Dedicated to innovation in aerospace

NLR-TR-2019-080 | juni 2020

Verkenning milieuscores voor de luchtvaart

Tussenrapportage

OPDRACHTGEVER: Kennis voor Beleid Programma

NLR – Koninklijk Nederlands Lucht- en Ruimtevaartcentrum

Dedicated to innovation in aerospace

Verkenning milieuscores voor de luchtvaart

Tussenrapportage

Een verkenning naar milieuscores voor de luchtvaart is in 2019 uitgevoerd als onderdeel van het Kennis voor Beleid programma van het NLR. Binnen dit programma ontwikkelt het NLR kennis op verzoek van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. Voor dit onderzoek heeft NLR gekeken of er een methodiek is te ontwikkelen welke de luchtvaart en individuele vluchten in het bijzonder een integrale score kan geven ten aanzien van milieu-impact.
Het onderzoek naar milieuscores heeft een vervolg gekregen in 2020 waarbij een prototype milieuscore zal worden ontwikkeld. Deze tussenrapportage beschrijft een verkenning van de opties voor een milieuscore gebaseerd op literatuur.

Van milieueffecten naar milieuscore
Het concept milieuscore is erg breed. Verschillende partijen hebben een ander beeld of andere verwachting bij wat een milieuscore precies inhoudt. Dat komt mede omdat de milieueffecten van de luchtvaart betrekking hebben op verschillende beleidsthema's. In deze literatuurstudie wordt een overzicht gegeven van de milieueffecten van de luchtvaart en door welke emissies deze effecten worden veroorzaakt. Zowel de emissies als de impact kunnen gekwantificeerd worden om vervolgens individuele elementen te combineren in een scoresysteem.

In het onderzoek is gekeken naar de impact van emissies op het klimaat en de leefomgeving. De impact op het klimaat kan gekwantificeerd worden door de emissies van broeikasgassen (zoals CO2, NOx en waterdamp) in kaart te brengen en deze vervolgens te vertalen naar klimaatimpact. De impact op de leefomgeving is verder onderverdeeld in de impact op bos- en natuurgebieden en de impact op de gezondheid van mensen. De impact op bos- en natuurgebieden wordt onder andere beïnvloed door stikstofdepositie. De gezondheid van mensen wordt onder andere beïnvloed door geluidbelasting en lokale luchtkwaliteit rondom luchthavens. Al deze aspecten kunnen gekwantificeerd worden door de emissies en/of concentraties in kaart te brengen en vervolgens te vertalen naar impact.

De vertaling van de milieu-impact naar een milieuscore is niet eenvoudig of eenduidig. De milieueffecten vormen echter wel de basis voor het definiëren van het doel van de milieuscore, bijvoorbeeld het verbeteren van lokale luchtkwaliteit,

RAPPORTNUMMER
NLR-TR-2019-080

AUTEUR(S)
E.S. van der Sman
J. Derei
M.E. Hak
M. Blom
C.J. Meerstadt

RUBRICERING RAPPORT
ONGERUBRICEERD

DATUM
juni 2020

KENNISGEBIED(EN)
Luchtverontreiniging door de luchtvaart
Vliegtuiggeluidseffecten op de omgeving

TREFWOORD(EN)
Klimaat
Luchtkwaliteit
Geluid

het minimaliseren van de geluidbelasting voor omwonenden of het terugdringen van klimaatverandering. Deze algemene doelen moeten echter zo specifiek mogelijk gemaakt worden, zodat geanalyseerd kan worden of de score bijdraagt aan het behalen van het doel. Dit kan door de doelen zo veel mogelijk meetbaar en tijdgebonden te maken. Het ontwikkelen van de “optimale score” is daarom een proces met betrokken partijen gebaseerd op kwantificeerbare gegevens welke simultaan worden beschouwd. Uit het doel van de milieuscore volgt ook de toepassing. Het ministerie voorziet een mogelijke toepassing van een milieuscore in de luchthaventarieven van Schiphol. Een dergelijke milieuscore kan ook gebruikt worden voor informatievoorziening of een andere vorm van (financiële) prikkels voor de verschillende betrokken partijen.

Het scoresysteem

Het scoresysteem rangschikt elementen door middel van bijvoorbeeld absolute of relatieve waardes, drempelwaardes of strafpunten. Onderdelen van het scoresysteem zijn het domein, de weegfactoren en de metriek. Het domein van de score is een vorm van aggregatieniveau, zoals de emissies van individuele vluchten of van individuele stakeholders. De keuze van weegfactoren tussen verschillende elementen hangt samen met het doel en is daarom een politieke keuze. Zo kan er bijvoorbeeld gekozen worden om elementen zwaarder te wegen als deze kostenefficiënt kunnen worden aangepast, of juist geen weegfactoren toe te passen en meerdere elementen naast elkaar te scoren. Een analyse van potentiële ongewenste effecten is belangrijk voor het vaststellen van de weegfactoren. Zo kan de keuze voor een focus op mitigeren van CO_2-uitstoot leiden tot een wenselijke verlaging van CO_2-niveaus in de atmosfeer, maar daarbij een onwenselijke verhoging van de ervaren geluidhinder veroorzaken doordat er bij directer vliegen bijvoorbeeld recht over woonkernen wordt gevlogen. De elementen van het scoresysteem kunnen ieder verder uitgewerkt worden op basis van verschillende metrieken, zoals de uitstoot per passagier of per kilometer. De keuze voor de elementen en vervolgens van de metriek hangt sterk samen met de beschikbare gegevens en de nauwkeurigheid van de gegevens.

Tot slot worden een aantal voorbeelden van reeds toegepaste milieuscores gegeven, namelijk het Fly Quiet and Green programma van Heathrow, de NO_x component in de landingsgelden van Zürich en de NATS 3Di score. Dit zijn voorbeelden waar een scoresysteem via een duidelijke toepassing bijdraagt aan het realiseren van een doel.

Beschikbare invoergegevens en modellen

Voor het kwantitatieve gedeelte van het onderzoek is het domein van de milieuscore beperkt tot individuele vluchten. Hierbinnen zijn verschillende invoergegevens en modellen geanalyseerd. Meerdere modellen kunnen CO_2-, NO_x- en waterdampemissies van individuele vluchten en specifieke onderdelen van de vlucht (zoals de start en landing) kwantificeren. Echter kunnen niet alle modellen de impact kwantificeren op het klimaat en/of de leefomgeving. Een mogelijk knelpunt is de beschikbaarheid van vliegtuigprestatiegegevens, deze gegevens zijn

niet altijd openbaar en kunnen in veel gevallen alleen onder specifieke voorwaarden gebruikt worden. Beschikbare modellen moeten per toepassing verder geanalyseerd worden in termen van nauwkeurigheid en betrouwbaarheid. Om de modellen te valideren zijn gegevens nodig van vluchtcomputers welke niet openbaar beschikbaar zijn. Over het algemeen kunnen de resultaten van de modellen verbeterd worden door een koppeling te maken met weergegevens en daadwerkelijk gevlogen vluchtprofiel.

Vervolgstappen

Voor het ontwikkelen van een prototype milieuscore zijn in deze literatuurstudie een breed scala aan opties beschreven. Om voortgang te maken in het ontwikkelen van een prototype is politieke sturing van het ministerie van IenW nodig om een specifiek doel voor het prototype te definiëren. NLR zal vervolgens analyseren welk type scoresysteem inclusief benodigde gegevens en modellen het beste passen bij het aangeven doel. Het ontwikkelen van een prototype zal leiden tot inzichten die gebruikt kunnen worden in vervolgstappen om met stakeholders een milieuscore verder vorm te geven en te implementeren.

NLR
Anthony Fokkerweg 2
1059 CM Amsterdam
p) +31 88 511 3113
e) info@nlr.nl i) www.nlr.nl

Dedicated to innovation in aerospace

NLR-TR-2019-080 | juni 2020

Verkenning milieuscores voor de luchtvaart

Tussenrapportage

OPDRACHTGEVER: Kennis voor Beleid Programma

AUTEUR(S):

E.S. van der Sman	NLR
J. Derei	NLR
M.E. Hak	NLR
M. Blom	NLR
C.J. Meerstadt	NLR

NLR – Koninklijk Nederlands Lucht- en Ruimtevaartcentrum

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

OPDRACHTGEVER	**Kennis voor Beleid Programma**
CONTRACTNUMMER	**-----**
EIGENAAR	**NLR**
NLR DIVISIE	**Aerospace Operations**
VERSPREIDING	**Beperkt**
RUBRICERING TITEL	**ONGERUBRICEERD**

GOEDGEKEURD DOOR:																		
AUTEUR							**REVIEWER**							**BEHERENDE AFDELING**						
E.S. van der Sman							B. Peerlings Bram Peerlings 2020.06.23 17:11:35 +02'00'							M. Nagelsmit M.H. Nagelsmit 2020.06.23 14:34:41 +02'00'						
DATUM	1	9	0	6	2	0	DATUM							DATUM						

Inhoudsopgave

Afkortingen 5

1 Inleiding 7

2 Milieu-impact van vliegen 10

2.1 Emissies 10
2.2 Impact op het klimaat 11
2.2.1 Klimaateffecten 11
2.2.2 Gevolgen van klimaatverandering 12
2.3 Impact op de leefomgeving 13
2.3.1 Impact op bos- en natuurgebieden 13
2.3.2 Impact op de gezondheid 13

3 Ontwerp van een milieuscore 16

3.1 Doelen en toepassingen 17
3.1.1 Doel van een milieuscore 17
3.1.2 Toepassing van een milieuscore 18
3.1.3 Voorbeelden van SMART doelen gekoppeld aan een toepassing 18
3.2 Stakeholders 19
3.3 Scoresystemen 20
3.3.1 Weegfactoren 20
3.4 Domeinen 21
3.5 Metriek 22
3.5.1 Eenheid 22
3.5.2 Tijdsschaal 23
3.6 Mogelijke risico's 23
3.7 Aanpak 'optimale score' 24

4 Emissies en impact van individuele vluchten 26

4.1 Certificeringsgegevens 26
4.2 Inventarisatie van de emissie-keten 26
4.2.1 Emissiefactoren en partijen die invloed hebben op deze factoren 27
4.3 Elementen die impact hebben op klimaat 29
4.4 Elementen die impact hebben op leefomgeving 31
4.4.1 Lokale emissies van uitlaatgassen 31
4.4.2 Geluidemissies 32

5 Invoergegevens en modellen voor het bepalen van een score 35

5.1 Invoergegevens 35
5.2 Modellen 37
5.2.1 Validatie en verificatie van modellen 38
5.2.2 CO_2-tool 39
5.2.3 Long range cruise model 39

5.2.4 MASS model 40
5.2.5 AEDT 40
5.2.6 Doc29 model 41
5.2.7 LEAS-iT 41
5.2.8 AERIUS 42
5.2.9 STACKS 43
5.3 Restricties 44

6 Voorbeelden van bestaande scoresystemen 46
6.1 Heathrow Airport Fly Quiet and green 46
6.2 NATS 3Di score 47
6.3 Zürich Airport Charges NO_x charge 48

7 Conclusie en vervolgstappen 49
7.1 Conclusie 49
7.2 Vervolgstappen 50

Afkortingen

ACRONIEM	OMSCHRIJVING
ACA	Airport Carbon Accreditation, een programma van ACI World
ADS-B	Automatic Dependent Surveillance-Broadcast; een coöperatief systeem voor luchtverkeersleiding om de positie van een vliegtuig te bepalen
ANIMA	Aviation Noise Impact Management through Novel Approaches (H2020 project)
APU	Auxiliary Power Unit, een apparaat (motor) dat de energie levert voor functies anders dan voortstuwing in een vliegtuig
BADA	Base of Aircraft Data, bevat prestatiegegevens van vliegtuigen, afkomstig van EUROCONTROL
CCO	Continuous Climb Operations
CDA	Continuous Descent Approach
CH_4	Methaan, broeikasgas
CO_2	Koolstofdioxide, broeikasgas
dB	Decibel, geluideenheid
DNW	German-Dutch Wind Tunnels
Doc29	Voor Europa geharmoniseerde methode om de geluidbelasting rondom civiele luchthavens te bepalen
ECAC	European Civil Aviation Conference
EGH	Ernstig gehinderden
FMC	Flight Management Computer
GES	Gezondheidskundige Evaluatie Schiphol
GHG	Broeikasgassen (Green House Gasses)
GPU	Ground Power Unit (Een power unit die zich niet in het vliegtuig bevindt en als vervanging voor een APU wordt gebruikt)
H_2O	Water(damp)
HAP	Hazardous Air Polutants
HC	Koolwaterstoffen (hydrocarbons)
ICAO	International Civil Aviation Organisation
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KvB	Kennis voor Beleid
L_{den}	Standaard om geluidbelasting over het gehele etmaal uit te drukken
LEAS-iT	Local aviation Emissions in Airport Scenarios - inventory Tool
L_{night}	Standaard voor geluidbelasting tijdens de nacht
LTO	Landing & Take Off; het gedeelte van de vlucht onder de 3000 voet
MER	Milieueffectrapportage
NADP	Noise Abatement Departure Procedure
NDC	Nationally Determined Contribution
NLR	Koninklijk Nederlands Lucht- en Ruimtevaartcentrum
NO_x	Stikstofoxide-emissies of concentraties, bestaande uit NO en NO_2.

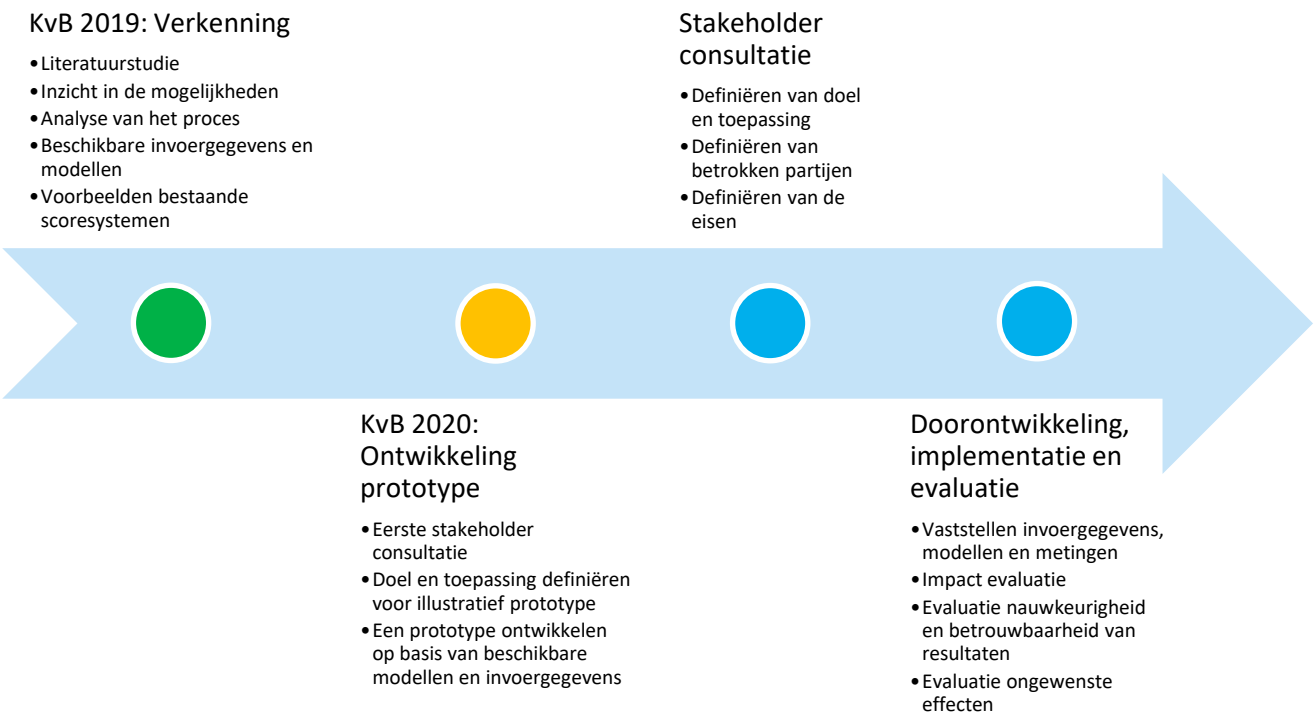
ACRONIEM	OMSCHRIJVING
O_3	Ozon
OpenAP	Open Aircraft Performance, software ontwikkeld door TU Delft
OPS	Operational Priority Substances
OV	Openbaar Vervoer
PM	Fijnstof (particulate matter)
QC	Quota Count
RIVM	Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu
SAF	Sustainable Aviation Fuels: duurzame non-fossiele brandstoffen voor de luchtvaart
SO_x	Zwaveloxide
UFP	Ultrafijn stof (ultrafine particles)
VOC	Volatile Organic Compounds (vluchtige organische stoffen)

1 Inleiding

De milieueffecten van de luchtvaart worden in het maatschappelijk debat steeds belangrijker. In Nederland worden de milieueffecten van de luchtvaart onder andere in beeld gebracht in milieueffectrapportages (MER). De rapportages worden door de overheid gebruikt om de milieueffecten mee te nemen in de besluitvorming over plannen en projecten. Onderdeel van bijvoorbeeld de MER-Schiphol zijn onder andere de effecten op menselijke gezondheid, zoals geluidsbelasting en lokale luchtkwaliteit, en op de natuur, zoals in de vorm van stikstofdepositie.

In de aanpak van een MER wordt geaggregeerd gekeken naar vele vliegbewegingen en bedrijvigheid op en rondom een luchthaven. De milieueffecten van individuele vluchten worden niet apart beoordeeld. In het sectorplan Slim en Duurzaam en het Ontwerpakkoord Duurzame Luchtvaart wordt het vaststellen van dergelijke duurzaamheidsprofielen genoemd als een onderdeel van de weg naar een duurzamer luchtvaartsysteem. Deze studie richt zich op het verkennen van de mogelijkheden voor het ‘scoren’ van de milieueffecten van de luchtvaart en van individuele vluchten in het bijzonder, om tot zogenaamde milieuscores te komen. Hierbij worden zowel lokale effecten op de leefomgeving meegenomen als effecten op het klimaat.

Dit rapport betreft een tussenrapportage. De tussenrapportage beschrijft de literatuurstudie die is uitgevoerd als onderdeel van het NLR Kennis voor Beleid (KvB) programma voor het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. De literatuurstudie zal in de loop van 2020 verder uitgewerkt worden inclusief enkele voorbeelden van mogelijke scores. Het NLR adviseert het Ministerie dit onderzoek te gebruiken als bouwsteen voor het definiëren van het doel en de toepassing van een dergelijke milieuscore in overleg met betrokken partijen. Gegeven een specifiek doel, zou het Ministerie en/of de Nederlandse luchtvaartsector kunnen kiezen om een score (of meerder scores) verder te ontwikkelen en te evalueren. Figuur 1 geeft een overzicht van het onderzoek en de geadviseerde vervolgstappen. De literatuurstudie wordt weergegeven met een groen bolletje. De vervolgstappen binnen KvB 2020 worden gevisualiseerd met een geel bolletje. Mogelijke vervolgstappen, die buiten het KvB-programma vallen, in samenwerking met verschillende stakeholders worden weergeven met blauwe bolletjes.



Figuur 1: Overzicht huidig onderzoek en vervolgstappen

De literatuurstudie is uitgevoerd aan de hand van de volgende onderzoeksvragen:

- Wat zijn de milieueffecten waar de luchtvaart verantwoordelijk voor is?
- Welke aspecten hebben invloed op het ontwikkelen van een milieuscore?
- Op welke manier kan een milieuscore worden opgebouwd?
- Kunnen de emissies en de impact van individuele vluchten gekwantificeerd worden?
- Welke modellen en gegevens zijn beschikbaar voor het ontwikkelen van een milieuscore?
- Welke voorbeelden van milieuscores bestaan er voor de luchtvaart?

