 2017*. Washington: International Council on Clean Transportation.
- International Air Transport Association. (Accessed July 2020). *Sustainable Aviation Fuels: Factsheet*. Retrieved from <https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/saf-what-is-saf.pdf>
- International Airport Review. (2020). *Gatwick's Biodiversity Impact*. Retrieved 2020, from <https://www.internationalairportreview.com/news/24845/gatwick-biodiversity-impact/>
- International Airport Review. (2020). *Incheon Airport to operate fuel cell electric buses at Terminal 2*. Retrieved from <https://www.internationalairportreview.com/news/117316/fuel-cell-bus-operations-incheon-airport/>

- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- IRENA. (2019). Hydrogen: A renewable energy perspective.
- Janssen et al. (2011). : Black carbon as an additional indicator of the adverse effects of airborne particles compared with PM10 and PM2.5. *Environ Health Perspect. Environ Health Perspect*.
- Kaveh Rajab Khalilpo. (2019). Chapter 5 - Interconnected Electricity and Natural Gas Supply Chains: The Roles of Power to Gas and Gas to Power. Academic Press.
- Kemp, L., & Mertens, P. (2018). *Energiescan gebouwen Maastricht Aachen Airport*. Sittard: Driven by Values.
- Kenniscentrum InfoMil. (n.d.). *Lokaal geurbeleid (provincie)*. Retrieved July 27, 2020, from Kenniscentrum InfoMil: <https://www.infomil.nl/onderwerpen/lucht-water/lucht/geur/lokaal-geurbeleid/>
- Khawaja, C., & Janssen, R. (2014). Sustainable supply of non-food biomass for a resource efficient bioeconomy - A review paper on the state-of-the-art. WIP - Renewable Energies.
- Kintisch. (2014). *MIT Technology Review: Can Sucking CO2 Out of the Atmosphere Really Work?* Retrieved from <https://www.technologyreview.com/s/531346/can-sucking-co2-out-of-the-atmosphere-really-work/>,
- Kuijers, T., Hocks, B., Witte, J., Becchi, F., Wijnakker, R., Frijters, E., . . . de Vries, S. (2018). *Klimaat Energie Ruimte: Ruimtelijke verkenning energie en klimaat*. Klimaataakkoord / Government of the Netherlands.
- Lam, M. K. (2012). Current status and challenges on microalgae-based carbon capture. *Greenhouse Gas Control* 10, 456–469.
- Lee, D. (2009). Aviation and global climate change in the 21st century. *Atmospheric Environment*.
- Lee, D. S., Fahey, D. W., Skowron, A., Allen, M. R., Burkhardt, U., Chen, Q., . . . Wilcox, L. J. (2020). The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric Environment*.
- Leefomgeving, P. v. (2010). *Nieuwe inzichten stikstofdepositie: Minder depositie van stikstof dan eerder gedacht*. Retrieved from Planbureau voor de Leefomgeving: <https://themasites.pbl.nl/balansvandeleeftomgeving/jaargang-2010/klimaat-lucht-en-energie/lucht/nieuwe-inzichten-stikstofdepositie>
- Leguijt, C., van der Veen, R., van Grinsven, A., van Nieuwenhuijzen, I., Broeren, M., Kampman, B., . . . Pronk, I. (2020). *Bio-Scope. Toepassingen en beschikbaarheid van duurzame biomassa*. CE Delft.
- Lewandowski, M. (2016). Designing the Business Models for a Circular Economy. *Sustainability* 8, 43.
- Ligtvoet, W. B. (2015). *Klimaatverandering: samenvatting van het vijfde IPCC-assessment en een vertaling naar Nederland*. Planbureau voor de Leefomgeving.
- Limburg Circulair. (2020). *Homepage*. Retrieved 2020, from <https:// limburgcirculair.com/>
- Maastricht Aachen Airport. (2019, September 11). *Gedeputeerde Staten pakken grondgebonden geluidoverlast MAA aan*. Retrieved July 15, 2020, from Maastricht Aachen Airport: <https://www.maa.nl/gedeputeerde-staten-pakken-grondgebonden-geluidoverlast-maa-aan/>
- Maastricht Aachen Airport. (2020). *Maastricht Aachen Airport Situatieschets - versie 1.0*. Maastricht: MAA.
- Maastricht Aachen Airport. (2020). *Over ons*. Retrieved 2020, from <https://www.maa.nl/over-ons/>
- Maastricht Aachen Airport. (2020). *Situatieschets Maastricht Aachen Airport*.
- Maastricht Aachen Airport. (n.d.). *Cijfers Maastricht Aachen Airport*. Retrieved August 21, 2020, from Maastricht Aachen Airport: cijfers: <https://www.maa.nl/over-ons/cijfers/>
- MAHEPA. (2019). *Ground Infrastructure Investment Plan*.
- Mertens, P., & Kemp, L. (2018). *Verduurzamen Maastricht Aachen Airport (presentatie)*. Sittard: DBV.
- NAG. (2020). *Maastricht Maintenance Boulevard*. Retrieved 2020, from <https://nag.aero/members/maastricht-maintenance-boulevard/>
- NASA. (1980). Study of Methane Fuel For.

