



Dedicated to innovation in aerospace

NLR-CR-2023-148 | oktober 2023

Concentraties zeer zorgwekkende stoffen op en rondom Nederlandse luchthavens

STACKS immissieresultaten op basis van TNO ZZS-emissietotalen

OPDRACHTGEVER: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat



Koninklijke NLR - Nederlands Lucht- en Ruimtevaartcentrum

Concentraties zeer zorgwekkende stoffen op en rondom Nederlandse luchthavens

STACKS immissieresultaten op basis van TNO ZZS-emissietotalen

Probleemstelling

De afgelopen jaren zijn de zorgen over schadelijke gevolgen van luchtvaart toegenomen. Een van de zorgen richt zich op de uitstoot van Zeer Zorgwekkende Stoffen (ZZS); ZZS zijn stoffen die gevaarlijk zijn voor mens en milieu omdat ze bijvoorbeeld de voortplanting belemmeren, kankerverwekkend zijn of zich in de voedselketen ophopen (RIVM, 2023). In Nederland bestaan er wel normen voor de uitstoot van ZZS door de industrie, maar niet voor de uitstoot van mobiele bronnen zoals vliegtuigen. Momenteel ontbreekt het inzicht in de uitstoot van ZZS door de luchtvaart en de daaruit voortkomende gevolgen voor de luchtkwaliteit. Hierdoor kan niet worden vastgesteld of normen nodig zijn.

Beschrijving van de werkzaamheden

In een eerdere studie heeft TNO de ZZS uitstoot door vliegverkeer bepaald voor 5 Nederlandse luchthavens (Amsterdam Airport Schiphol, Eindhoven Airport - civiel, Groningen Airport Eelde, Maastricht Aachen Airport en Rotterdam The Hague Airport). NLR heeft de verspreiding van deze uitstoot en de daaruit volgende concentraties van ZZS berekend met de STACKS luchtvaartmodule. De resultaten zijn waar mogelijk vergeleken met de bekende Maximaal Toelaatbaar Risiconiveaus (MTR) voor lange-termijnblootstelling die zijn opgesteld door het RIVM. Omwille van de consistentie is hierbij, tenzij anders vermeld, uitgegaan van dezelfde aannames en werkwijze als bij de TNO-studie.

Resultaten en conclusies

Op en rondom de luchthaven zijn de ZZS-emissies van het vliegverkeer vooral afkomstig van het taxiën. Ook dragen taxi-emissies het meest bij aan de ZZS-concentraties door vliegverkeer: zelfs op tientallen kilometers van de luchthaven zijn het de taxi-emissies die voor meer dan 90% de concentratie bepalen. De uitstoot op de start- en landingsbaan en het vliegen onder de 3000 ft hoogte – inclusief de APU-uitstoot - zijn voor minder dan 10% bepalend. Enkel op de luchthaven zelf spelen APU-emissies een relatief grote rol met een bijdrage aan de concentratie van 30%.

RAPPORTNUMMER
NLR-CR-2023-148

Naam auteur

RUBRICERING RAPPORT
ONGERUBRICEERD

DATUM
Oktober 2023

KENNISGEBIED(EN)
Luchtverontreiniging door de luchtvaart

TREFWOORD(EN)
ZZS
Luchtkwaliteit
STACKS

De toetsing van de berekende ZZS concentraties aan de MTR-waardes bleek lastiger dan voorzien: voor vier van de acht stoffen was de MTR gebaseerd op een verouderde berekening of bleken de concentraties niet af te leiden uit emissies van vluchtige organische stoffen (VOS). De bevindingen zijn op hoofdlijnen in de tabel hieronder samengevat:

ZZS	Bevinding	Toetsing
<i>1,3-Butadieen</i>	Concentratie t.g.v. vliegtuigemissies onder MTR. Totaal incl. andere bronnen onbekend	Vliegtuigemissies getoetst o.b. beschikbare MTR
<i>Formaldehyde</i>	Concentratie t.g.v. vliegtuigemissies onder MTR. Totaal incl. andere bronnen onbekend	Vliegtuigemissies getoetst o.b. beschikbare MTR
<i>Benzeen</i>	Geen overschrijding, ook niet incl. andere bronnen	Vliegtuigemissies incl. achtergrond getoetst o.b.v. beschikbare MTR en achtergrondinformatie
<i>Polycyclische Aromatische Koolwaterstoffen (PAK's): Naftaleen 1-Methylnaftaleen 2-Methylnaftaleen</i>	Niet toetsbaar op basis van VOS-emissies. Enkel als groep toetsbaar, toetsing op basis van fijnstof (PM ₁₀)	Vliegtuigemissies niet getoetst omdat de daarvoor benodigde PM ₁₀ emissie gegevens niet beschikbaar waren t.b.v. het onderzoek
<i>Isopropylbenzeen</i>	Concentratie t.g.v. vliegtuigemissies zeer laag, onder MTR. Overschrijding incl. andere bronnen onwaarschijnlijk	Vliegtuigemissies getoetst o.b. beschikbare MTR
<i>Crotonaldehyde</i>	Concentratie t.g.v. vliegtuigemissies bepaald, onduidelijkheid over geldende MTR	Niet getoetst totdat een nieuw MTR waarde is bepaald o.b.v. nieuwe methode RIVM

Toepasbaarheid

De studie geeft inzicht in de jaargemiddelde ZZS-concentraties door vliegtuigemissies van Nederlandse luchthavens. Deze informatie kan worden gebruikt voor het ontwikkelen van beleid. De gevolgde werkwijze leidt tot een onderbouwd overzicht van de jaargemiddelde luchtvaartbijdragen aan ZZS-concentraties op basis van eerder door TNO berekende ZZS-emissies.

De studie geeft echter geen inzicht in de concentraties van uur tot uur of in eventuele seizoens-effecten. De resultaten zeggen door het ontbreken van achtergrondconcentraties ook niets over de relatieve bijdrage van vliegtuigen ten opzichte van andere bronnen. Benzeen vormt hierop de enige uitzondering. Voor crotonaldehyde, naftaleen, 1-methylnaftaleen, en 2-methylnaftaleen kan op dit moment niets gezegd worden over de concentraties bij lange-termijnblootstelling waarbij risico's optreden doordat de MTR-waarde verouderd is of de toetsing op basis van andere stoffen dient plaats te vinden.

NLR

Anthony Fokkerweg 2

1059 CM Amsterdam

t | +31 88 511 3113

e | info@nlr.nl | www.nlr.nl



Dedicated to innovation in aerospace

NLR-CR-2023-148 | oktober 2023

Concentraties zeer zorgwekkende stoffen op en rondom Nederlandse luchthavens

STACKS immissieresultaten op basis van TNO ZZS-emissietotalen

OPDRACHTGEVER: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

AUTEUR(S):

Naam auteur

NLR

Naam auteur

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
Naam auteur	Naam auteur	Naam auteur

Inhoudsopgave

Afkortingen	8
1 Introductie	9
2 Werkwijze	10
2.1 Algemeen	10
2.2 Totale emissies	11
2.3 Ruimtelijke verdeling emissies	13
2.3.1 Taxi-emissies van de hoofdmotoren	13
2.3.2 Emissies bij start vanaf de grond en klim tot 3.000 voet	15
2.3.3 Emissies bij nadering vanaf 3.000 voet tot de grond	16
2.3.4 APU-emissies	17
2.4 Berekening van concentraties	18
2.4.1 STACKS verspreidingsmodel	18
2.4.2 Uurverdeling emissies	19
2.4.3 Warmte-inhoud	19
2.4.4 Weer, achtergrondconcentratie en ruwheid	19
2.4.5 Studiegebied, emissie- en rekenpunten	20
2.5 Toetsen van concentraties	24
3 Resultaten	26
3.1 Ruimtelijke verdeling ZZS-emissies	26
3.1.1 Amsterdam Airport Schiphol	26
3.1.2 Eindhoven Airport	29
3.1.3 Groningen Airport Eelde	31
3.1.4 Maastricht Aachen Airport	33
3.1.5 Rotterdam The Hague Airport	35
3.2 Berekende ZZS-concentraties	37
3.2.1 Amsterdam Airport Schiphol	38
3.2.2 Eindhoven Airport	40
3.2.3 Groningen Airport Eelde	41
3.2.4 Maastricht Aachen Airport	42
3.2.5 Rotterdam The Hague Airport	43
3.3 Vergelijking met andere bronnen van ZZS	44
4 Conclusies	45
4.1 Resultaten	45
4.2 Beperkingen studie	46
4.3 Aanbevelingen	47
5 Referenties	48

Appendix A	Emissiefactoren	49
Appendix A.1	Conversiefactoren	49
Appendix A.2	MTR-waarden	50
Appendix B	APU emissielocaties overige velden	51
Appendix C	Taxiroutes	53
Appendix C.1	Taxi-afstanden Amsterdam Airport Schiphol	53
Appendix C.2	Taxi-afstanden Eindhoven Airport	55
Appendix C.3	Taxi-afstanden Groningen Airport Eelde	55
Appendix C.4	Taxi-afstanden Maastricht Aachen Airport	56
Appendix C.5	Taxi-afstanden Rotterdam The Hague Airport	56
Appendix C.6	Taxiroutes overige velden	57

Afkortingen

ACRONIEM	OMSCHRIJVING
APU	<i>Auxiliary Power Unit</i> , hulpmotor in de staart van de meeste vliegtuigen die het vliegtuig op de grond van stroom kan voorzien ook als de hoofdmotoren uit staan
CBS	Centraal Bureau voor de Statistiek
GCN/GDN	Grootschalige Concentratie- en Depositiekaarten Nederland
HC	<i>Hydrocarbons</i> , onverbrande koolwaterstoffen
ICAO	International Civil Aviation Organization
IenW	Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
PAK	Polycyclische Aromatische Koolwaterstoffen
MER	Milieueffectrapportage
MTR	<i>Maximaal Toelaatbaar Risiconiveau</i> , grenswaarde voor langdurige blootstelling bepaald door het RIVM
NAP	Noise Abatement Procedure
NLR	Koninklijke NLR - Nederlandse Lucht- en Ruimtevaartcentrum
NNM	Nieuw Nationaal Model
PM ₁₀	Fijnstof met een diameter van maximaal 10 µm (micrometer)
RIVM	Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu
SRM	Standaardrekenmethode
TIM	<i>Time-In-Mode</i> , tijd dat een vliegtuig in een bepaalde LTO-fase zit
TNO	Nederlandse organisatie voor Toegepast-Natuurwetenschappelijk Onderzoek
VOS	Vluchtige Organische Stoffen
ZZS	Zeer Zorgwekkende Stoffen

1 Introductie

Context

In de Tweede Kamer is de afgelopen jaren in toenemende mate aandacht besteed aan de emissies (ofwel uitstoot) van de luchtvaart en de gevolgen daarvan voor de lokale luchtkwaliteit. Het gaat hierbij onder meer om ultrafijnstof en zeer zorgwekkende stoffen (ZZS). In antwoord op Kamervragen in maart 2022 (Tweede Kamer, 2022) en tijdens het Commissiedebat Verduurzaming luchtvaart van 16 juni 2022 (IenW, 2022) is aan de vaste commissie toegezegd dat *“de Kamer wordt geïnformeerd over de noodzaak van het nemen van beleidsmaatregelen om de emissies van ZZS door de luchtvaart te beperken”*. Daartoe zou eerst onderzoek worden uitgevoerd naar de totale emissies van ZZS door de luchtvaart en de daaruit volgende concentraties rond Nederlandse luchthavens. Hierop heeft TNO een overzicht gemaakt van de totale ZZS-emissies van vliegverkeer op en rondom vijf luchthavens in Nederland (IenW, 2023). In dit rapport heeft NLR de concentraties berekend die volgen uit deze ZZS-emissies.