Het rapport is als volgt opgebouwd. In hoofdstuk 2 wordt een beschrijving gegeven van de verschillende emissies van de luchtvaart. Vervolgens wordt het effect (ook wel impact genoemd) van deze emissies op het milieu kwalitatief beschreven. Door verschillende effecten te kwantificeren is het mogelijk om de effecten met elkaar te vergelijken en af te wegen. Samengevoegd leiden de effecten tot een integrale “milieuscore” waarbij meerdere aspecten simultaan worden beschouwd. In hoofdstuk 3 worden de mogelijkheden om een milieuscore op te stellen beschreven, met aandacht voor mogelijk ongewenste effecten daarvan. Er worden concrete voorbeelden gegeven van de belangrijkste aspecten die invloed hebben op de score zoals het doel en de toepassing. Het doel zou bijvoorbeeld kunnen zijn het verminderen van de milieueffecten waar de luchtvaart verantwoordelijk voor is; de toepassing het meenemen van milieuscores in luchthavengelden. Vervolgens wordt in hoofdstuk 4 specifiek gekeken naar het kwantificeren van de emissies en impact van individuele vluchten. Hier ligt de focus op de technische aspecten, zoals de benodigde gegevens en de modellen die kunnen worden toegepast (hoofdstuk 5). Tot slot worden in hoofdstuk 6 een aantal voorbeelden van de toepassing van dergelijke scores gegeven. De conclusie van de tussenrapportage wordt beschreven in hoofdstuk 7 inclusief een vooruitblik voor het vervolgonderzoek in 2020.

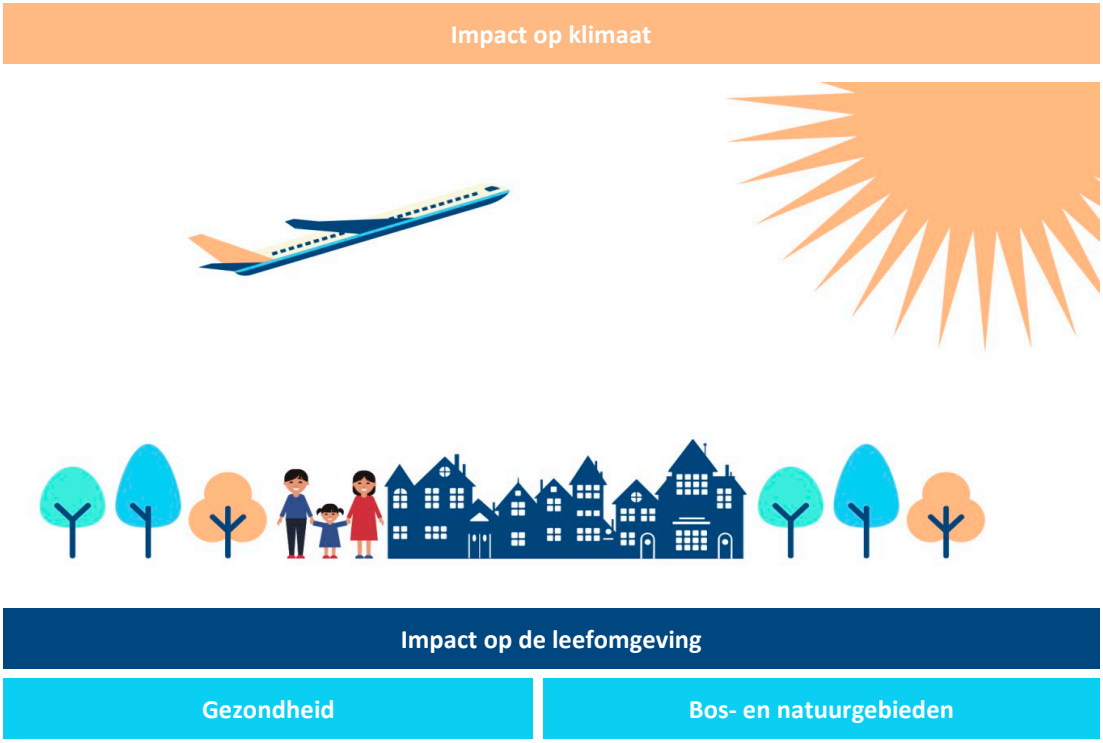
NLR werkt onder het programma Kennis voor Beleid (KvB) aan het project “Milieuscores”. Binnen KvB verbreedt en verdiept het NLR de vakkennis over de milieu-impact van de luchtvaart. IenW voorziet een mogelijke toepassing van “milieuscores” op luchthaven Schiphol, waarbij elke drie jaar de luchthaventarieven opnieuw worden vastgesteld.

Kernpunten onderzoek:

- **Doel:** Verkenning van het ontwikkelen en toepassen van milieuscores. Kennisopbouw over het kwantificeren van de milieu-impact van de luchtvaart.
- **Doelgroep:** Het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW), specifiek het cluster duurzaamheid en de afdeling Schiphol.

2 Milieu-impact van vliegen

De milieu-impact van de luchtvaart wordt binnen dit onderzoek opgedeeld in twee delen: de impact op het klimaat en de impact op de leefomgeving. Bij de laatste wordt een onderscheid gemaakt tussen impact op bos- en natuurgebieden en impact op de gezondheid. Deze verdeling is geïllustreerd in Figuur 2.



Figuur 2: Verdeling van milieu- impact van de luchtvaart zoals toegepast in dit onderzoek (NLR)

2.1 Emissies

De milieu-impact van de luchtvaart is gekoppeld aan de uitstoot van verbrandingsproducten en geluid, gezamenlijk emissies genoemd.

Uitstoot van verbrandingsproducten

Tijdens een vlucht komen emissies vrij door verbranding van een brandstof. Ook voorafgaand aan de vlucht komen emissies vrij. De grondafhandelingsprocessen produceren emissies en gedurende de tijd dat het vliegtuig aan de grond staat, wordt getankt en geladen met passagiers en vracht, zijn er tal van processen die emissies produceren. ICAO[1] heeft voor verbrandingsemissies vier categorieën onderscheiden:

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

[1] Airport Air Quality Manual Doc 9889 – ICAO – 2011.

In dit onderzoek worden alleen de emissies van het vliegtuig zelf (1) en van de handling (2) meegenomen in de scope van de milieuscore.

De grootste bijdrage in emissies komt van de vlucht zelf. Bij verbranding van vliegtuigbrandstoffen in de motor ontstaan de volgende emissies: koolstofdioxide (CO_2), waterdamp (H_2O), stikstofoxiden (NO_x), zwaveloxiden (SO_x), koolmonoxide (CO), onverbrande koolwaterstoffen (HC), fijnstof (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].

Geluid
Geluid is de tweede emissie die bij vliegen wordt geproduceerd. Hierbij kan onderscheid worden gemaakt tussen geluid dat hoort bij de grondoperatie en dat hoort bij de vlucht. Tijdens de grondoperatie wordt geluid geproduceerd door bijvoorbeeld het taxiën van het vliegtuig of het gebruik van de APU. Tijdens de vlucht veroorzaken zowel de motoren als ook de interactie van het vliegtuig met de lucht geluid (airframe noise).

2.2 Impact op het klimaat

Deze paragraaf beschrijft relevante vliegtuigemissies vanuit klimaatoogpunt, en de gevolgen van klimaatverandering.

2.2.1 Klimaateffecten

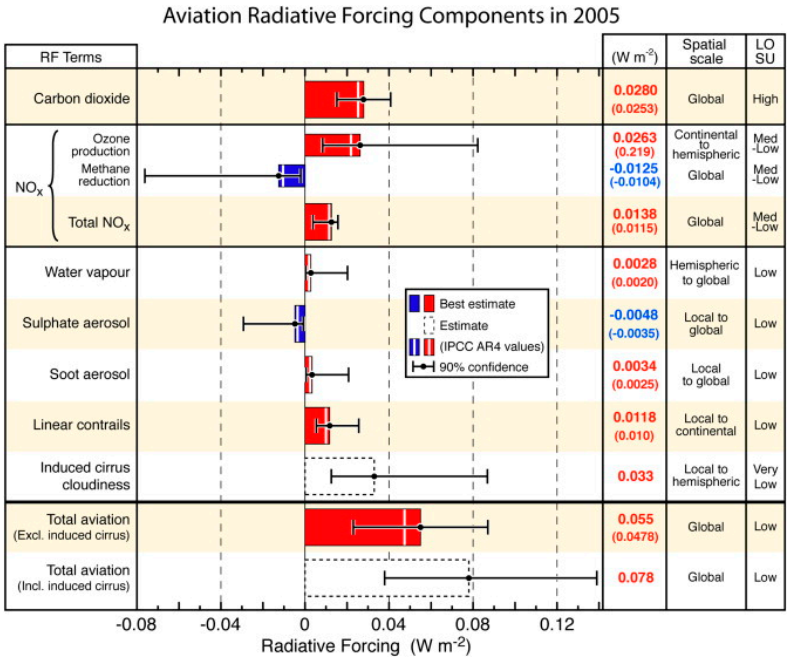
Vliegtuigen stoten gassen en deeltjes uit in de hoge troposfeer en lagere stratosfeer (de hoogte waarop subsonisch wordt gevlogen, ca 9-13 km). De belangrijkste emissies die een impact hebben op het klimaat zijn CO_2, NO_x, H_2O, SO_x, HC en roetdeeltjes[3]. Deze gassen en deeltjes beïnvloeden de concentratie van atmosferische broeikasgassen, waaronder koolstofdioxide (CO_2), ozon (O_3) en methaan (CH_4). 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.

Radiative forcing
Het kwantificeren van de klimaatimpact van deze gassen en deeltjes is complex. Dit wordt gedaan door te kijken naar de ‘radiative forcing’: het temperatuureffect dat de gassen of deeltjes hebben in de atmosfeer. Dit kan opwarming zijn, maar ook verkoeling. De duur van klimaateffecten is eveneens van belang. CO_2 heeft bijvoorbeeld een atmosferische verblijfstijd van 5 tot 200 jaar. Andere gassen, zoals NO_x, SO_x of waterdamp hebben kortere atmosferische verblijfstijden en blijven op wat meer geconcentreerde wijze achter nabij de vliegroutes. Dit is voornamelijk het geval in de noordelijke gemiddelde breedtegraad. Deze emissies kunnen ertoe leiden dat ‘radiative forcing’ regionaal optreedt nabij de vliegroutes, in tegenstelling tot bijvoorbeeld CO_2 en methaan, die juist wereldwijd voor effecten zorgen. Kort gezegd is er dus sprake van zowel een lokaal als globaal effect op het klimaat[4].

Voor NO_x speelt de hoogte waarop uitstoot plaatsvindt een rol in de impact die het heeft op de ozonlaag. Ozonvorming neemt toe naarmate de concentratie van NO_x toeneemt in de hoge troposfeer en lage stratosfeer. Op

[2] Airport Air Quality Manual Doc 9889 – ICAO – 2011.
[3] Wuebbles et al. (2010) - Issues and Uncertainties Affecting Metrics for Aviation Impacts on Climate.
[4] IPCC - Special Report on Aviation and the Global Atmosphere (2000).

grotere hoogtes (de operationele hoogte van supersone vliegtuigen, ca. 17-20 km) leidt een toename van NO_x juist tot een vermindering van de stratosferische ozonlaag. De verblijfstijd van NO_x neemt toe met de hoogte, dus de effecten op de ozonlaag zijn afhankelijk van de hoogte van NO_x-emissie en varieert op regio-schaal in de troposfeer en op globale schaal in de stratosfeer[5].



Figuur 3: Radiative forcing componenten van de luchtvaart[6]

2.2.2 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.[7]

Het IPCC voorspelt 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[8].

[5] IPCC - Special Report on Aviation and the Global Atmosphere (2000).
[6] Lee et al. (2009) - Aviation and global climate change in the 21st century.
[7] Ligtvoet, W., Bregman, A., van Dorland, R., Brinke, W. B. M., de Vos, R., Petersen, A. C., & Visser, H. (2015). Klimaatverandering: samenvatting van het vijfde IPCC-assessment en een vertaling naar Nederland. Planbureau voor de Leefomgeving.
[8] 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 [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

2.3 Impact op de leefomgeving

In de literatuur is een breed scala aan onderzoek beschikbaar over de impact van de luchtvaart op de leefomgeving. Dit onderwerp wordt in de breedste zin 'kwaliteit van leven' genoemd. Zo is door onder andere NLR binnen het Europese Horizon 2020 onderzoeksproject Aviation Noise Impact Management through Novel Appraoches (ANIMA) onderzoek gedaan naar kwaliteit van leven en zijn hiervoor indicatoren vastgesteld, zoals gezondheid, veiligheid, of werkgelegenheid. In dit rapport wordt specifiek ingegaan op aspecten die effect hebben op de bos- en natuurgebieden en de gezondheid van omwonenden bij een luchthaven.

2.3.1 Impact op bos- en natuurgebieden

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_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 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_x met depositie als gevolg[9]. Dit vermindert de kwaliteit en biodiversiteit van bos- en natuurgebieden.[10]

Naast de effecten van stikstof kan (ultra)fijnstof de gezondheid van dieren en planten aantasten. Op de dagelijkse tot jaarlijkse tijdsschaal zorgt vliegtuiggeluid voor een verstoring van dieren in het wild. Dit kan effect hebben op zang van vogels[11], broedpatronen van insecten en vogels[12], bloeddruk van kleine zoogdieren[13] en botsingen met vogels[14] en herten[15]. Ook kan SO_x (met NO_x) 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 teweeg brengen in bos- en natuurgebieden. [16]

2.3.2 Impact op de gezondheid

De impact op de gezondheid wordt in dit onderzoek belicht van twee kanten: de impact op de gezondheid ten gevolge van geluidbelasting en de impact op de gezondheid door de verslechtering van de lokale luchtkwaliteit.

2.3.2.1 Geluidbelasting

Geluidbelasting kan impact hebben op de gezondheid van mensen. De motoren en de beweging van het vliegtuig door de lucht veroorzaken geluid, dat in bepaalde gevallen op de grond door mensen hoorbaar is. Tijdens de start

[9] https://themasites.pbl.nl/balansvandeleefomgeving/jaargang-2010/klimaat-lucht-en-energie/lucht/nieuwe-inzichten-stikstofdepositie
[10] Bal, D., H.M. Beije, J.H. van Dobben, A. van Hinsberg (2007) Overzicht van kritische stikstofdeposities voor natuurdoeltypen. Ministerie van LNV, Directie Kennis, Ede.
[11] Diego Gil et al., 2015: Birds living near airports advance their dawn chorus and reduce overlap with aircraft noise, Behavioral Ecology, Volume 26, Issue 2, March-April 2015, Pages 435–443, https://doi.org/10.1093/beheco/aru207.
[12] New South Wales, 2003: State of environment report, Chapter 7, Environment Protection Authority. http://www.epa.nsw.gov.au/soe/soe2000/bh/print_bh_7.htm
[13] Chesser, R.K., R.S. Caldwell, and M.J. Harvey. 1975. Effects of noise on feral populations of Mus musculus. Physiological Zoology 48(4):323–325.
[14] Allan, J. R. (2000). The costs of bird strikes and bird strike prevention. Human conflicts with wildlife: economic considerations, 18.
[15] Biondi, K. M., Belant, J. L., Martin, J. A., DeVault, T. L., & Wang, G. (2011). White-tailed deer incidents with US civil aircraft. Wildlife Society Bulletin, 35(3), 303-309.
[16] https://climate.nasa.gov/news/645/climate-change-may-bring-big-ecosystem-changes/

produceert een vliegtuig over het algemeen hogere geluidniveaus, ten opzichte van de rest van de vlucht. In het geval dat een luchthaven zich vlak bij bewoond gebied bevindt, zal daar geluidhinder kunnen plaatsvinden. Blootstelling van de omgeving aan geluid kan voor ergernis bij mensen zorgen, dit kan potentieel ook de gezondheid schaden. Geluidhinder wordt het meest intens ervaren op het moment dat het geluid hard hoorbaar is en vlak daarna, bijvoorbeeld door de gevolgen van slapeloosheid.[17] Het geluid van vliegtuigen kan echter ook leiden tot permanente schade aan de gezondheid, zoals gehoorverlies en hart- en vaateffecten.[18,19]

Bij geluidhinder gaat het om beleving van geluid door mensen. Dit betekent dat de mate van geluidhinder van persoon tot persoon kan verschillen. Om toch een algemeen beeld te kunnen schetsen van de mate van geluidhinder in een bepaald gebied, is door het RIVM in 2006 de Gezondheidskundige Evaluatie Schiphol (GES) uitgevoerd. Hierin is onderzoek gedaan naar de relatie tussen zelf gerapporteerde ernstige geluidhinder of slaapverstoring rond Schiphol (tussen 2002 en 2005) en vliegtuiggeluidbelasting. Deze relatie wordt ook wel de dosis effect relatie genoemd. Dosis effectrelaties zijn niet in alle landen gelijk omdat ze specifiek zijn vastgesteld voor de respons van bewoners in dat land.

Jaarlijks worden berekeningen gedaan van de geluidbelasting ten gevolge van vliegtuiggeluid. De resultaten uit deze berekening worden gebruikt om het aantal ernstig gehinderde en slaapverstoorde mensen te bepalen. Door deze waarden jaarlijks te bepalen verkrijgt men inzicht in het effect dat vliegverkeer van en naar een luchthaven heeft op de leefomgeving en de mate waarop dit verandert. Ook worden deze getallen gebruikt om de effecten te limiteren en daarmee de omgeving bescherming te bieden.

Naast de hinder die ontstaat door geluid heeft het RIVM onderzoek gedaan naar het effect van vliegtuiggeluid op de gezondheid. In het onderzoek is gekeken naar de relatie tussen de geluidbelasting en het voorkomen van hoge bloeddruk en het gebruik van bloeddrukverlagende middelen. RIVM geeft aan dat er voldoende aanwijzingen zijn voor een verband tussen blootstelling aan vliegtuiggeluid en het optreden van hoge bloeddruk. Het is echter niet mogelijk gebleken een drempelwaarde te geven voor deze relatie[20].

2.3.2.2 Lokale luchtkwaliteit

De lokale luchtkwaliteit is afhankelijk van de concentraties van stoffen in de atmosfeer op leefniveau[21] 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_2, fijnstof (PM_{10}, $PM_{2,5}$), ozon en ultrafijnstof zijn van belang voor de (lokale) luchtkwaliteit[22].

NO_2, PM_{10}, $PM_{2,5}$ 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_2) en fijnstof (PM_{10} en $PM_{2,5}$) meegenomen voor de luchtkwaliteit. PM_{10}

[17] Nguyen, T. L., Yano, T., Hiraguri, Y., Morinaga, M., Morihara, T., Nguyen, T. L., ... & Bui, T. L. (2018, December). Long-Term Follow-Up Study of Community Response to Step-Change in Aircraft Noise Exposure around Noi Bai International Airport. In INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings (Vol. 258, No. 4, pp. 3488-3499). Institute of Noise Control Engineering.
[18] Lee, K. J., Park, J. B., Jang, J. Y., Cho, S. M., Lee, S. W., Kim, J. G., ... & Chung, H. K. (1999). Health effects of aircraft noise on residents living near an airport. Korean Journal of Occupational and Environmental Medicine, 11(4), 534-545.
[19] Swift, H. (2010). A review of the literature related to potential health effects of aircraft noise (No. PARTNER-COE-2010-003). Partnership for Air Transportation Noise and Emissions Reduction.
[20] Gezondheidskundige Evaluatie Schiphol 2006, RIVM Briefrapport 630100005/2008, DJM Houthuijs, CMAG van Wiechen, ORP Breugelmans, M Marra
[21] 1,5 meter boven de grond
[22] Luchtkwaliteitsindex : Aanbevelingen voor de samenstelling en duiding (2015), RIVM rapport 2014-0050, A. Dusseldorp et al.

bestaat uit deeltjes met een typische diameter kleiner dan 10 micrometer, $PM_{2,5}$ uit deeltjes met een diameter kleiner dan 2,5 micrometer. Daarnaast wordt ook ultrafijnstof (UFP) onderscheiden. Ultrafijnstof is het bestanddeel van fijnstof ($PM_{0,1}$) met de allerkleinste afmeting: kleiner dan 0,1 micrometer.