- NASA. (2011, December 13). *Climate change may bring big ecosystem changes*. Retrieved from NASA Global Climate Change Vital Signs of the Planet: <https://climate.nasa.gov/news/645/climate-change-may-bring-big-ecosystem-changes/>
- NASA. (2016). *Spiral Development of Electrified Aircraft Propulsion from Ground to Flight*. NASA.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2016). *Commercial Aircraft Propulsion and Energy Systems Research: Reducing Global Carbon Emissions*. Washington, DC: The National Academies Press.
- New South Wales. (2003). *State of the Environment report*. Environment Protection Agency. Retrieved from [https://www.stateoftheenvironment.des.qld.gov.au/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0003/1260615/soe-report-2003.pdf](https://www.stateoftheenvironment.des.qld.gov.au/__data/assets/pdf_file/0003/1260615/soe-report-2003.pdf)
- Noordhollands Dagblad. (2020, July 07). *Herrie van vliegtuigen en auto's al bij ramen weren*. Retrieved 07 27, 2020, from Noordhollands Dagblad: [https://www.noordhollandsdagblad.nl/cnt/dmf20200707\\_58660918/herrie-van-vliegtuigen-en-auto-s-al-bij-ramen-weren?utm\\_source=www.vlieghinder.nl&utm\\_medium=referral&utm\\_content=/nieuws/artikel/herrie-van-vliegtuigen-en-autos-al-bij-ramen-weren](https://www.noordhollandsdagblad.nl/cnt/dmf20200707_58660918/herrie-van-vliegtuigen-en-auto-s-al-bij-ramen-weren?utm_source=www.vlieghinder.nl&utm_medium=referral&utm_content=/nieuws/artikel/herrie-van-vliegtuigen-en-autos-al-bij-ramen-weren)
- Packmule. (2020). *Airport Vehicles*. Retrieved 2020, from <http://packmule.com/airport-vehicles/>
- PAS-bureau. (2017, Februari). *Gebiedsrapportage 2016 Natura 2000 gebied nr. 153 Bunder- en Elsloerbos*. Utrecht: PAS-bureau en RIVM. Retrieved from [https://www.bij12.nl/assets/153\\_Bunder-en-Elsloerbos.pdf](https://www.bij12.nl/assets/153_Bunder-en-Elsloerbos.pdf)
- Poll, R. v., & al., e. (2018). *Beleving Woonomgeving in Nederland - Inventarisatie Verstoringen 2016; RIVM Rapport 2018-0084*. Bilthoven: RIVM.
- Porsche Consulting. (2018). *The Future of Vertical Mobility*. Stuttgart, Germany: Porsche Consulting.