Dit rapport

Dit rapport laat zien hoe de door vliegverkeer uitgestoten ZZS zich verspreiden en tot welke concentratiebijdragen ze leiden. Hiervoor wordt uitgegaan van door TNO berekende emissietotalen voor emissies van civiel vliegverkeer op kerosine. Emissies van vliegverkeer op Avgas en mobiele bronnen zijn niet berekend. Met het oog op de consistentie met de emissieresultaten sluit de door NLR gevolgde aanpak zo nauw mogelijk aan op de door TNO gehanteerde werkwijze. Deze werkwijze leidt er toe dat er binnen relatief korte tijd een onderbouwd overzicht gegeven kan worden aan de Tweede Kamer van de jaargemiddelde ZZS-concentraties door vliegverkeeremissies op en rond de door TNO doorgerekende luchthavens – Amsterdam Airport Schiphol, Eindhoven Airport (civiel), Groningen Airport Eelde, Maastricht Aachen Airport en Rotterdam The Hague Airport. Ook zorgt deze aanpak er voor dat de berekende concentraties vergeleken kunnen worden met de door het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM) opgestelde Maximaal Toelaatbare Risiconiveaus voor langdurige blootstelling aan deze stoffen (de zogeheten MTR-waarden).

Het rapport is als volgt opgebouwd:

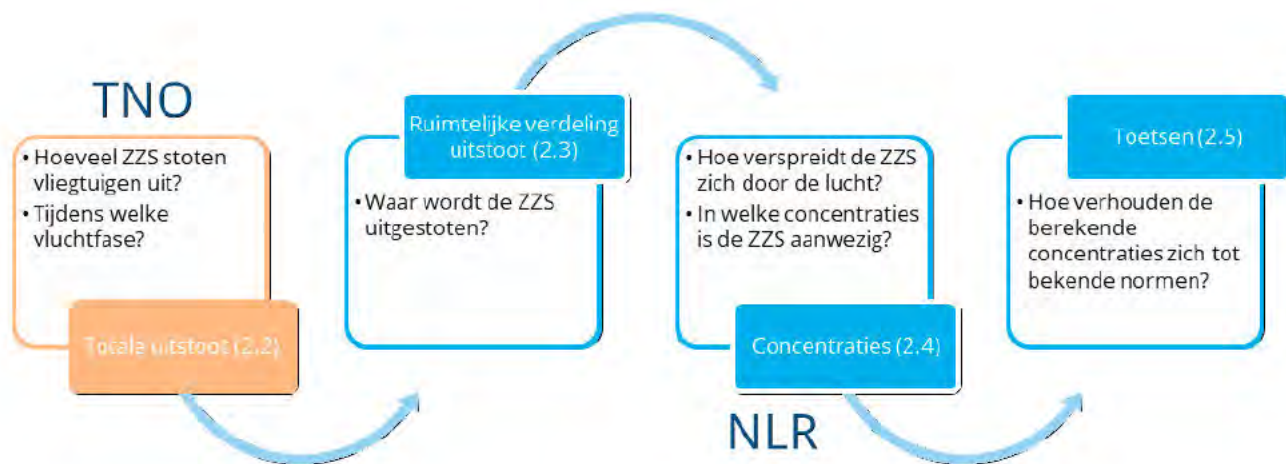
- Hoofdstuk 2 geeft een beknopte omschrijving van de gevolgde werkwijze en de gemaakte aannames. Hierbij wordt ingegaan op de relatie tussen deze concentratiestudie en de eerdere TNO studie, het koppelen van de emissies aan specifieke locaties, de modellering van de verspreiding van de stoffen door de lucht en de uiteindelijke concentratieberekening. Relevante aanvullende informatie is opgenomen in Appendix A, Appendix B en Appendix C.
- Hoofdstuk 3 presenteert de berekende emissieverdeling en concentraties per luchthaven (dit laatste met behulp van contourplots). Deze plots laten de lezer zien waar de hoogste jaargemiddelde concentraties optreden. Per stof wordt vervolgens dieper ingegaan op de berekende concentraties in relatie tot de MTR-waarden.
- Hoofdstuk 4 trekt conclusies over de berekende concentraties, wat de berekende waarden aangeven en wat de beperkingen van het onderzoek zijn. Ten slotte worden enkele aanbevelingen gedaan om meer inzicht te krijgen in de ZZS-concentraties op en rondom luchthavens.

2 Werkwijze

2.1 Algemeen

Deze studie bouwt voort op de eerdere studie van TNO naar de emissies van ZZS door vliegverkeer. Omwille van de consistentie neemt deze studie daarom zo veel mogelijk de door TNO gehanteerde aanpak en aannames bij het bepalen van de ZZS-emissies over (TNO, 2023). Dit betekent dat er voor de emissietotalen uit wordt gegaan van hetzelfde vliegverkeer, dezelfde aannames over *time-in-mode* (TIM) tijden en dezelfde aannames over de emissies van vliegverkeer. Deze gegevens zijn opgevraagd bij TNO en voor de uitvoering van het huidige onderzoek beschikbaar gesteld.

De huidige studie en de eerdere TNO studie samen geven uiteindelijk antwoord op de vraag “wat betekenen de emissies van ZZS door vliegverkeer voor de luchtkwaliteit?”. Hiervoor worden de volgende vier deelvragen beantwoord: hoeveel ZZS stoot het vliegverkeer uit, waar wordt de ZZS uitgestoten, tot welke concentraties leidt dat, en hoe verhouden deze concentraties zich tot bekende normen? De eerste vraag is door TNO beantwoord, de overige drie komen in deze studie aan bod. De focus in deze studie ligt dus op de ruimtelijk verdeling van de ZZS-emissies en de hieruit volgende concentraties zoals hieronder getoond.



Figuur 1: Concentratiestudie in relatie tot voorgaande TNO emissiestudie. De getallen verwijzen naar de secties waarin deze onderwerpen besproken worden

In de volgende secties wordt per deelvraag dieper ingegaan op de werkwijze en gemaakte aannames. Hoewel er gekozen is voor een zo uniform mogelijke werkwijze, kan de werkwijze op detailniveau per luchthaven verschillen; dit in verband met verschillen in complexiteit en beschikbare informatie. Overal waar een afwijkende aanpak wordt gevolgd, wordt dit aangegeven.

2.2 Totale emissies

Deze concentratiestudie bouwt voort op de emissiestudie van TNO. Om de uitgangspunten van deze concentratiestudie goed te begrijpen worden de aannames en werkwijze van de emissiestudie hier kort samengevat. Echter, voor een volledig beeld wordt de lezer verwezen naar de originele studie van TNO (Notitie Emissieberekening ZZS Luchthavens (dd. 10 mei 2023)).

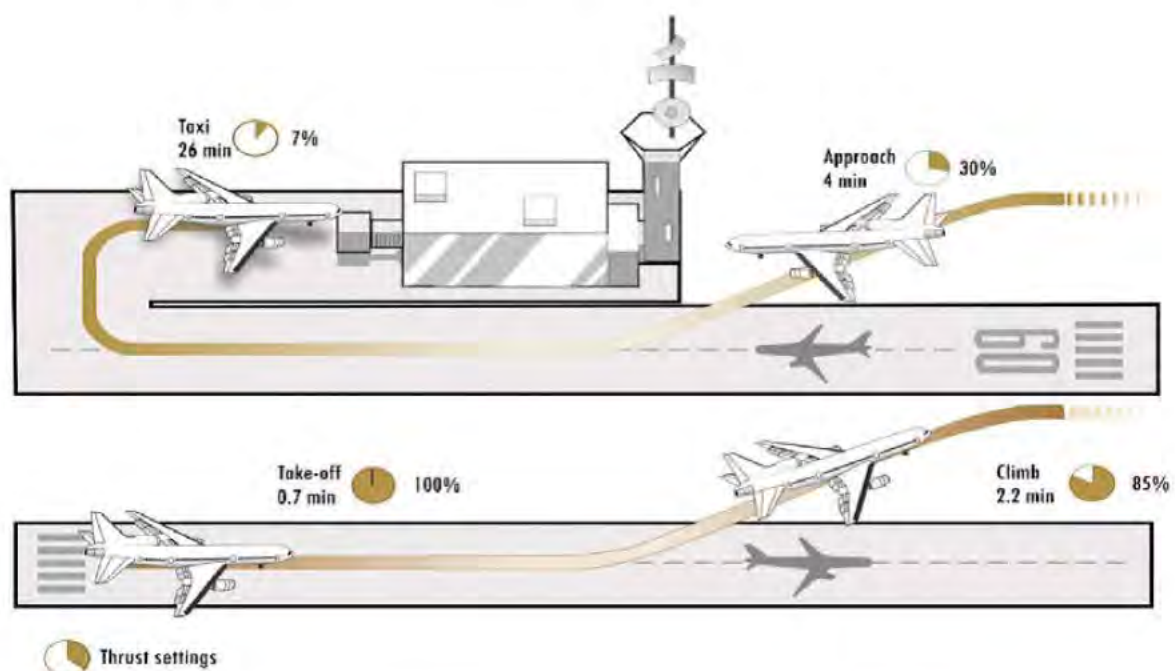
De emissies zijn berekend op basis van vaste omrekenfactoren om de emissies van onverbrande koolwaterstoffen (HC) door vliegverkeer om te rekenen naar vluchtige organische stoffen (VOS) en vervolgens naar de ZZS die voorkomen in de uitlaatgassen van vliegtuigmotoren.

Het betreft hier de volgende stoffen:

- 1,3-Butadien
- Formaldehyde
- Benzeen
- 1-Methylnaftaleen*
- Naftaleen*
- 2-Methylnaftaleen*
- Isopropylbenzeen (ook wel cumeen genoemd)
- Crotonaldehyde (ook wel 2-butenal genoemd)

*Deze 3 stoffen maken deel uit van de polycyclische aromatische koolwaterstoffen ofwel PAK's.

De HC en VOS emissies van het vliegverkeer is per luchthaven, per vliegtuig- of helikoptertype en per vluchtfase bepaald. De vluchtfasen zijn overgenomen uit de zogeheten *landing-and-takeoff cyclus* (LTO) die door ICAO worden gebruikt bij de certificatie van vliegtuigmotoren (zie Figuur 2).



Figuur 2: LTO-cyclus zoals gebruikt bij de emissiecertificatie van vliegtuigmotoren (ICAO, 2020)

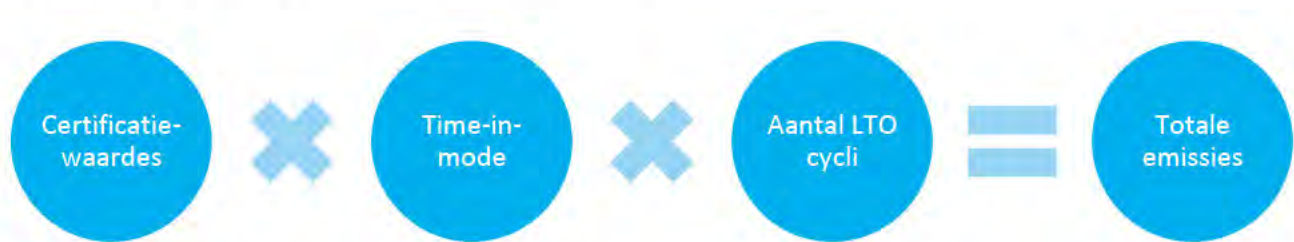
Hieronder volgt een korte uitleg van de gebruikte vluchtfases:

- *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
- *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

Elke LTO-cyclus bevat dus een aankomende en een vertrekkende vlucht. In de studie is aangenomen dat het aantal LTO-cycli gelijk is aan het aantal vliegbewegingen gedeeld door 2.

De emissieberekening is gemaakt per vliegtuigtype en per vluchtfase. Hierbij zijn de emissie-certificatiewaarden van ICAO (uitgedrukt in kg/s) vermenigvuldigd met de zogeheten time-in-mode (TIM) tijd. Dit is de tijd dat het vliegtuig in de betreffende vluchtfase zit. Alleen voor de taxi-tijden zijn luchthaven-specifieke tijden van EUROCONTROL gebruikt. Voor de overige vluchtfasen is uitgegaan van de algemene TIM-tijden van ICAO. Deze berekening geeft de emissies per vluchtfase voor een bepaald vliegtuigtype. Vervolgens zijn deze emissies vermenigvuldigd met het aantal vliegbewegingen per vliegtuigtype per jaar uit de statistieken van het CBS. Dit geeft een overzicht van de ZZS-jaaremissies per luchthaven, per vliegtuigcategorie en per vluchtfase.

