



Dedicated to innovation in aerospace

NLR-CR-2025-043 | juni 2025

UFP-concentraties op luchthavens van nationale betekenis

Groningen Airport Eelde, Maastricht Aachen Airport, Rotterdam
The Hague Airport

OPDRACHTGEVER: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat



Koninklijke NLR - Nederlands Lucht- en Ruimtevaartcentrum

UFP-concentraties op luchthavens van nationale betekenis

Groningen Airport Eelde, Maastricht Aachen Airport, Rotterdam The Hague Airport

Probleemstelling

Blootstelling aan verhoogde concentraties ultrafijnstof (UFP) vormt een potentieel gezondheidsrisico. Vliegtuigemissies zijn een belangrijke bron van UFP op luchthavens en vormen daarmee een risico. Aangezien UFP-concentraties geen vast onderdeel vormen van luchtkwaliteitsstudies zijn deze niet op alle luchthavens van nationale betekenis bekend.

Beschrijving van de werkzaamheden

De studie berekent op basis van brandstofverbruik uit de Emissieregistratie en met gebruik van de STACKS luchtvaartmodule welke jaargemiddelde UFP-concentraties ontstaan door emissies van vliegtuigmotoren op de luchthavens waarvoor nog geen UFP-concentraties bekend zijn. Het gaat hierbij om Groningen Airport Eelde (GAE), Maastricht Aachen Airport (MAA) en Rotterdam The Hague Airport (RTHA).

Resultaten en conclusies

De studie geeft inzicht in de jaargemiddelde UFP-concentraties door vliegtuigemissies op GAE, MAA en RTHA voor het meest recente jaar waarvoor het brandstofverbruik voorhanden was: 2023.

	GAE	MAA	RTHA
Brandstofverbruik [kg]	590.445	1.767.919	6.148.086
Hoogste jaargemiddelde UFP-concentratie [N/cm ³]	808	5.919	10.292
Achtergrond concentratie [N/cm ³]	5.000-6.500	8.000-12.500	10.000-20.000

Toepasbaarheid

De berekende jaargemiddelde concentraties kunnen gebruikt worden als referentie voor monitoring. Wanneer er UFP-normen beschikbaar komen kunnen de resultaten gebruikt worden bij verdere beleidsvorming.

RAPPORTNUMMER
NLR-CR-2025-043

AUTEUR(S)
Bescherming persoonlijke levenssfeer

RUBRICERING RAPPORT
ONGERUBRICEERD

DATUM
juni 2025

KENNISGEBIED(EN)
Luchtverontreiniging door de luchtvaart

TREFWOORD(EN)
UFP
luchtkwaliteit
STACKS luchtvaartmodule
Emissieregistratie



Dedicated to innovation in aerospace

NLR-CR-2025-043 | juni 2025

UFP-concentraties op luchthavens van nationale betekenis

Groningen Airport Eelde, Maastricht Aachen Airport, Rotterdam
The Hague Airport

OPDRACHTGEVER: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

AUTEUR(S):

Bescherming persoonlijke levenssfeer



NLR
NLR
NLR

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

OPDRACHTGEVER	Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
CONTRACTNUMMER	---
EIGENAAR	NLR
NLR DIVISIE	Aerospace Operations
VERSPREIDING	Beperkt
RUBRICERING TITEL	ONGERUBRICEERD

GOEDGEKEURD DOOR:		
AUTEUR	REVIEWER	BEHERENDE AFDELING
Bescherming persoonlijke levenssfeer	Bescherming persoonlijke levenssfeer	Bescherming persoonlijke levenssfeer

English summary

Problem statement

Ultrafine particles pose a potential health risk to communities near airports. As UFP concentrations are not always covered in air quality studies, the concentrations at some Dutch airports of national interest are unknown.

Work description

This study calculates the UFP concentrations from aircraft emissions at the airports of national interest where the UFP concentrations are unknown: Groningen Airport Eelde (GAE), Maastricht Aachen Airport (MAA), and Rotterdam The Hague Airport (RTHA) based on fuel consumption statistics from 'Emissieregistratie' and using the 'STACKS aviation module' dispersion model.

Results and conclusions

The study shows the UFP concentrations (annual average) from aircraft emissions at GAE, MAA, and RTHA based on the most recent set of fuel consumption figures available (covering 2023).

	GAE	MAA	RTHA
Fuel [kg]	590.445	1.767.919	6.148.086
Highest UFP concentration [annual average, N/cm ³]	808	5.919	10.292
Background concentration [N/cm ³]	5.000-6.500	8.000-12.500	10.000-20.000

Applicability

The calculated concentration values (annual average) can be used as a reference for monitoring. When UFP limit values become available, the calculated values can be used for policy development.

Inhoudsopgave

Afkortingen	6
1 Introductie	7
1.1 Context	7
1.2 Dit rapport	7
2 Werkwijze	8
2.1 Algemeen	8
2.2 Ophalen brandstofverbruik 2023	8
2.3 Maken ruimtelijke verdeling UFP-emissies	9
2.3.1 Omrekenen brandstofverbruik naar UFP-emissies	9
2.3.2 Taxi-emissies van de hoofdmotoren	10
2.3.3 Emissies bij vertrek vanaf de grond tot 3.000 voet	11
2.3.4 Emissies bij nadering vanaf 3.000 voet tot de grond	11
2.3.5 APU-emissies	12
2.3.6 Emissies overige bronnen	12
2.3.7 Emissies boven de 3000 voet	12
2.4 Uitvoeren concentratieberekeningen	12
2.4.1 STACKS verspreidingsmodel	13
2.4.2 Uurverdeling emissies	13
2.4.3 Warmte-inhoud	13
2.4.4 Weer, achtergrondconcentratie en ruwheid	13
2.4.5 Studiegebied, emissie- en rekenpunten	14
3 Resultaten	16
3.1 Resultaten GAE	16
3.1.1 Brandstofverbruik GAE	16
3.1.2 Ruimtelijke emissieverdeling GAE	16
3.1.3 UFP-concentraties GAE	17
3.2 Resultaten MAA	18
3.2.1 Brandstofverbruik MAA	18
3.2.2 Ruimtelijke emissieverdeling MAA	19
3.2.3 UFP-concentraties MAA	19
3.3 Resultaten RTHA	20
3.3.1 Brandstofverbruik RTHA	20
3.3.2 Ruimtelijke emissieverdeling RTHA	21
3.3.3 UFP-concentraties RTHA	22
4 Conclusies	23
4.1 Resultaten	23
4.2 Aannames en beperkingen studie	23
4.3 Aanbevelingen	24

5	Referenties	25
Appendix A	Invoergegevens	26
Appendix A.1	TIM-waarden	26
Appendix B	Taxiroutes en -afstanden	27
Appendix B.1	Taxiroutes en -afstanden Groningen Airport Eelde	27
Appendix B.2	Taxiroutes en -afstanden Maastricht Aachen Airport	28
Appendix B.3	Taxiroutes en -afstanden Rotterdam The Hague Airport	29
Appendix C	APU-emissielocaties	30

Afkortingen

ACRONIEM	OMSCHRIJVING
APU	Auxiliary Power Unit; hulpmotor in de staart van de meeste vliegtuigen die het vliegtuig op de grond van stroom kan voorzien ook als de hoofdmotoren uit staan
CLO	Compendium voor de Leefomgeving
GAE	Groningen Airport Eelde
GPU	Ground Power Unit
ICAO	International Civil Aviation Organization
IenW	(Ministerie van) Infrastructuur en Waterstaat
LTO	Landing and Take-Off cyclus
MAA	Maastricht Aachen Airport
MER	Milieueffectrapportage
N.B.	nota bene
NLR	Koninklijke NLR - Nederlands Lucht en Ruimtevaartcentrum NLR
NNM	Nieuw Nationaal Model
PM _{2,5}	Fijnstof met een diameter van maximaal 2,5 µm (micrometer)
RTHA	Rotterdam The Hague Airport
SRM	Standaard Rekenmethoden
STACKS	Short Term Air-pollutant Concentrations KEMA-modelling System
TIM	time-in-mode
TNO	Nederlandse organisatie voor Toegepast-Natuurwetenschappelijk Onderzoek
UFP	Ultrafijnstof (deeltjes met een diameter kleiner dan 0,1 µm (micrometer))
WHO	World Health Organization
ZZS	Zeer Zorgwekkende Stoffen

1 Introductie

1.1 Context

UFP staat voor *ultrafine particles*, oftewel ultrafijn stof. Deze deeltjes hebben een diameter van minder dan 0,1 micrometer (μm) en worden uitgestoten door verschillende bronnen, waaronder vliegtuigmotoren. UFP komt zowel in de natuur voor als door menselijk handelen, bijvoorbeeld door wegverkeer, de luchtvaart, de industrie, energieproductie, de scheepvaart, houtverbranding en andere activiteiten waarbij brandstoffen worden verbrand. UFP wordt in de luchtvaart voornamelijk gevormd tijdens de verbranding van brandstoffen, zoals bij het opstijgen, landen of taxiën van een vliegtuig (Owen, 2022), hoewel smeeroliën ook een belangrijke bijdrage leveren.

In tegenstelling tot fijnstof (PM_{2,5} en PM₁₀), dat ook bestaat uit grotere deeltjes, zijn UFP's gemiddeld kleiner en kunnen ze dieper in de longen doordringen, en zelfs in de bloedbaan terechtkomen. UFP-concentraties door emissies uit vliegtuigmotoren worden in verband gebracht met negatieve gevolgen voor de gezondheid van luchthavenmedewerkers en omwonenden (Janssen, Houthuijs, & Dusseldorp, 2022; Møller, Brauer, Mikkelsen, & al, 2017). Ondanks de zorgen is het vooralsnog niet gelukt om het oorzakelijk verband tussen de emissies en schadelijke gezondheidseffecten wetenschappelijk aan te tonen. Hierdoor is de WHO niet in staat om 'veilige' of 'acceptabele' concentraties te bepalen (WHO, 2021). Als gevolg hiervan ontbreken wettelijke normen voor UFP (CLO, 2024).

Het ontbreken van wettelijke kaders heeft ook tot gevolg dat UFP-concentraties geen vast onderdeel zijn van milieueffectrapportages en luchthavenvergunningen. Daarom is maar voor een deel van de luchthavens van nationale betekenis bekend welke UFP-concentraties door emissies van vliegtuigmotoren ontstaan.

1.2 Dit rapport

Dit rapport heeft als doel om de kennis over UFP-concentraties op en rond luchthavens door emissies van vliegtuigmotoren aan te vullen. Het gaat hierbij om de concentraties op de volgende luchthavens: Groningen Airport Eelde, Maastricht Aachen Airport en Rotterdam The Hague Airport.

De werkwijze wordt in hoofdstuk 2 toegelicht. Hierbij wordt ingegaan op de gebruikte invoer, de emissieverdeling en de concentratieberekening. De resultaten worden in hoofdstuk 3 per luchthaven gepresenteerd. De conclusies worden in hoofdstuk 4 besproken. Ook wordt hier ingegaan op de beperkingen van deze studie en worden enkele aanbevelingen gedaan.

2 Werkwijze

2.1 Algemeen

In deze studie worden op basis van brandstofverbruik UFP-concentraties op leefniveau¹ berekend op en rond drie Nederlandse luchthavens. Het doel van de studie is om op basis van bestaande, beschikbare data ontbrekende kennis aan te vullen over jaargemiddelde UFP-concentraties op de Nederlandse luchthavens. Hierbij wordt zoveel mogelijk aangesloten bij de gangbare werkwijze voor UFP-berekeningen in recente en lopende milieueffectrapportages.