Effecten op de gezondheid

De effecten van fijnstof op de gezondheid van mensen is onder andere door de Gezondheidsraad[23] onderzocht. Langdurige blootstelling aan fijnstof kan de volgende effecten hebben[24,25]:

- 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.

Geurhinder

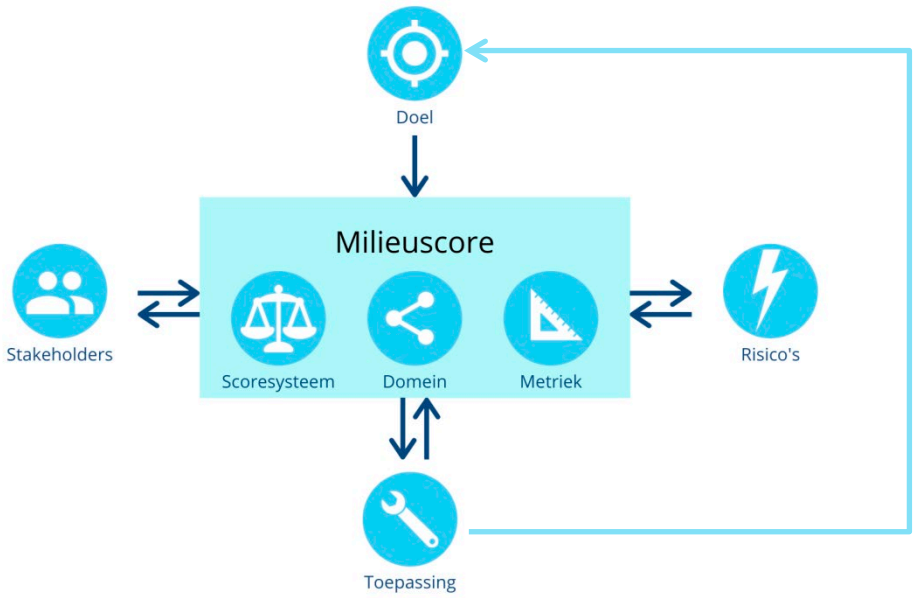
Zoals hiervoor aangegeven stoot een vliegtuigmotor ook kleine hoeveelheden zogenaamde vluchtige organische stoffen uit. Dit zijn restproducten van (onverbrande) kerosine. Deze kunnen leiden tot geurhinder op en nabij de luchthaven. Voor geur gelden provinciale grenswaarden. Mogelijke geurhinder is een vast onderdeel van MER studies. Zo is bijvoorbeeld geurhinder onderzocht in de MER vliegbasis Eindhoven[26]. De voornaamste conclusie was dat de geurconcentratie voor alle destijds berekende scenario's (waaronder dat met 43.000 vliegbewegingen) ter plaatse van de dichtstbijzijnde woning voldeed aan de gestelde (98-percentiel) grenswaarde. Dit betekent dat 98% van de tijd de grenswaarde niet wordt overschreden. Dat de grenswaarde niet wordt overschreden betekent echter niet dat er geen sprake is van geurhinder. Uit een belevingsonderzoek van de GGD Brabant-Zuidoost[27] in 2016 blijkt dat op basis van een steekproef 10% van de inwoners binnen de 20 Ke geluidcontour rondom de luchthaven ernstige geurhinder van het vliegverkeer ervaart.

[23] Gezondheidsraad (2018) Gezondheidswinst door schonere lucht. Gezondheidsraad Nr. 2018/01.
[24] Janssen NA, Hoek G, Simic-Lawson M, Fischer P, van Bree L, ten Brink H, Keuken M, Atkinson RW, Anderson HR, Brunekreef B, Cassee FR: Black carbon as an additional indicator of the adverse effects of airborne particles compared with PM10 and PM2.5. Environ Health Perspect. 2011, 119: 1691-1699. 10.1289/ehp.1003369.
[25] Kovacic, P., & Somanathan, R. (2014). Nitroaromatic compounds: Environmental toxicity, carcinogenicity, mutagenicity, therapy and mechanism. Journal of Applied Toxicology, 34(8), 810–824. doi:10.1002/jat.2980.
[26] Luchtkwaliteit rond de luchthaven Eindhoven, MER luchthaven Eindhoven 2012, A. Hoolhorst, E. Kokmeijer en J.J. Erbrink, NLR-CR-2013-044, juni 2013.
[27] Beleving leefomgeving rondom vliegveld Eindhoven, derde meting 2016, Drs. AM van Gestel en Drs. MJM van Dijnhoven, GGD Brabant-Zuidoost, juli 2017.

3 Ontwerp van een milieuscore

In het vorige hoofdstuk is een overzicht gegeven van de impact van luchtvaartemissies op het klimaat en de leefomgeving. De vertaling van deze impact naar een milieuscore is niet eenvoudig of eenduidig. Het is belangrijk om te realiseren dat de score op vele verschillende manieren kan worden opgebouwd afhankelijk van een aantal overwegingen. Figuur 4 laat zien welke elementen meegenomen kunnen worden in het definiëren van een milieuscore. Deze elementen worden één voor één besproken in dit hoofdstuk. Allereerst dient een doel vastgesteld te worden waar de milieuscore aan bij dient te dragen. Het doel bepaalt welke aspecten van de milieu-impact van vliegen de meeste aandacht verdienen en met welke nauwkeurigheid deze meegenomen moeten worden in de score. De toepassing zou uiteindelijk moeten bijdragen aan het behalen van het doel. Ook belanghebbenden of stakeholders hebben belangen bij en invloed op het ontwikkelen van een milieuscore, aangezien zij ook beïnvloed zullen worden door de score. Het is belangrijk om betrokkenheid te hebben van deze partijen tijdens het opstellen van de score, om draagvlak te hebben voor de implementatie. Vervolgens zijn er ook factoren die de vorm van de milieuscore zelf bepalen; in dit rapport zijn deze gegroepeerd in het scoresysteem, het domein waar de score op van toepassing is en de toegepaste metriek. Tot slot brengt een milieuscore ook risico's en mogelijke negatieve effecten met zich mee, die ook overwogen moeten worden bij het ontwerp van de milieuscore.

Daarom vormen alle aspecten die in dit hoofdstuk beschreven worden een cruciale rol in het definiëren van de "optimale score".



Figuur 4: De opbouw van een milieuscore, bestaande uit alle elementen die behandeld worden in dit hoofdstuk (NLR)

3.1 Doelen en toepassingen

Deze paragraaf beschrijft het opstellen van doelen die een milieuscore dient, en de SMART methode om deze doelen concreet te maken. Vervolgens worden een aantal toepassingen benoemd, waarna voorbeelden van SMART combinaties van doelen en toepassingen gegeven worden.

3.1.1 Doel van een milieuscore

Het definiëren van het doel (of meerdere doelen) van de milieuscore is wellicht de meest bepalende stap in het proces. Het doel geeft richting en helpt bij het vaststellen van de andere aspecten die een milieuscore beïnvloeden. De doelen hangen ook af van de partij die de milieuscore zou opstellen.

In dit rapport wordt een eerste aanzet gedaan voor datgene wat met een milieuscore bereikt kan worden. Hieronder een opsomming van een aantal mogelijke overkoepelende doelen, in willekeurige volgorde:

- terugdringen van klimaatverandering;
- verminderen aantasting van bos- en natuurgebieden;
- verbeteren lokale luchtkwaliteit en geluidbelasting voor omwonenden minimaliseren;
- leidende rol nemen als land in transitie naar schonere luchtvaart;
- betere en efficiëntere beleidsvorming door inzichten in milieu-impact;
- prestaties van stakeholders op milieugebied transparant en inzichtelijk maken;
- prestaties van stakeholders op milieugebied monitoren en verbeteren;
- groei van luchtvaart handhaven;
- consumenten informeren en stimuleren een bewuste keuze te maken;
- inkomsten genereren.

De overkoepelende doelen zijn te abstract en veelomvattend om gericht naartoe te werken. Daarom moeten de overkoepelende doelen vertaald worden naar SMART doelen. SMART staat in dit verband voor[28]:

Specifiek
Er wordt duidelijk geformuleerd waar het om gaat en welk resultaat bereikt dient te worden.

Meetbaar
Iedere onafhankelijke derde moet in staat zijn om na te gaan of het doel daadwerkelijk is gerealiseerd. Van belang is daarom ook om exact de voorwaarden te formuleren waaraan het resultaat zal moeten voldoen.

Acceptabel
De doelen dienen voort te komen uit een gedegen analyse van de luchtvaartsector en geen onacceptabele gevolgen voor stakeholders te hebben.

Realistisch
Het gestelde doel moet realistisch en haalbaar gedefinieerd worden, zodat er kans op succes is. Een uitdagende doelstelling kan opgesplitst worden in kleinere, haalbare stappen (niet onmogelijk, wel uitdagend genoeg).

[28] Universiteit Utrecht, “Smart opstellen van leerdoelen”, URL: https://www.uu.nl/sites/default/files/upper_leerdoelen_smart_opstellen.pdf

Tijdgebonden
Er moet een streeftijd aangegeven worden waarbinnen het doel behaald dient te zijn.

De toepassing, welke wordt beschreven in de volgende paragraaf, kan ook een onderdeel zijn van het formuleren van SMART doelen.

3.1.2 Toepassing van een milieuscore

De toepassing is de manier waarop de milieuscore in praktijk gebracht wordt. Om het doel van een milieuscore te realiseren, is de toepassing van de score van belang. De toepassing bepaalt ook op welke manier stakeholders effecten van de milieuscore gaan ondervinden, waardoor de toepassing voor politieke gevoeligheden kan zorgen. Voorbeelden van toepassingen van een milieuscore zijn:

- de milieuscore wordt vertaald naar een financiële heffing of beloning;
- de milieuscore wordt periodiek openbaar gemaakt;
- de milieuscore wordt gesteld als voorwaarde voor operatie of groei in Nederland;
- de milieuscore wordt gebruikt om sectorbrede of individuele doelen te kwantificeren.

3.1.3 Voorbeelden van SMART doelen gekoppeld aan een toepassing

Een aantal van de algemene doelen die benoemd zijn in paragraaf 3.1.1 zijn als voorbeeld in deze paragraaf verder uitgewerkt tot SMART doel en gekoppeld aan een toepassing.

Toegankelijke Informatievoorziening
Een milieuscore zou de belasting van het milieu in brede zin transparant en inzichtelijk kunnen maken voor verschillende partijen, zoals omwonenden van luchthavens, bedrijven in de luchtvaart, investeerders en de overheid. Wellicht zet de beschikbaarheid van milieuscores actoren al aan om de transitie naar duurzame luchtvaart te versnellen. Passagiers zouden geholpen door de milieuscore bijvoorbeeld bewuster keuzes kunnen maken bij het kopen van een vliegreis. Bij het concept “Naming and shaming” of “Naming and faming” worden partijen aangewezen die respectievelijk het slechtste en het beste presteren op milieuvlak. Dit kan op zich zelf al motivatie bieden om de milieuprestaties te verbeteren en wordt door London Heathrow succesvol toegepast. Een voorbeeld van een SMART doel in dit kader zou kunnen zijn: *Op 1 januari 2022 is van alle luchtvaartmaatschappijen een score te vinden op het gebied van geluidsbelasting, NOx emissies en inzet voor een duurzamere operatie.*

Financiële prikkels
Een milieuscore zou kunnen worden gebruikt om financiële consequenties te onderbouwen. De inkomsten zouden via een fonds beschikbaar gesteld kunnen worden voor verduurzaming van de luchtvaart. Het koppelen van de milieuscore aan luchthavengelden prikkelt partijen financieel om hun impact op het milieu terug te dringen. Zo zouden bijvoorbeeld luchthavengelden voor een vlucht bepaald kunnen worden op basis van de milieuscore van die specifieke vlucht. Dat vereist echter wel een objectieve vaststelling van een milieuscore, die breed gedragen en geaccepteerd wordt door partijen die er letterlijk op worden afgerekend. Momenteel is er in de luchthavengelden van Schiphol al een milieu aspect opgenomen, namelijk een verschil in tarief voor zeven geluidscategorieën en een heffing

voor nachtvliegen.[29] Een SMART doel in deze categorie zou kunnen zijn: *Vanaf 1 april[30] 2022 wordt ook een CO_2 en NO_x component berekend in de tarieven voor vliegtuigen die op Schiphol opstijgen of landen.*
Luchtvaartmaatschappijen zijn niet de enige stakeholders voor wie een financiële prikkel gekoppeld kan worden aan de milieuscore, voor grondafhandelaren of luchtverkeersleiders kan het ook worden toegepast.

Prestaties monitoren en verbeteren
Een milieuscore zou gebruikt kunnen worden om periodiek de stand van zaken op het gebied van duurzaamheid in de luchtvaartsector in kaart te brengen. Dit zou een concrete manier kunnen zijn om specifieke doelen te stellen. Twee voorbeelden van SMART doelen in dit kader zijn: *in 2025 is er een verbetering van 5% in de totale milieuscore voor alle luchtvaartmaatschappijen gerealiseerd ten opzichte van 2019* of *tot en met 2030 is er ieder jaar gemiddeld een verbetering van 2% per jaar geweest in de milieuscore van een luchthaven.*

3.2 Stakeholders

Er zijn veel belanghebbenden, of zogenaamde stakeholders, betrokken bij een milieuscore. De belangrijkste stakeholders in de luchtvaart (niet op volgorde) zijn:

- Overheid
- Luchtvaartmaatschappijen
- Luchthavens
- Luchtverkeersleiders
- Afhandelaars
- Fabrikanten van vliegtuigen en vliegtuigonderdelen
- Passagiers
- Omwonenden
- Vrachtafhandelaars en postbedrijven
- Gebruikers van vrachtfunctie luchthaven: fabrikanten, handelaren en consumenten van goederen die per lucht vervoerd worden
- Natuurbelangenorganisaties
- Brandstofproducenten
- Toerisme industrie

Deze stakeholders hebben allemaal invloed op verschillende aspecten van de luchtvaartsector. Bij het ontwerpen van de score is daarom overleg met betrokken partijen een belangrijke stap in het proces. Bij het ontwikkelen van een milieuscore is het van belang dat in kaart wordt gebracht welke invloed en verantwoordelijkheid de verschillende partijen hebben op de score, zodat de juiste partijen verantwoordelijkheid kunnen nemen voor (een deel van) die score. Als het doel van de score is om partijen te stimuleren hun prestaties te verbeteren, dan moet het mogelijk zijn voor partijen om de score in de goede richting te veranderen. Het vliegen van een specifieke naderingsroute wordt bijvoorbeeld onder andere beïnvloed door luchtverkeersleiding, afhankelijk van de weersomstandigheden en hoe druk het op dat moment is in het luchtruim. De naderingsroute dient vervolgens door de piloten (van een bepaalde luchtvaartmaatschappij) nauwkeurig gevolgd te worden. Uiteraard bepalen nog veel meer factoren de keuze voor een specifieke naderingsroute. Dit voorbeeld toont dat verschillende partijen op een verschillende manier invloed en verantwoordelijkheid hebben op de route en de uitvoering daarvan.

[29] Schiphol, 2020, "Airport charges and conditions 2020", te downloaden via: https://www.schiphol.nl/nl/route-development/pagina/ams-airport-charges-levies-slots-and-conditions/
[30] 1 april is iedere drie jaar de datum dat de nieuwe tarieven en voorwaarden van kracht worden op Schiphol.

3.3 Scoresystemen

Een scoresysteem is een methode om relatieve verschillen in prestaties van verschillende partijen uit te drukken op basis van op voorhand vastgestelde criteria. Voor het opstellen van een scoresysteem bestaan vele uiteenlopende opties. Afhankelijk van het doel van de score in combinatie met de specifieke toepassing kan gekeken worden welk scoresysteem het meest geschikt is. Het systeem zal ook afhankelijk zijn van de mogelijkheden om verschillende elementen te kwantificeren en de manier waarop deze elementen gekwantificeerd worden.

Deze opsomming bevat een aantal voorbeelden van scoresystemen:

- een absolute score opgebouwd uit punten verdiend in verschillende categorieën;
- een strafpuntensysteem waar aanvankelijk met een vaste score wordt begonnen, maar strafpunten toegepast worden voor negatieve milieu-impact;
- een score relatief aan de prestaties van anderen;
- een optelsom van totale maatschappelijke kosten (gemonetariseerde kosten);
- een drempelwaarde waar (elementen van) de score boven moet(en) blijven;
- een range waarbinnen de score zich moet bevinden.

3.3.1 Weegfactoren

Het vaststellen van weegfactoren om tot een milieuscore te komen, is een gevoelig proces. Of geluidhinder zwaarder of lichter wordt gewogen dan bijvoorbeeld de aantasting van natuurgebieden is niet alleen een subjectieve, maar ook een politieke kwestie. De keuze zou in ieder geval zo veel mogelijk gemaakt moeten worden op basis van transparante en meetbare gegevens. In deze paragraaf worden vijf aanpakken voor het opstellen van weegfactoren genoemd:

Doelgerichte aanpak
Het doel van een milieuscore kan leidend zijn in het opstellen van weegfactoren. Als bijvoorbeeld het reduceren van geluidhinder bij omwonenden als voornaamste doel is vastgesteld, zou het logisch zijn om akoestische emissies zwaarder te wegen dan bijvoorbeeld de uitgestoten CO_2.

Aanpak gebaseerd op haalbaarheid, kostbaarheid en effectiviteit van nog mogelijke verbetering
Een andere aanpak is om het gewicht van de factoren af te laten hangen van hoe haalbaar, kostbaar en effectief het is om een bepaalde verbetering door te voeren. Een voorbeeld waar het opstellen van weegfactoren op mogelijkheid tot verbetering is uitgevoerd is de Heathrow League Table (zie hoofdstuk 6), waar afwijkingen van gelande routes en daalprofielen ongeveer drie keer zo zwaar gewogen zijn als score elementen volgend uit de motorcertificatie. De luchtvaartmaatschappij heeft namelijk bij iedere vlucht de kans om zich te verbeteren op track keeping (het vliegen van de geplande route) en CDA violations (het afwijken van een constant dalingsprofiel), terwijl voor betere motorprestaties al vrij snel een ingrijpende en kostbare verandering van de vloot nodig is. Zo kan bijvoorbeeld een uit te voeren verbetering, die gemakkelijk, goedkoop en effectief is een hoge factor toebedeeld krijgen, terwijl een uit te voeren verbetering die moeilijk en duur is om door te voeren een lage factor zou kunnen krijgen.

Geen weegfactoren
Een andere optie is het scoren op meerdere gebieden, zonder een onderlinge hiërarchie aan te brengen. In dit geval zou een partij naast elkaar scores krijgen op allerlei facetten van de operatie, en worden al deze scores ook apart gepresenteerd, zonder gewogen samengevoegd te worden tot één score. Dit lijkt meer op een MER, waar ook op

meerdere gebieden een evaluatie wordt uitgevoerd zonder deze achteraf te bundelen tot een enkel cijfer. In dit geval zou een andere partij (zoals de consument of luchthaven) alsnog de afweging zelf maken op basis van dit overzicht, waarmee in feite impliciet alsnog weegfactoren worden toebedeeld op basis van eigen belangen.