De berekening op hoofdlijnen is samengevat in Figuur 3.



Figuur 3: bepaling van totale emissies op hoofdlijnen

De jaarlijkse ZZS-emissies zijn berekend voor de volgende Nederlandse luchthavens:

- Amsterdam Airport Schiphol
- Eindhoven Airport
- Groningen Airport Eelde
- Maastricht Aachen Airport
- Rotterdam The Hague Airport

Lelystad Airport was en is op het moment van schrijven niet open voor handelsverkeer en is daarom niet meegenomen in de studie.

Uit de emissiestudie blijkt dat circa 94% van de ZZS-emissies wordt uitgestoten door de hoofdmotor op stationair of laag vermogen (*idle*). Deze emissiecategorie bevat zowel het taxiën van en naar de start- en landingsbaan als het stationair draaien op het platform. TNO toont aan dat ZZS met name ontstaat bij lage motorvermogens. Als gevolg hiervan zijn de bijdrages van overige emissiecategorieën een stuk kleiner in omvang zoals te zien is in Tabel 1.

Tabel 1: Relatieve gemiddelde ZZS-emissie per emissie-categorie

Emissie-categorie	Gemiddeld aandeel in de emissies van ZZS
Hoofdmotor(en), taxi emissies (<i>idle</i>)	94,1%
APU	1,6%
Hoofdmotor(en), start (<i>take-off</i>)	0,7%
Hoofdmotor(en), klim tot 3.000 voet	1,2%
Hoofdmotor(en), nadering vanaf 3.000 voet	2,4%

TNO heeft alleen civiel vliegverkeer en helikopters die opereren op Jet-A kerosine meegenomen in de berekening. De toestellen op andere brandstoffen zoals Avgas zijn niet meegenomen in de emissieberekening en daardoor ook niet in deze concentratiestudie.

Over HC-emissies is relatief weinig bekend en de onzekerheidsmarge van de Emissieregistratie is dan ook relatief groot: tot wel 200% voor de emissiefactoren voor VOS-anders-dan-methaan uit kerosine. Hier bovenop komt een onzekerheidsmarge van 10% voor het aantal bewegingen in de verkeersdata voor vliegverkeer op kerosine. Voor vliegverkeer op Avgas zijn de marges nog hoger (TNO, 2017). Ten opzichte van het FEIS emissiemodel van Eurocontrol, rapporteert Emissieregistratie ongeveer 25% hogere emissies voor het vliegverkeer in Nederland. Dit verschil komt met name voort uit de onzekerheid rond het klein verkeer op Avgas en andere vliegtuigbrandstoffen (geen kerosine) (RIVM, 2023).

De door TNO berekende emissietotalen vormen de basis voor het hier gerapporteerde en door NLR uitgevoerde onderzoek.

2.3 Ruimtelijke verdeling emissies

Hieronder volgt per emissie-categorie een omschrijving van hoe de emissies ruimtelijk verdeeld zijn.

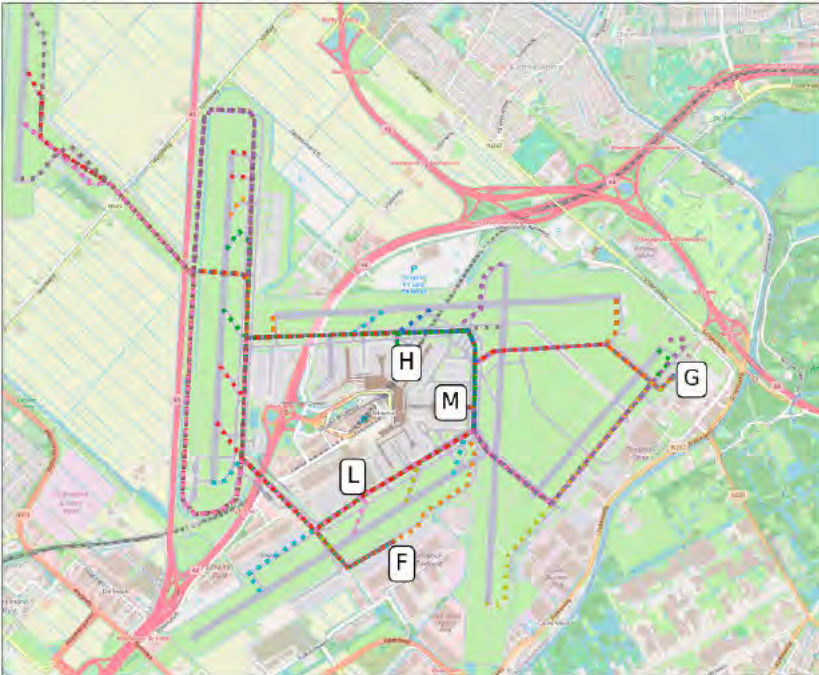
2.3.1 Taxi-emissies van de hoofdmotoren

Om te bepalen waar de ZZS wordt uitgestoten, moet worden vastgesteld welke taxiroutes er gevolgd zijn van het platform naar de startbaan of van de landingsbaan naar het platform. Vervolgens worden de emissies over de routes verdeeld¹. Om brandstof te besparen worden piloten verzocht om zo veel mogelijk met minder motoren te taxiën. Bij de emissieberekening is hier geen rekening mee gehouden.

Schiphol

Van elke vliegbeweging op Schiphol is bekend wat het vertrek- en eindpunt is geweest. Hieruit volgt een netwerk van mogelijke taxiroutes. Schiphol is een complexe luchthaven met een uitgebreid stelsel van banen en opstelplaatsen. Vanwege de grote hoeveelheid aan mogelijke combinaties zijn de opstelplaatsen op het platform samengevoegd tot 5 platformgebieden zoals getoond in Figuur 4. De locaties van de platformgebieden zijn overgenomen uit de meest recente milieueffectrapportage (MER) (Hoolhorst, Erbrink, & Kokmeijer, 2020).

¹ Alle *idle* emissies worden over de routes verdeeld, waarbij geen rekening wordt gehouden met de locatie(s) waarop stationair wordt gedraaid.



Figuur 4: De 5 platformgebieden F, G, H, L en M, en de taxiroutes die zijn gebruikt voor Amsterdam Airport Schiphol in onderbroken lijnen weergegeven

Voor iedere combinatie van platformgebied en start- of landingsbaan zijn per vliegtuigtype de meest gangbare taxiroutes vastgesteld. In sommige gevallen ontbreken voor de specifieke vliegtuigtypes die in de TNO studie voorkomen gegevens over het baangebruik dan wel platformgebruik. Wanneer dit voorkomt zijn deze emissies opgeteld bij de emissies binnen dezelfde vluchtfase waar wel een koppeling is.

Aansluitend bij het feit dat emissies in het jaar 2019 onderzocht zijn, is hierbij uitgegaan van het baangebruik in 2019. Onder invloed van weer, verkeer en baanonderhoud kan het baangebruik van jaar tot jaar verschillen. Voor de taxiroutes tussen de platformgebieden en de Polderbaan zijn drie varianten gemaakt die afhangen van het gebruik van de Zwanenburglaan. Hierbij is aangenomen dat deze drie taxiroutes even vaak gebruikt worden. De taxiroutes zijn te zien in Figuur 4. In Appendix C.1 zijn de individuele taxiroutes en bijbehorende afstand opgenomen.

Overige luchthavens van nationale betekenis

Voor de andere luchthavens was de informatie over de gevolgde taxiroutes niet binnen de voor het onderzoek beschikbare termijn voorhanden. Daarom is voor deze luchthavens handmatig per start- of landingsbaan² een taxiroute opgesteld van het platform naar de baan. Deze zijn te vinden in Appendix C.6. Per vliegtuigtype is bepaald hoe vaak deze taxiroutes zijn gebruikt op basis van radardata uit het door NLR ontwikkelde FANOMOS-systeem³.

Voor het taxiën wordt aangenomen dat de ZZS tijdens het taxiën gelijkmatig wordt uitgestoten. Deze aanname is in lijn met de TNO studie. 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.

² 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.

³ FANOMOS is een door NLR ontwikkeld systeem om vliegtuigbewegingen mee te volgen.

2.3.2 Emissies bij start vanaf de grond en klim tot 3.000 voet

In tegenstelling tot andere emissies komen ZZS vooral bij lage motortemperaturen en gashandelstanden vrij. De emissies van ZZS bij de start⁴ (0,7%) en tijdens de klim (1,2%) is dan ook gering in verhouding tot het totaal. TNO heeft geen ZZS-emissies boven de 3.000 voet berekend omdat emissies boven deze hoogte niet geregistreerd worden in de Emissieregistratie.

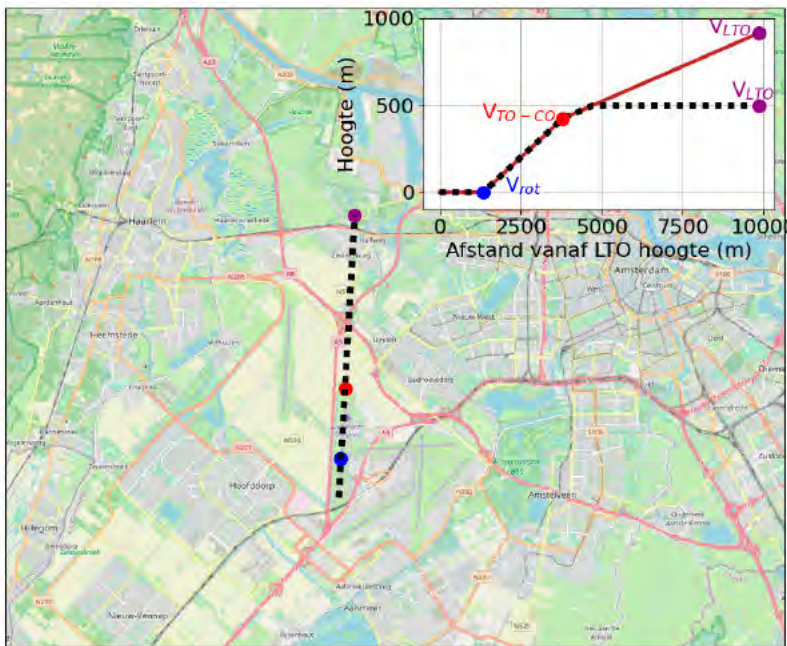
Om een goede verdeling te maken van de emissies tijdens de start en klim tot 3.000 voet zijn *straight-out* klimprofielen opgesteld voor de drie vliegtuigtypes die de grootste bijdrage leveren aan de emissies tijdens de start, klim en landing. Dit is gedaan voor iedere luchthaven apart. Deze profielen zijn vervolgens toegepast op de overige vliegtuigtypes.

De profielen bestaan uit een snelheids- en een hoogteprofiel. Per vliegtuigtype zijn de drie meest voorkomende hoogteprofielen 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 profielen. Dit bleek om technische redenen problemen te geven met het gebruikte rekenmodel. Om dit op te lossen worden de profielen van de grond tot 500 meter (1640 voet) gevolgd, hierna wordt aangenomen dat het vliegtuig op 500 meter hoogte blijft. Een dergelijk klimprofiel is weergegeven in Figuur 5. Deze vereenvoudiging levert rekenkundige voordelen op, terwijl het effect op concentraties op leefniveau beperkt is. Dit wordt bevestigd met de resultaten in Figuur 24 in Sectie 3.2.1 met daarin de bronverdeling van de concentraties op verschillende plekken rondom de luchthaven.

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. Hierbij is wederom uitgegaan van het baangebruik per vliegtuigtype in 2019. Verder is de aanname van TNO overgenomen 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.

⁴ Ter verduidelijking: met 'start' wordt het opstijgen vanaf de baan bedoeld, niet het opstarten van de vliegtuigmotor.