Hierbij worden de volgende vier stappen gevolgd:

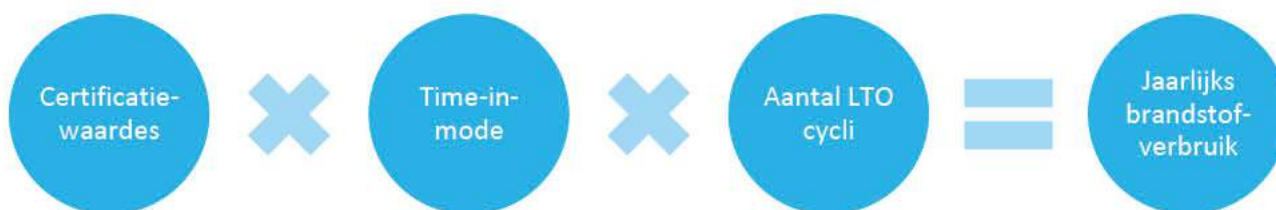
1. Ophalen brandstofverbruik 2023
2. Maken ruimtelijke verdeling UFP-emissies
3. Uitvoeren concentratieberekeningen

In de volgende paragrafen wordt elk van de stappen toegelicht.

2.2 Ophalen brandstofverbruik 2023

Voor de emissie- en concentratieberekeningen wordt uitgegaan van jaarcijfers van 2023 voor het brandstofverbruik zoals bijgehouden door de Emissieregistratie². De waarden zijn voor het doel van deze studie uitgesplitst per vliegtuigtype en per vluchtfase (TNO, 2024). Dit betreft het verbruik op de grond tot een hoogte van 3.000 voet (zie 2.3.7).

Het brandstofverbruik is bepaald aan de hand van motorcertificatiedata en zogeheten *time-in-mode* (TIM)-waarden of tijden. 'Mode' verwijst hierbij naar een vluchtfase uit de zogeheten *landing and take-off* cyclus (LTO) die door ICAO worden gebruikt bij de certificatie van vliegtuigmotoren (zie verklarend kader op de volgende pagina). Ook emissies uit de 'hulpmotor' ofwel *Auxiliary Power Unit* (APU) worden in deze studie gezien als aparte *mode*. Figuur 1 vat de berekening op hoofdlijnen samen. De werkwijze van de Emissieregistratie is omschreven in een methoderapport (RIVM, 2024). In dit rapport zijn ook de gebruikte TIM-waarden terug te vinden. In Appendix A1 zijn deze waarden overgenomen. De geïnteresseerde lezer kan de motorcertificatiewaardes inzien uit ICAO-motordatabase (ICAO, 2024).



Figuur 1: Werkwijze Emissieregistratie voor bepaling van brandstofverbruik op hoofdlijnen

¹ Voor de bepaling van concentraties op leefniveau wordt gerekend met 1,5 m boven het maaiveld ofwel 'neushoogte'

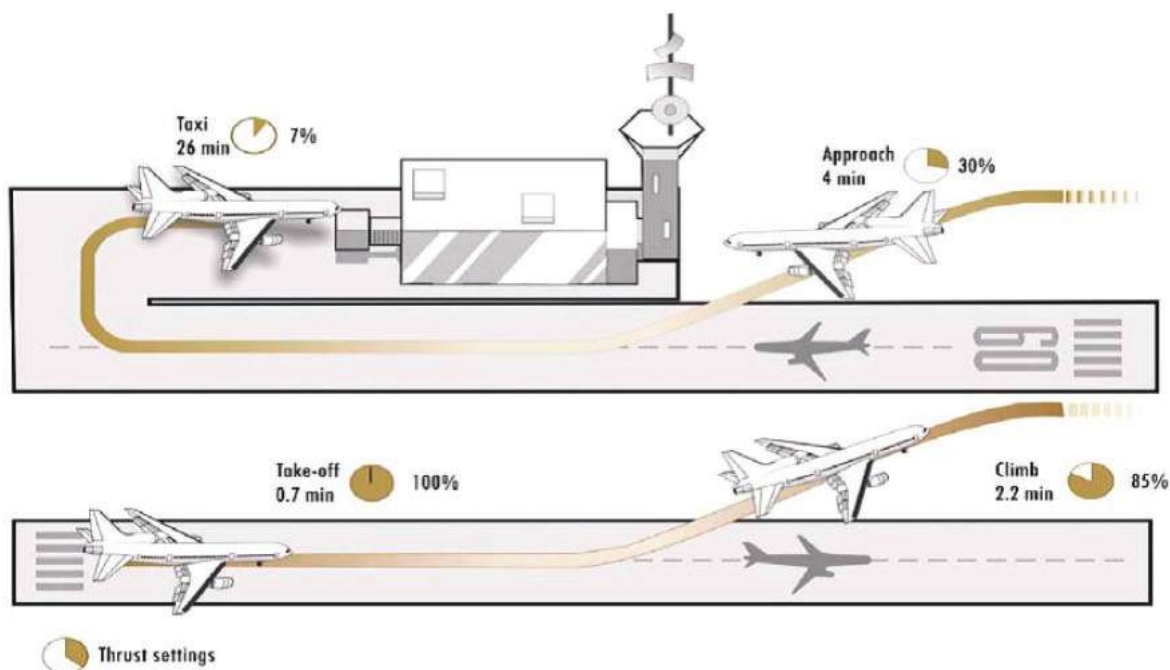
² <https://www.emissieregistratie.nl/>

VERKLAREND KADER**Landing and take-off cycle (LTO)**

De LTO-cyclus bestaat uit de volgende vluchtfases:

- *Approach* – nadering vanaf 3.000 voet hoogte tot op de landingsbaan
- *Taxi* – grondbeweging van de landingsbaan naar de *gate* en weer terug naar de startbaan met (bijna) stationair (*idle*) vermogen
- *Take-off* – het opstijgen van het vliegverkeer met hoog vermogen tot het punt dat het vermogen wordt afgebouwd naar het lagere klimvermogen
- *Climb* – de klim na het opstijgen tot een hoogte van 3.000 voet

Figuur 2 laat deze fasen nog eens terugkomen in een plaatje.



Figuur 2: LTO-cyclus zoals gebruikt bij de emissiecertificatie van vliegtuigmotoren. Getoonde tijden en percentages zijn illustratief (ICAO, 2020)

2.3 Maken ruimtelijke verdeling UFP-emissies

Op basis van het brandstofverbruik per vluchtfase wordt een ruimtelijke verdeling van UFP-emissies gemaakt. Hierbij wordt dezelfde methode gevolgd als bij de ZZS-concentratiestudie (NLR, 2023), maar wordt uitgegaan van het baangebruik in 2023. De werkwijze wordt hieronder in detail toegelicht.

2.3.1 Omrekenen brandstofverbruik naar UFP-emissies

Het brandstofverbruik wordt in de berekening met een vaste emissiefactor omgerekend naar UFP-emissies. Elke vluchtfase heeft een eigen emissiefactor. Voor emissies uit de hoofdmotoren tijdens starten, klimmen, dalen en taxiën zijn deze gebaseerd op een studie van Mazaheri, Johnson, & Morawska (2009). In deze studie zijn voor enkele

veelvoorkomende vliegtuigtypen (Boeing 737, 767 en 777, Airbus A320 en A330) de UFP-emissies gemeten en gekoppeld aan het brandstofverbruik. Hieruit zijn algemene emissiefactoren afgeleid. Om brandstof te besparen worden piloten soms door luchtvaartmaatschappijen verzocht om zo veel mogelijk met minder motoren te taxiën of om met verminderd vermogen op te stijgen. Bij de emissieberekening is hier geen rekening mee gehouden waardoor de werkelijke UFP-emissies mogelijk anders liggen dan hier aangenomen.

De emissiefactor voor APU-emissies komt uit een studie van Lobo et al. (2012). Hierbij wordt niet meegenomen dat APU-gebruik soms vervangen wordt door een Ground Power Unit (GPU) of walstroom. Op basis van beschikbare milieueffectrapporten wordt op Maastricht Aachen Airport bij 40% van de bewegingen gebruik gemaakt van een GPU (25%) of walstroom (15%). Aangezien ten minste een deel van deze GPU's elektrisch is (LNV, 2023), wordt hiermee de UFP-uitstoot uit de APU op Maastricht overschat. Op Groningen Eelde Airport en Rotterdam The Hague Airport wordt alleen gebruik gemaakt van de APU (Adecs, 2023).

Het wordt aangenomen dat deze emissiefactoren ook van toepassing zijn op de vliegtuigen in deze studie. De gebruikte kentallen zijn weergegeven in Tabel 1. Conform de richtlijnen voor luchtkwaliteit van de WHO worden de UFP-deeltjes uitgedrukt in aantallen en niet in massa (WHO, 2021).

Tabel 1: Emissiefactoren voor UFP die gebruikt zijn om brandstof om te zetten naar UFP-emissies (Mazaheri, Johnson, & Morawska, 2009; Lobo, et al., 2012)

Fase/APU	UFP-emissiefactor [deeltjes / kg brandstof]
Hoofdmotor(en), taxi-emissies (<i>idle</i>)	$3 \cdot 10^{16}$
APU	$1,55 \cdot 10^{16}$
Hoofdmotor(en), start (<i>take-off</i>)	$5 \cdot 10^{16}$
Hoofdmotor(en), klim tot 3.000 voet (<i>climb-out</i>)	$5 \cdot 10^{16}$
Hoofdmotor(en), nadering vanaf 3.000 voet (<i>approach</i>)	$4 \cdot 10^{16}$

2.3.2 Taxi-emissies van de hoofdmotoren

Om te bepalen waar de UFP wordt uitgestoten, moet worden vastgesteld welke taxiroutes er gevolgd zijn van het platform naar de startbaan of van de landingsbaan naar het platform. Hiervoor is handmatig per start- of landingsbaan³ een taxiroute opgesteld van het platform naar de baan. Deze zijn te vinden in Appendix B. Per vliegtuigtype is bepaald hoe vaak deze taxiroutes zijn gebruikt op basis van radardata uit het door NLR ontwikkelde FANOMOS-systeem⁴. Vervolgens worden de emissies over de routes verdeeld⁵.

Voor het taxiën wordt aangenomen dat de UFP tijdens het taxiën gelijkmatig wordt uitgestoten. Dit betekent dat de emissies op basis van de afgelegde afstand gelijkmatig over de routes verdeeld kunnen worden. Met andere woorden: een route waarop 60% van de jaarlijks afgelegde afstand wordt afgelegd, krijgt 60% van de emissies toebedeeld en deze worden gelijkmatig over de route verdeeld. De hoogte waarop de taxi-emissies worden uitgestoten is overgenomen uit eerdere luchtkwaliteitsstudies en bedraagt afgerond 1,5 m. Dit getal staat voor de gemiddelde hoogte van een vliegtuigmotor bij het taxiën.

³ Een start- en landingsbaan is in veel gevallen in twee richtingen te gebruiken. Als dit het geval is, is voor beide varianten een route opgesteld.

⁴ FANOMOS is een door NLR ontwikkeld systeem om vliegtuigbewegingen mee te volgen.

⁵ Alle *idle* emissies worden uniform over de routes verdeeld, waarbij geen rekening wordt gehouden met de locatie(s) waarop stationair wordt gedraaid.

2.3.3 Emissies bij vertrek vanaf de grond tot 3.000 voet

Voor de verdeling van emissies tijdens de start en klim tot 3.000 voet zijn hoogteprofielen over *straight-in* routes (vanaf nu “routeprofiel” genoemd) opgesteld voor de drie vliegtuigtypes die de grootste bijdrage leveren aan de emissies tijdens de start, klim en landing. Dit is gedaan voor iedere luchthaven apart. Deze profielen zijn vervolgens toegepast op de overige vliegtuigtypes.