- Provincie Limburg. (2020). *Beleidskader Circulaire Economie*. Retrieved 2020, from <https://www.limburg.nl/onderwerpen/duurzame-energie/dossier/nieuwsbrieven/nieuwsbrief-energie/beleidskader/>
- Rijksoverheid. (2020). *Wet- en regelgeving - Regeling Burgerluchthavens*. Retrieved 2020, from <https://wetten.overheid.nl/BWBR0026564/2019-11-07>
- RIVM. (2016). *Gezondheid per buurt, wijk en gemeente*. Retrieved 07 01, 2020, from Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu: <https://www.rivm.nl/media/smmap/vliegverkeerhinder.html>
- RIVM, KNMI, NLR. (2019). *Vliegtuiggeluid: meten, berekenen en beleven, Een verkenning van wensen en ontwikkelopties*.
- Roland Berger. (2017). *Aircraft Electrical Propulsion – the next chapter of aviation?*
- Roland Berger. (2017). *Development of business cases for fuel cells and hydrogen applications for regions and cities*. Retrieved from FCH Europa: [https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/FCH%20Docs/171121\\_FCH2JU\\_Application-Package\\_WG5\\_P2H\\_Green%20hydrogen%20%28ID%202910583%29%20%28ID%202911641%29.pdf](https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/FCH%20Docs/171121_FCH2JU_Application-Package_WG5_P2H_Green%20hydrogen%20%28ID%202910583%29%20%28ID%202911641%29.pdf)
- Roland Berger. (2020). *Roadmap to True Zero*.
- Rooij, B. J. (2020). *Op Eindhoven Airport rijdt de koffer straks zelf naar het vliegtuig*. Retrieved from [https://www.limburger.nl/cnt/dmf20200817\\_00172034/op-eindhoven-airport-rijdt-de-koffer-straks-zelf-naar-het-vliegtuig](https://www.limburger.nl/cnt/dmf20200817_00172034/op-eindhoven-airport-rijdt-de-koffer-straks-zelf-naar-het-vliegtuig)
- Roosien, R., & Bussink, F. (2018). *Urban air mobility - Current state of affairs*. Amsterdam: Netherlands Aerospace Centre - NLR.
- Rotterdam the Hague Airport. (2019). *Onderzoek naar grootschalige productie synthetische kerosine in Rotterdam*. Retrieved 2020, from <https://www.rotterdamthehagueairport.nl/onderzoek-naar-grootschalige-productie-synthetische-kerosine-in-rotterdam/>
- Ruiz, P., Sgobbi, A., Nijs, W., Thiel, C., Dalla Longa, F., Kober, T., . . . Hengeveld, G. (2015). The JRC-EU-TIMES model. Bioenergy potentials for EU and neighbouring countries. JRC Science Hub.