Pareto front

Voor maatregelen die een tegengesteld effect op twee elementen in de score hebben, kan een Pareto front helpen in de besluitvorming. Dit is een middel om trade-offs te visualiseren. Een Pareto front visualiseert het samenspel tussen twee (2D) of drie (3D) variabelen waarbij het niet mogelijk is om één van de parameters te verbeteren zonder dat het effect heeft op de andere(n) variabele(n).[31] Middels een Pareto front kan een theoretisch optimum gevonden worden. Een voorbeeld van een handeling waarop een Pareto front toegepast kan worden, is een omvliegroute waarbij minder over bewoond gebied wordt gevlogen. Dit komt geluid en lokale luchtkwaliteit in de leefomgeving ten goede, maar zorgt voor meer uitstoot met averse effecten op bos- en natuurgebieden en klimaat. Hetzelfde geldt bijvoorbeeld voor vertrek vanaf de Polderbaan: het vliegpad gaat relatief lang over relatief minder dichtbevolkt gebied, maar het taxiën naar de baan duurt langer en veroorzaakt zodoende meer emissies.

Optelling van maatschappelijke kosten

In het geval dat de elementen van de milieuscore worden gemonetariseerd, wordt alles uitgedrukt in financiële kosten, meestal voor de maatschappij. Zo zou de atmosferische emissies bijvoorbeeld uitgedrukt kunnen worden in een prijs voor de leefomgeving (medische kosten), bos- en natuurgebieden (kosten conservatiewerk en verlies van biodiversiteit) en klimaat (kosten van lange termijn gevolgen klimaatverandering voor de maatschappij). In dit geval worden alle kosten opgeteld voor een score (de “monetarisering” zoals genoemd in 3.3). Het voordeel van deze methode is dat alle effecten worden uitgedrukt in dezelfde eenheid en weegfactoren daardoor niet bepaald hoeven te worden. Het is echter niet zo dat deze aanpak daarmee eenvoudiger of eenduidiger is, omdat het uitdrukken van bepaalde effecten in geld zeer lastig kan zijn.

3.4 Domeinen

De score kan van toepassing zijn op verschillende domeinen. Hiermee wordt de entiteit bedoeld waarop de milieuscore van toepassing is. In deze paragraaf worden een aantal domeinen beschreven.

Individuele vlucht

In dit geval worden het type vliegtuig en motor, de bezettingsgraad, de route, het brandstofverbruik of de efficiëntie (per vluchtsegment, eventueel inclusief taxiën), de keuze van brandstof (bijvoorbeeld het gebruik van duurzame brandstof, SAF) en andere parameters meegenomen in een score. Een voordeel van een dergelijke aanpak is dat inzichtelijk gemaakt kan worden waar verbetering nodig is, wanneer een nieuwer toestel bijvoorbeeld beter scoort dan een ouder toestel of wanneer de landing niet continu dalend uitgevoerd wordt. Daarnaast is een koppeling mogelijk tussen een score op dit domein en landingsgelden. Voor deze constructie zou de luchthaven of de lokale overheid de score opstellen en aan de luchtvaartmaatschappij geven. De beschikbaarheid van data van de luchtverkeersleiding of de luchtvaartmaatschappij is nodig om een dergelijke score op te stellen.

Individuele reis (deur tot deur)

In dit geval wordt niet alleen de vlucht, maar de gehele reis van deur tot deur meegenomen in de score. Hiermee wordt voorkomen dat de verantwoordelijkheid van een duurzamere vliegreis slechts bij de betrokken

[31] Science Direct Website, 2020; Topics: Paretho Front. URL: https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/pareto-front (bezocht op 10-04-2020).

luchtvaartsectorpartijen ligt en/of dat onterecht (voor een gedeelte van de reis) voor andere modaliteiten wordt gekozen. Deze score zou het gevolg zijn van een samenspel tussen meerdere stakeholders, waarbij ook de keuzes van de passagier van belang zijn. Tijdens alle fases van de reis wordt de score beïnvloed. Een voordeel hiervan is dat KPIs en verbeterpunten tijdens de gehele reis inzichtelijk gemaakt worden voor vele stakeholders. Voor een dergelijk beoordelingssysteem moet helder geformuleerd worden wat het doel is van de score, wie deze opstelt, en aan wie deze wordt uitgedeeld, bijvoorbeeld de passagier of alle stakeholders die deel uitmaken van de reis.

Score per actor

Een milieuscore zou ook breder toegepast kunnen worden dan op individuele reisbewegingen. Wanneer slechts naar individuele reizen wordt gekeken, wordt breder beleid op het gebied van duurzaamheid niet meegenomen. Als een luchtvaartmaatschappij bijvoorbeeld innovatieve oplossingen zoekt voor gewichtsbesparing en recycling en in de gehele keten, of binnen het eigen bedrijf elektrisch rijden stimuleert of zo min mogelijk reizen met het vliegtuig maakt, zou dit mee kunnen worden genomen in de milieuscore. Zo zouden luchtvaartmaatschappijen, luchthavens (zie het KvB 2019 project “Duurzaamheidsindicatoren voor luchthavens”, NLR-TR-2019-535, februari 2020), grondafhandelaars, luchtverkeersleiders en/of passagiers een eigen milieuscore kunnen ontvangen. Een dergelijke milieuscore zou ook periodiek kunnen worden uitgedeeld. Op basis van geaggregeerde data over een bepaalde periode (dag, week, maand, jaar) zou een score kunnen worden uitgedeeld. In dit geval kan gewerkt worden met een doelstelling, en uitgedrukt worden hoeveel procent van de tijd een actor het target heeft gehaald.

Nederlandse luchtvaart

De milieuscore kan ook gegeven worden aan de gehele Nederlandse luchtvaart. In dit geval is van individuele actoren, vluchten of momenten niet zichtbaar hoe er gepresteerd is, maar wordt de luchtvaart als geheel gemotiveerd om te verbeteren. Zo zou geaggregeerde CO_2, NO_x, geluidbelasting en fijnstofuitstoot meegenomen kunnen worden. Bij dit domein moet wel gelet worden op overlap met de periodieke MER.

3.5 Metriek

De metriek voor een milieuscore kan significante invloed hebben op hoe partijen scoren ten opzichte van elkaar. In dit hoofdstuk worden een aantal opties voor de eenheid en de tijdsschaal die worden gebruikt in een milieuscore genoemd. Dit is geen uitputtend overzicht.

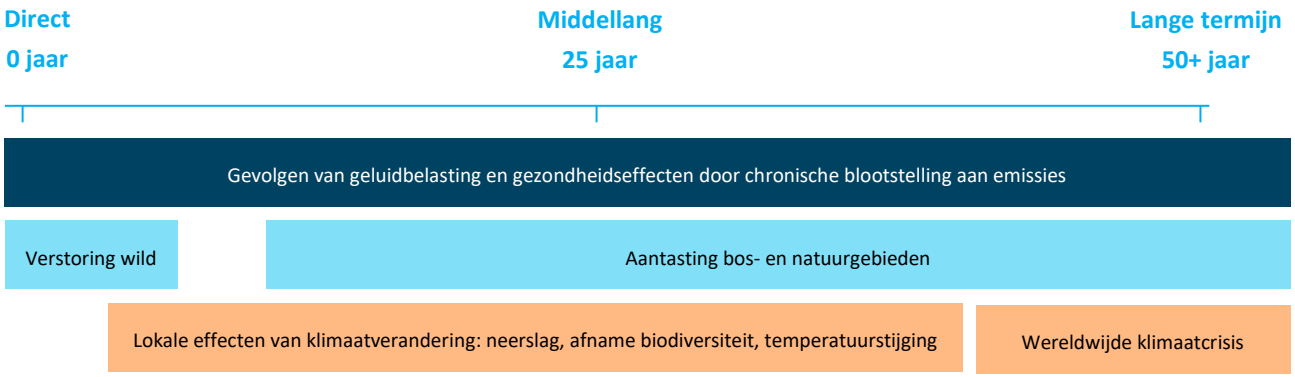
3.5.1 Eenheid

Afhankelijk van de gekozen score-opbouw kunnen per onderdeel verschillende eenheden gebruikt worden, maar er kan ook consequent één eenheid gekozen worden voor de gehele score. De uiteindelijke keuze van eenheid volgt onder andere uit het gekozen scoresysteem (sectie 3.3) en het domein (sectie 3.4). Voorbeelden van eenheden waarmee gerekend kan worden zijn:

- per passagier (bijv. CO_2, NO_x, ernstig gehinderden)
- per km (bijv. CO_2, NO_x, ernstig gehinderden)
- per pax-km (bijv. CO_2, NO_x, ernstig gehinderden)
- cumulatief voor de gehele vlucht/reis
- Euro per pax, km, vliegbeweging, per BBP contributie
- per kilogram nuttige lading (voor vrachtvluchten)

3.5.2 Tijdsschaal

De metriek zou ook gekoppeld kunnen worden aan de tijdsschaal van de milieueffecten van luchtvaart. De tijdsschaal van milieueffecten van de luchtvaart loopt significant uiteen. Figuur 5 geeft een indicatie van de verwachte tijdschalen van verschillende milieueffecten van de luchtvaart, op basis van de effecten zoals beschreven in hoofdstuk 2 en hun respectievelijke tijdschalen.



Figuur 5: Tijdschaal

3.6 Mogelijke risico's

Het is mogelijk dat de milieuscore, ondanks dat deze bijdraagt aan het gestelde doel, ook negatieve effecten met zich meebrengt. De averse effecten die een milieuscore teweeg kan brengen, zijn wederom sterk afhankelijk van de gekozen scorestructuur en het domein. Zo zou een score voor luchtvaartmaatschappijen hoofdzakelijk gericht op vermindering van geluidoverlast hele andere bijeffecten hebben dan een geaggregeerde multi-stakeholder score voor de gehele Nederlandse luchtvaart. Desalniettemin worden in deze paragraaf een aantal risico's genoemd die aandacht verdienen bij het ontwerp van een milieuscore.

Invloed van weging
Een lage weging voor een bepaald onderdeel van de milieuscore kan er voor zorgen dat negatieve milieu-impact in dat gebied toeneemt. Zo direct mogelijk vliegen om brandstof te besparen kan bijvoorbeeld weer extra geluidhinder geven en bepaalde bos-/natuurgebieden belasten. In gevallen waar een ingreep twee milieubelangen tegengesteld beïnvloedt, zou een Pareto front toegepast kunnen worden zoals beschreven in paragraaf 3.4.

Aantasten van innovatie- of duurzaamheidsbudgetten
Wanneer een score wordt gekoppeld aan financiële consequenties voor luchtvaartmaatschappijen, zal dit de operationele kosten beïnvloeden. Wanneer deze nieuwe kosten te hoog zijn, kan dit er voor zorgen dat er minder budget overblijft voor investeringen om de milieu-impact te verlagen. Dit zorgt weer voor minder verbetering in de score en daardoor weer meer kosten, waardoor juist een vicieuze cirkel van geremde verbetering ontstaat. Voor een luchthaven zou hetzelfde kunnen gelden. Om dit te voorkomen, zouden opbrengsten van de score direct in duurzaamheid geïnvesteerd kunnen worden. Ook zou een vorm gezocht kunnen worden waar de score gebonden kosten niet bovenop huidige kosten komen, maar dat andere componenten in prijs verlaagd worden waardoor er niet

direct een grote stijging in kosten is. Hoe dit precies zou werken, hangt weer af van de gekozen vorm en welke instantie de milieukosten heft.

Aantrekkelijkheid Nederland voor internationale luchtvaart

Wederom in het geval dat er voor luchtvaartmaatschappijen financiële consequenties verbonden worden aan milieuscores, zou dit ook de aantrekkelijkheid van Nederland en specifiek Schiphol beïnvloeden. Als er bij iedere start en landing vanaf Schiphol extra kosten gemaakt worden die niet gelden in nabijgelegen Europese hubs, zou het kunnen dat luchtvaartmaatschappijen met grote toestellen Schiphol minder aantrekkelijk vinden als luchthaven dan voorheen. De verdere ontwikkeling van Schiphol valt buiten de beschouwing van deze studie, maar dit effect kan in ieder geval mee worden genomen in het ontwerp van een score. Een oplossing hiervoor zou zijn om de score op Europees niveau op te stellen. EASA is momenteel bezig met het ontwikkelen van een ecoLabel.[32]

Verschuiving in plaats van vermindering uitstoot

Wanneer financiële maatregelen gebonden aan een milieuscore worden toegepast voor vluchten die opstijgen of landen in Nederland, zou dit ertoe kunnen leiden dat luchtvaartmaatschappijen hun nieuwere, schonere en stillere toestellen op routes van en naar Nederland inzetten. Dit is positief voor de Nederlandse leefomgeving en bos- en natuurgebieden, maar een positieve score op klimaat geeft eigenlijk een scheef beeld omdat de minder schone toestellen vooralsnog vliegen en uitstoten in het buitenland, en er op de totale som van de luchtvaartmaatschappij weinig verandert. Dit zou geadresseerd kunnen worden middels een score die de gehele vlootsamenstelling (ook buiten Nederland) meeneemt. Een spiegelbeeldig risico van geen tarieven invoeren gekoppeld aan een milieuscore, terwijl buitenlandse luchthavens dit wel doen, is dat Nederland de minder schone en minder stille toestellen krijgt.

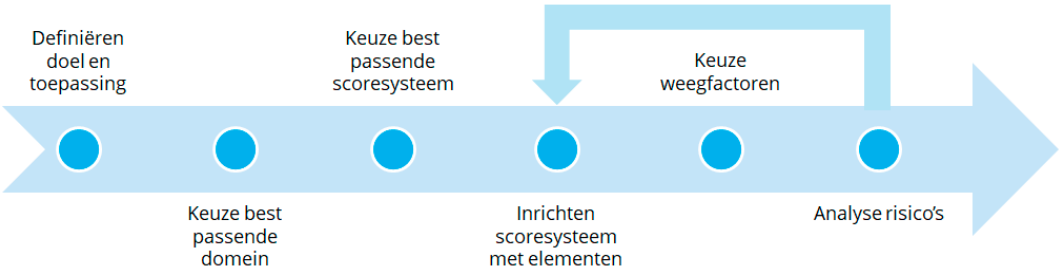
Ongelijkheid versterken

Er dient rekening mee gehouden te worden dat de partijen die een milieuscore ontvangen niet allemaal in dezelfde financiële en logistieke positie zijn om hun milieu impact te verbeteren. Wanneer passagiers of andere bedrijven dan door een matige milieuscore ontmoedigd worden om met sommige partijen te werken, kan dit een significant effect hebben op concurrentie en marktmechanismes.

3.7 Aanpak ’optimale score’

Het vaststellen van een milieuscore is een proces waarbij de volgende aspecten een rol spelen: doel, toepassing, stakeholders, het scoresysteem, domeinen en metriek. De ‘optimale score’ kan daarom niet op voorhand worden vastgesteld maar is het resultaat van verschillende keuzes die gemaakt worden met betrokken stakeholders. Het doel heeft de meeste invloed op de score. Als het doel wijzigt, dan zal de “optimale score” – en methode om die vast te stellen – ook wijzigen. Andere elementen zoals het domein, de metriek en de tijdlijn worden gekozen zodat ze het beste passen bij het doel en de toepassing van de score. In Figuur 6 wordt het proces om een milieuscore te definiëren weergegeven.

[32] https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/The%20European%20Plan%20for%20Aviation%20Safety%20%28EPAS%29%202019-2023%20%E2%80%93%20Summary%20Leaflet.pdf



Figuur 6: Proces om tot milieuscore te komen

Wanneer een keuze is gemaakt voor de opbouw van een milieuscore, volgt het kwantificeren van de verschillende onderdelen van de score. Als we de volledige breedte van hoofdstuk 3 doortrekken, zouden de opties voor kwantificeren te veel en te wijd uiteenlopend zijn om adequaat te kunnen beschrijven. Om deze reden, is vanaf hier gekozen om het domein van de individuele vlucht verder te bekijken in dit rapport. De volgende hoofdstukken hebben dus betrekking op het kwantificeren van milieu impact van individuele vluchten. Als een 'optimale score' deels bestaat uit resultaten verkregen uit beschikbare modellen, zal op voorhand een verificatie en validatie kunnen plaatsvinden. Dit kan modelresultaten dichter tot de werkelijke situatie brengen, maar ook zorgen voor een grotere mate van vertrouwen onder de verschillende spelers waarop de Milieuscore op van toepassing is.

4 Emissies en impact van individuele vluchten

Om tot een score te kunnen komen is het van belang om de verschillende emissies te kunnen inventariseren, te kwantificeren en waar mogelijk te kunnen vergelijken. Ook is het relevant om in kaart te brengen welke stakeholders verantwoordelijk zijn voor een bepaald type uitstoot.

Emissies van individuele vluchten worden in grote lijnen beïnvloed door: het type vliegtuig in combinatie met het type motor en de operatie. Het nieuwste vliegtuig kan theoretisch zuiniger en stiller zijn dan een oud toestel, echter kan de uitstoot alsnog toenemen als het vliegtuig lager vliegt met een hoger vermogen.

4.1 Certificeringsgegevens

Bestaande scoresystemen, zoals luchthavengelden, zijn vaak gebaseerd op certificeringsgegevens van vliegtuigen en/of motoren. Het scoresysteem gebruikt deze gegevens om vliegtuigen in te delen in categorieën of direct met elkaar te vergelijken. Dit kan door grenswaardes aan te houden of de afstand tot de grenswaarde te vergelijken. Het doel van de score kan echter sterk afwijken van het doel waarmee certificeringsgegeven binnen ICAO tot stand zijn gekomen.

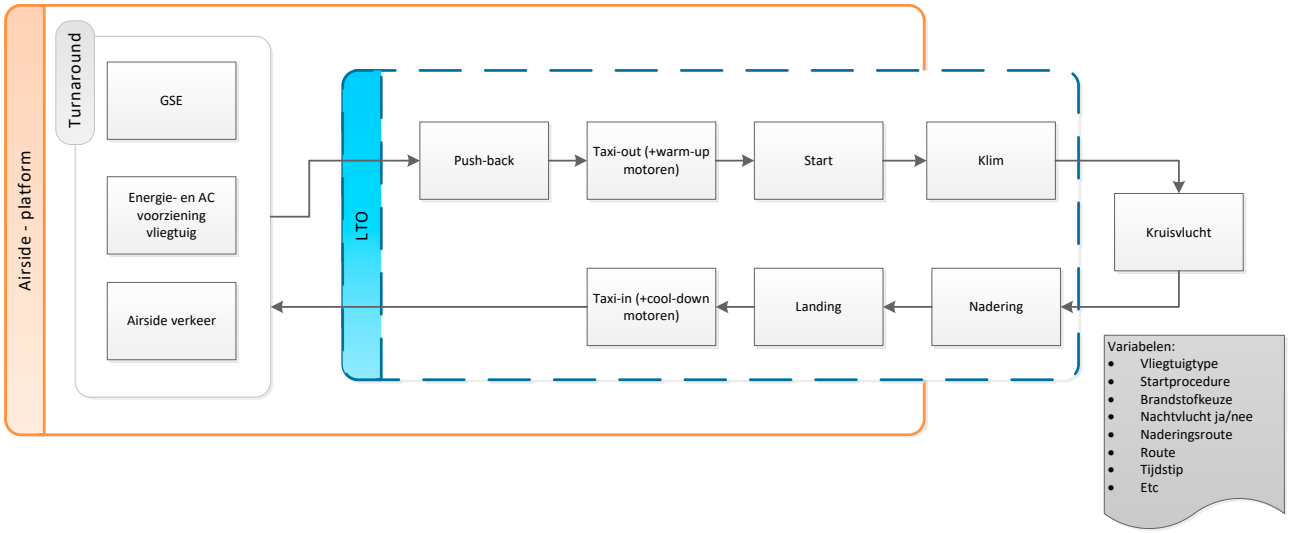
De ICAO Committee on Aviation Environmental Protection (CAEP) stelt technologiedoelen, ontworpen volgens het principe “challenging but achievable”, om ervoor te zorgen dat nieuwe technologieën bijdragen aan het reduceren van de milieu-impact van de luchtvaart. CAEP vertaald deze doelen in standaarden welke beschreven staan in Annex 16 Volumes I, II en III voor zowel het vliegtuig als de motor. De certificatie eisen (standaarden) voorkomen een technologische terugval.