De routeprofielen bestaan uit een snelheids- en een hoogteprofiel, die op basis van appendices 13.4 zijn bepaald (NLR, 2022). Per geselecteerd vliegtuigtype is het meest voorkomende hoogteprofiel geselecteerd. De aanvang van de start, het gemiddelde punt op de startbaan waar het neuswiel loskomt van de baan, de gemiddelde snelheid bij het loskomen, de gemiddelde locatie en bijbehorende snelheid waarop het vermogen wordt gereduceerd (overgang van start naar klim) en de locatie en snelheid waarop de 3.000 voet (LTO-hoogte) wordt bereikt, zijn allemaal vastgesteld op basis van deze routeprofielen. Deze zijn vervolgens gewogen gemiddeld – met het aantal vliegbewegingen als weegfactor – om tot een gemiddeld routeprofiel te komen dat wordt toegepast op alle bewegingen voor desbetreffende luchthaven.

De routeprofielen die doorlopen tot LTO-hoogte (3.000 voet) bleken om technische redenen problemen te geven met het gebruikte rekenmodel STACKS. Om dit op te lossen zijn de routeprofielen van de grond tot 500 m (1.640 voet) gevolgd. Hierna wordt aangenomen dat het vliegtuig op 500 m hoogte blijft. Deze vereenvoudiging levert rekenkundige voordelen op, terwijl het effect op concentraties op leefniveau beperkt is (NLR, 2023). De vereenvoudiging zal in ieder geval *niet* tot een onderschatting leiden van de luchtvaartbijdrage aan UFP-concentraties op leefniveau, omdat de emissies boven de 500 meter naar lagere hoogte (500 m) worden verplaatst.

Aangenomen wordt dat het vliegverkeer tijdens elk van deze onderdelen van de klim met een constante acceleratie versnelt. Voor de start wordt aangenomen dat deze aanvangt met een gemiddelde taxisnelheid van 6,4 m/s (ca. 23 km/u).

Voor de ruimtelijke verdeling van de emissies zijn de klimprofielen in het verlengde van de startbaan geplaatst. Ook wordt aangenomen dat de gashandelstand niet verandert binnen dezelfde vluchtfase. Dit betekent voor de start en de klim dat de brandstofstroom (brandstofverbruik per seconde) en daarmee de emissies per seconde constant is gedurende elk van deze vluchtfasen.

2.3.4 Emissies bij nadering vanaf 3.000 voet tot de grond

Voor de nadering wordt uitgegaan van een *straight-in routeprofiel* van 3.000 voet tot het begin van de landingsbaan. De vaststelling van deze routeprofielen is op identieke wijze verlopen als hierboven beschreven voor *straight-out*. Ook wordt dezelfde afvlakking op 500 m toegepast, in lijn met de klimprofielen. De snelheid neemt daarbij lineair af vanaf de snelheid op 3.000 voet tot de snelheid bij *touchdown*. Eenmaal op de landingsbaan wordt aangenomen dat het vliegtuig lineair vertraagt tot de gemiddelde taxisnelheid van 6,4 m/s (zo’n 23 km/u).

Tenslotte is aangenomen dat de brandstofstroom (brandstofverbruik per seconde) en daarmee de emissies per seconde tijdens de gehele nadering gelijk blijft. Dit is in lijn met de aanname dat de gashandelstand niet varieert binnen één vluchtfase.

2.3.5 APU-emissies

In deze studie wordt aangenomen dat de APU tijdens taxiën uit staat en alle APU-emissies derhalve op het platform plaatsvinden. Bij de emissieberekening is geen rekening gehouden met eventueel gebruik van (elektrische) generatoren of walstroom die het gebruik van de APU minder noodzakelijk maken.

Er wordt aangenomen dat de APU-emissies plaatsvinden op de vliegtuigopstelplaatsen, zie Appendix C. De APU-emissies worden uniform over de locaties verspreid zonder onderscheid tussen vliegtuigtypes.

De emissiehoogte hangt samen met de grootte van het vliegtuig. Hier is een gemiddelde emissiehoogte van 5 m aangenomen, die wordt toegepast op iedere APU-locatie.

2.3.6 Emissies overige bronnen

UFP-emissies uit grondbronnen zoals voertuigen of generatoren, en emissies tijdens het proefdraaien, tanken van vliegtuigen, of emissies uit bandenslijtage zijn niet meegenomen in deze studie. Dit geeft een onderschatting. Daarentegen is verminderd APU-gebruik door inzet van elektrische GPU's of walstroom ook niet meegenomen in de studie. Dit geeft een overschatting. Het netto effect van deze aannames op de berekende concentraties is onbekend.

2.3.7 Emissies boven de 3000 voet

Emissies van luchtverontreinigende stoffen boven de 3.000 voet vallen buiten de nationale rapportageverplichting en worden niet bijgehouden door Emissieregistratie. NLR proefberekeningen van UFP-concentraties op Groningen Airport Eelde bevestigen steekproefsgewijs dat het effect van emissies boven de 3.000 voet op de luchtkwaliteit op leefniveau zeer beperkt zal zijn. Hiervoor is gekeken naar het afzonderlijke effect van UFP-emissies tot een hoogte van 500 m en het effect van UFP-emissies op een hoogte tussen de 500 m en 3000 voet (~900 m) op de UFP-concentraties op leefniveau. Gemiddeld wordt 97% van de concentraties op leefniveau bepaald door emissies onder de 500 m. Op het luchthaventerrein is dit aandeel nog hoger (99,8%). Buiten het luchthaventerrein zijn emissies van grotere hoogten, relatief aan het totaal, weliswaar belangrijker (maximaal 7,7%) maar is de totale concentratie lager dan op het luchthaventerrein.

2.4 Uitvoeren concentratieberekeningen

Na het bepalen van de totale emissies en de plaats waar deze worden uitgestoten (zie Sectie 2.3), is onderzocht hoe de uitstoot zich verspreidt door de lucht. De verspreiding van de emissie hangt onder meer af van het weer en de eigenschappen van de uitlaatpluim van het vliegtuig. De verspreiding is berekend met het dispersiemodel STACKS. Hieronder volgt een korte omschrijving van het gebruikte model en een overzicht van de gemaakte keuzes en aannames bij de UFP-concentratieberekening.

2.4.1 STACKS verspreidingsmodel

De verspreiding van emissies wordt gesimuleerd met het STACKS-verspreidingsmodel in combinatie met de luchtvaartmodule. STACKS is een rekenprogramma om luchtkwaliteit mee te bepalen als gevolg van uitstoot van industrie en verkeer. Het model maakt gebruik van een zogeheten 'Gaussisch pluimmodel' en is opgezet volgens het Nieuw Nationaal Model (NNM). STACKS is door de staatssecretaris van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat goedgekeurd als onderdeel van Standaardrekenmethode 3 (SRM3) (DGMR, 2023).

Het STACKS-model voegt de vliegtuigemissies samen met informatie over het studiegebied. Kenmerken als de ruwheid van het oppervlak worden door het model verzameld, evenals (geïnterpoleerde) meteorologische gegevens en achtergrondconcentraties. Het model kan de verspreiding van verschillende soorten stoffen berekenen. Afhankelijk van de stof waar het om gaat, worden er aannames gedaan over hoe de stof zich gedraagt. UFP wordt binnen STACKS gemodelleerd als inerte stof (dat wil zeggen: een stof die niet chemisch reageert met andere stoffen). Fysisch-chemische processen zoals coagulatie (samenklontering) worden dan niet meegenomen.

De verspreiding van de emissies door de lucht wordt per uur doorgerekend, waaruit voor elk rekenpunt (zie tabel 4) een concentratie volgt.

2.4.2 Uurverdeling emissies

De UFP-emissies hebben niet alleen een bepaalde locatie, maar zijn ook uitgestoten op een bepaalde tijd. Dit is echter niet af te leiden uit de brandstoftotalen. Daarom is per luchthaven een representatieve uurverdeling afgeleid uit het vliegtuigvolgsysteem FANOMOS.

2.4.3 Warmte-inhoud

Zowel uit de vliegtuigmotor als uit de uitlaat van de APU komt een hete pluim van uitstoot. Deze pluim stijgt onder invloed van warmte op. De warmte-inhoud⁶ van de pluim wordt berekend aan de hand van het brandstofverbruik, met behulp van de energetische waarde van de brandstof (43,1⁷ MJ per kg kerosine).

2.4.4 Weer, achtergrondconcentratie en ruwheid

Het rekenmodel haalt informatie over het weer op met behulp van de zogeheten 'PreSRM module'⁸. Voor de berekeningen wordt gebruikt gemaakt van meerjarige meteorologie over de voorgeschreven periode van 2005 t/m 2014⁹. Hiermee wordt aangesloten bij de aanvullende afspraken die zijn gemaakt binnen het NNM. Dit wordt gedaan om het effect van tijdelijke weersextremen op de eindresultaten te dempen en is om die reden de standaard aanpak bij luchtkwaliteitsstudies. Het gebruik van meerjarige meteorologie geeft een robuuster beeld van de concentraties.

⁶ Over warmte-inhoud is veel te doen geweest bij het berekenen van de gevolgen van vliegtuigemissies. Sommige rekenmodellen zijn oorspronkelijk niet ontworpen om te rekenen aan vliegtuigemissies. Als gevolg hiervan wordt de pluimstijging niet automatisch goed berekend. De STACKS luchtvaartmodule houdt rekening met de pluimkenmerken die horen bij vliegtuigemissies en heeft daarmee geen aanpassingen in de warmte-inhoud nodig voor het modelleren van pluimstijging.

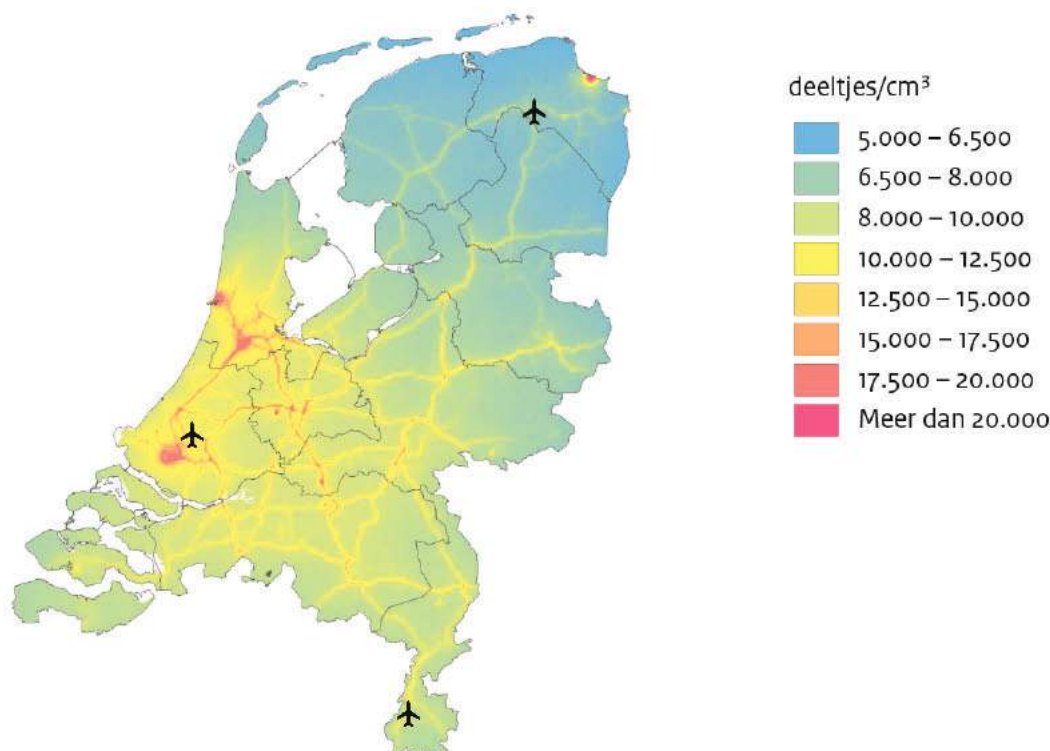
⁷ De energetische waarde van kerosine varieert over tijd en per regio waar de kerosine geproduceerd is. De gerapporteerde waarde is een inschatting op basis van meerdere bronnen.