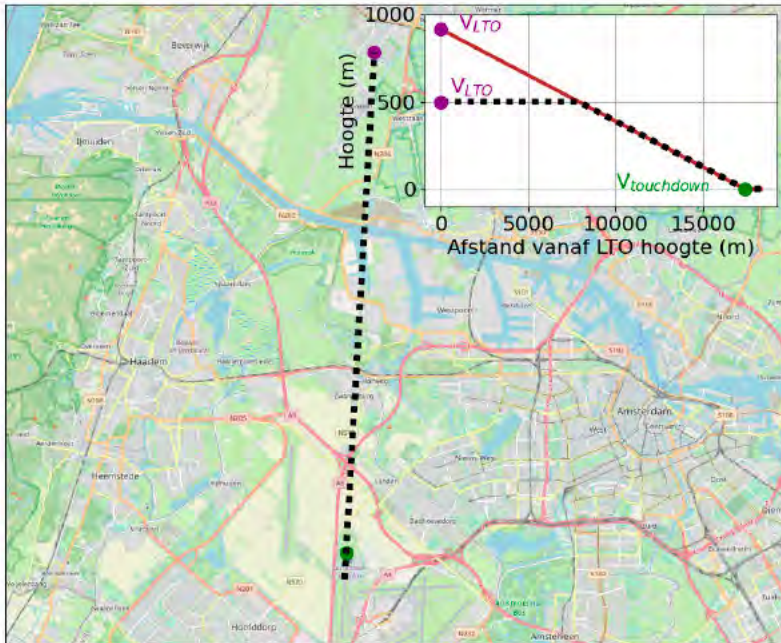


Figuur 5: Schematische weergave straight-out profiel van een vliegtuig dat vanaf de Zwanenburgbaan in noordelijke richting start. De solide lijn geeft het profiel weer dat is doorgetrokken tot LTO-hoogte; de gestippelde lijn geeft het profiel weer zoals is geïmplementeerd in voorliggende studie. V_{rot} in blauw markeert het loskomen van het neuswiel, V_{TO-co} in rood markeert de overgang van start naar klim en V_{LTO} in paars markeert het einde van het profiel waarbij, bij het doortrekken van het profiel tot boven de 500 m, de LTO-hoogte wordt bereikt

2.3.3 Emissies bij nadering vanaf 3.000 voet tot de grond

De emissies tijdens de nadering zijn met 2,4% beduidend minder dan de emissies tijdens het taxiën. Emissies boven de 3.000 voet zijn door TNO niet berekend.

Voor de nadering wordt uitgegaan van een *straight-in* van 3.000 voet tot het begin van de landingsbaan. De locatie en snelheid op 3.000 voet evenals de locatie en snelheid op het *touchdown*-punt en de locatie waarop het vliegtuig de landingsbaan verlaat, worden bepaald op basis van deze profielen en gewogen gemiddeld op basis van gebruiksfrequentie. 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).



Figuur 6: Schematische weergave straight-in profiel van een vliegtuig dat vanuit noordelijke richting nadert op de Zwanenburgbaan. De solide lijn geeft het profiel weer dat is doorgetrokken tot LTO-hoogte; de gestippelde lijn geeft het profiel weer zoals is geïmplementeerd in voorliggende studie. V_{LTO} in paars markeert het punt waarop in het doorgetrokken profiel de 3.000 voet LTO-hoogte wordt bereikt. $V_{touchdown}$ in groen markeert het raken van de landingsbaan

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 van het TNO dat de gashandelstand niet varieert binnen één vluchtfase.

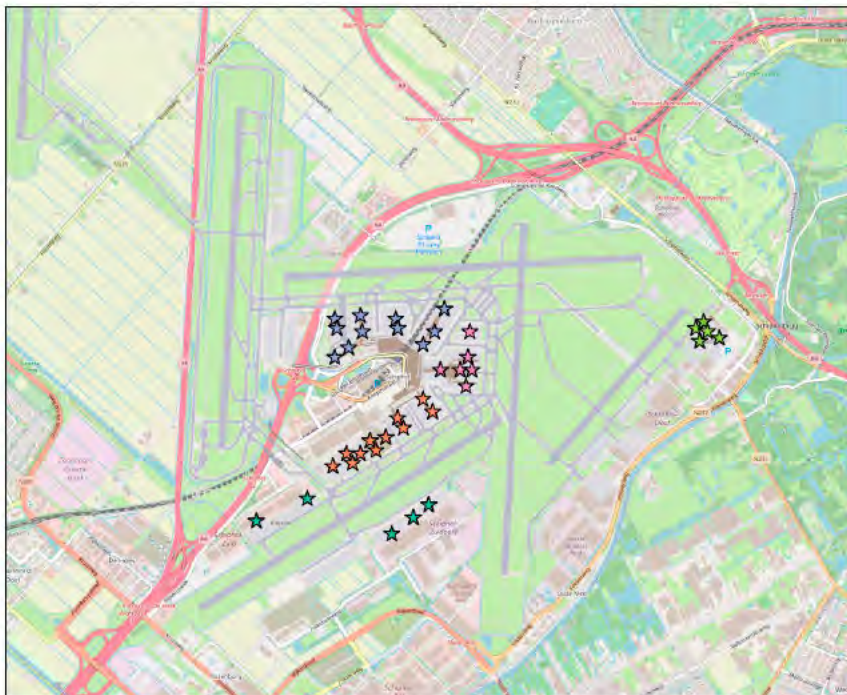
2.3.4 APU-emissies

TNO heeft voor elk vliegtuigtype de ZZS-emissie van de *auxiliary power unit* (APU)⁵ van het meeste vliegverkeer berekend, op basis van standaard APU *time-in-modes* en emissiefactoren. De emissies van de APU vinden normaliter plaats op het platform; 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 op de grond die het gebruik van de APU minder noodzakelijk maken.

Schiphol

In de laatste milieueffectrapportage van Schiphol is gerekend met meerdere APU-locaties per platformgebied (Hoolhorst, Erbrink, & Kokmeijer, 2020). Deze 38 locaties zijn in deze studie overgenomen. De APU-emissies zijn per vliegtuigtype verdeeld over de vijf platformgebieden, op basis van frequentie. Aangenomen wordt dat de emissies van de APU's binnen een platformgebied gelijkmatig over de APU-locaties verdeeld is. De locaties zijn weergegeven in Figuur 7.

⁵ Het meeste vliegverkeer heeft een APU; een soort hulpmotor in de staart die de energievoorziening aan boord verzorgt, voornamelijk wanneer de hoofdmotoren uit staan.



Figuur 7: Aangenomen locaties van de auxiliary power unit (APU) emissies. De locaties zijn middels kleuren gegroepeerd per platformgebied

Overige luchthavens van nationale betekenis

Voor de andere luchthavens van nationale betekenis zijn de APU-locaties op de vliegtuigopstelplaatsen geplaatst die zich op de civiele platforms bevinden, weergegeven in Appendix B. Deze locaties zijn voor alle vliegtuigtypes dezelfde. De APU-emissies worden ook voor deze luchthavens uniform over de locaties verspreid.

De emissiehoogte hangt samen met de grootte van het vliegtuig. Gezien het aandeel groot en klein vliegverkeer verschilt per platformgebied, verschilt ook de gemiddelde hoogte waarop APU-emissies worden uitgestoten. Voor Amsterdam Airport Schiphol is hier op basis van voorgaande studies een onderscheid in gemaakt. Voor de andere luchthavens is een gemiddelde emissiehoogte van 5 m aangenomen, die wordt toegepast op iedere APU-locatie.

2.4 Berekening van concentraties

Na het bepalen van de totale emissies (zie Sectie 2.2) 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 STACKS verspreidingsmodel. Hieronder volgt een korte omschrijving van het gebruikte model en een overzicht van de gemaakte keuzes en aannames bij de ZS-concentratieberekening.

2.4.1 STACKS verspreidingsmodel

De verspreiding van de uitstoot wordt nagebootst met de luchtvaartmodule van het STACKS verspreidingsmodel. STACKS is een rekenmodule 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). Meer informatie over STACKS is te vinden op de website van DGMR⁶.

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. De berekening van ZZS-emissies en -concentraties is afgeleid uit de uitstoot van vluchtige organische stoffen of VOS (zie Sectie 2.2). Hiervan wordt aangenomen dat deze zich gedragen 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 een concentratie volgt.

2.4.2 Uurverdeling emissies

De ZZS-emissies hebben niet alleen een bepaalde locatie, maar zijn ook uitgestoten op een bepaalde tijd. Bij de bepaling van de emissietotalen door TNO is deze koppeling niet gemaakt. 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. Deze warmte-inhoud⁷ wordt berekend aan de hand van het brandstofverbruik, met behulp van de energetische waarde van de brandstof (43,1⁸ 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’⁹. Voor de berekeningen wordt gebruikt gemaakt van meerjarige meteorologie over de periode van 2005 t/m 2014. 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 ZZS-concentraties.

⁶ <https://dgmrsoftware.nl/producten/geluid-en-luchtkwaliteit/geomilieu/geomilieu-stacks/>

⁷ 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.

⁸ 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.

⁹ PreSRM staat voor Preprocessor Standaard Rekenmethoden.

Voor de verspreiding van VOS wordt gerekend zonder achtergrondconcentratie; met uitzondering van benzeen is deze ook niet bekend. Geen achtergrondconcentratie wil zeggen dat er alleen gerekend wordt met de verspreiding van de uitstoot door de luchtvaart.

De 'terreinruwheid' is met name relevant voor de lokale pluimstijging. In het verleden is voor Schiphol een representatieve ruwheid van 0,15 m vastgesteld die door het rekenmodel kan worden gebruikt. Aangezien alle onderzochte luchthavens een vergelijkbare terreingesteldheid kennen, is in deze studie voor elke luchthaven met een ruwheid van 0,15 m gerekend.

2.4.5 Studieggebied, 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 rekegebied 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 een grote luchthaven als Schiphol 600 x 600 m, en voor de overige luchthavens 250 x 250 m.

Voor de hoogten van de gridcellen daarentegen zijn voor alle luchthavens dezelfde keuzes gemaakt. De gridcelhoogte hangt af van de afstand vanaf de grond en neemt toe met toenemende afstand, als weergegeven in Tabel 2. Hier is voor gekozen omdat de hoeveelheid ZZS-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 de emissies binnen deze laag uiteindelijk naar een hoogte van 500 m zijn weggeschreven

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	Laag 8
Ondergrens hoogtelaag in meter	0	5	10	20	50	100	200	500
Bovengrens hoogtelaag in meter	5	10	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. Voor ZZS was op voorhand niet bekend hoe ver de effecten zouden reiken. Daarom is voor elke luchthaven eerst met een grove proefberekening vastgesteld welk gebied nodig is om de effecten goed in beeld te brengen. Elk gebied is zo gekozen dat er buiten het studiegebied geen overschrijdingen zijn van de MTR-waarden voor de ZZS.

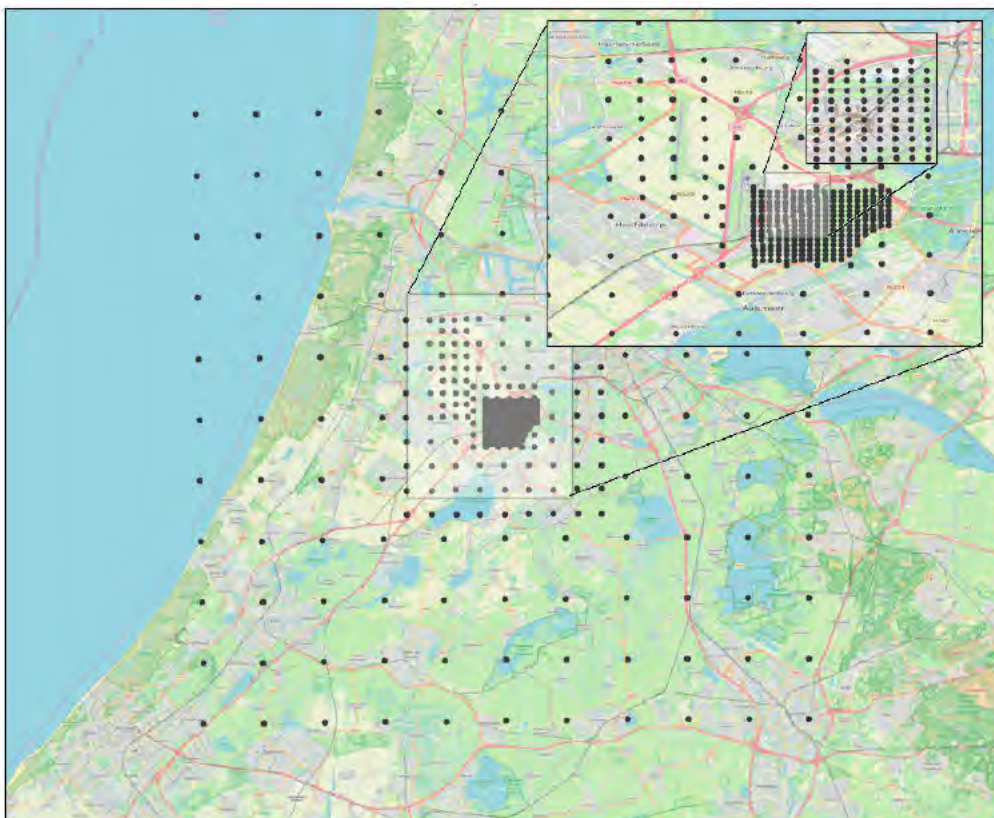
¹⁰ De nauwkeurigheid hangt ook samen met de kwaliteit van de gebruikte data en de onderliggende aannames die zijn gebruikt om de emissieverdeling vast te stellen.