Certificatiegegevens zijn vaak gebaseerd op data gemeten tijdens specifieke operationele omstandigheden. Omdat certificatiegegevens onder gecontroleerde omstandigheden worden bepaald, is het gebruik hiervan niet altijd de beste oplossing voor een specifieke milieuscore van een vlucht onder (waarschijnlijk) andere omstandigheden. Zo kan de motor vanwege luchtdruk, temperatuur, of extra belading op een ander vermogen opereren dan tijdens de certificatietest. De certificatiegegevens bieden echter ook voordelen: deze gegevens zijn algemeen bekend, liggen vast en zijn gebonden aan het vliegtuigtype en/of de motor. Dit maakt de score voorspelbaar voor partijen. Dit hoofdstuk is daarom gericht op het inventariseren en kwantificeren van emissies van individuele vluchten op basis van prestatiegegevens van vliegtuigen en motoren in combinatie met operationele parameters zoals de gevlogen route tussen vertrek en bestemming.

4.2 Inventarisatie van de emissie-keten

De emissies die vrijkomen in de luchtvaart kunnen worden gegroepeerd in verschillende onderdelen. In onderstaande Figuur 7 is een schematische uitwerking gegeven van de keten aan globale stappen die plaatsvinden als een vliegtuig vanaf een bepaalde luchthaven naar een bestemming vliegt. Bij al deze stappen komen emissies vrij. Deze emissies verschillen uiteraard in type, hoeveelheid en reikwijdte. Ook de betrokken stakeholders zijn niet voor alle stappen gelijk. Om met een milieuscore groener gedrag te stimuleren is het van belang dat duidelijk is welke partij actie kan

ondernemen op een bepaald onderdeel. Op deze manier wordt de milieuscore onderdeel van een multistakeholder-aanpak waarin het essentieel is dat partijen samenwerken om doelen te bereiken.



Figuur 7: Emissie-keten van een vliegreis

4.2.1 Emissiefactoren en partijen die invloed hebben op deze factoren

In voorgaande sectie is de emissie-keten weergegeven van een vlucht. Per onderdeel hierin wordt in onderstaande tabel weergegeven wat de bijbehorende emissies zijn en welke partijen daarbij betrokken zijn en dus invloed kunnen hebben op deze emissies.

Tabel 1: Overzicht emissie-keten per element inclusief betrokken partijen

Element	***Emissies***	***Partijen die invloed hebben op deze emissies***
Ground Support Equipment Ground Support Equipment wordt ingezet om het vliegtuig te ondersteunen op verschillende manieren wanneer het staat opgesteld op het platform. Dit zijn (afhankelijk van het vliegtuigtype dat wordt afgehandeld): ground power units (GPUs), air climate units, towtugs/pushbacks, baggagebanden, passagierstrappen, vorkheftrucks, tractoren, vrachtladers, etc.[33] [34]	CO_2, CO, NO_2, HC, PM_{10}, $^{PM}_{2.5,}$ ^{VOC}[35] Geluid	Grondafhandelaar, luchthaven, luchtvaartmaatschappij
Energie en pneumatische druk Energie en pneumatische druk wordt doorgaans geleverd door de Auxiliary Power Unit (APU). Dit is een extra motor aan boord van het vliegtuig dat de energie levert voor functies anders dan de voortstuwing. Ze leveren bijvoorbeeld energie voor het starten van de hoofdmotoren. Daarnaast leveren ze ook pneumatische druk voor andere systemen zoals de airconditioning van het vliegtuig. De functies van de APU kunnen worden overgenomen door diverse GSE en walstroom	SO_2, THC, CO, NO_x, PM, roet[36] Geluid (bij inzet APU)	Luchtvaartmaatschappij, luchthaven

[33] https://www.icao.int/publications/Documents/9889_cons_en.pdf
[34] https://www.zurich-airport.com/~/media/flughafenzh/dokumente/das_unternehmen/laerm_politik_und_umwelt/luft/2014_gse_emissionmeth_zrh.pdf
[35] https://www.nap.edu/read/22084/chapter/4#11

Element	*Emissies*	*Partijen die invloed hebben op deze emissies*
Airside verkeer Alle voertuigen, zoals auto's, busjes die rondrijden op het afgesloten stuk airside ten behoeve van de vertrekkende en aankomende vluchten.	CO_2, CO, NO_2, HC, PM_{10}, $^{PM}_{2.5,}$ ^{VOC} [37] Geluid	Grondafhandelaar, luchthaven, luchtvaartmaatschappij
Warm-up motoren Voor vertrek dient een vliegtuig de motoren op te warmen. Gedurende drie minuten worden de motoren opgewarmd in 'idle' stand. Dit kan voor of tijdens de push-back geïnitieerd worden, of bij het taxiën.	CO_2, H_2O, NO_x, SO_2, CO, HC, PM, roet Geluid	Luchtvaartmaatschappij
Pushback Om van de vliegtuigopstelplaats naar de taxibaan te komen, wordt het vliegtuig achteruit weggeduwd en gekeerd door een push-backtruck.	CO_2, NO_x, CO, HC Geluid	Luchtvaartmaatschappij, grondafhandelaar
Taxi-out Na pushback taxiet het vliegtuig naar de startbaan toe.	CO_2, H_2O, NO_x, SO_2, CO, HC, PM, roet Geluid	Luchtvaartmaatschappij, luchtverkeersleiding, luchthaven (beleid en ontwerp)
Opstijgen Zodra het vliegtuig toestemming heeft om te starten, kan het opstijgen. De hoeveelheid brandstof die wordt gebruikt en de hoeveelheid geluid die uitstraalt op de omgeving hangt o.m. af van de gekozen startprocedure.		Luchtvaartmaatschappij, luchtverkeersleiding, luchthaven (beleid en ontwerp)
Kruisvlucht Zodra het vliegtuig op kruishoogte is gaat het verder met de kruisvlucht. Het brandstofgebruik hangt o.a. af van de hoogte, gevlogen route, de snelheid en de weersomstandigheden.		Luchtvaartmaatschappij, luchtverkeersleiding
Landen Voor het landen kan gekozen worden uit verschillende procedures die van invloed zijn op de hoeveelheid en projectie van geluid en de emissies. Bij touch-down kan gebruik worden gemaakt van reverse-thrust. Hier zijn regels aan gebonden omdat dit extra geluid produceert. Aan de andere kant vermindert het slijtage van de remmen.		Luchtvaartmaatschappij, luchtverkeersleiding, luchthaven (beleid, ontwerp)
Taxi-in Nadat het vliegtuig veilig is geland taxiet het vliegtuig van de baan naar de gate. Dit kan op verschillende manieren worden gedaan, bijvoorbeeld all- of reduced engine taxi.		Luchtvaartmaatschappij, luchtverkeersleiding, luchthaven (beleid, ontwerp)
Cool-down motoren Op de luchthaven aangekomen moeten de motoren nog 2 tot 3 minuten cool-down krijgen, hier ook in idle, voordat ze worden uitgeschakeld. De taxi-tijd is doorgaans voldoende om de cool-down te voltooien.		Luchtvaartmaatschappij

[36] https://www.researchgate.net/publication/225055075_Determination_of_the_emissions_from_an_aircraft_auxiliary_power_unit_APU_during_the_Alternative_Aviation_Fuel_Experiment_AAFEX
[37] https://www.nap.edu/read/22084/chapter/4#11

4.3 Elementen die impact hebben op klimaat

De klimaatimpact van vliegverkeer wordt veroorzaakt door de uitstoot tijdens de gehele vlucht en alle processen om de vlucht heen (zoals taxiën, motor opwarmen, etc.). Maar niet alleen de hoeveelheid uitstoot, maar ook de hoogte en locatie van de uitstoot zijn van belang.

Een aantal parameters waarvan de klimaatimpact van een vliegbeweging afhankelijk is en die meegenomen zouden kunnen worden in de score zijn:

- Vliegtuigtype (in combinatie met motortype en uitvoering)
- Brandstofsoort
- Vlieghoogte (tijdens de kruisvlucht, incl. variatie in vlieghoogte)
- Wind
- Locatie (lengtegraad en breedtegraad)
- Route (afwijking van grootcirkelafstand)
- Vliegprocedure (o.a. cost index)
- Gewicht van het vliegtuig
- Moment van de dag

Uit de lijst kan een set elementen worden gekozen op basis van de gewenste manier van scoren. Afhankelijk van de beschikbaarheid van data kan vervolgens de milieuscore bepaald worden. Als voorbeeld kan op basis van een standaard of optimaal profiel/route een standaard score worden bepaald. Vervolgens kan afhankelijk van de afwijking ten opzichte van het standaard profiel/route de klimaatscore worden afgeleid. De gekozen elementen zijn mede afhankelijk van wie er gescoord wordt. Zo hebben vliegmaatschappijen invloed op bepaalde elementen, waar luchtverkeersleiders invloed hebben op andere elementen.

Vliegtuigtype
Het vliegtuigtype in combinatie met de motor bepaalt het brandstofverbruik tijdens de vlucht en is daarmee direct gerelateerd aan de uitstoot van uitlaat gassen. Over het algemeen geldt, hoe zwaarder het vliegtuig, hoe hoger het brandstofverbruik. De efficiëntie van het vliegtuig speelt ook een belangrijke rol. Nieuwere vliegtuigen zijn over het algemeen efficiënter en verbruiken daardoor minder brandstof.

Brandstofsoort
Het type brandstof dat wordt gebruikt voor de verbranding speelt een grote rol in de klimaatimpact die een vliegtuig teweeg brengt. Zo kan het gebruik van duurzame drop-in brandstoffen, waterstof of (gedeeltelijke) elektrificatie ervoor zorgen dat de klimaatimpact kan worden gereduceerd.

Vlieghoogte
De weerstand die het vliegtuig ondervindt is afhankelijk van de hoogte en de snelheid (die is o.a. afhankelijk van de hoogte). Hoe hoger het vliegtuig vliegt, hoe minder weerstand het vliegtuig ondervindt. Hiermee gaat het brandstofverbruik omlaag. Toch kan hoger vliegen ook een nadelig effect op het klimaat hebben. Zo is de impact van waterdampuitstoot groter op grotere hoogte vanwege de lage temperatuur die de vorming van condens strepen bevordert.

Wind
Wind kan een positieve maar ook negatieve impact hebben op het brandstofverbruik. Afhankelijk van de windrichting kunnen vliegsnelheid en grondsnelheid behoorlijk van elkaar verschillen. Windrichting en windsterkte kunnen worden meegenomen in het plannen van de route, zodat rugwind nuttig wordt ingezet en tegenwind zoveel mogelijk wordt vermeden.

Locatie
De locatie op aarde waar een vliegtuig zich bevindt heeft een grote invloed op de klimaatimpact van een vlucht. Afhankelijk van de locatie, kan de impact van emissies zoals NO_x en waterdamp en de formatie van condens strepen verschillen.

Route
Routes die afwijken van de grootcirkel route zorgen over het algemeen voor extra brandstofverbruik omdat de totale vliegafstand toeneemt, en daarmee het brandstofverbruik. Dat geldt niet als een route wordt gekozen die gebruik maakt van gunstige windpatronen, waarmee de rugwind de extra afstand compenseert. De toename van de vliegafstand kan dus extra emissies veroorzaken. Een klimaat-optimale route kan in sommige gevallen echter afwijken van de kortste route. Door zowel verticaal als horizontaal de route te verleggen kunnen gebieden worden vermeden waar condens strepen zich gemakkelijker (of überhaupt) kunnen vormen. Het kan voorkomen dat het vermijden van (extra) condens strepen opweegt tegen het verbruiken van extra brandstof als gevolg van een langere route.

Vliegprocedure
Afhankelijk van de gekozen vliegprocedure voor de start en landing verbruikt een vliegtuig meer of minder brandstof en daarmee worden meer uitlaatgassen uitgestoten. Zo wordt een kosten index functie in de flight management computer (FMC) gebruikt om een optimale waarde te vinden tussen kosten voor brandstof en tijdgebonden kosten. Zo een index zou op een soortgelijke manier toegepast kunnen worden op emissies.

Gewicht van het vliegtuig
Zelfs tussen vliegtuigen van hetzelfde type kan het gewicht van het vliegtuig verschillen. Zo kan een vliegtuig vol beladen vertrekken maar ook terwijl er nog veel ruimte of gewicht over is. Dit kan op twee manieren worden benaderd. Enerzijds verbruikt het vliegtuig meer brandstof als het vliegtuig zwaarder is, maar tegelijkertijd vervoert het waarschijnlijk ook meer passagiers of vracht. Hierdoor kan het zo zijn dat de uitstoot per persoon of per kilogram vracht omlaag gaat. Daarnaast kan de configuratie van een vliegtuig verschillen waardoor het vliegtuiggewicht verandert.

Moment van de dag
Het moment van de dag kan invloed hebben op de klimaatimpact van een vliegtuig doordat de impact van condens strepen verandert met het moment van de dag. Zo weerkaatsen condens strepen de warmte van de aarde gedurende de nacht en overdag, maar vindt er geen weerkaatsing van straling van de zon plaats in de nacht.

4.4 Elementen die impact hebben op leefomgeving

Er zijn twee vluchtelementen die impact hebben op de leefomgeving. Het eerste element is de emissie van stoffen die een verandering van de luchtkwaliteit teweeg brengt en depositie van giftige stoffen veroorzaakt. Het andere element is de verstoring van de leefomgeving door geluidemissies van het vliegverkeer. De factoren die van invloed zijn op luchtkwaliteit, depositie en geluid worden in de volgende paragrafen beschreven. Hierbij is een onderscheid gemaakt tussen emissies van uitlaatgassen en geluid.

4.4.1 Lokale emissies van uitlaatgassen

De luchtkwaliteit en depositie van uitlaatgassen wordt beïnvloed door een aantal stoffen dat uit de uitlaat van een vliegtuigmotor komen. De belangrijkste stoffen zijn NO_x, fijnstof, SO_x en vluchtige organische verbindingen (VOC's)[38,39]. Voor de impact van emissies op leefomgeving en bos- en natuurgebieden is voornamelijk de fase rondom de LTO-cyclus van belang.

Een aantal belangrijke factoren die bepalen wat het effect is van een vlucht op de luchtkwaliteit, zijn hieronder uitgelicht.

- Landing of start
- Baan en route
- Vliegprocedure
- Vliegtuigtype
- Brandstofsoort
- Grondgebonden activiteiten

Landing of start
Het vereiste motorvermogen is verschillend tijdens de start en landing van het vliegtuig. Zo wordt bij de start vaak tussen 70% en 100% van het motorvermogen gevraagd terwijl er tijdens de landing slechts een klein deel van het vermogen nodig is. Het motorvermogen bepaalt voor een belangrijk deel het brandstofverbruik. Ook is de uitstoot van NO_x gerelateerd aan de druk en verbrandingstemperatuur in de motor en zal bij een hoog motorvermogen (hoge druk en temperatuur) de NO_x-uitstoot toenemen.

Baan en route
De baan en de gevlogen route bepalen niet zozeer de hoeveelheid uitstoot, maar wel de locatie waar de uitstoot plaatsvindt. Zo zorgt een route vanaf een baan met route over onbewoond gebied over het algemeen voor minder luchtkwaliteitsoverlast dan een route over een stad.

Vliegprocedure
Afhankelijk van de gevlogen vliegprocedure, maakt het vliegtuig gebruik van een bepaalde gashendelstand. Een voorbeeld hiervan is het verschil in gashendelstand tussen een landing met een horizontaal segment en een glijvluchtnadering (CDA). Tijdens een horizontaal segment is meer stuwkracht vereist. De gashendelstand bepaalt de brandstofstroom in de motor. Een hogere gashendelstand zorgt voor meer brandstofverbruik, dit zorgt voor meer

[38] Kilic, D., Huang, R., Slowik, J., Brem, B., Durdina, L., Rindlisbacher, T., ... & Prevot, A. (2014, May). Primary VOC emissions from Commercial Aircraft Jet Engines. In EGU General Assembly Conference Abstracts (Vol. 16).
[39] https://www.easa.europa.eu/eaer/air-quality/aviation-environmental-impacts

uitstoot van de ene stof en minder uitstoot van de andere stof en daarmee een verandering van de luchtkwaliteit. Bovendien wordt bij een hogere gashendelstand meer NO_x geproduceerd vanwege hoge temperaturen en drukniveaus in de verbrandingskamer van de motor.

Vliegtuigtype en gewicht
Het vliegtuigtype en motortype in combinatie met het vliegtuiggewicht bepalen voor een groot deel de brandstofstromen die nodig zijn om op te kunnen stijgen of te kunnen dalen in combinatie met wind, temperatuur en vliegprocedure.

Brandstofsoort
Duurzame brandstoffen bevatten lagere hoeveelheden zwavel en aromaten. Hierdoor is de uitstoot van SO_x en PM een stuk lager; ook de uitstoot van CO en HC is over het algemeen lager; de uitstoot van NO_x blijft vaak ongewijzigd maar kan is sommige gevallen iets lager zijn[40].

Grondgebonden activiteiten
Door het efficiënter maken of veranderen van grondgebonden activiteiten, kunnen de lokale emissies worden gereduceerd. Zo kunnen elektrisch taxiën en het gebruik van GPU's in plaats van APU's, de grondgebonden emissies reduceren.

4.4.2 Geluidemissies

Het aantal ernstig gehinderden (EGH) is een maat die beschrijft hoeveel mensen gehinderd worden door vliegtuiggeluid. Dit aantal wordt berekend met behulp van de L_{den} contouren die jaarlijks voor een luchthaven in kaart worden gebracht. Deze berekening wordt gedaan door de L_{den} waarde op een bepaalde locatie, met een bijbehorend aantal inwoners, te evalueren middels de vastgestelde dosis-effect relatie (DER). Deze relatie is opgesteld binnen de Gezondheidskundige Evaluatie Schiphol (GES) en in 2017 bijgesteld om te corrigeren voor de modelovergang van het Nederlands Rekenmodel (NRM) naar de Doc29 rekenmethodiek.

De mate waarin het aantal ernstig gehinderden wordt verhoogd door een specifieke vlucht kan dienen als een indicator voor milieu-impact. Door middel van, tijdens het project 'Milieuscore' ontwikkelde, software kan de bijdrage aan het aantal jaarlijks ernstig gehinderde mensen door een specifieke vlucht worden berekend. De bijdrage ernstig gehinderden wordt berekend middels een relatie die is vastgesteld voor gemiddelde lange termijn blootstelling en afgenomen vragenlijsten over hinder. Het gebruik van de DER geeft dus geen garantie dat dit voor een enkele vlucht de werkelijke hinder benadert. Ondanks deze limitatie kan deze methode worden gebruikt om inzicht te genereren in verschillen in hinderlijkheid van operaties, omdat een relatie wordt gelegd tussen geluidniveaus, locatie, aantal bewoners en een toenemende mate van hinderlijkheid bij toenemende geluidniveaus. Het gebruik van de DER kan dus worden toegepast om onderlinge verschillen tussen de geluidniveaus op bewoond gebied door vliegoperaties in kaart te brengen. Als het doel van de milieuscore niet is het laten afnemen van hinder, maar enkel de totale hoeveelheid uitgestoten geluid, dan kan de afhankelijkheid van locatie en/of bewonersaantallen worden weggenomen. In dat geval kan bijvoorbeeld met geluidcontouroppervlakten worden gewerkt.

[40] Booz Allen Hamilton. (2018). State of the Industry Report on Air Quality Emissions from Sustainable Alternative Jet Fuels. National Academy of Sciences.