⁸ PreSRM staat voor Preprocessor Standaard Rekenmethoden.

⁹ Op 9 april 2025, tijdens de uitvoer van deze studie, is een nieuwe versie van de PreSRM-module beschikbaar gekomen. Deze rekent met meerjaarsgemiddelde meteo van 2014 tot en met 2024. Deze versie is nog niet geïmplementeerd in de luchtvaartmodule.

Voor UFP zijn er (nog) geen gegevens over achtergrondconcentraties beschikbaar binnen de PreSRM module. Wel biedt het Compendium voor de Leefomgeving (CLO) een indicatieve, landelijke UFP-concentratiekaart voor het jaar 2022 (CLO, 2024). CLO geeft aan dat deze waarden te onzeker zijn om conclusies aan te verbinden. De gegevens zijn dan ook niet gebruikt in de berekeningen van voorliggende studie. Figuur 3 toont de indicatieve achtergrond als context bij de berekende UFP-concentraties door vliegtuigemissies.

Indicatieve concentratie ultrafijnstof, 2022



Bron: RIVM 2022, Gebaseerd op een combinatie van resultaten van verschillende studies, meetcampagnes en modellering.

RIVM/jan23
www.clo.nl/nl062301

Figuur 3: indicatieve waardes UFP-achtergrondconcentratie in Nederland (CLO, 2024). De locaties van de drie luchthavens zijn toegevoegd door NLR

De terreinruwheid is een maat voor de obstakels op leefniveau, die van invloed zijn op de verspreiding van stoffen. Daarbij is per luchthaven gekeken naar het luchthaventerrein; nabij de uitstootlocaties is deze immers het meest relevant. Uit PreSRM volgt een terreinruwheid van 0,06 m voor Groningen Airport Eelde, 0,11 m voor Maastricht Aachen Airport en 0,08 m voor Rotterdam The Hague Airport.

2.4.5 Studiegebied, emissie- en rekenpunten

De omvang van het studiegebied waarbinnen de emissies vallen wordt afgebakend naargelang het verloop van de vluchtprofielen, zodanig dat alle emissies worden meegenomen. Naast de omvang van het studiegebied moet er een keuze worden gemaakt voor de resolutie waarmee gerekend wordt. Het rekenmodel deelt het gebied op in blokjes of 'gridcellen' waarbinnen de emissiegegevens en andere relevante parameters worden verzameld. Des te kleiner deze blokjes zijn, des te gedetailleerder de resultaten in kaart kunnen worden gebracht. Kleinere cellen leiden echter ook

tot een langere rekentijd en leiden niet automatisch tot nauwkeurigere resultaten¹⁰. De gekozen resolutie moet passen bij de kwaliteit van de invoer, de beschikbare rekentijd, de nauwkeurigheid van het model en de aard van de uitkomsten.

Aan iedere cel binnen het rekengebied wordt een bepaalde hoeveelheid emissies toegeschreven, afhankelijk van het verkeer dat de cel doorkruist. Voor de gemiddelde locatie van deze emissies binnen de cel wordt het zwaartepunt op basis van brandstofverbruik binnen de cel bepaald. De vastgestelde celgrootte is voor alle luchthavens 250 x 250 m. De gridcelhoogte hangt af van de afstand tot de grond en neemt toe met toenemende hoogte, als weergegeven in Tabel 2. Hier is voor gekozen omdat de hoeveelheid UFP-emissies zich concentreert op lagere hoogte, en emissies op lagere hoogte tevens een grotere invloed hebben op de concentraties op leefniveau. De bovenste laag betreft de laag tussen de 500 m en het plafond van 3.000 voet (ruim 900 m), waarbij ten behoeve van de berekening van de concentraties alle emissies binnen deze laag aan een hoogte van 500 m zijn toegekend.

Tabel 2: Gedefinieerde hoogtelagen binnen deze studie waarin emissies worden onderverdeeld

	Laag 1	Laag 2	Laag 3	Laag 4	Laag 5	Laag 6	Laag 7
Ondergrens hoogtelaag in meter	0	5	20	50	100	200	500
Bovengrens hoogtelaag in meter	5	20	50	100	200	500	914

Het STACKS-model berekent de concentraties die volgen uit de ingevoerde emissies op gedefinieerde rekenpunten. Het gebied waarbinnen deze rekenpunten vallen moet groot genoeg zijn om alle relevante concentraties te berekenen. In deze studie is voor elk rekengebied een rechthoekig vlak met hoge resolutie gedefinieerd, omringd door een grid met lagere resolutie. Tabel 3 toont de omvang van het rekengebied en de gekozen resoluties per luchthaven.

Tabel 3: Rekengebied en resoluties per luchthaven voor berekening UFP-concentraties

	Groningen	Maastricht	Rotterdam
Rekengebied (lengte x breedte)	15 x 15 km	20 x 15 km ¹¹	15 x 15 km
Aantal rekenpunten	461	463	461
Resolutie rekenpunten			
Grof	1 x 1 km	1 x 1 km	1 x 1 km
Fijn	250 x 250 m, 3 x 4 km rondom	250 x 250 m, 3 x 4 km rondom	250 x 250 m, 3 x 4 km rondom

¹⁰ De nauwkeurigheid hangt ook samen met de kwaliteit van de gebruikte data en de onderliggende aannames die zijn gebruikt om de emissieverdeling vast te stellen.

¹¹ Er is gekozen om de rekenpunten die voorbij de Nederlandse grens liggen niet mee te nemen in verband met de relevantie voor Nederlandse handhaving.

3 Resultaten

Dit hoofdstuk laat per luchthaven zien waar de UFP-uitstoot plaatsvindt en tot welke jaargemiddelde concentraties van UFP op leefniveau deze uitstoot leidt.

De totale UFP-emissies worden berekend volgens de methode zoals toegelicht in sectie 2.3.1 op basis van de brandstoftotalen voor het jaar 2023 uit de Emissieregistratie en vaste emissiefactoren per vluchtfase. Voor het maken van een ruimtelijke verdeling van de door TNO aangeleverde brandstoftotalen is de werkwijze gevolgd die in Sectie 2.3 wordt uitgelegd. De emissies verspreiden zich na uitstoot, onderhevig aan (veranderende) meteorologische omstandigheden, door de lucht en verhogen de concentraties van UFP op leefniveau. Om tot de concentraties te komen, is de werkwijze gevolgd die in Sectie 2.4 is uiteengezet.

3.1 Resultaten GAE

3.1.1 Brandstofverbruik GAE

Voor Groningen Airport Eelde wordt uitgegaan van een jaarverbruik van 590.000 kg. Ten opzichte van Maastricht en Rotterdam is het brandstofverbruik in de lucht relatief hoog ten opzichte van het verbruik op de grond. Het verbruik per vluchtfasen, zowel absoluut als relatief, zijn voor Groningen Airport Eelde weergegeven in Tabel 4.

Tabel 4: Brandstofverbruik per vluchtfase voor Groningen Airport Eelde

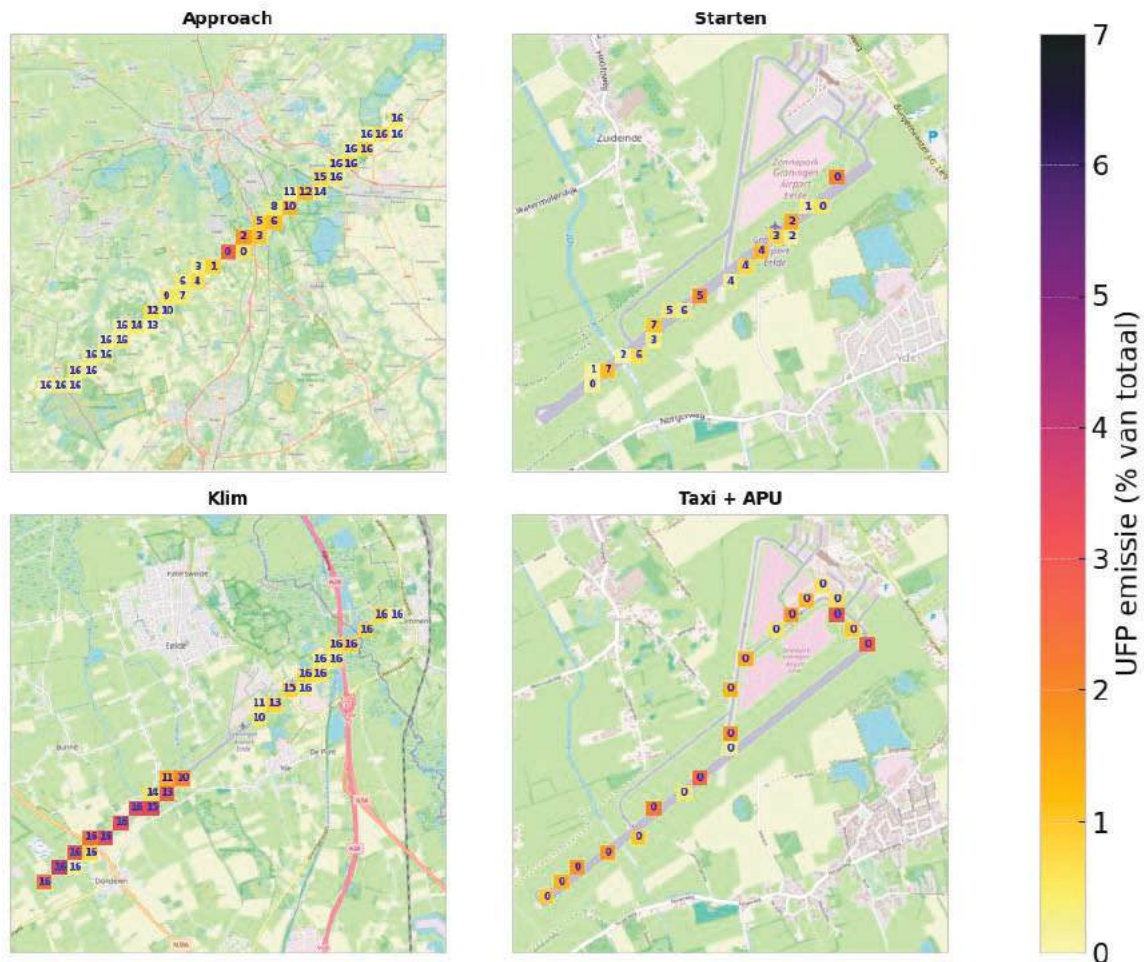
	Taxi (idle)	Start (take-off)	Klim tot 3.000 voet	Nadering vanaf 3.000 voet	APU	Totaal
Brandstof in kg	132.372	75.088	183.939	156.127	42.919	590.445
Relatief	22%	13%	31%	26%	7%	100% ¹²

3.1.2 Ruimtelijke emissieverdeling GAE

Voor Groningen Airport Eelde is de ruimtelijke emissieverdeling per vluchtfase te zien in Figuur 3. Circa de helft van de emissies worden uitgestoten op of binnen enkele kilometers van de luchthaven, op een hoogte van minder dan 1.000 voet. Taxi en APU, samen goed voor 27,2% van de totale emissies, worden over een relatief klein gebied uitgestoten, afgezet tegen emissies binnen de *approach*-fase die over tientallen kilometers verspreid tot slechts 20,7% van de totale emissies leiden. Emissies binnen de klimfase bedragen circa 40% van het totaal, maar worden op 1.000 voet of hoger uitgestoten waar het effect op luchtverontreiniging op leefniveau gering is.