- San Francisco Airport. (2019). *San Francisco Airport Looks To Reward Passengers Opting To Take Public Transport*. Retrieved from <https://simpleflying.com/san-francisco-public-transport-reward/>
- Schaafsma, M. (2009). Airport & City. *Airports in Cities and Regions: Research and Practise: 1st International Colloquium on Airports and Spatial Development*, .
- Scheepers, M., Gamboa Palacios, S., Jegu, E., Pupo Nogueira De Oliveira, L., Rutten, L., van Stralen, J., . . . West, K. (2020). *Towards a sustainable energy system for the Netherlands in 2050*. Amsterdam, The Netherlands: TNO.
- Schiphol. (2020). *Jaarverslag: Waardecreatie en Erkenningen*. Retrieved from <https://www.Schiphol.nl/nl/schiphol-group/pagina/jaarverslag-waardecreatie-en-erkenningen>
- Schiphol Airport. (n.d.). *Fully electric buses: Europe's largest fleet*. Retrieved 2020, from <https://www.schiphol.nl/en/schiphol-group/page/europes-largest-fleet-of-fully-electric-buses/>
- Shell. (2017). *Hydrogen: energy of the future?*
- Shell. (2018). *The road to sustainable fuels for zero emissions mobility*. 39th International Vienna Motor Conference.
- Shell. (2019). *Circulaire bestemming voor CO2 van Shell Pernis*. Retrieved from Shell: <https://www.shell.nl/over-ons/shell-pernis-refinery/news-archive-pernis/archief/berichten-2019/circular-destination-for-co2-from-shell-pernis.html>
- Shell, & Wuppertal Institut. (2017). *Energy of the future? Sustainable Mobility through Fuel Cells and H2*.
- Singh, J., & Dhar, D. W. (2019). Overview of Carbon Capture Technology: Microalgal Biorefinery Concept and State-of-the-Art. *Frontiers in Marine Science*.
- SkyNRG. (2020). *Sustainable Aviation Fuel*. Retrieved from <https://skynrg.com/sustainable-aviation-fuel/saf/>
- Sman, E. v. (2019). *Vliegen op Waterstof*. NLR.
- Sydney Airport. (2020). *Biodiversity*. Retrieved 2020, from <https://www.sydneyairport.com.au/corporate/sustainability/environment/biodiversity>
- Terwel, R., & Kerkhoven, J. (2018). *Carbon Neutral Aviation with Current Engine Technology*.
- TNO. (2014). *Laag frequent geluid: van bron naar ontvanger*. Den Haag: TNO.
- TNO. (2020). *Ten things you should know about hydrogen*. Retrieved from <https://www.tno.nl/en/focus-areas/energy-transition/roadmaps/towards-co2-neutral-fuels-and-feedstock/hydrogen-for-a-sustainable-energy-supply/ten-things-you-need-to-know-about-hydrogen/>
- To70. (2018). *Quickscan Eindhoven Airport 2020, verkenning naar milieueffecten voor groeiscenario's Eindhoven Airport*. Den Haag: To70.
- Topsector Energie. (2018). *Contouren van een routekaart waterstof*.
- Trouw. (2020, April 17). *Geen vliegtuigen, volop vogelgefluit: wat de afwezigheid van herrie met ons doet*. Retrieved 07 22, 2020, from Trouw.nl: <https://www.trouw.nl/nieuws/geen-vliegtuigen-volop-vogelgefluit-wat-de-afwezigheid-van-herrie-met-ons-doet~b9411eb8/>
- van Bokhorst, M., & Faber, J. (2018). *CO2-, NOx- en PM10 emissies Eindhoven Airport*. Delft: CE Delft.
- van Wijk, A., & Chatzimarkakis, J. (2020, March). *Green Hydrogen for a European Green Deal A 2x40 GW Initiative*. Hydrogen Europe.
- Vanderlande. (2017, 02 20). *Vanderlande closes the loop at Eindhoven Airport*. Retrieved from <https://www.vanderlande.com/news/vanderlande-closes-the-loop-at-eindhoven-airport/>
- Vinci. (2018). *Biodiversity: inauguration of the VINCI Airports and UNAF partnership "Bees, guardians of the environment"*. Retrieved 2020, from <https://www.vinci-airports.com/en/news/biodiversity-inauguration-vinci-airports-and-unaf-partnership-bees-guardians-environment>
- VVD, CDA, D66 & Christenunie. (2017). *Regeerakkoord 2017: Vertrouwen in de Toekomst*. Retrieved from Rijksoverheid: <https://www.rijksoverheid.nl/regering/documenten/publicaties/2017/10/10/regeerakkoord-2017-vertrouwen-in-de-toekomst>
- World Commission on Environment and Development. (1987). *Our Common Future*.
- Wuebbles. (2010). *Issues and Uncertainties Affecting Metrics for Aviation Impacts on Climate*.