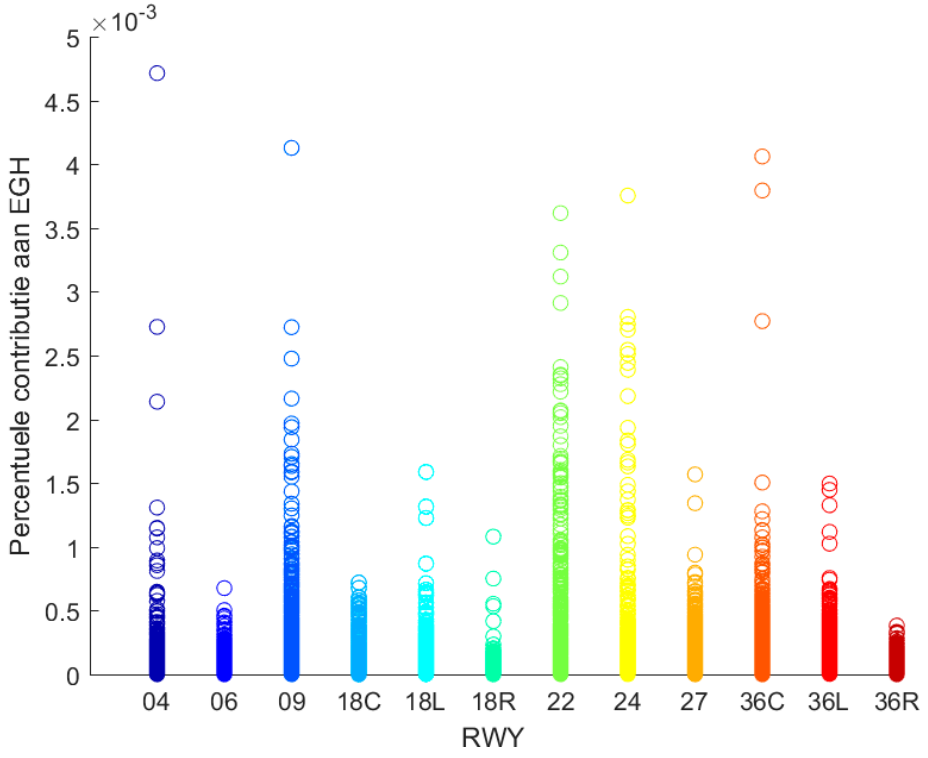
De bovengenoemde EGH-indicator is in grote mate afhankelijk van een aantal variabelen dat verband houdt met de operatie van vliegbewegingen. Deze variabelen zijn:

- Landing of start
- Baan
- Route
- Vliegprocedure
- Vliegtuigtype
- Moment van de dag (dag / avond / nacht)

De EGH-indicator zou mogelijk kunnen worden gebruikt om te sturen op het verminderen van geluidimpact in de omgeving van een luchthaven. Echter zal eerst moeten worden bekeken welke van de bovenstaande elementen of combinatie van elementen de grootste invloed heeft op het aantal EGH en of sturing hierop niet zal leiden tot een perverse werking. Daarnaast is het van belang om diverse varianten van EGH-indicatoren te bepalen, waarbij een correctie op een bepaald element, zoals bijvoorbeeld het aantal passagiers/vracht, wordt toegepast. Daarnaast zou ook kunnen worden nagedacht over een EGH-indicator die rekening houdt met de mate waarop een vlucht bijdraagt aan de spreiding van hinder in de omgeving. Hoe dit precies zal worden vormgegeven zal in het vervolgonderzoek worden uitgewerkt.

In het onderstaande figuur (

Figuur 8) is ter illustratie een eerste uitsplitsing gemaakt, waarbij de bijdrage aan het aantal EGH is geplot voor verschillende banen (RWY) van Schiphol. Elke cirkel in het figuur is een vliegbeweging en laat zien hoeveel deze percentueel bijdraagt aan het totaal aantal ernstig gehinderden in een jaar. Merk op dat er op de verticale as een schaalfactor van 10^{-3} van toepassing is.



Figuur 8: Percentuele bijdrage ernstig gehinderden van individuele vluchten aan het jaartotaal; uitgesplitst naar baan

Het is hier goed te zien dat een operatie vanaf een aantal banen voor een groter aantal ernstig gehinderden zorgt dan anderen. In vervolgonderzoek zal een aantal uitsplitsingen worden gedaan, waardoor beter inzicht wordt verkregen in de impact van de diverse elementen en de sturingsmogelijkheden middels een milieuscore. Hieronder zijn deze elementen nader uitgelegd.

Landing of start
Over het algemeen zijn geluidniveaus tijdens een start hoger dan tijdens de landing. In het geval dat twee dezelfde vliegtuigen over hetzelfde grondpad starten en landen dan zal de bijdrage in ernstig gehinderde hoger uitvallen voor de start. Voor de landing kan echter gebruik van straalomkering (reverse thrust; toegepast voor extra decelleratie) zorgen voor verhoogde geluidniveaus ten opzichte van een landing zonder straalomkering. Op het element landen/starten kan niet worden gestuurd, echter kan wel worden gestuurd op dit element in combinatie met een ander element. Zo kan worden gestuurd op het landen op een bepaalde baan met een specifieke procedure of juist starten op een baan volgens een specifieke route.

Baan
Vanaf welke baan wordt vertrokken of op welke wordt geland is van grote invloed op het aantal ernstig gehinderden. De richting waarin wordt geland of vertrokken bepaald het gebied dat wordt overvlogen. Zo is de bijdrage van landingen op baan 22 (Oostbaan richting het zuidwesten) of 24 (Kaagbaan richting het zuidwesten) van Schiphol in veel gevallen hoger dan bij andere banen omdat er voor een groot deel over Amsterdam heen wordt gevlogen.

Route
Voor de route geldt hetzelfde als voor de baan. Bepaalde routes gaan over gebieden met weinig bebouwing, terwijl anderen over dicht stedelijk gebied liggen.

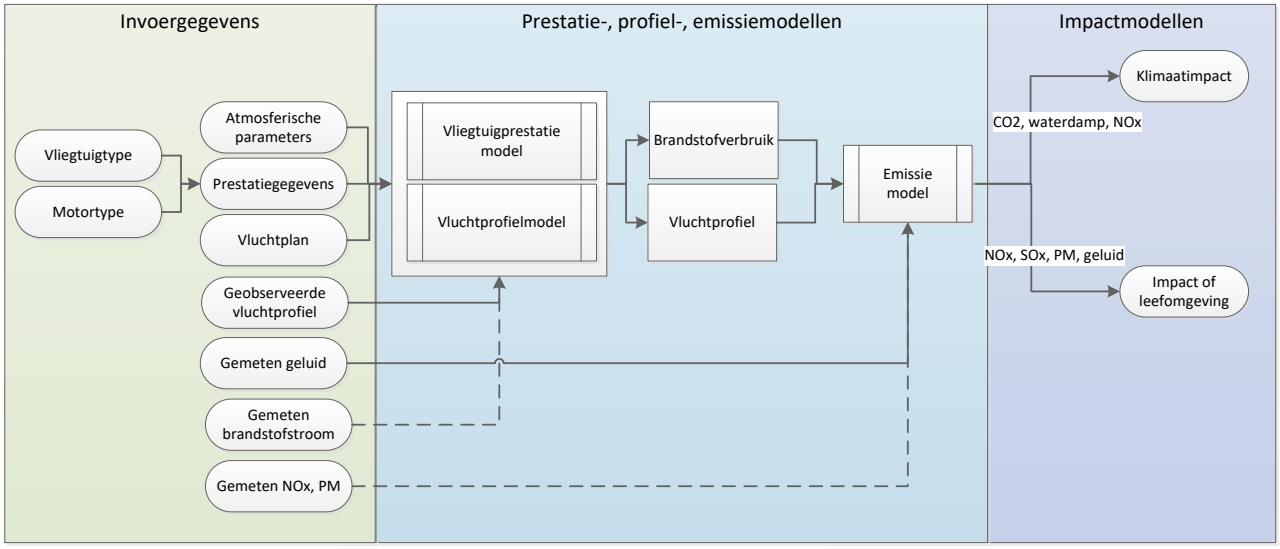
Vliegprocedure
De vliegprocedure beschrijft op welke wijze een vliegtuig start of landt. Zo worden voor starts een aantal verschillende NADP (Noise Abatement Departure Procedure) procedures gehanteerd. Daarnaast is het precieze hoogteverloop afhankelijk van het startgewicht van het vliegtuig. Voor de landingen worden procedures aangehouden waarbij horizontaal of in glijvlucht wordt gevlogen. In de meeste gevallen zou op het moment dat alleen de vliegprocedure varieert (met vliegtuigtype, baan, route en dergelijke constant) voor een landing een CDA voor minder EGH zorgen dan een profiel met een lang horizontaal vluchtsegment op 2000ft (ongeveer 600m) hoogte.

Vliegtuigtype
De verwachting is dat er een sterk verband is tussen vliegtuigtype en de contributie aan het aantal EGH. Daarbij zullen grote en technologisch gezien oudere vliegtuigtypen voor meer ernstig gehinderden zorgen dan een kleiner en/of moderner vliegtuig. Er zal hierbij worden onderzocht of er bij een vertaling naar een milieuscore rekening moet worden gehouden met het aantal passagiers dat wordt vervoerd. Enerzijds als manier van normalisatie en anderzijds om mogelijke substitutie inzichtelijk te maken (e.g. 1 een keer vliegen met een groot vliegtuig i.p.v. 2 of 3 keer met een klein vliegtuig).

Moment van de dag (dag / avond / nacht)
Het moment van de dag bepaalt de straffactor voor vliegtuiggeluid. Zo wordt bijvoorbeeld het geluidniveau (Leq) van vluchten die in de nacht wordt uitgevoerd met 10dB opgehoogd. Een dergelijke vlucht heeft zal hierdoor, bij gelijke omstandigheden (afgezien van dag/nacht), voor een groter aantal EGH te zorgen. Ditzelfde geldt voor avondvluchten, deze krijgen een 5dB ophoging toegewezen ten opzichte van een dagvlucht.

5 Invoergegevens en modellen voor het bepalen van een score

Dit hoofdstuk beschrijft op welke manier de milieu-impact van de luchtvaart gekwantificeerd kan worden. De score kan worden gebaseerd op certificatie parameters, operationeel gebruik en meetgegevens van individuele vluchten. Hierdoor ontstaat een score voor een vlucht die afhankelijk is van de prestatiegegevens en vluchtgegevens van een vliegtuig/vlucht. Een overzicht van de mogelijke invoer parameters en modellen voor de ontwikkeling van een milieuscore zijn schematisch weergegeven in Figuur 9.



Figuur 9: Schematische weergave van een milieuscore-model

Dit hoofdstuk beschrijft allereerst de brondata die nodig is om een berekening te kunnen maken met een model. Vervolgens worden enkele van de (binnen NLR beschikbare) modellen die gebruikt kunnen worden om profielen, prestaties en emissies te berekenen beschreven. Uiteindelijk zullen de emissies omgezet moeten worden naar een score die afhankelijk is van de impact van deze emissies. De modellen die beschikbaar zijn voor de berekening van impact van de emissies worden in de laatste paragraaf besproken.

5.1 Invoergegevens

Er bestaat een groot aantal bronnen dat invoer levert voor allerlei modellen. Deze bronnen geven informatie over bijvoorbeeld geluid, emissies en vliegprestaties. Hieronder zijn een aantal voorbeelden gegeven van dit soort bronnen:

ICAO Aircraft Engine Emissions Databank (AEED): de database bevat emissiegegevens van vliegtuigmotoren gemeten volgens de procedures van ICAO Annex 16 Volume II en waar aangegeven, is de data ook gebruikt voor certificatie. Er wordt informatie gegeven over motoren die in productie zijn of in productie zijn geweest. De database is openbaar beschikbaar. EASA onderhoud de databank en plaatst updates hiervan op hun website[41]. Deze gegevens kunnen worden gebruikt als bron voor bijvoorbeeld emissiemodellen voor de berekening van NO_x, CO en HC.

[41] https://www.easa.europa.eu/easa-and-you/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank

Base of Aircraft Data (BADA): de database bevat prestatiegegevens van vliegtuigtypes. Dit zijn onder andere gegevens over het maximum startgewicht, zwaartepunt en maximum hoogte, maar ook typisch te verwachten snelheidsverloop, vliegprofiel, vliegconfiguraties en brandstofverbruik. Deze gegevens worden als invoer gebruikt voor vliegtuigprestatiemodellen en vliegprofielmodellen[42]. De database is in beheer bij EUROCONTROL. Er gelden licentievoorwaarde voor het gebruikt van deze gegevens. In de licentie staat vermeld dat deze data niet gebruikt mag worden om individuele vliegtuigtypes met elkaar te vergelijken, wat het lastig maakt om te gebruiken voor het scoren van vliegbewegingen.

Aircraft noise and performance (ANP) database: de database bevat voor meer dan 150 verschillende vliegtuigtypen geluid en prestatiegegevens en kan gebruikt worden voor het modelleren van profielen en het berekenen van geproduceerd geluid middels het Doc29 model. De data, gebruikt voor het samenstellen van de ANP database, is afkomstig van vliegtuigfabrikanten.

EASA certification noise levels: EASA publiceert frequent de geluidcertificatieniveaus van vliegtuig-/motorcombinaties. Dit doen zij voor verschillende vliegtuigcategorieën, te weten: straalvliegtuigen, zware propellervliegtuigen, lichte propellervliegtuigen en hefschroefvliegtuigen (zoals helikopters).

OpenAP: de database bevat prestatiegegevens van vliegtuigtypes uit openbare bronnen. De database is ontwikkeld zodat er geen licentierestricties van toepassing zijn op het gebruik van de data. De prestatiegegevens zijn vergelijkbaar met de gegevens uit BADA, echter bevat de database een select aantal vliegtuigtypes.

ADS-B Mode-S data: via de transponder aan boord van het vliegtuig wordt informatie uitgezonden welke opgevangen kan worden door grondapparatuur. De data die door Mode S Extended Squitter wordt uitgezonden bevat onder andere het vliegtuigtype, de positie en de vliegsnelheid. Deze gegevens kunnen gebruikt worden om het daadwerkelijk gevlogen vliegprofiel nauwkeurig te bepalen en informatie over de weersomstandigheden te achterhalen.

FANOMOS: FANOMOS is een systeem dat de vliegpaden, hoogten en snelheden registreert van vluchten in het Nederlands luchtruim. Deze data wordt onder andere gebruikt voor geluidberekeningen en uitstootberekeningen, maar kunnen ook worden gebruikt voor een analyse van het vlieggedrag van de geregistreerde vliegtuigen. De data is afkomstig van LVNL en mag daardoor niet zomaar worden gepubliceerd.

Flight recorder: In het vliegtuig worden tijdens de vlucht een groot aantal parameters geregistreerd. Het gaat hierbij om bijvoorbeeld de brandstofstroom of vlieghoek van het vliegtuig. Dit soort gegevens zijn doorgaans moeilijk te verkrijgen, maar belangrijk voor het valideren en verfijnen van de huidige modellen voor geluid en deeltjesuitstoot.

Luchtkwaliteitsensoren: De luchtkwaliteit meten per individuele beweging is lastig aangezien de verspreiding en depositie van de deeltjes geleidelijk plaatsvindt en ook andere bronnen dan het vliegverkeer bijdragen aan de emissies. Echter zijn er verschillende bronnen of systemen die inzicht geven in concentraties van deeltjes die bepalend zijn voor de luchtkwaliteit. Zo geeft het Landelijk meetnet van het RIVM op grote schaal weer wat per uur de concentraties van verschillende stoffen zijn op bepaalde punten. Daarnaast bestaan er verschillende verplaatsbare systemen waarmee bijvoorbeeld (ultra)fijnstof kan worden gemeten op een specifieke locatie.

[42] https://www.eurocontrol.int/eec/public/standard_page/proj_BADA.html

NOMOS geluidmetingen: Het Noise Monitoring System (NOMOS) is een geluidmeetsysteem, geplaatst op verschillende locaties (meer dan 40 op het moment) rondom Schiphol. De gemeten geluiddata wordt verwerkt en opgeslagen. Deze data kan worden gebruikt om zo nauwkeurig als mogelijk, het uitgestoten vliegtuiggeluid te monitoren of om geluidberekeningen te valideren.

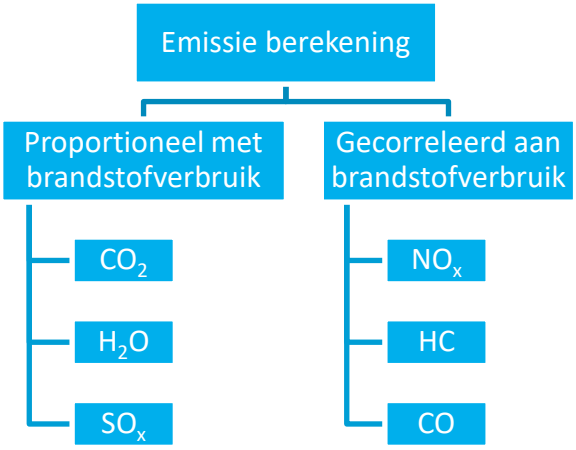
5.2 Modellen

Deze paragraaf beschrijft de algemene methodiek voor een milieuscore-model en enkele opties voor de uitvoering. De methodiek is onderverdeeld in twee milieuaspecten, namelijk impact op klimaat en impact op leefomgeving. De milieuscore voor leefomgeving wordt bepaald door geluid en emissies van stoffen tijdens de grondoperatie en LTO-cyclus en de klimaatimpact is afhankelijk van de gehele operatie.

Emissieberekeningen

Voor het berekenen van de emissies kan een onderscheid gemaakt worden tussen emissies die direct proportioneel zijn aan het brandstofverbruik en emissies die een niet-lineare correlatie hebben met het brandstofverbruik. De emissie factor voor CO_2 is 3.16 kilogram per kilogram brandstof; die voor waterdamp is gelijk aan 1.237 kilogram per kilogram brandstof. Voor het berekenen van NO_x, CO, HC, etc. moeten complexere rekenmethoden gebruikt worden. Deze emissies worden onder andere beïnvloed door het type motor, de gashendelstand, de hoogte en de vliegsnelheid.

Voor het berekenen van de emissies kan een onderscheid gemaakt worden tussen emissies die direct proportioneel zijn aan het brandstofverbruik en emissies die een niet-lineare correlatie hebben met het brandstofverbruik. De emissie factor voor CO_2 is 3.16 kilogram per kilogram brandstof; die voor waterdamp is gelijk aan 1.237 kilogram per kilogram brandstof. Voor het berekenen van NO_x, CO, HC, etc. moeten complexere rekenmethoden gebruikt worden. Deze emissies worden onder andere beïnvloed door het type motor, de gashendelstand, de hoogte en de vliegsnelheid.



Figuur 10: Emissieberekeningen[43]

Om een beeld te krijgen van de modellen die beschikbaar zijn voor het creëren van een milieuscore is een overzicht van de modellen weergegeven in Tabel 2. Het overzicht geeft voor elk model aan of het gebruikt wordt voor klimaat of leefomgeving, of er emissies of impact mee berekend kan worden, welke emissies berekend kunnen worden en een korte omschrijving van het model. In de volgende paragrafen wordt elk model in meer detail behandeld.

[43] Schaefer, Martin & Bartosch, Sebastian. (2013). Overview on fuel flow correlation methods for the calculation of NOx, CO and HC emissions and their implementation into aircraft performance software.