¹² Cijfers zijn afgerond en tellen daardoor op tot 99%

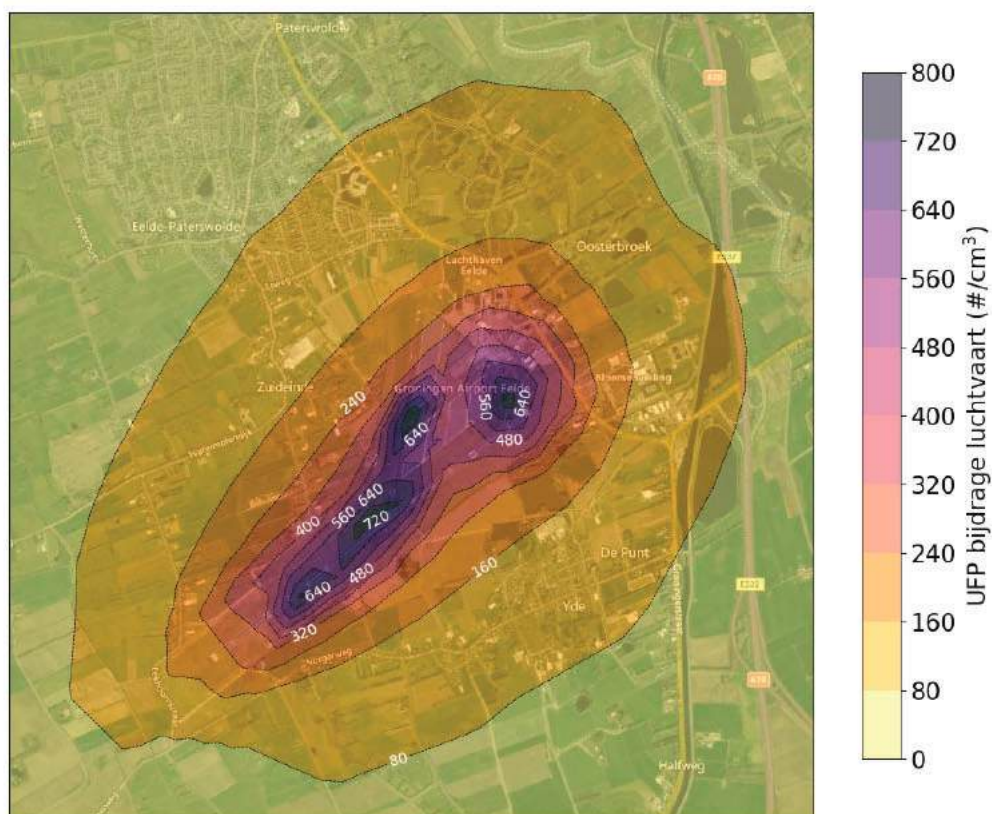
Binnen de *approach*-fase vindt het grootste deel van de emissies plaats ten noordoosten van de luchthaven. Dit staat in contrast met emissies binnen de klimfase; hiervan wordt het overgrote deel ten zuidwesten van de luchthaven uitgestoten. Dit is te herleiden naar de dominante windrichting; door een frequente zuidwestenwind wordt doorgaans richting het zuidwesten gestart en richting het zuidwesten geland. Dit leidt ertoe dat de meeste *approach*-emissies ten noordoosten van de luchthaven eindigen en de meeste klimemissies ten zuidwesten van de luchthaven terechtkomen.



Figuur 4: De geaggregeerde emissietotalen weergegeven per vluchtfase, met bijbehorende ruimtelijke schaal waarop deze emissies worden uitgestoten. Emissiepunten voor approach, starten, klim en taxi+APU zijn respectievelijk weergegeven op een schaal van 36, 4, 10 en 3 km (in beide richtingen). De kleuren representeren het percentage UFP op het totaal dat binnen desbetreffende vluchtfase op aangegeven locatie wordt uitgestoten. De blauwe getallen geven het flight level (honderden voet) weer waarop gemiddeld wordt uitgestoten

3.1.3 UFP-concentraties GAE

De door STACKS berekende luchtvaartbijdragen aan de jaarconcentraties UFP zijn voor Groningen Airport Eelde weergegeven in Figuur 4. Over het luchthaventerrein zijn enkele hotspots te identificeren die corresponderen met emissielocaties van taxiënde vliegtuigen en APU's (zie Figuur 3). Er wordt een maximale UFP-concentratie van 808 deeltjes per cm^3 berekend. Buiten het luchthavengebied ligt de bronbijdrage aan UFP aan de rand van het terrein op ongeveer 320 deeltjes per cm^3 . Deze concentratie daalt al snel onder de 160 deeltjes per cm^3 . De kaart van het CLO (Figuur 3) laat een indicatieve achtergrondconcentratie in de luchthavenomgeving zien van 5.000 tot 6.500 deeltjes per cm^3 .



Figuur 5: Berekende UFP-concentraties op en rondom Groningen Airport Eelde voor het jaar 2023

3.2 Resultaten MAA

3.2.1 Brandstofverbruik MAA

Voor Maastricht Aachen Airport wordt uitgegaan van een jaarverbruik van 1,768,000 kg. De luchthaven faciliteert relatief veel grote (vracht)vliegtuigen waardoor het jaarverbruik ongeveer drie keer zo hoog is als op Groningen bij een lager aantal vliegbewegingen. Hierbij wordt 50% van de brandstof op de grond verbruikt tegenover 50% in de lucht (tot 3000 voet). Tabel 5 geeft het verbruik voor Maastricht Aachen Airport weer.

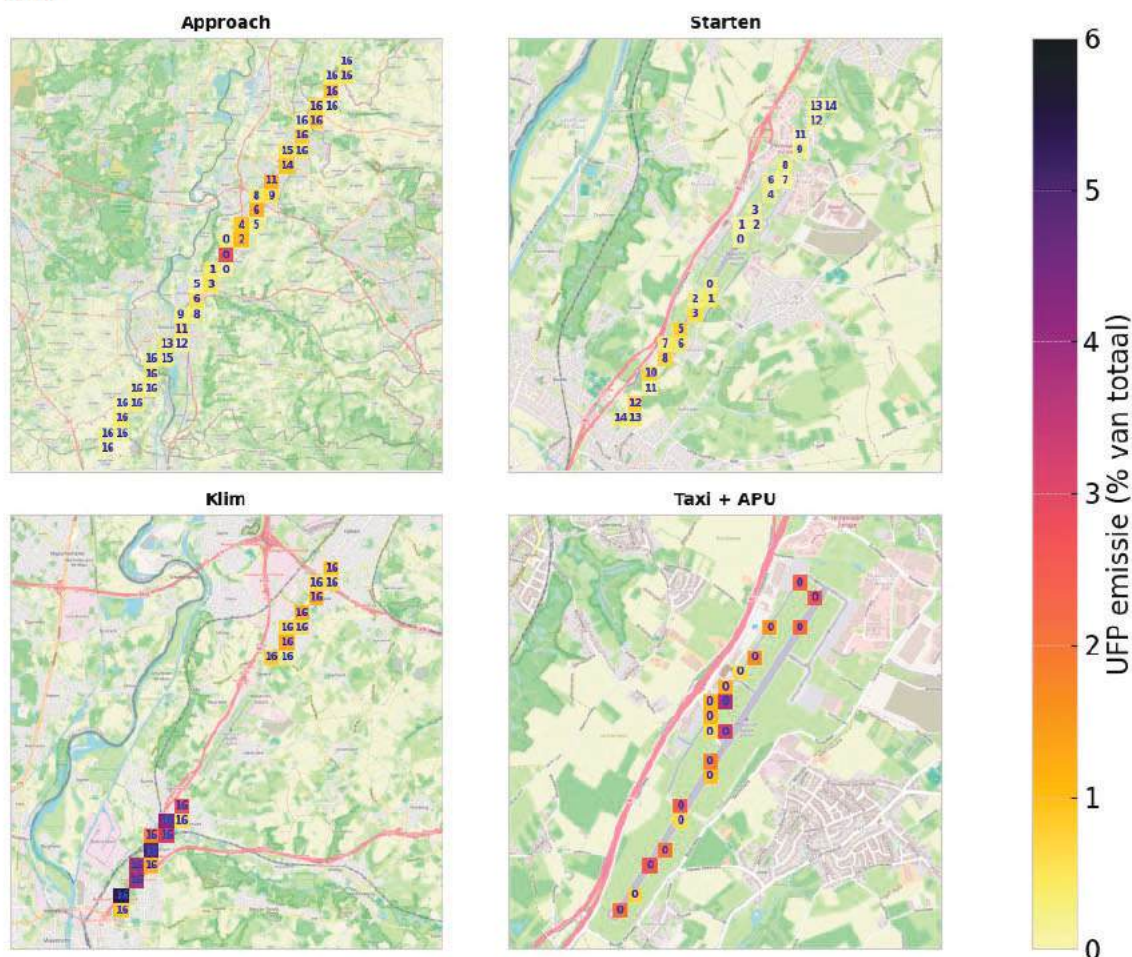
Tabel 5: Brandstofverbruik per vluchtfase voor Maastricht Aachen Airport

	Taxi (idle)	Start (take-off)	Klim tot 3.000 voet	Nadering vanaf 3.000 voet	APU	Totaal
Brandstof in kg	423.920	270.940	519.372	372.576	181.111	1.767.919
Relatief	24%	15%	29%	21%	10%	100% ¹³

¹³ Cijfers zijn afgerond en tellen daardoor op tot 99%

3.2.2 Ruimtelijke emissieverdeling MAA

De ruimtelijke patronen in de emissies zijn voor Maastricht Aachen Airport weergegeven in Figuur 5. Wederom is de *hotspot* aan emissies afkomstig van de klimfase te zien ten zuidwesten van de luchthaven, waar de meeste *approach*-emissies zich ten noordoosten van de luchthaven bevinden. De kleinere relatieve bijdrage van starten op het totaal, vergeleken met Groningen Airport Eelde, is ook zichtbaar, evenals de grotere relatieve bijdrage van taxibewegingen en APU.

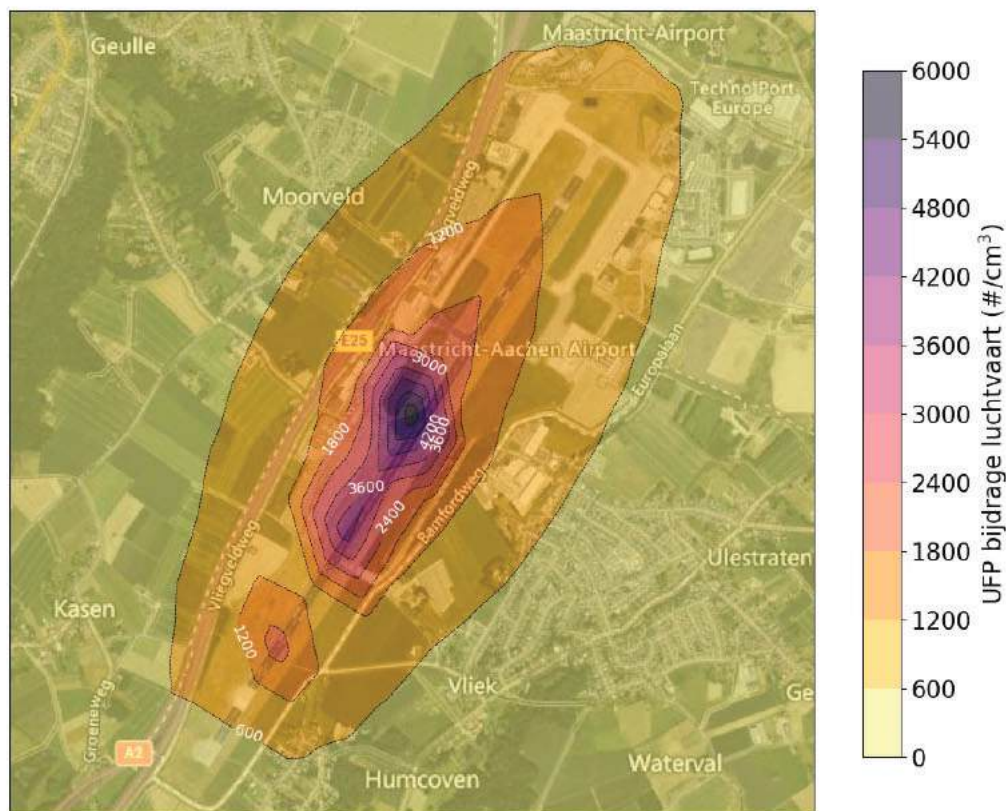


Figuur 6: De geaggregeerde emissietotalen weergegeven per vluchtfase, met bijbehorende ruimtelijke schaal waarop deze emissies worden uitgestoten. Emissiepunten voor approach, starten, klim en taxi+APU zijn respectievelijk weergegeven op een schaal van 40, 6, 14 en 3 km (in beide richtingen). De kleuren representeren het percentage UFP op het totaal dat binnen desbetreffende vluchtfase op aangegeven locatie wordt uitgestoten. De blauwe getallen geven het flight level (honderden voet) weer waarop gemiddeld wordt uitgestoten