- WUR. (2014). *Dossier Olifantsgras - Miscanthus*. Retrieved July 21, 2020, from Wageningen University & Research: <https://www.wur.nl/nl/Dossiers/dossier/Olifantsgras-Miscanthus.htm>
- Xu, H. (2018). Flight of an aeroplane with solid-state propulsion. *Nature*, 532–535.
- Yugo, M., & Soler, A. (2019). A look into the role of e-fuels in the transport system in Europe (2030-2050). *Concawe*.
- Zhang, M., Huang, Q., Liu, S., & Li, H. (2019). Assessment Method of Fuel Consumption and Emissions of Aircraft during Taxiing on Airport Surface under Given Meteorological Conditions. *Sustainability*, 6110.
- Ziya Sogut, M., Yalcin, E., & Hikmet Karakoc, T. (2017, December 1). Assessment of degradation effects for an aircraft engine considering exergy analysis. *Elsevier*, pp. 1417-1426.

## Appendix A ACERT input

Onderstaande table geeft de input gegevens weer die in ACERT zijn gebruikt voor de berekening van de CO<sub>2</sub> voetafdruk van MAA.

Parameter	Hoeveelheid	Eenheid
Benzine getankt voor eigen voertuigen luchthaven	2864	L
Diesel getankt voor eigen voertuigen luchthaven	221925	L
Diesel getankt voor voertuigen van derden	32869	
Gas gebruikt door de brandweer	27	L
CO <sub>2</sub> blusser gebruikt	138	kg
De-icing chemicals gebruikt	2000	L
Elektriciteit gekocht door luchthaven	542942	kWh
Percentage water off-site behandeld	100%	
Jaarlijkse vliegbewegingen	Op basis van FANOMOS	
Taxi time per LTO	10	minuten
Tijd APU aan	15	minuten
Proefdraaien middelgrote vliegtuigen	200	X per jaar
Warmte (gasverbruik) door luchthaven zelf	585109	m <sup>3</sup>
Warmte (gasverbruik) door derden	170561	m <sup>3</sup>
Elektriciteit ingekocht door de luchthaven	4106154	kWh
Elektriciteit ingekocht voor derden	825090	kWh
Percentage passagiers met OV	5	%
Percentage passagiers dat met auto komt (incl. taxi)	95	%
Verdeling brandstof benzine/diesel	50%	50%
<b>Proefdraaien</b>	<b>Aantal sessies</b>	
Piston, Turboprop (Cessna 182)	163	
Single-Aisle Jet (e.b. B737, A320)	200	
Double-Aisle Jet (e.g. A330)	0	

### Luchthaven gegevens

Aantal werknemers	200	FTE
Vliegbewegingen per jaar	16512	bewegingen
Passagiersaantal per jaar	445249	passagiers
Vracht per jaar	111376	Ton
Aantal werknemers van derden	160	werknemers





Dedicated to innovation in aerospace

## NLR - Koninklijk Nederlands Lucht- en Ruimtevaartcentrum

Koninklijke NLR werkt als neutraal opererend onderzoekscentrum met zijn partners aan een betere wereld van morgen. NLR biedt daarbij innovatieve oplossingen en technische expertise en zorgt voor een sterke concurrentiepositie van het bedrijfsleven.

NLR is ruim 100 jaar een kennisorganisatie met de diepgewortelde wil om te blijven vernieuwen en zet zich in voor een duurzame, veilige, efficiënte en effectieve lucht- en ruimtevaart.

De combinatie van diepgaand inzicht in de klantbehoefte, multidisciplinaire expertise en toonaangevende onderzoeksfaciliteiten, maakt snel innoveren mogelijk. NLR vormt in binnen- en buitenland de spilfunctie tussen wetenschap, bedrijfsleven en overheid, en overbrugt de kloof tussen fundamenteel onderzoek en toepassingen in de praktijk. Daarnaast werkt NLR als Groot Technologisch Instituut (GTI) sinds 2010 in de TO2-federatie samen aan toegepast onderzoek in Nederland.

Vanuit de hoofdvestigingen in Amsterdam en Marknesse en twee satellietvestigingen, draagt NLR bij aan een veilige en duurzame maatschappij en werkt met partners in vele (defensie)programma's, onder andere aan complexe composieten constructies voor verkeersvliegtuigen en aan doelgericht gebruik van het F-35-jachtvliegtuig. Daarnaast geeft NLR invulling aan Nederlandse en Europese (klimaat)doelstellingen conform de Luchtvaartnota, de European Green Deal, Flightpath 2050 en door deelname aan programma's zoals Clean Sky en SESAR.

Voor meer informatie bezoek: [www.nlr.nl](http://www.nlr.nl)

### Postal address

PO Box 90502  
1006 BM Amsterdam, The Netherlands  
e) [info@nlr.nl](mailto:info@nlr.nl) i) [www.nlr.org](http://www.nlr.org)

### NLR Amsterdam

Anthony Fokkerweg 2  
1059 CM Amsterdam, The Netherlands  
p) +31 88 511 3113

### NLR Marknesse

Voorsterweg 31  
8316 PR Marknesse, The Netherlands  
p) +31 88 511 4444