Tabel 2: Gebruik en functies van beschikbare modellen

Model	***Gebruik***	***Emissies/Impact***	***Emissies***	***Omschrijving***
CO_2-tool	Klimaat	Emissies	CO_2, NO_x	Model voor de berekening van emissies over de gehele vlucht op klasse- en vlootniveau (stoel en afstand)
Long range cruise model	Klimaat en leefomgeving	Emissies	CO_2, NO_x, H_2O	Model voor de berekening van emissies tijdens onderdelen van, of de gehele vlucht van individuele types en vlootniveau
MASS model	Klimaat en leefomgeving	Emissies	CO_2, NO_x, H_2O, CO, HC	Model voor de berekening van de prestaties van een specifiek vliegtuigtype (inclusief motoren en elektrische systemen)
AEDT	Klimaat en leefomgeving	Emissies	Geluid, CO_2, NO_x, H_2O, CO, HC, PM	Model voor het berekenen van emissies en geluid op individueel niveau en wereldschaal
Doc29 model	Leefomgeving	Emissies	Geluid	Model voor het berekenen van geluidniveaus op de grond
LEAS-iT	Leefomgeving	Emissies	CO_2, NO_x, H_2O, CO, HC, PM	Model voor het berekenen van emissies op de luchthaven en tijdens de LTO cyclus
AERIUS	Leefomgeving	Emissies/impact	NO_x	Model voor het berekenen van emissies en depositie van stikstof
STACKS	Leefomgeving	Impact	NO_x, CO, HC, PM	Model voor het berekenen van luchtkwaliteit en het aantal overschrijdingen van grenswaarden

5.2.1 Validatie en verificatie van modellen

Voordat wordt ingegaan op de verschillende beschikbare modellen, is het van belang dat wordt beseft dat modelresultaten kunnen afwijken van de werkelijke situatie. Hoe groot die afwijking is en op welke onderdelen van het resultaat een afwijking kan ontstaan, kan getest worden door de modellen te valideren en verifiëren. Absolute nauwkeurigheid in modelresultaten is (nagenoeg) onhaalbaar, echter kan worden toegewerkt naar een punt waarbij de afwijkingen voldoende klein zijn dat men deze accepteert en/of deze kennis meeneemt in de totstandkoming van een milieuscore.

Enerzijds is het modelresultaat afhankelijk van de invoergegevens, maar anderzijds ook van het model zelf. Het valideren en verifiëren van een model kan worden gedaan door verkregen resultaten te toetsen tegen resultaten van een ander, reeds gevalideerd, model of op basis van publiek beschikbare (meet)gegevens. Daarnaast kan dit ook worden gedaan door de resultaten te vergelijken met niet publiek beschikbare praktijkdata. Luchtvaartmaatschappijen registreren verschillende parameters zoals brandstofverbruik, motorinstellingen en vliegtuigconfiguratie tijdens de vlucht, maar ook het startgewicht. Met behulp van dit soort informatie kan worden getest wat de nauwkeurigheid van het model is, maar geeft daarnaast de mogelijkheid om het systeem meetbaar nauwkeuriger te maken.

Als een Milieuscore, gebaseerd op modelresultaten, wordt ingezet, geeft een validatie en verificatie met behulp van data van luchtvaartmaatschappijen de mogelijkheid om de modelresultaten dichter tot de werkelijke situatie te brengen, maar ook een grotere mate van vertrouwen onder de verschillende spelers waarop de Milieuscore op van toepassing is.

5.2.2 CO_2-tool

De CO_2-tool is een binnen het NLR ontwikkelde tool die wordt gebruikt voor het snel inschatten op hoog aggregatieniveau van toekomstige effecten, op CO_2-uitstoot, door bepaalde maatregelen (NLR-TR-2019-557). De tool is bedoeld om emissies te berekenen die uiteindelijk als invoer dienen voor klimaatimpact berekeningen, maar de tool zelf rekent geen klimaatimpact uit.

De tool werkt op basis van historische vluchtdata, normaliter van één luchthaven, naar wens gelimiteerd tot vertrekkend en/of aankomend verkeer, of verkeer tussen een specifiek stedenpaar. Vervolgens wordt een trend in het aantal vliegtuigbewegingen berekend, op basis van extrapolatie van historische trends of een vast ingesteld percentage en wordt er – per klasse (op basis van vliegtuigcapaciteit en vluchtafstand) – toestellen in- en uitgefaseerd.

De invoer van het model is een set met historische vluchten met informatie over vliegtuigtype en de combinatie van herkomst en bestemming van de vliegbeweging. Bovendien wordt als invoer gebruik gemaakt van vliegtuigprestatiegegevens en vluchtprofielen uit BADA. Om een voorspelling te kunnen maken van de CO_2-uitsoot in de toekomst wordt een inschatting gemaakt van nieuwe vliegtuigen die de vloot betreden en de daarbij behorende prestaties.

Als uitvoer van de tool kan de totale CO_2-uitstoot van de luchtvaartsector worden berekend geaggregeerd op vlootniveau, maar ook per afstandsklasse, stoelkasse of vlucht. De tool geeft verder ook informatie het aantal vluchten per jaar en de leeftijdsverdeling van de vloot per stoel- en afstandsklasse.

Als uitbreiding is het mogelijk om de NO_x-uitstoot te bepalen met behulp van de Boeing-2 methode, waarbij de snelheid, atmosferische parameters en motorcertificatiegegevens gebruikt worden om de NO_x-uitstoot te bepalen.

5.2.3 Long range cruise model

Voor de berekening van emissies tijdens de vlucht of onderdelen van de vlucht wordt gebruik gemaakt het long range cruise model. De gegevens die nodig zijn om de emissies te bereken met het model zijn onderverdeeld in drie groepen zoals ook aangegeven in Figuur 9.

Prestatiegegevens
Onder de prestatiegegevens die nodig zijn voor het model vallen het motortype, met bijbehorende motorparameters, en het vliegtuigtype met bijbehorende aerodynamische eigenschappen, gewichten, en operationele parameters zoals hoogte en snelheidsprofielen. Het model gebruikt BADA voor de vliegtuigprestatiegegevens en AEED voor de motorgegevens.

Vluchtgegevens
Voor de vluchtgegeven gebruikt het model momenteel gegevens uit FANOMOS. Deze gegevens zouden in de toekomst ook uit ADS-B data kunnen komen. De belangrijkste gegevens zijn aankomst en bestemming in combinatie met het staartnummer. Voor het deel binnen het Nederlandse luchtruim wordt ook gekeken naar de route ten opzichten van de grootcirkelafstand.

Atmosferische gegevens
Op dit moment maakt het model gebruik van standaard atmosfeer parameters. Dit zou in de toekomst uitgebreid kunnen worden met lokale weersmetingen zoals windsnelheid en temperatuur.

Emissieberekening
Op basis van het berekende vluchtprofiel kan het brandstofverbruik worden bepaald**.** De CO_2-uitstoot is volledig gerelateerd aan het brandstofverbruik tijdens de vlucht. De uitstoot wordt berekend door het brandstofverbruik te vermenigvuldigen met emissie factor.

De NO_x-uitstoot wordt volgens de Boeing-2 methodiek berekend. Deze methodiek combineert de momentane vliegsnelheid, lokale atmosferische toestand en brandstofstroom langs de vliegbaan met motorcertificatie gegevens tot een momentane NO_x-uitstoot. Integratie langs een gedeelte van de vliegbaan levert de NO_x-uitstoot op van een vlucht over dat vluchtsegment.

5.2.4 MASS model

De tool MASS (Mission Aircraft and Systems Simulation) is ontwikkeld door het NLR en simuleert de prestaties van een specifieke vliegtuigconfiguratie inclusief motoren en elektrische systemen. Het model begint met het maken van een vluchtprofiel waaruit benodigde prestatieparameters volgen, zoals de kruishoogte en snelheid van het vliegtuig. Deze parameters worden vervolgens als invoer gebruikt voor het vliegtuigmodel (prestatiemodel) waar op basis van fysische vergelijkingen de krachten op het vliegtuig worden bepaald, waardoor de benodigde stuwkracht bekend is. Met behulp van het GSP-model (Gas-Turbine Simulation Program) kan het brandstofverbruik bepaald worden. Dit gebeurt aan de hand van de benodigde stuwkracht uit het vliegtuigmodel en de atmosferische parameters uit het vliegprofiel. In het model kan ook het effect van hybride-elektrische aandrijving worden berekend.

De invoer voor het model zijn parameters van het vluchtprofiel (zoals hoogte en snelheid als functie van horizontale afstand) en vliegtuig-specifieke parameters (zoals gewicht en weerstandscoëfficiënten) uit publiek beschikbare bronnen. De uiteindelijke uitvoer van het model is het brandstofverbruik, het energieverbruik en de emissie van CO, NO_x en HC. De emissies die proportioneel zijn aan het brandstofverbruik (zoals CO_2 en waterdamp) kunnen zoals beschreven in hoofdstuk 5.2 worden berekend aan de hand van emissie factoren. Het model berekent geen klimaatimpact.

5.2.5 AEDT

AEDT is een tool die vliegtuigprestaties modelleert in tijd en ruimte om brandstof, emissies en geluid te bepalen. Binnen de tool is het mogelijk om een analyse te doen van gate tot gate. Dit betekent dat onder andere het opwarmen van de motoren, APU gebruik en taxiën van en naar de baan kan worden meegenomen. Het programma ondersteunt de analyse van enkele vluchten (single flight scenario's) maar ook analyses op geaggregeerd niveau (globale vlucht scenario's).[44]

[44] https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/apl/research/models/aedt/

Als invoer voor dit model dienen vluchtprofielen, allerlei informatie over het vliegveld (banen, taxiroutes, etc.), routes, vlootinformatie en een scenario aangeleverd te worden. Als uitvoer kan AEDT de brandstof, emissies (zoals CO_2, NO_x, SO_x, etc.), geluidcontouren en geluidwaardes per locatie bepalen. De tool dient dus als emissietool en geeft geen informatie over de klimaatimpact, noch over het aantal gehinderden.[45]

5.2.6 Doc29 model

Voor het berekenen van de geluidniveaus op de grond, ten gevolge van de operatie van vliegtuigen, wordt gebruik gemaakt van het ECAC Doc29 model. Dit is een voor Europa geharmoniseerde methode om de geluidbelasting rondom civiele luchthavens te bepalen. In Nederland wordt Doc29 reeds gebruikt voor Schiphol. Op de regionale luchthavens in Nederland wordt vooralsnog gebruik gemaakt van het Nederlands Rekenmodel (NRM). Voor een geluidberekening op basis van de voor Schiphol gehanteerde implementatie heeft dit model als input de volgende gegevens nodig:

- radardata (positie, hoogte en snelheid uit FANOMOS);
- vluchtdata (vliegtuigtype, datum en tijd, start/landing, etc.);
- vliegtuigdata (vliegtuigeigenschappen uit o.a. ANP, AEED en ICAO certificatiedatabase).

Door alle vluchten die in een jaar zijn voorgekomen door te rekenen met het model, kan een L_{den} en L_{night} worden bepaald. Deze waarden geven een beeld van de geluidbelasting op verschillende punten rondom de luchthaven. De details van een berekening kunnen worden gevonden in het rapport 'Toepassing ECAC Doc29 voor het bepalen van de geluidbelasting van het vliegverkeer van Schiphol'[46]. In principe kan voor elke vlucht worden bepaald hoe groot de geluidbijdrage is geweest aan het totaal. Door de rekengrids, waar op elk punt in dat grid een hindersom wordt weergegeven, van onderlinge vluchten naast elkaar te leggen, kunnen deze met elkaar worden vergeleken.

Met behulp van de Nederlandse dosis effect relatie (welke niet in het Doc29 model is beschreven) kan inzicht worden verkregen in de impact die vliegtuiggeluid heeft op de omgeving. Hieronder is de formule van de dosis effect relatie (voor L_{den}) gegeven. Hierbij staat EGH_pct voor het percentage ernstig gehinderden personen op een bepaald punt ten gevolge van de ingevulde L_{den}.

$$EGH_pct = 1 - \frac{1}{1 + e^{-7.7130+0.1260*Lden}}$$

Door het percentage ernstig gehinderden te vermenigvuldigen met het aantal personen dat volgens een woning- of personenbestand op dat gridpunt woont, krijgt men het werkelijk aantal ernstig gehinderden op die locatie.

5.2.7 LEAS-iT

Voor luchtkwaliteitsberekeningen wordt door het NLR momenteel gebruikt gemaakt van de tool LEAS-iT (Local Aviation Emissions in Airport Scenarios - inventory Tool). LEAS-iT is een methode die onder andere in de MER 2018[47] gebruikt wordt voor het berekenen van emissies in de luchtvaart. In de LEAS-iT tool kan een wijd spectrum aan verschillende emissies doorgerekend worden zoals CO, NO_x, fijnstof, VOS (vluchtige organische stoffen) en nog vele andere emissies. Voor de berekeningen wordt een onderscheid gemaakt tussen de taxifase en de vluchtfase. Deze

[45] https://aedt.faa.gov/Documents/AEDT2d_ASIFReferenceGuide.pdf
[46] https://zoek.officielebekendmakingen.nl/blg-875160.pdf
[47] MER 'Nieuw Normen- en Handhavingsstelsel Schiphol' – 2018, Deel 5: Actualisatie en doorkijk naar de periode na 2020.

emissies hebben een impact op de leefomgeving. LEAS-iT dient als model om emissies te berekenen die vervolgens gebruikt kunnen worden om uiteindelijk de luchtkwaliteit te bepalen.

LEAS-iT gebruikt vliegtuigprofielen en vliegtuigprestaties om de emissies rondom de luchthaven te berekenen. Het resultaat van de berekening is een driedimensionaal grid voor elk uur waarin de waarde in elk rekenpunt het gewogen gemiddelde in het zwaartepunt van de cel is. Het zwaartepunt van de cel wordt meegegeven als uitvoer van de berekening. De emissies van de stoffen zijn afhankelijk van de vliegduur, het aantal motoren, de brandstofstroom en de emissie-index van elke emissie. De emissie-index beschrijft het aantal gram uitstoot van een emissie per kilogram brandstof. Deze is afhankelijk van het motortype van het vliegtuig en de gashendelstand.

Als invoer voor LEAS-iT zijn de volgende parameters van belang:[48]

- vliegtuigtype
- start/landingsbaan
- route
- prestatieprofiel
- aantal vliegtuigbewegingen
- motortype
- aantal motoren per vliegtuig en brandstofsoort
- de brandstofstroom, NO_x, CO en HC emissie indices, Smoke Number (SN) voor de vier standaard ICAO LTO thrust settings
- motor drukverhouding
- taxi tijd
- dag (van de week) en uur (van de dag)

Prestatiegegevens
Onder de prestatiegegevens die nodig zijn voor de LEAS-iT tool vallen het vliegtuigtype, motortype en motor drukverhouding. Aan de hand van het motortype is informatie over brandstofstromen en emissie indices te achterhalen.

Profielgegevens
Onder de vluchtgegevens die nodig zijn voor de LEAS-iT tool vallen de start/landingsbaan, route, het prestatieprofiel en de taxitijd.

5.2.8 AERIUS

AERIUS is een web-based calculator die wordt gebruikt als rekeninstrument voor de leefomgeving. De tool kan emissies van stikstof berekenen door verschillende economische activiteiten. Bovendien is de tool in staat om de depositie van NO_x op Natura-2000 gebieden te berekenen. Behalve de calculator, wordt AERIUS ook gebruikt voor de registratie van stikstofuitstoot en kan het worden toegepast om beleidsscenario's door te rekenen waarbij stikstof toegekend wordt aan verschillende economische activiteiten[49].

[48] https://www.commissiemer.nl/docs/mer/p27/p2792/2792-142stikstofberekeningen.pdf
[49] https://www.aerius.nl/nl/producten

In AERIUS wordt gebruikt gemaakt van het OPS model van het RIVM (Operational Priority Substances) om voor de emissies van de economische activiteiten de verspreiding en de depositie te bepalen. Voor de berekening dienen een aantal invoergegevens aan de tool te worden meegegeven en een aantal gegevens zijn afkomstig van standaardwaarden en factsheets beschikbaar binnen de tool.

Als invoer voor de depositiebijdrage van de luchtvaartsector zijn de uitstoot, de hoogte van de uitstoot en de warmte-inhoud van emissies van belang. De warmte-inhoud bepaalt de stijging van de emissies. Voor de verspreiding en depositie zijn verder meteorologische gegevens nodig die voor zes verschillende regio's worden berekend afgeleid van 19 meetstations van het KNMI. De uitvoer van de tool is de depositie per rekenpunt.[50]

5.2.9 STACKS

STACKS is een tool die wordt gebruikt voor het berekenen en modelleren van luchtkwaliteit voor de industrie. Met de module is de luchtkwaliteit te berekenen voor negen verschillende stoffen afkomstig van industrie en wegverkeer. Deze stoffen bedragen:

- NO_2
- PM_{10}
- $PM_{2.5}$
- Elementair koolstof
- SO2
- Benzeen
- BaP (Benzo[a]pyrene)
- Co
- Pb

STACKS maakt gebruik van het Nieuw Nationaal Model (NNM) waarin punt en oppervlaktebronnen gezamenlijk met wegverkeer worden doorgerekend. Het model kan de impact van de emissies van het vliegverkeer en andere industrieën bepalen.

De invoer voor STACKS is de hoeveelheid emissies die ingevoerd kunnen worden als oppervlaktebron of als puntbron afhankelijk van het type emissie. Als uitvoer van de module wordt de jaargemiddelde totale concentratie van elke stof meegegeven, maar ook de achtergrondconcentratie, bronconcentratie en het aantal overschrijdingen van de grenswaarden.

STACKS+ functioneert als de rekenkern van het model en modelleert de verspreiding van de rookpluimen uit puntbronnen, oppervlaktebronnen, verkeerswegen en parkeerplaatsen. Ten opzichte van het NNM is STACKS uitgebreid om luchtkwaliteit langs verkeerswegen door te rekenen. Het is gebaseerd op fysische en chemische vergelijkingen. Door het gebruik van een meteorologische database op uurbasis, wordt de situatie van uur tot uur berekend. STACKS maakt gebruik van de meest recente, door het ministerie van IenW vrijgegeven achtergrondconcentraties en emissiefactoren van het wegverkeer.[51]

[50] https://www.aerius.nl/nl/factsheets/calculator-in-het-kort/16-09-2019
[51] https://dgmrsoftware.nl/producten/geluid-en-luchtkwaliteit/geomilieu/geomilieu-stacks/

5.3 Restricties

Veel van de hierboven genoemde modellen geven een uiteindelijk resultaat in de vorm van een totale emissie of de emissieverspreiding per locatie. Om vanuit deze resultaten een milieuscore te berekenen moeten modellen of formules gebruikt worden om de vertaling te maken naar impact. Op dit moment is niet voor alle aspecten van een milieuscore een model beschikbaar voor het berekenen van de impact. Op basis van de analyse over beschikbare invoergegevens en modellen zijn de volgende beperkingen geconstateerd:

- voor het gebruik van bepaalde vliegtuigprestatiegegevens gelden strikte voorwaarden;
- er zijn meerdere modellen beschikbaar om emissies te berekenen maar de vertaling naar impact is niet altijd onderdeel van het model;
- niet alle modellen zijn gevalideerd met vluchtgegevens, de nauwkeurigheid van de modellen zou met behulp van deze gegevens beter bepaald kunnen worden.

Een aantal voorbeelden van modellen met restricties zijn:

- De CO_2-tool en het long range cruise model maken beiden gebruik van BADA data, wat als nadeel heeft dat het niet gebruikt mag worden om individuele vliegtuigtypes met elkaar te vergelijken. Bovendien bevat de BADA database niet alle vliegtuigtypes en wordt een specifiek motortype verondersteld voor elk vliegtuig. Om een realistisch beeld te krijgen van de daadwerkelijke emissies is het ook van belang om radartracks en/of vluchtdata te koppelen aan de modellen.
- Het long range cruise model wordt nu gebruikt voor het maken van emissieberekeningen maar zou in de toekomst idealiter uitgebreid worden naar een model wat ook de impact van deze emissies kan berekenen. Op dit moment is er nog veel onzekerheid over de impact van bepaalde emissies zoals NO_x en waterdamp tijdens de kruisvlucht.
- De meest nauwkeurige score kan worden bereikt door het gebruik van daadwerkelijke weer- en vluchtdata. Behalve de benodigde opslagcapaciteit, zijn vluchtcomputergegevens niet openbaar beschikbaar en kunnen deze gegevens alleen met toestemming van luchtvaartmaatschappijen gebruikt worden.
- Bij het Doc29 model en veel andere modellen heeft de invoerdata een sterke invloed op het resultaat. Als invoer kan er bijvoorbeeld voor worden gekozen om een specifiek vliegprofiel te gebruiken voor de gehele vloot, per vliegtuigtype of per vliegtuigbeweging. De keuze is een afweging tussen rekentijd en nauwkeurigheid.