3.2.3 UFP-concentraties MAA

Voor Maastricht Aachen Airport is de totale gemodelleerde UFP-concentratie weergegeven in Figuur 6. Vergeleken met Groningen Airport Eelde is de berekende UFP-bijdrage sterker geconcentreerd op één locatie: het platformgebied waar de APU-emissies plaatsvinden en wat tevens als start- en eindpunt fungeert van iedere taxi-route. De grotere bijdrage van APU- (en taxi-) emissies op het geheel, leidt tot de beschreven patronen in de UFP-concentratie op leefniveau. Een maximale UFP-concentratie van 5.919 deeltjes per cm^3 is berekend. Kijkend naar het gebied buiten de

inrichting kan op basis van Figuur 6 worden geconcludeerd dat de bronbijdragen onder de 600 deeltjes per cm^3 liggen. De kaart van het CLO (Figuur 3) laat een indicatieve achtergrondconcentratie in de luchthavenomgeving zien van 8.000 tot 10.000 deeltjes per cm^3 .



Figuur 7: Berekende UFP-concentraties op en rondom Maastricht Aachen Airport voor het jaar 2023. N.B.: Het concentratiebereik op de kleurenschaal wijkt af het bereik in Figuur 4. Vanuit illustratieve overwegingen zijn de minimale en maximale waarden van de kleurenschaal niet gelijkgetrokken tussen de figuren

3.3 Resultaten RTHA

3.3.1 Brandstofverbruik RTHA

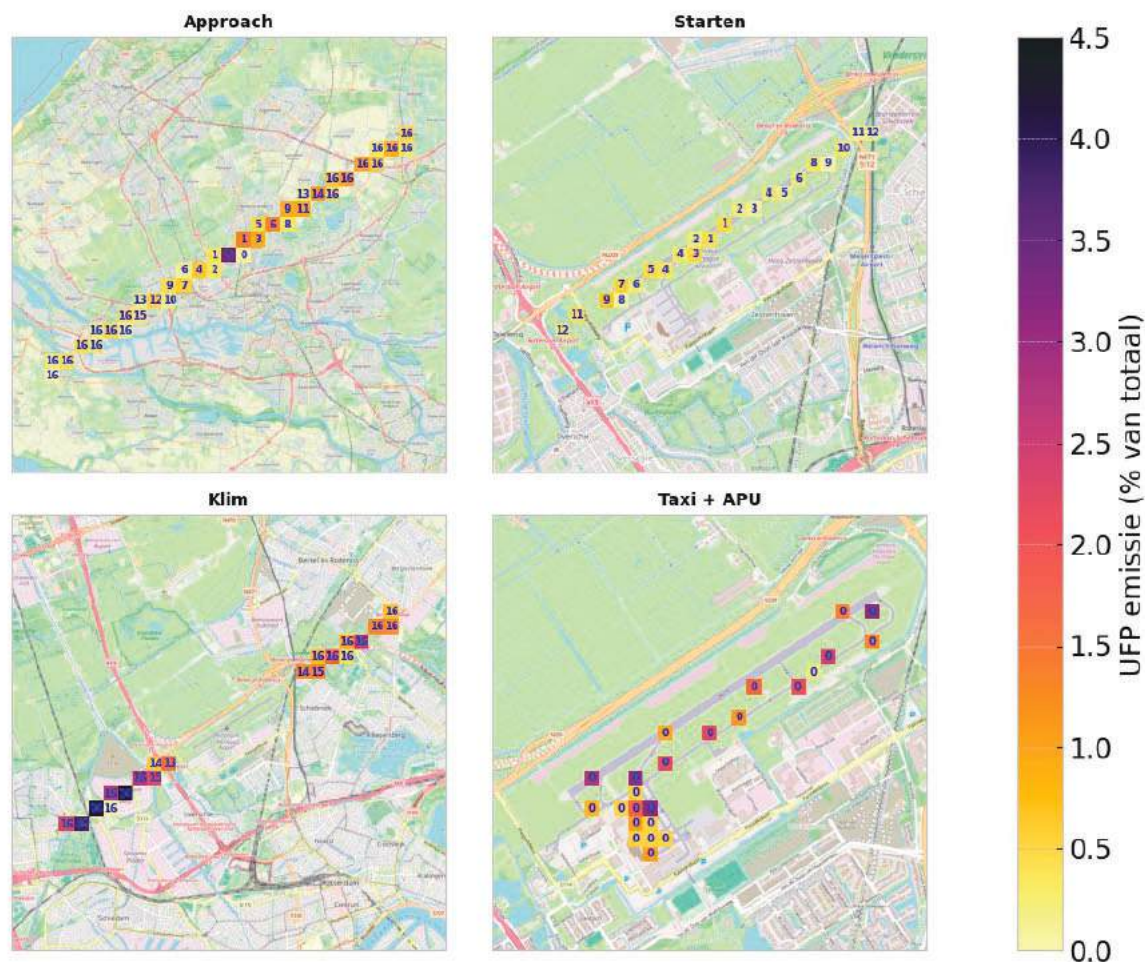
Het jaarverbruik op Rotterdam The Hague Airport ligt op 6.148.000 kg. Hierbij wordt 50% van de brandstof op de grond verbruikt tegenover 50% in de lucht (tot 3000 voet). Het aandeel APU is hierbij met 14% relatief groot. Tabel 6 geeft het verbruik voor Rotterdam The Hague Airport weer.

Tabel 6: Brandstofverbruik per vluchtfase voor Rotterdam The Hague Airport

	Taxi (idle)	Start (take-off)	Klim tot 3.000 voet	Nadering vanaf 3.000 voet	APU	Totaal
Brandstof in kg	1.546.023	720.267	1.626.520	1.395.934	859.342	6.148,086
Relatief	25%	12%	26%	23%	14%	100%

3.3.2 Ruimtelijke emissieverdeling RTHA

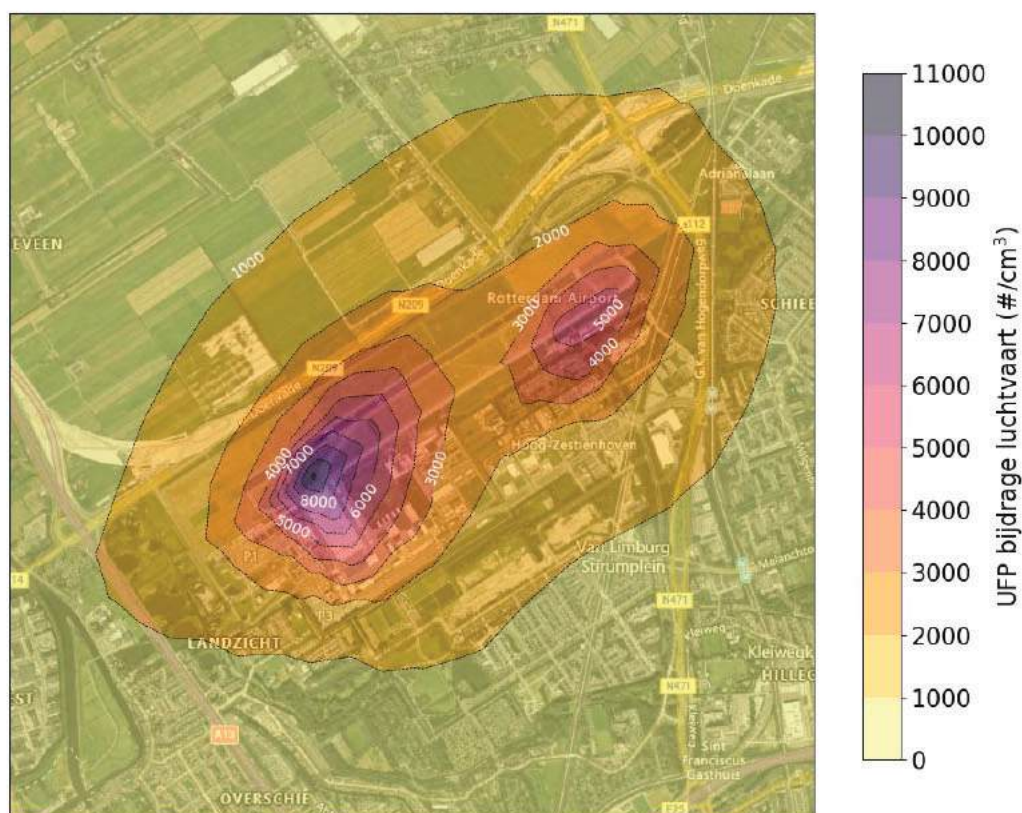
Ten slotte is de ruimtelijke spreiding van emissies van vluchtfase voor Rotterdam The Hague Airport te zien in Figuur 7. Het algemene beeld is gelijk aan de emissieverdeling op Groningen Airport Eelde en Maastricht Aachen Airport.



Figuur 8: De geaggregeerde emissietotalen weergegeven per vluchtfase, met bijbehorende ruimtelijke schaal waarop deze emissies worden uitgestoten. Emissiepunten voor approach, starten, klim en taxi+APU zijn respectievelijk weergegeven op een schaal van 36, 4, 10 en 2,6 km (in beide richtingen). De kleuren representeren het percentage UFP op het totaal dat binnen desbetreffende vluchtfase op aangegeven locatie wordt uitgestoten. De blauwe getallen geven het flight level (honderden voet) weer waarop gemiddeld wordt uitgestoten

3.3.3 UFP-concentraties RTHA

Figuur 8 geeft ten slotte de berekende UFP-concentraties weer op en rondom Rotterdam The Hague Airport. De maximale concentratie nadert hier de 10.292 deeltjes per cm^3 . De hoogste bronbijdragen concentreren zich rond het gebied van de vliegtuigopstelplaatsen, waar de APU's worden gebruikt en de taxiroutes beginnen of eindigen. De bronbijdragen nemen snel af naar onder de 2.000 deeltjes per cm^3 buiten de inrichting, in de directe omgeving van de luchthaven. De kaart van het CLO (Figuur 3) laat een indicatieve achtergrondconcentratie in de luchthavenomgeving zien van 10.000 tot 15.000 deeltjes per cm^3 .



Figuur 9: Berekende UFP-concentraties op en rondom Rotterdam The Hague Airport voor het jaar 2023. N.B.: Het concentratiebereik op de kleurenschaal wijkt af het bereik in Figuur 4 en Figuur 6. Vanuit illustratieve overwegingen zijn de minimale en maximale waarden van de kleurenschaal niet gelijkgetrokken tussen de figuren

4 Conclusies

4.1 Resultaten

De studie laat zien dat de berekende UFP-concentraties variëren van maximaal 808 deeltjes per cm^3 op Groningen Airport Eelde tot maximaal 10.292 deeltjes per cm^3 op Rotterdam The Hague Airport. Dat de resultaten zo ver uiteen liggen past bij het grote verschil in activiteit op de luchthavens. De resultaten staan samengevat in de tabel hieronder.