Binnen deze studie is voor Amsterdam Airport Schiphol gekozen voor vier verschillende resoluties, die stapsgewijs variëren van lagere (grovere) resoluties verder van de luchthaven af (waar concentraties lager zijn) tot hogere (fijnere) op het luchthaventerrein en specifiek het platform (waar concentraties hoger zijn en luchthavenmedewerkers nabij). Bij de overige luchthavens is voor twee verschillende resoluties gekozen.

Tabel 3 toont de omvang van het studiegebied en de gekozen resoluties per luchthaven. Figuur 8 tot en met Figuur 12 tonen de rekenpunten ten opzichte van de omgeving.

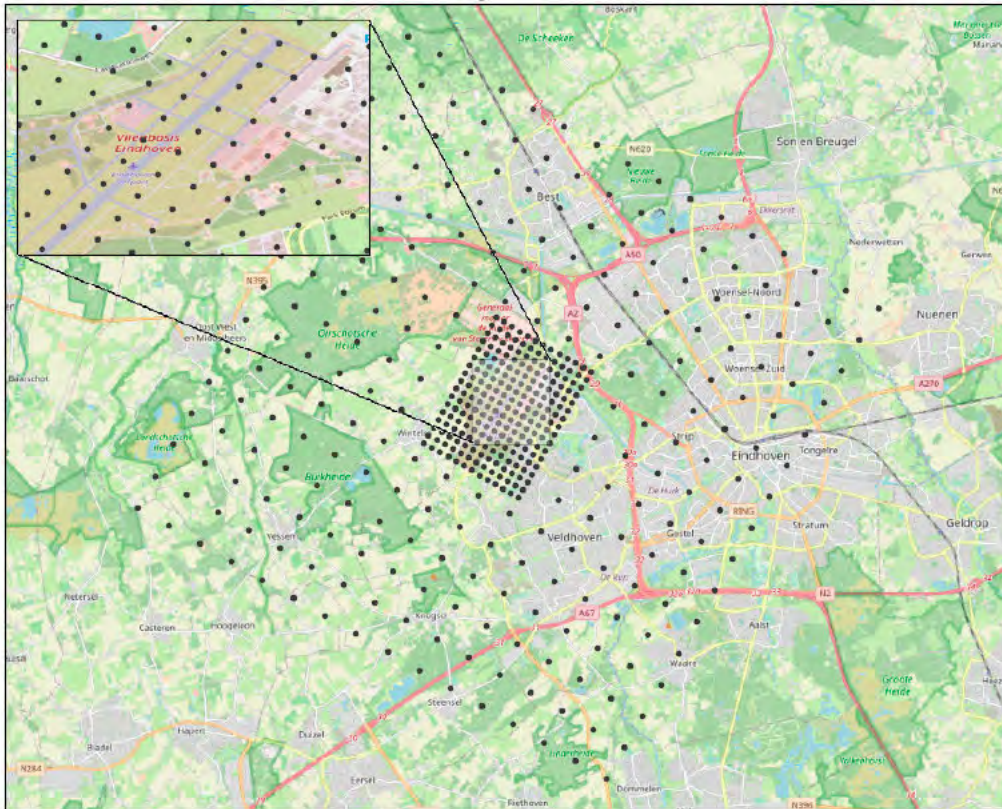
Tabel 3: Rekengebied en resoluties per luchthaven voor berekening ZZS-concentraties

	Amsterdam	Eindhoven	Groningen	Maastricht	Rotterdam
Studiegebied (lengte x breedte)	50 x 50 km	15 x 15 km	15 x 15 km	20 x 15 km ¹¹	15 x 15 km
Aantal rekenpunten	469	461	461	463	461
Resolutie rekenpunten					
Grof	5 x 5 km	1 x 1 km	1 x 1 km	1 x 1 km	1 x 1 km
Midden	2 x 2 km, 16 km rondom	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	250 x 250 m, 3 x 4 km rondom
Fijn	1 x 1 km				
Zeer fijn	250 x 250 m				

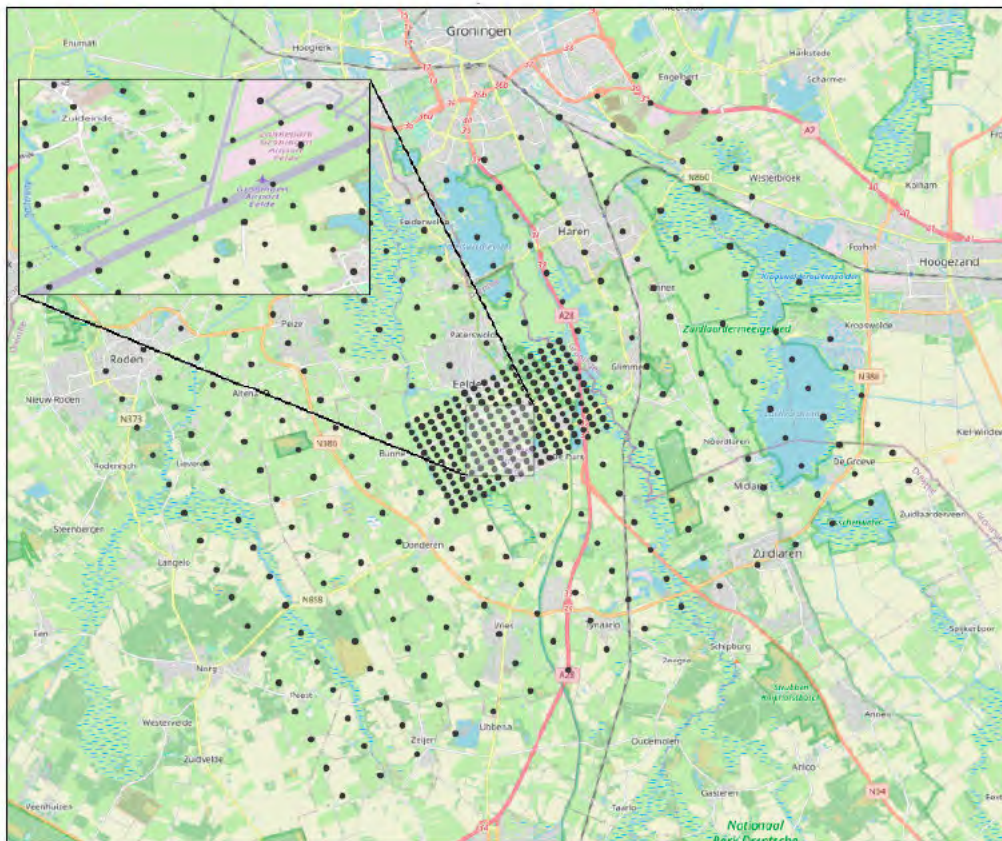


Figuur 8: Set aan 469 rekenpunten rond Schiphol die zijn gebruikt in deze studie

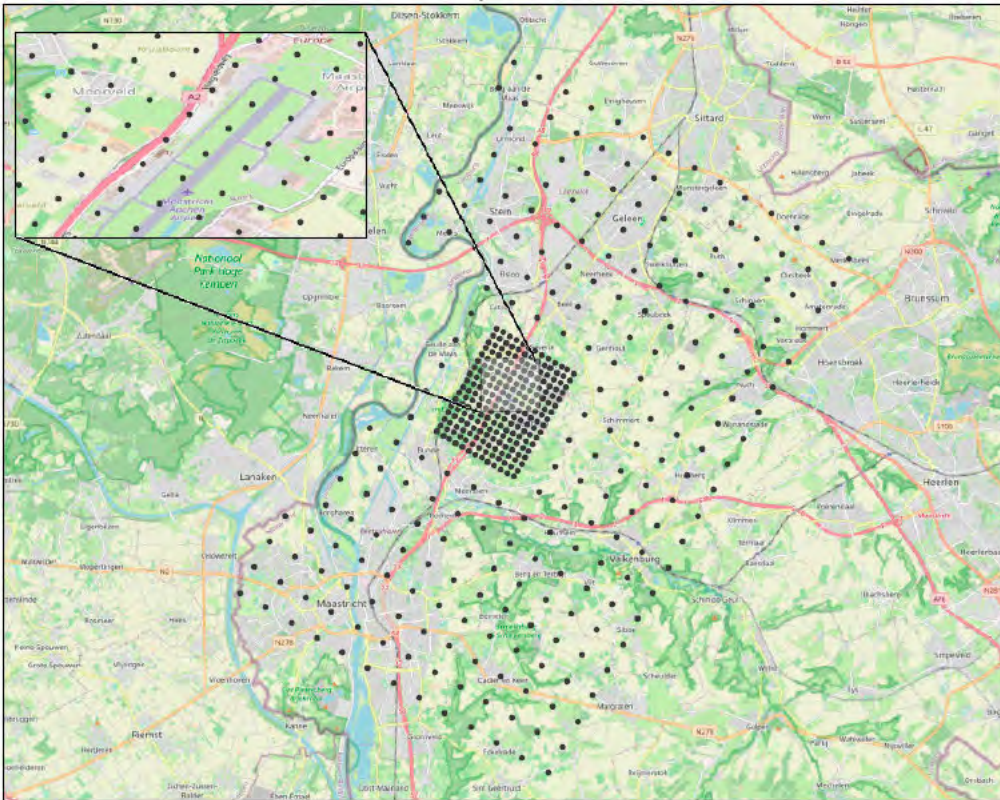
¹¹ Er is gekozen om de rekenpunten die voorbij de Nederlandse grens liggen niet mee te nemen in verband met de relevantie voor Nederlandse handhaving.