De beperkingen kunnen op verschillende manieren geminimaliseerd worden, deze zijn hieronder beschreven:

- het gebruik van vluchtdata in combinatie met modellen zou de nauwkeurigheid van de modellen kunnen vergroten. Dit zou ten koste kunnen gaan van rekensnelheid als vluchtdata heel gedetailleerd wordt meegenomen in vergelijking met geaggregeerde data.
- Door het verbeteren van modellen kan de nauwkeurigheid van de resultaten worden vergroot. Zo zou een model gevalideerd kunnen worden met behulp van vluchtdata of atmosferische data, of doormiddel van het gebruik van vluchtcomputergegevens.
- Voor het Doc29 model kan het gemodelleerde profiel gekoppeld worden aan het daadwerkelijk gevlogen profiel om de nauwkeurigheid van de resultaten te vergroten.
- Voor het Doc29 model kan het gemodelleerde profiel gekoppeld worden aan het daadwerkelijk gevlogen profiel om de nauwkeurigheid van de resultaten te vergroten.
- ADS-B data kan worden gebruikt voor het long range cruise model en de CO_2-tool om de gevlogen route nauwkeuriger te bepalen (omvliegfactor).

- Voor het gebruik van atmosferische parameters wordt in veel gevallen gebruik gemaakt van lange-termijngemiddelde waardes. Bij het gebruik van dag- of uurwaardes zou de nauwkeurigheid van de emissies en de impact hiervan mogelijk kunnen worden vergroot.

6 Voorbeelden van bestaande scoresystemen

Verschillende vormen van milieuscores bestaan al in verschillende industrieën wereldwijd; bekende voorbeelden zijn de letters op elektrische apparaten (een A+++ ijskast) en keurmerken in de voedselindustrie. Ook binnen de luchtvaart bestaan al enkele voorbeelden van milieuscores. Dit hoofdstuk beschrijft het doel, de aanpak, de toepassing en vereiste gegevens van drie scoresystemen uit de luchtvaart.

6.1 Heathrow Airport Fly Quiet and green

Doel

Het Fly Quiet and Green programma van Heathrow Airport[52] stimuleert luchtvaartmaatschappijen om met minimale uitstoot van geluid en emissies te vliegen naar en van Heathrow Airport. Op deze manier draagt het bij aan de vermindering van geluidoverlast en de inzet van schonere toestellen naar en vanaf de luchthaven.

Methode

Luchtvaartmaatschappijen worden op meerdere onderdelen gerangschikt op hun prestaties relatief aan elkaar. Sommige onderdelen wegen zwaarder dan anderen. De gewogen optelsom van deze scores is de totaalscore tussen 0 en 1000, waarbij je met een score van 1000 nummer 1 zou zijn in alle onderdelen, en met een score van 0 het laagste zou hebben gescoord op ieder onderdeel. Op basis van de eindscore worden de luchtvaartmaatschappijen gerangschikt in de zogenaamde “League table”.

Er zijn drie onderdelen waarop een score gegeven wordt:

1. **Strategische geluidgegevens**
   Dit onderdeel betreft geluidkenmerken van motor en vliegtuig zoals vastgelegd in certificatie.
   - Metric 1: Geluidcertificatie (via de zogenaamde *chapter number* in de ICAO certificatie): 50% gewicht
   - Metric 2: Quota Count (QC) / stoel / vliegbeweging: 50% gewicht
2. **Strategische emissiegegevens**
   Dit onderdeel betreft atmosferische emissies uit de motor, zoals vastgelegd in certificatie.
   - Metric 1: Milieucertificatie (op basis van de *CAEP standard* in de ICAO certificatie): 50% gewicht
   - Metric 2: NO_x / stoel / beweging: 50% gewicht
3. **Operationele gegevens**
   Deze categorie betreft hoe het vliegtuig gevlogen wordt. Metric 1 kijkt in hoeverre de daling continu was, Metric 2 in hoeverre er werd gehouden aan het landingsplan en Metric 3 op welk tijdstip er werd gevlogen.
   - Metric 1: Continuous Descent Approach (CDA) overtredingen: 150% gewicht
   - Metric 2: Afwijkingen van de geplande route: 150% gewicht
   - Metric 3: Late of vroege vliegbewegingen: 60% gewicht

[52] Heathrow Fly Quiet and Green Website, bezocht 28-03-2020, URL: https://www.heathrowflyquietandgreen.com/

Toepassing

Momenteel zijn er nog geen financiële gevolgen verbonden aan de positie van een luchtvaartmaatschappij in de League Table. De toepassing is gericht op het transparant en inzichtelijk maken van de milieuprestaties van verschillende luchtvaartmaatschappijen en het bieden van handvatten voor verbetering.

Input gegevens

De volgende data wordt gebruikt voor de League Table:

- Certificatiedata van het vliegtuig en de motor voor geluid en emissies
- ANSP-data van de vlucht voor Operational Metrics.

6.2 NATS 3Di score

Doel

De Three Dimensional Inefficiency Score (3Di)[53] heeft als hoofddoel de milieu-efficiëntie in het luchtruim van het VK te meten en verbeteren. Dit gebeurt door vliegtuigen een zo efficiënt mogelijke route te laten vliegen, waardoor minimale brandstof wordt verbruikt. De partij die gescoord wordt is NATS, de Britse luchtverkeersleiding. De 3Di score is opgesteld in samenspraak met de klanten van NATS, te weten luchtvaartmaatschappijen.

Methode

Per vlucht wordt de gevlogen horizontale afstand (op basis van radargegevens) vergeleken met de grootcirkelafstand over het gehele vliegprofiel. Het verticale vluchtprofiel wordt vergeleken met het voorkeursprofiel (CCO, CDA). Ook wordt gekeken hoe veel tijd het vliegtuig zich op een lagere hoogte dan ideaal bevond (op lagere hoogte wordt meer brandstof verbruikt vanwege de hogere luchtdichtheid). De prestaties op het horizontale en verticale profiel vertalen zich in een operationele score per vlucht.

Toepassing

Van alle commerciële vluchten wordt met 3Di de route gescoord. Ieder jaar resulteert dit in een cumulatieve score voor NATS van 0-100+. Deze wordt vergeleken met een doelstelling die jaarlijks gezet wordt door de Britse civiele luchtvaartautoriteit (UK CAA). Op basis van de 3Di score kan NATS een bonus of boete krijgen tot 1% van de jaarlijkse winst. (In tegenstelling tot veel andere ANSPs is NATS een private onderneming.)

Input gegevens

NATS gebruikt hun eigen radargegevens in een regressiemodel om tot de score te komen.

[53] NATS Website, '3di Score', bezocht 28-03-2020, URL: https://www.nats.aero/environment/3di/

6.3 Zürich Airport Charges NO_x charge

Doel

Het doel van de NO_x component in de landingsgelden van Zürich Airport[54] is het stimuleren van het gebruik van schonere vliegtuigen en motoren op Zürich Airport om de lokale luchtkwaliteit rondom de luchthaven te verbeteren.

Methode

Voor vliegtuigen beschreven in ICAO Annex 16 Volume II en voor vliegtuigen waar de Zwitserse Federal Office of Civil Aviation (FOCA) emissiedata voor heeft, wordt een emissiebelasting geheven in de landingsgelden conform *FOCA directive 33-05-27: Aircraft Emission Charges in Switzerland*. De volgende formule wordt gebruikt:

$$Emissieheffing = Emissiewaarde \times Emissietarief$$

Hierin is de emissiewaarde specifiek voor ieder vliegtuig (de formule staat hieronder) en het emissietarief is CHF2,50.

$$Emissiewaarde = a \cdot \#_{eng} \cdot \sum_{LTO\ modes} \left(\frac{60 \cdot time \cdot fuelflow \cdot NOx_{factor}}{1000} \right)$$

Waarin:

- a = 1 wanneer LTO koolwaterstoffenemissies per rated thrust (HCC Dp/Foo) minder dan of gelijk aan de huidige ICAO standaard zijn
- a > 1 wanneer LTO koolwaterstoffenemissies per rated thrust (HCC Dp/Foo) groter dan de huidige ICAO standaard zijn
- $\#_{eng}$ = aantal motoren$\#_{eng}$ = aantal motoren
- Fuelflow = brandstofverbruik in kg/seconde
- NOx_{factor} = gemeten NO_x factor in g/kg brandstof
- De LTO modes zijn: take-off, climbout, approach en taxi/idle.

Voor vliegtuigen waarvan geen FOCA data beschikbaar is, zijn aan de hand van het type vliegtuig en type en aantal motoren emissiewaardes vastgesteld.

Toepassing

Zürich Airport verwerkt niet alleen een geluidcomponent in de landingsgelden (dit doen de meeste luchthavens al), maar ook een variabele component aan de hand van NO_x die de motor uitstoot.

Input gegevens

De input gegevens zijn:

- ICAO engine emission databank
- Brandstofverbruik

[54] Zürich Airport (2020); 'Gebuehrenreglement' beschikbaar op: https://www.flughafen-zuerich.ch/business-und-partner/flugbetrieb/gebuehren

7 Conclusie en vervolgstappen

7.1 Conclusie

De luchtvaart heeft, net als vele andere sectoren, impact op het milieu. Deze milieu-impact is in deze tussenrapportage opgesplitst in klimaatimpact en impact op de leefomgeving. Om deze impact te mitigeren kunnen maatregelen genomen worden over de hele emissie-keten van de bron tot de gebruiker. Een mogelijk effectieve manier om dit te bewerkstelligen is middels een milieuscore. De term milieuscore lijkt mogelijk erg concreet, echter zijn er veel opties te bedenken waaruit een milieuscore kan worden opgebouwd en op welke milieu-impact een dergelijke score de nadruk legt. Naast de opbouw van de score kunnen er ook meerdere doelen en toepassingen worden bedacht die een milieuscore kan dienen.

In het onderzoek is een eerste verkenning uitgevoerd naar de mogelijke emissies en/of impact die zouden kunnen worden gescoord binnen een scoresysteem. Zo kan worden gedacht aan de uitstoot van CO_2, NO_x of geluid. Deze emissies op zich kunnen inzicht geven in de milieu-impact, daarnaast kan een dieper inzicht worden verkregen wanneer deze worden geschaald middels een gekozen eenheid, zoals een bepaalde hoeveelheid emissie per passagierskilometer of per kilogram vracht. Om meerdere aspecten simultaan te beschouwen moet deze waarde een weegfactor toegewezen krijgen. Wat deze weegfactor precies moet zijn voor de verschillende milieu-indicatoren is grotendeels een subjectieve en politieke keuze afhankelijk van het doel van de score.

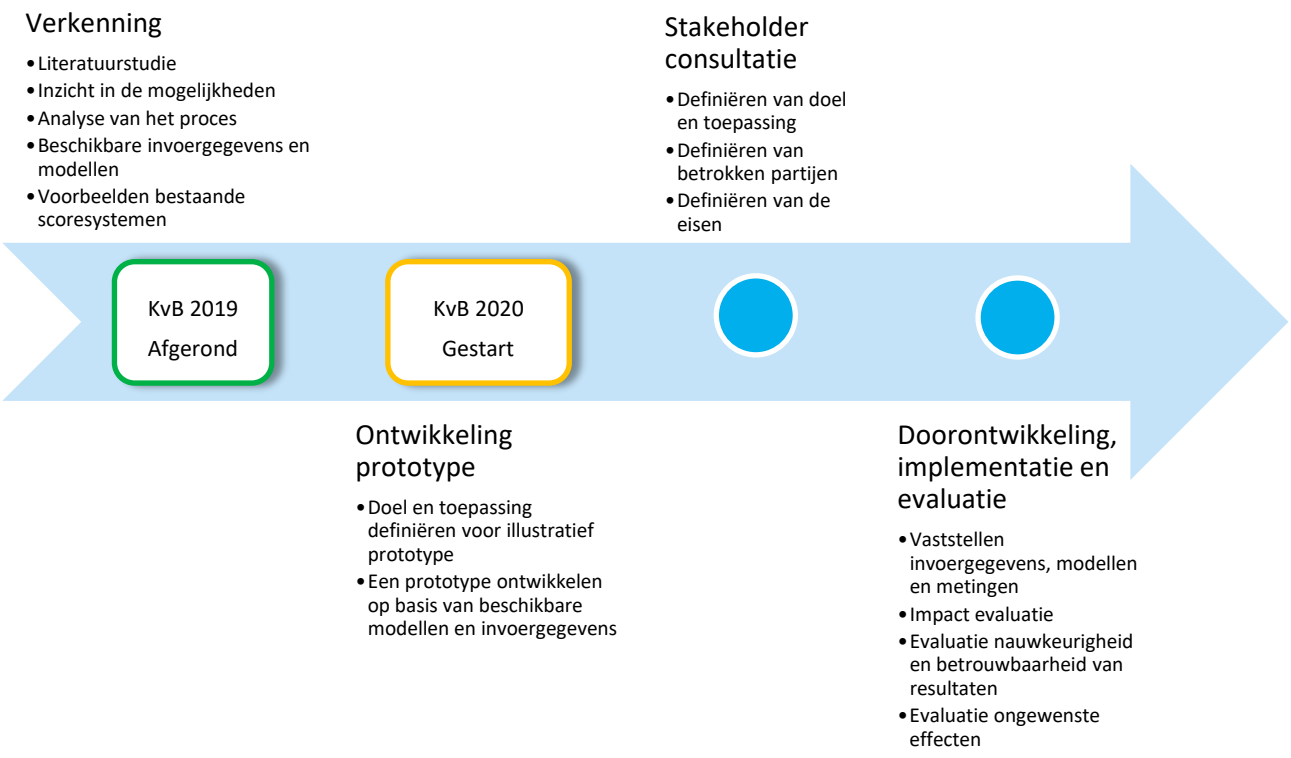
Voor een scoresysteem is het van belang dat emissies of de impact daarvan goed kan worden berekend of gemeten. In deze verkenning is gekeken naar beschikbare invoergegevens en modellen die gebruikt kunnen worden om de emissies van individuele vluchten te kwantificeren. Zo kan worden gedacht aan bijvoorbeeld, vliegpaden, hoogten en snelheden via radar data of transponder data, vliegtuigprestatiegegevens via de ICAO Aircraft Engine Emissions Databank, Aircraft noise and performance database (ANP) en Base of Aircraft Data (BADA) als invoer voor modellen als het long range cruise model, Doc29 of LEAS-iT. Deze modellen kunnen emissies berekenen welke impact hebben op het klimaat en de leefomgeving. Echter zijn niet alle modellen in staat de emissies te vertalen naar impact. De nauwkeurigheid van de modellen kan over het algemeen verbeterd worden door een koppeling te maken met de weergegevens (zoals windsnelheid) en de daadwerkelijk gevlogen route. Er kunnen beperkingen gelden voor het gebruik van modellen en invoergegevens in de vorm van licentievoorwaarden, in het bijzonder als het gaat om vliegtuigprestatiegegevens. In vervolgonderzoek zullen deze beperkingen verder onderzocht worden afhankelijk van de specifieke toepassing van de score. Een andere mogelijkheid is het gebruik van flight recorder data van luchtvaartmaatschappijen om precieze brandstofstromen en motorparameters te verkrijgen om de emissies van een missieprofiel goed te kunnen bepalen. Voor het gebruik van flight recorder gegevens moet echter eerst toestemming worden verkregen van luchtvaartmaatschappijen.

Zoals eerder genoemd kunnen verschillende vormen van milieuscores worden opgezet met verschillende doelen en toepassingen. Dat betekent dat de keuze van het doel, de toepassing en de precieze invulling van een milieuscore bepaalde voordelen oplevert, maar potentieel ook nadelen kan hebben. Zo kan de keuze voor een focus op mitigeren van CO_2-uitstoot leiden tot een wenselijke verlaging van CO_2-niveaus in de atmosfeer, maar daarbij een onwenselijke verhoging van de ervaren geluidhinder doordat er bij directer vliegen bijvoorbeeld recht over woonkernen wordt gevlogen.

Het idee van een milieuscore is reeds in verschillende vormen uitgewerkt in bijvoorbeeld het VK en Zwitserland. Luchthaven Heathrow maakt gebruik van een tabel, waarin luchtvaartmaatschappijen met elkaar worden vergeleken middels een duurzaamheidsscore. Daarnaast wordt een score voor de Britse luchtverkeersleiding NATS bijgehouden, die hun milieuprestatie inzichtelijk maakt. Zürich Airport heeft haar luchthavengelden afhankelijk gemaakt van niet alleen een geluidcomponent, maar ook de hoeveelheid NO_x die wordt uitgestoten.

7.2 Vervolgstappen

In het vervolgonderzoek binnen het Kennis voor Beleid programma van 2020 zal een prototype milieuscore worden uitgewerkt op basis van beschikbare modellen en invoergegevens. Ook bij het ontwikkelen van een prototype is het van belang om het doel op voorhand zo concreet mogelijk te definiëren. De uitwerking van het prototype is afhankelijk van het detailniveau van de score en de beschikbare invoergegevens en modellen. Er zal hierbij in worden gegaan op de verwachte effecten die deze systemen teweeg brengen. Het KvB-onderzoek zal gebeuren in overleg met het ministerie van IenW.



De uitkomsten van deze literatuurstudie en het vervolgonderzoek naar prototypes vormt de basis voor het verder uitwerken en implementeren van milieuscores. Verdere uitwerking en implementatie van een dergelijke score valt buiten het Kennis voor Beleid programma. Om een dergelijke milieuscore toe te passen zullen de ideeën uit dit onderzoek en vervolgonderzoek moeten worden getoetst bij de verschillende stakeholders. Onderdeel van de uitwerking zijn de eisen die verschillende partijen zullen stellen aan de milieuscore, denk hierbij aan de nauwkeurigheid, betrouwbaarheid en voorspelbaarheid van de score. Afhankelijk van de toepassing zullen niet alleen technische aspecten maar ook juridische aspecten verder in kaart gebracht moeten worden. Na het implementeren van de score kan een evaluatie van de gewenste en ongewenste effecten plaatsvinden door de score en het gedrag van de betrokken stakeholders te monitoren.

Dedicated to innovation in aerospace

Koninklijk Nederlands Lucht- en Ruimtevaartcentrum

Het NLR is een toonaangevend, mondiaal opererend onderzoekscentrum voor de lucht- en ruimtevaart. Met zijn multidisciplinaire expertise en ongeëvenaarde onderzoeksfaciliteiten, levert NLR innovatieve, integrale oplossingen voor complexe uitdagingen in de aerospace sector.

De werkzaamheden van het NLR beslaan het volledige spectrum van Research Development Test & Evaluation (RDT&E). Met zijn kennis en faciliteiten kunnen bedrijven terecht bij het NLR voor validatie, verificatie, kwalificatie, simulatie en evaluatie. Zo overbrugt het NLR de kloof tussen onderzoek en toepassing in de praktijk. Het NLR werkt zowel voor overheid als industrie in binnen- en buitenland. Het NLR staat voor praktische en innovatieve oplossingen, technische expertise en een lange termijn ontwerpvisie. Hierdoor vindt NLR's cutting edge technology zijn weg naar succesvolle lucht- en ruimtevaartprogramma's van OEM's zoals Airbus, Embraer en Pilatus. Het NLR draagt bij aan (defensie)programma's zoals ESA's IXV re-entry voertuig, de F-35, de Apache-helikopter en Europese programma's als SESAR en Clean Sky 2.
Opgericht in 1919 en met 600 betrokken medewerkers, realiseerde NLR in 2017 een omzet van 76 miljoen euro. 81% hiervan is afkomstig uit contractonderzoek, het overige betreft een overheidsbijdrage.

Voor meer informatie bezoek: **www.nlr.nl**

Postal address
PO Box 90502
1006 BM Amsterdam, The Netherlands
e) info@nlr.nl **i)** 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

NLR is a registered trade name of Stichting Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium, Chamber of Commerce No. 41150373. VAT No. NL002760551B01