Tabel 7: UFP-emissie, hoogste concentratie en achtergrond per luchthaven voor het jaar 2023

	Groningen Airport Eelde	Maastricht Aachen Airport	Rotterdam The Hague Airport
Brandstofverbruik [kg]	590.445	1.767.919	6.148.086
Hoogste UFP- concentratie [aantal/ cm^3]	808	5.919	10.292
UFP- achtergrondconcentratie incl. luchtvaart [aantal/ cm^3] ¹⁴	5.000- 6.500	8.000- 10.000	10.000- 15.000

Hoewel de WHO aangeeft te weinig informatie te hebben om normen te bepalen voor veilige UFP-concentraties, staan er in het WHO-richtlijnendocument wel enkele aanbevelingen voor de classificatie van UFP-concentraties: concentraties lager dan 1.000 deeltjes per cm^3 worden geclassificeerd als 'laag', concentraties hoger dan 10.000 deeltjes per cm^3 (24-uur gemiddelde) of 20.000 deeltjes per cm^3 (uur gemiddelde) worden geclassificeerd als 'hoog' (WHO, 2021). Over jaargemiddelde concentraties zoals berekend in deze studie zijn geen uitspraken van de WHO gevonden.

4.2 Aannames en beperkingen studie

Deze sectie geeft een overzicht van de belangrijkste aannames en beperkingen van deze studie. De model-technische onzekerheden die voortkomen uit het gebruik van STACKS zijn opgenomen in de NNM-documentatie.

De emissiefactoren en modellering van de pluimstijging zijn bepaald op basis van metingen aan een beperkt aantal vliegtuigen, motoren en APU's. Het is onbekend in welke mate deze toepasbaar zijn op andere, veelal kleinere vliegtuigen. Ook worden brandstofbesparende of emissiebeperkende maatregelen nog niet meegenomen in de registratie van het brandstofverbruik waardoor de werkelijke uitstoot afwijkt.

De aanwezigheid van gebouwen en andere fysieke obstakels op de luchthaven beperkt wordt meegenomen in de berekening. Dit heeft niet zo zeer effect op de hoogte van de jaargemiddelde concentraties, maar wel waar de piekconcentraties kunnen optreden. De bepaling van luchthaven-specifieke ruwheden neemt wel de aanwezigheid van bebouwing mee op het luchthaventerrein. Hier wordt echter een gemiddelde waarde voor gebruikt die over het gehele rekengebied wordt toegepast. Metingen op de luchthaven, bijvoorbeeld voor handhaving van de ARBO (arbeidsomstandigheden) wet- en regelgeving, laten deze effecten wel zien.

¹⁴ Waarden afgelezen van indicatieve concentratiekaart van het CLO (Figuur 3)

Andere aannames die gemaakt zijn vanwege ontbrekende data of modelmatige overwegingen zijn het niet meenemen van emissies boven de 3.000 voet (onderschatting), het afvlakken van vliegprofielen op 500 m hoogte (overschatting), het gebruik van meerjarige meteo (onder- of overschatting) en het hanteren van vaste uitstoothoogtes voor hoofdmotor- en APU-emissies (onder- of overschatting). Op basis van validatie-berekeningen gemaakt voor deze en eerdere studies wordt het effect van deze aannames op de jaargemiddelde luchtkwaliteit zeer klein geacht.

4.3 Aanbevelingen

Op basis van de conclusies en beperkingen uit deze studie doen we de volgende drie aanbevelingen.

De emissiefactoren voor UFP zijn afgeleid uit ruim een decennium oude metingen aan een beperkt aantal, grotere vliegtuigen. Het is onbekend in welke mate deze emissiefactoren representatief zijn voor nieuwere vliegtuigen of vliegtuigen van een ander type. Ook is onbekend in welke mate de emissiefactoren variëren over de tijd of onder verschillende omstandigheden. Hierdoor wordt de UFP-emissie mogelijk onder- of juist overschat. Door nieuwe metingen uit te voeren aan meerdere vliegtuigtypen onder verschillende omstandigheden wordt de toepasbaarheid van de emissiefactoren vergroot en ontstaan mogelijk nieuwe inzichten die kunnen leiden tot een lagere uitstoot van UFP door vliegtuigen.

Elke draaiende verbrandingsmotor produceert emissies die negatieve gevolgen kunnen hebben voor de gezondheid. Vliegtuigmotoren vormen daardoor een potentieel risico voor medewerkers op het platform. Door vliegtuigen met uitgeschakelde motoren van en naar het platform te slepen kan dit risico worden beperkt. Om operationele redenen en een gebrek aan geschikte sleepvoertuigen wordt dit zogeheten operationeel slepen nog maar zeer beperkt in de praktijk gebracht. Aanbevolen wordt om samen met de luchthavenpartijen deze redenen in kaart te brengen, te onderzoeken hoe deze in de praktijk kunnen worden opgelost en te blijven investeren in materieel wat operationeel slepen mogelijk maakt.

Als laatste is onvoldoende bekend over de (langere termijn) gezondheidsimpact van UFP. Aanbevolen wordt om te blijven investeren in onderzoek naar de gezondheidsimpact van UFP om kaders te kunnen stellen, passende en effectieve maatregelen te kunnen nemen en de werkomstandigheden op het platform te kunnen verbeteren.

5 Referenties

- Adecs. (2023). *Bijdrage Luchtvaart aan lokale luchtkwaliteit*. Den Haag: Adecs Airinfra Consultants BV.
- CLO. (2024, december 11). *Ultrafijnstof in de lucht*. Retrieved from Compendium voor de leefomgeving:
<https://www.clo.nl/indicatoren/nl062301-ultrafijnstof-in-de-lucht>
- DGMR. (2023). *Modules en uitbreidingen - luchtkwaliteit (SRM1, SRM2 en NNM/SRM3)*. Retrieved from DGMR:
<https://dgmrsoftware.nl/producten/geluid-en-luchtkwaliteit/geomilieu/>
- Hoolhorst, A., Erbrink, J., & Kokmeijer, E. (2020). *Luchtkwaliteit en stikstofdepositie rond luchthaven Schiphol - deelrapport voor het MER NNHS*. NLR i.s.m. Erbrink Stacks Consult en DNV GL.
- ICAO. (2020, juli). *Local air quality technology standards*. Retrieved from Website of the International Civil Aviation Organisation: https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/LAQ_TechnologyStandards.aspx
- ICAO. (2024, July 07). *ICAO Aircraft Engine Emissions Databank*. Retrieved from Website of EASA:
<https://www.easa.europa.eu/en/domains/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank>
- IPLO. (2023, April). *Emissiedatabase luchtvaart*. Retrieved from Informatiepunt Leefomgeving:
<https://iplo.nl/thema/lucht/vaststellen-luchtkwaliteit/emissiedatabase-luchtvaart/>
- Janssen, N., Houthuijs, D., & Dusseldorp, A. (2022). *Gezondheidseffecten van ultrafijn stof van vliegverkeer rond Schiphol*. Bilthoven: RIVM.
- LNV. (2023). *Ontwerpbesluit Wnb-vergunning exploitatie Maastricht Aachen Airport*. Retrieved from Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit:
https://puc.overheid.nl/natuurvergunningen/doc/PUC_773756_17/1/
- Lobo, P., Rye, L., Christie, S., Williams, P., Uryga-Bugajska, I., Wilson, C., . . . Pourkashanian, M. (2012). Impact of Alternative Fuels on Emissions Characteristics of a Gas Turbine Engine - Part 1: Gaseous and Particulate Matter Emissions. *Environ. Sci. Technol.*, 46, 10805-10811.
- Mazaheri, M., Johnson, G., & Morawska, L. (2009). Particle and gaseous emissions from commercial aircraft at each stage of the landing and takeoff cycle. *Environ. Sci. Technol.*, 43.
- Møller, K., Brauer, C., Mikkelsen, S., & al, e. (2017). *Copenhagen Airport Cohort: air pollution, manual baggage handling and health*. BMJ Open.
- NLR. (2022). *Appendices van de voorschriften voor de berekening van de geluidsbelasting in Lden voor de overige burgerluchthavens bedoeld in artikel 8.1 van de Wet luchtvaart*. Nederlands Lucht- en Ruimtevaartcentrum.
- NLR. (2023). *Concentraties zeer zorgwekkende stoffen op en rondom Nederlandse luchthavens*. Amsterdam: Nederlands Lucht en Ruimtevaartcentrum NLR. doi:NLR-CR-2023-148 PT1 & PT2
- Owen, B. A. (2022). Review: Particulate Matter Emissions from Aircraft. *Atmosphere*.
- RIVM. (2024, april 15). *Methoderapport verkeer en vervoer 2024*. Retrieved from Website van Emissieregistratie:
<https://www.emissieregistratie.nl/documentatie/methoderapporten/verkeer-en-vervoer>
- TNO. (2024). *Samengestelde modeluitvoer brandstofverbruik per LTO-fase en vliegtuigtype in 2023, uit het CLEO model van TNO*. Emissieregistratie.
- WHO. (2021). *WHO global air quality guidelines*. Geneve, Zwitserland: World Health Organization.

Appendix A Invoergegevens

Appendix A.1 TIM-waarden

Tabel 8: Gebruikte time-in-mode waarden (in seconden) voor Groningen Airport Eelde

Groningen	HELI_P	HELI_T	JUMBO	PISTON	TF	TFBUS	TP	TPBUS
Approach	330	330	240	270	240	96	270	270
Climb-out			120	300	100	30	150	150
Idle	240	180	600	600	600	540	540	540
Take-off	480	300	56	18	34	24	30	30

Tabel 9: Gebruikte time-in-mode waarden (in seconden) voor Maastricht Aachen Airport

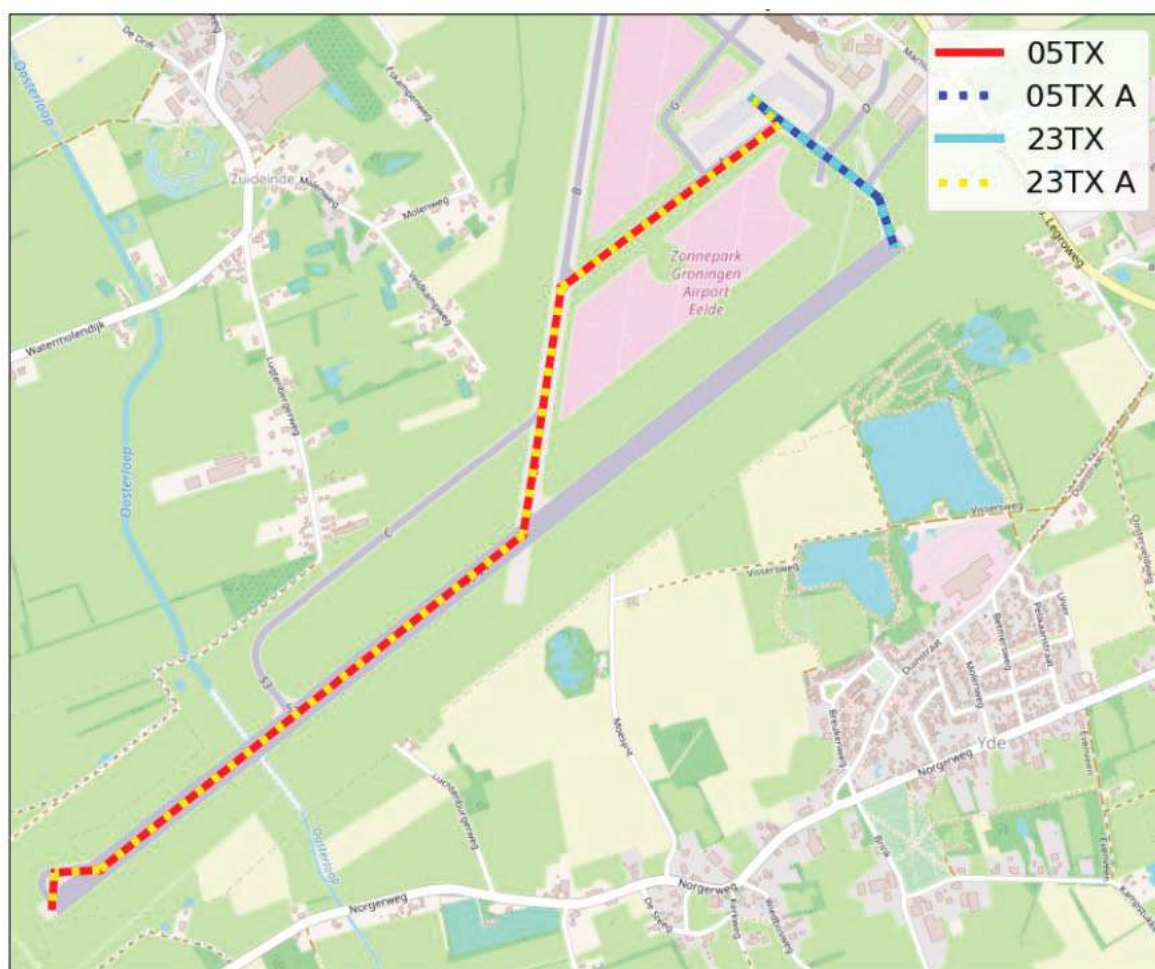
Maastricht	HELI_P	HELI_T	JUMBO	PISTON	TF	TFBUS	TP	TPBUS
Approach	330	330	240	270	240	96	270	270
Climb-out			120	300	100	30	150	150
Idle	240	180	760	600	760	900	900	900
Take-off	480	300	56	18	34	24	30	30