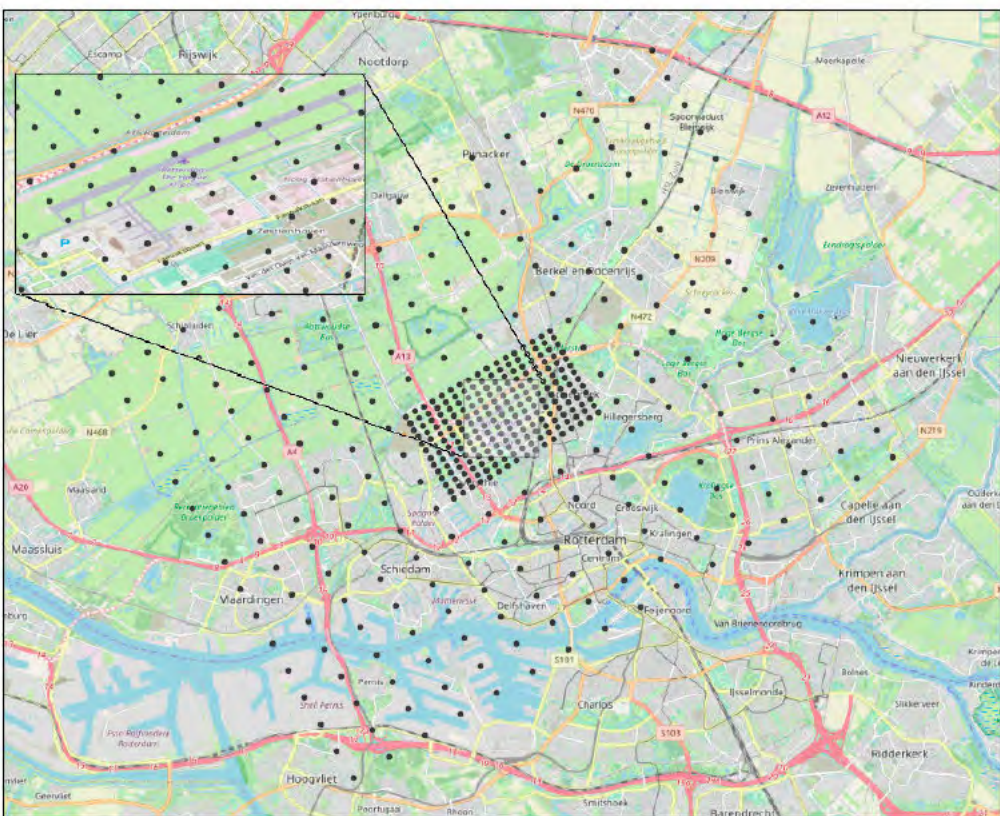
Figuur 9: Set aan 461 rekenpunten rond Eindhoven Airport die zijn gebruikt in deze studie



Figuur 10: Set aan 461 rekenpunten rond Groningen Airport Eelde die zijn gebruikt in deze studie



Figuur 11: Set aan 463 rekenpunten rond Maastricht Aachen Airport die zijn gebruikt in deze studie



Figuur 12: Set aan 461 rekenpunten rond Rotterdam The Hague Airport die zijn gebruikt in deze studie

2.5 Toetsen van concentraties

Voor de door luchtvaart uitgestoten ZZS bestaan geen wettelijk vastgestelde grenswaarden voor luchtkwaliteit. Benzeen vormt hierop de uitzondering. Voor benzeen is een officiële luchtkwaliteitsgrenswaarde vastgesteld van $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ als jaargemiddelde concentratie. Een manier om toch te toetsen op de risico's bij langdurige blootstelling is om gebruik te maken van Maximaal Toelaatbare Risiconiveaus (MTR). MTR zijn door RIVM in opdracht van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat vastgestelde normen voor maximale jaargemiddelde concentraties. De waarden zijn te vinden in de 'totale lijst van Zeer Zorgwekkende Stoffen' van het RIVM (RIVM, 2023) en in de 'Activiteitenregeling milieubeheer' (Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, 2007).

In deze studie worden de berekende jaargemiddelde ZZS-concentraties waar mogelijk vergeleken met de MTR-waarden voor deze stoffen om zo context te geven bij de uitkomsten. Er zijn echter een aantal bijzonderheden:

- Navraag bij het RIVM leert dat de MTR voor **crotonaldehyde** is vastgesteld met een verouderde methode die niet meer door RIVM gebruikt wordt (RIVM, 2-Butenal stofgegevens, 2023). RIVM raadt dan ook af gebruik te maken van de huidige waarde en raadt aan om te wachten met toetsen tot een nieuwe waarde is opgesteld.
- Voor de stoffen **1-methylnaftaleen, naftaleen en 2-methylnaftaleen** – een groep stoffen die deel uitmaakt van de Polycyclische Aromatische Koolwaterstoffen ofwel PAK's – zijn weliswaar MTR-waarden vastgesteld, maar deze gelden niet voor de stoffen afzonderlijk maar voor de hele groep stoffen. De juiste procedure om PAK's te toetsen is om de concentraties van benzo[a]pyreen – een andere stof uit dezelfde groep – af te leiden uit de uitstoot van PM_{10} en deze vervolgens te toetsen aan de MTR-waarde. Dit vereist echter andere emissieresultaten dan de VOS-emissies die aangeleverd zijn voor dit onderzoek waarmee toetsing van PAK's niet mogelijk is binnen dit project (RIVM, 2022).
- Voor de overige ZZS zijn de MTR toepasbaar om te toetsen.

Tabel 4 vermeldt het MTR voor de door luchtvaart uitgestoten ZZS en de bijbehorende MTR. Ook wordt in deze tabel aangegeven bij welke VOS-concentratie de MTR voor een ZZS wordt overschreden uitgaande van een vaste massaverhouding tussen VOS en ZZS.

Tabel 4: Vastgestelde MTR voor de in deze studie onderzochte ZZS (TNO, 2023)

Stof	MTR in concentratie van betreffende stof [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Massa% t.o.v. VOS ¹²	VOS-concentratie waarbij MTR wordt overschreden [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
1,3-Butadieen	3	1,687%	178
Formaldehyde	10	12,310%	81
Benzeen	5	1,681%	297
Isopropylbenzeen	870	0,003%	2.90E+07
Crotonaldehyde	0.00436*	1,033%	0.422
PAK's waaronder: 1-methylnaftaleen naftaleen 2-methylnaftaleen	0,001**	0,25% 0,54% 0,21%	**

*Op basis een verouderde methode. RIVM raadt af deze waarde te gebruiken om te toetsen en raadt aan om te wachten tot een nieuwe waarde is vastgesteld

**Kan enkel als groep getoetst worden en wel op basis van PM_{10} emissies

¹² De VOS in vliegtuigemissies bevatten niet enkel ZZS, dus de percentages tellen niet op naar 100%.

Wanneer er een grenswaarde of norm beschikbaar is dan kan het NLR de berekende concentratie daaraan toetsen. Het NLR is echter niet deskundig om uitspraken te doen over de ernst en/of mogelijke gezondheidsrisico's van de uitkomsten en verwijst hiervoor door naar het RIVM of andere kundige partijen.

3 Resultaten

Dit hoofdstuk laat allereerst zien waar de ZZS-emissies van vliegverkeer plaatsvindt (Sectie 3.1). Vervolgens wordt getoond tot welke jaargemiddelde concentraties van ZZS op leefniveau deze uitstoot leidt (Sectie 3.2) en hoe de berekende waarden zich verhouden tot het maximaal toelaatbaar risiconiveau (MTR; Sectie 3.3).

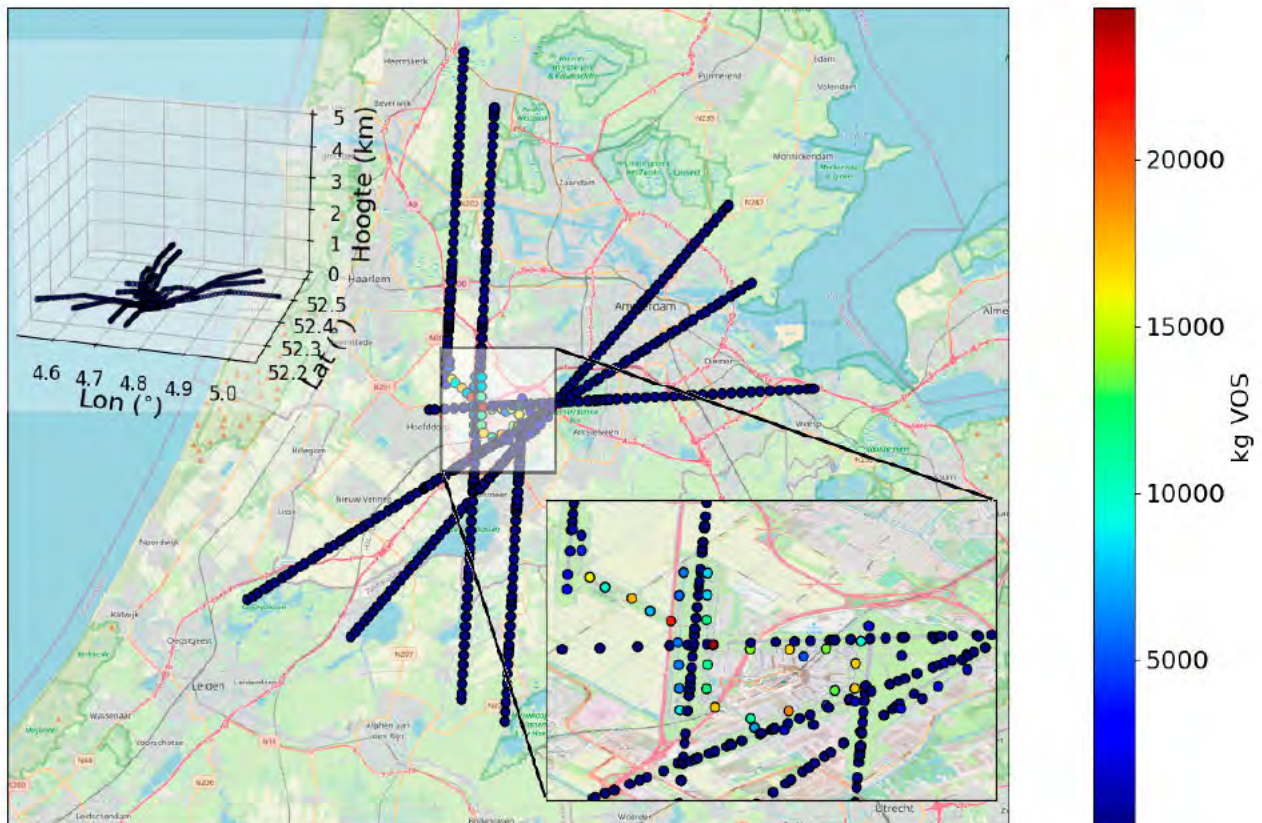
3.1 Ruimtelijke verdeling ZZS-emissies

Een belangrijk onderdeel van deze studie is het maken van een ruimtelijk verdeling van de door TNO berekende ZZS-emissies. Hiervoor is de werkwijze gevolgd die in Sectie 2.3 wordt uitgelegd. Deze sectie laat de ruimtelijke verdeling van emissies per luchthaven zien. Omdat de uitstoot van de verschillende ZZS een vaste verhouding hebben met de uitstoot van VOS, geeft de ruimtelijke verdeling van VOS ook de ruimtelijke verdeling van ZZS weer. Hieronder volgt per luchthaven een overzicht van de VOS-emissies uit de hoofdmotor¹³.

3.1.1 Amsterdam Airport Schiphol

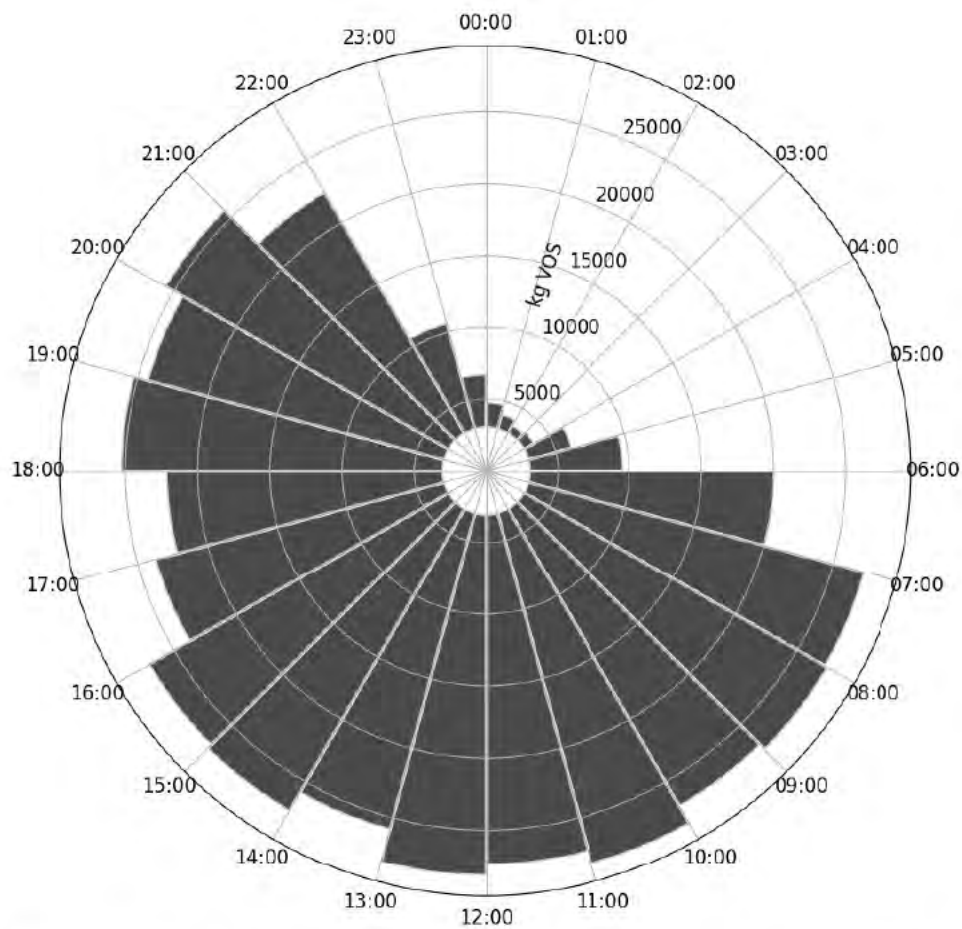
Figuur 13 toont de VOS-emissies van vliegverkeer op en rondom Amsterdam. VOS-emissies zijn een directe graadmeter voor de uitstoot van ZZS.

¹³ De emissies uit de APU staan niet in de figuren. Dit heeft te maken met de werking van het rekenmodel. In de concentratieberekening zijn deze emissies wel meegenomen.



Figuur 13: Ruimtelijke verdeling van VOS-emissies op en rondom Amsterdam Airport Schiphol. De kleuren geven de hoeveelheid emissies aan in kg per jaar

Het merendeel van de VOS-emissies wordt op het luchthaventerrein langs de taxibanen uitgestoten. De hoogste emissies vinden plaats op de taxibanen. In de omgeving van de luchthaven vinden de emissies in het verlengde van de start- en landingsbanen plaats.

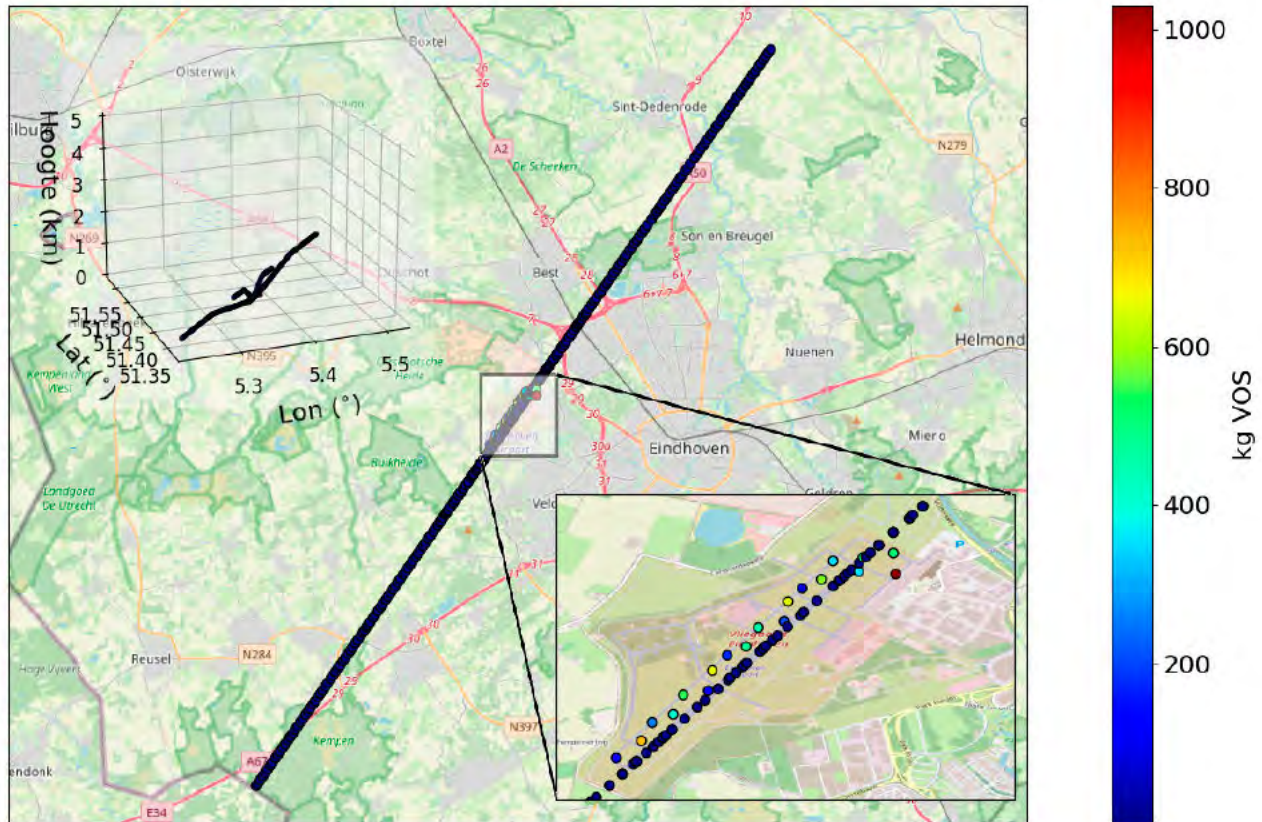


Figuur 14: Verdeling van VOS-emissies op en rondom Amsterdam Airport Schiphol over een gemiddelde dag. De staven geven de jaaremissietotalen aan in kg VOS per uur van de dag

Figuur 14 toont de VOS-emissieverdeling voor het vliegverkeer op en rondom Amsterdam Airport Schiphol, per uur van de dag, gesommeerd voor alle dagen in het jaar. Hierin is het verschil tussen dag en nacht goed zichtbaar. VOS jaaremissies fluctueren overdag rond de 20.000-30.000 kg per uur van de dag (gesommeerd over een jaar).

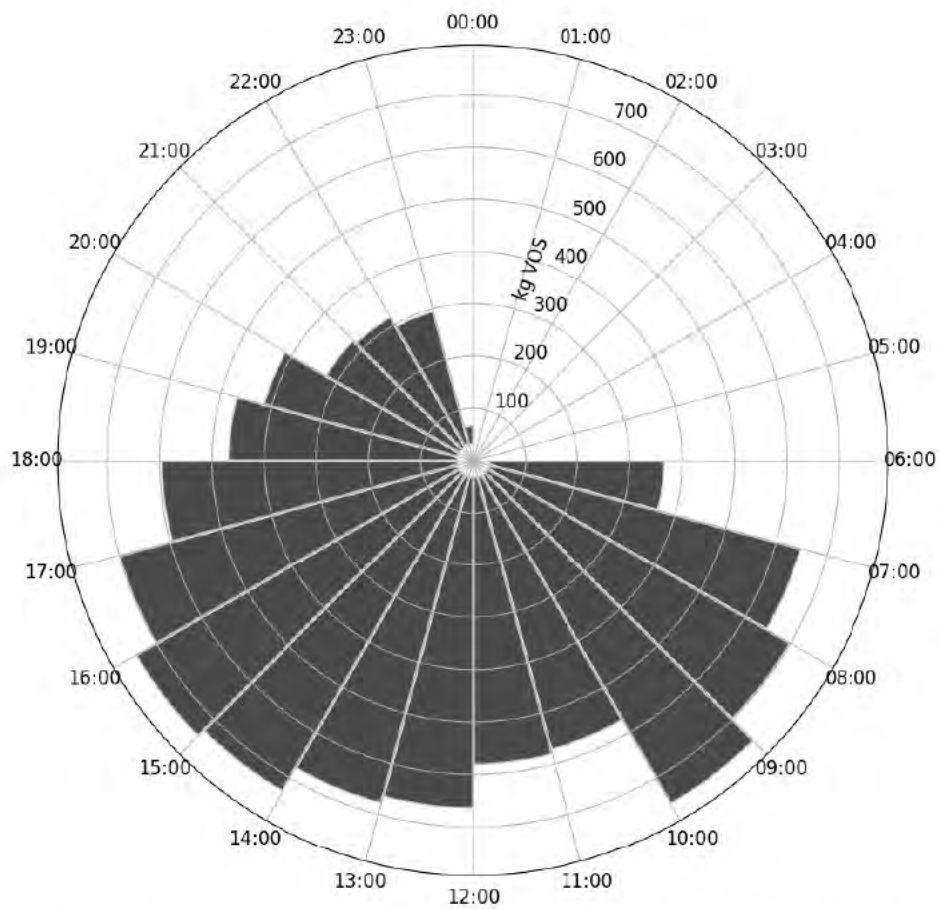
3.1.2 Eindhoven Airport (civiel)

Figuur 15 toont de VOS-emissies van vliegverkeer op en rondom Eindhoven. VOS-emissies zijn een directe graadmeter voor de uitstoot van ZZS.



Figuur 15: Ruimtelijke verdeling van VOS-emissies op en rondom Eindhoven Airport. De kleuren geven de hoeveelheid emissies aan in kg per jaar

Het merendeel van de VOS-emissies wordt op het luchthaventerrein langs de taxibanen uitgestoten. De hoogste emissies vinden plaats op de taxibanen. In de omgeving van de luchthaven vinden de emissies in het verlengde van de start- en landingsbanen plaats.

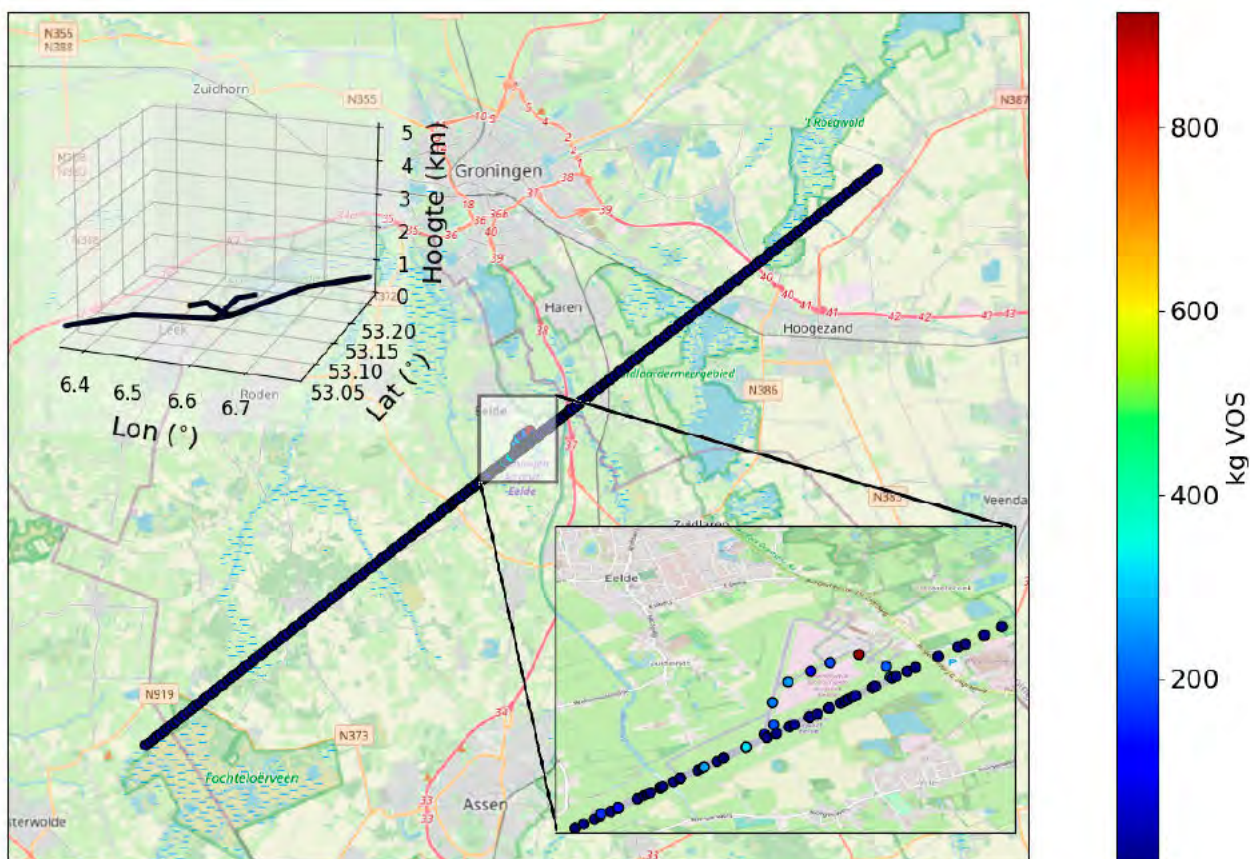


Figuur 16: Verdeling van VOS-emissies op en rondom Eindhoven Airport over een gemiddelde dag. De staven geven de jaaremissietotalen aan in kg VOS per uur van de dag

Figuur 16 toont de VOS emissieverdeling voor het vliegverkeer op en rondom Eindhoven Airport, per uur van de dag, gesommeerd voor alle dagen in het jaar. Hierin is het verschil tussen dag en nacht goed zichtbaar. VOS jaaremissies fluctueren overdag rond de 600-800 kg per uur van de dag (gesommeerd over een jaar).