Tabel 10: Gebruikte time-in-mode waarden (in seconden) voor Rotterdam The Hague Airport

Rotterdam	HELI_P	HELI_T	JUMBO	PISTON	TF	TFBUS	TP	TPBUS
Approach	330	330	240	270	240	96	270	270
Climb-out			120	300	100	30	150	150
Idle	240	180	760	600	760	600	600	600
Take-off	480	300	56	18	34	24	30	30

Appendix B Taxiroutes en -afstanden

Appendix B.1 Taxiroutes en -afstanden Groningen Airport Eelde

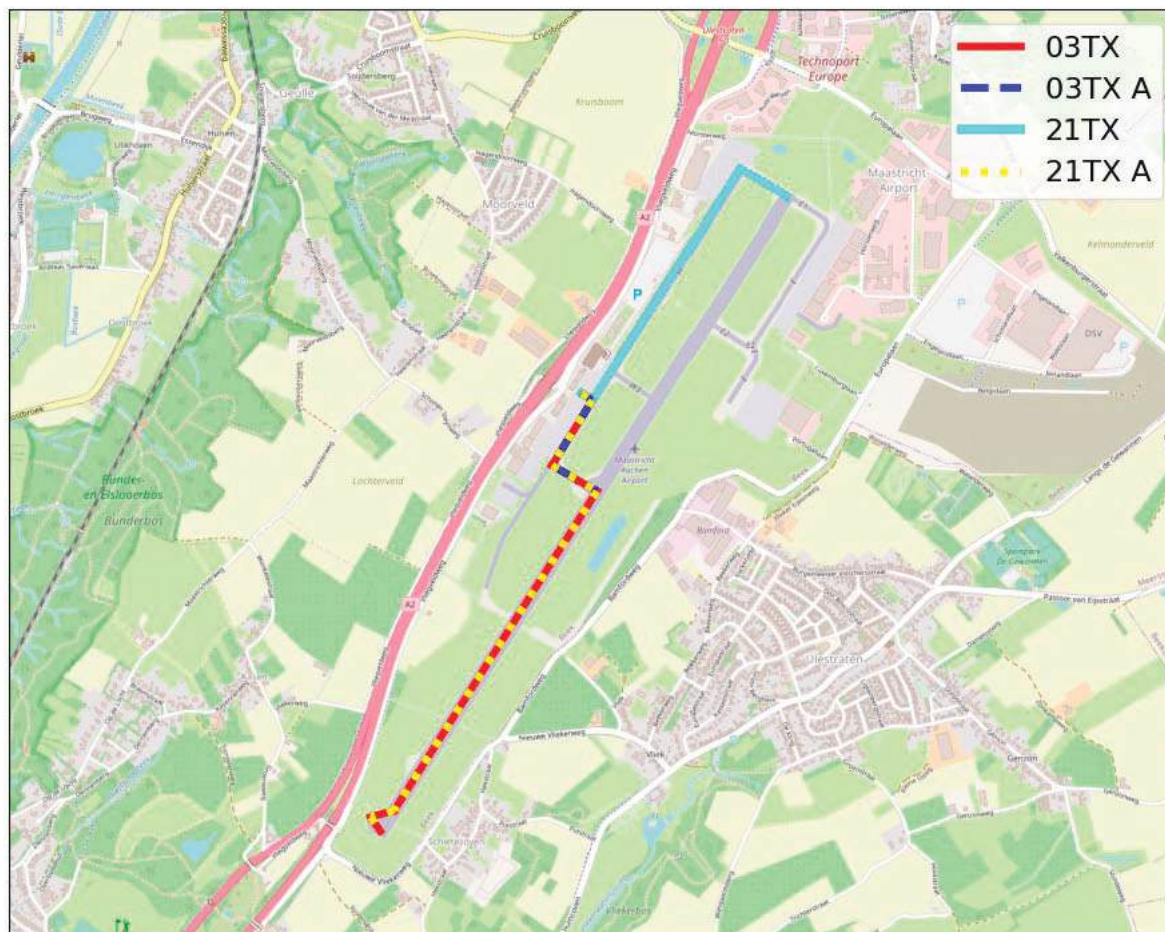


Figuur 10: Taxiroutes Groningen Airport Eelde. De routes eindigend op 'A' betreffen de aankomstroutes. De overige routes betreffen vertrekroutes

Tabel 11: Totale afstand in meters van iedere gedefinieerde taxiroute op Groningen Airport Eelde

Baankop	Vertrek- of aankomstroute	Platformgebied	Afstand (m)
05	Aankomst	-	490
05	Vertrek	-	2710
23	Aankomst	-	2710
23	Vertrek	-	490

Appendix B.2 Taxiroutes en -afstanden Maastricht Aachen Airport

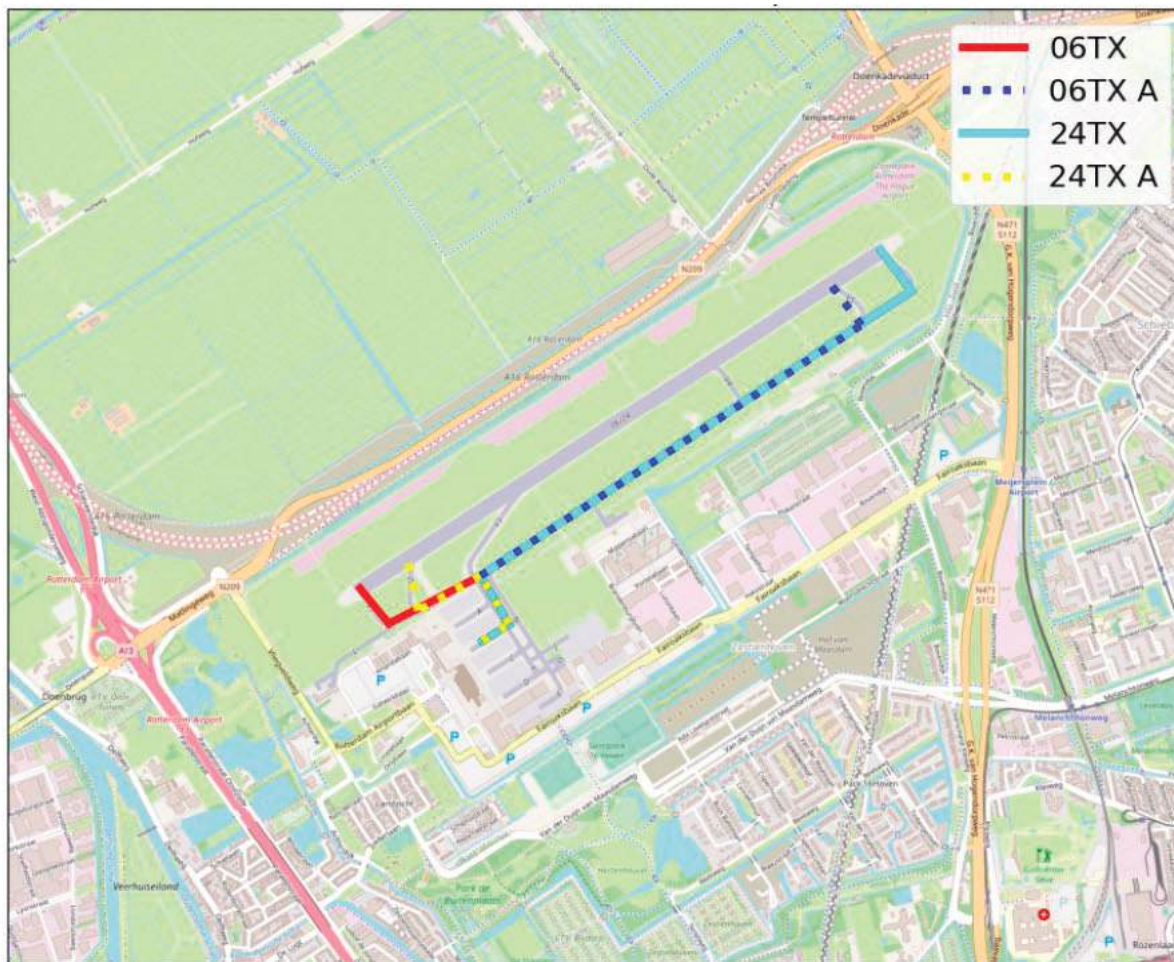


Figuur 11: Taxiroutes Maastricht Aachen Airport. De routes eindigend op 'A' betreffen de aankomstroutes. De overige routes betreffen vertrekroutes

Tabel 12: Totale afstand in meters van iedere gedefinieerde taxiroute op Maastricht Aachen Airport

Baankop	Vertrek- of aankomstroute	Platformgebied	Afstand (m)
03	Aankomst	-	490
03	Vertrek	-	1970
21	Aankomst	-	1970
21	Vertrek	-	1220

Appendix B.3 Taxiroutes en -afstanden Rotterdam The Hague Airport



Figuur 12: Taxiroutes Rotterdam The Hague Airport. De routes eindigend op 'A' betreffen de aankomstroutes. De overige routes betreffen vertrekroutes

Tabel 13: Totale afstand in meters van iedere gedefinieerde taxiroute op Rotterdam The Hague Airport

Baankop	Vertrek- of aankomstroute	Platformgebied	Afstand (m)
06	Aankomst	-	2100
06	Vertrek	-	830
24	Aankomst	-	750
24	Vertrek	-	2300

Appendix C APU-emissielocaties



Figuur 13: Gebruikte APU-emissielocaties op Groningen Airport Eelde. APU-locaties zijn gemarkeerd met een ster



Figuur 14: Gebruikte APU-emissielocaties op Maastricht Aachen Airport. APU-locaties zijn gemarkeerd met een ster



Figuur 15: Gebruikte APU-emissielocaties op Rotterdam The Hague Airport. APU-locaties zijn gemarkeerd met een ster



Dedicated to innovation in aerospace

Koninklijke NLR - Nederlands Lucht- en Ruimtevaartcentrum

Het onderzoekscentrum Koninklijke NLR werkt op objectieve en onafhankelijke wijze met zijn partners aan een betere wereld van morgen. NLR biedt daarbij innovatieve oplossingen en technische expertise en zorgt voor een sterke concurrentiepositie van het bedrijfsleven.

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

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

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

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

Royal NLR

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

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