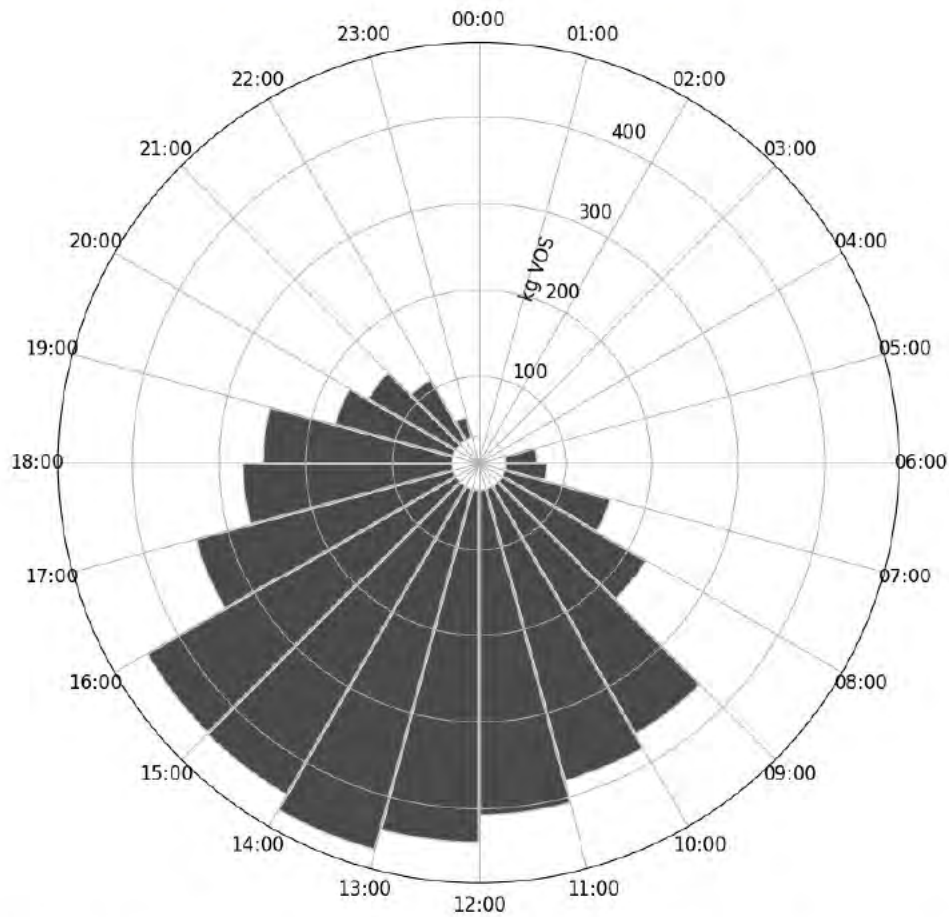
3.1.3 Groningen Airport Eelde

Figuur 17 toont de VOS-emissies van vliegverkeer op en rondom Groningen. VOS-emissies zijn een directe graadmeter voor de uitstoot van ZZS.



Figuur 17: Ruimtelijke verdeling van VOS-emissies op en rondom Groningen Airport Eelde. De kleuren geven de hoeveelheid emissies aan in kg per jaar

Het merendeel van de VOS-emissies wordt op het luchthaventerrein langs de taxibanen uitgestoten. De hoogste emissies vinden plaats op de taxibanen. In de omgeving van de luchthaven vinden de emissies in het verlengde van de start- en landingsbanen plaats.

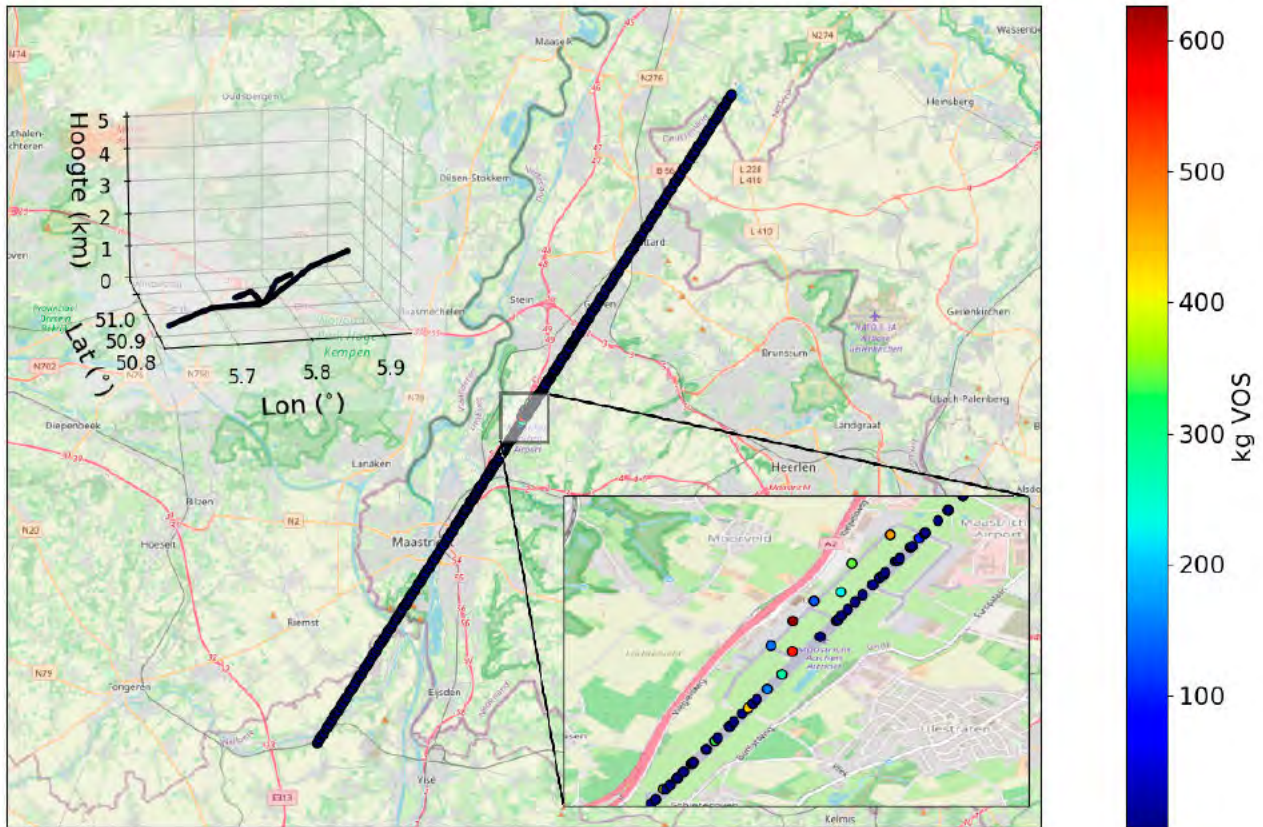


Figuur 18: Verdeling van VOS-emissies op en rondom Groningen Airport Eelde over een gemiddelde dag. De staven geven de jaaremissietotalen aan in kg VOS per uur van de dag

Figuur 18 toont de VOS emissieverdeling voor het vliegverkeer op en rondom Groningen Airport Eelde, per uur van de dag, gesommeerd voor alle dagen in het jaar. Hierin is het verschil tussen dag en nacht goed zichtbaar. VOS jaaremissies fluctueren overdag rond de 300-500 kg per uur van de dag (gesommeerd over een jaar).

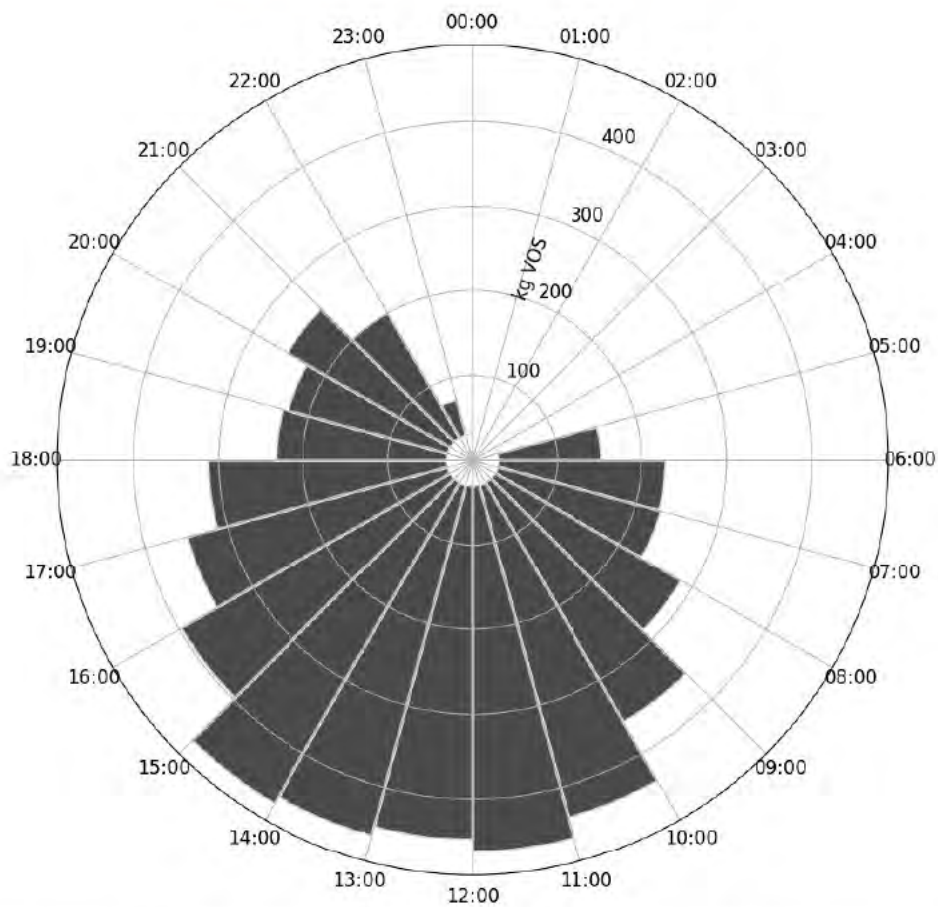
3.1.4 Maastricht Aachen Airport

Figuur 19 toont de VOS-emissies van vliegverkeer op en rondom Maastricht. VOS-emissies zijn een directe graadmeter voor de uitstoot van ZZS.



Figuur 19: Ruimtelijke verdeling van VOS-emissies op en rondom Maastricht Aachen Airport. De kleuren geven de hoeveelheid emissies aan in kg per jaar

Het merendeel van de VOS-emissies wordt op het luchthaventerrein langs de taxibanen uitgestoten. De hoogste emissies vinden plaats op de taxibanen. In de omgeving van de luchthaven vinden de emissies in het verlengde van de start- en landingsbanen plaats.

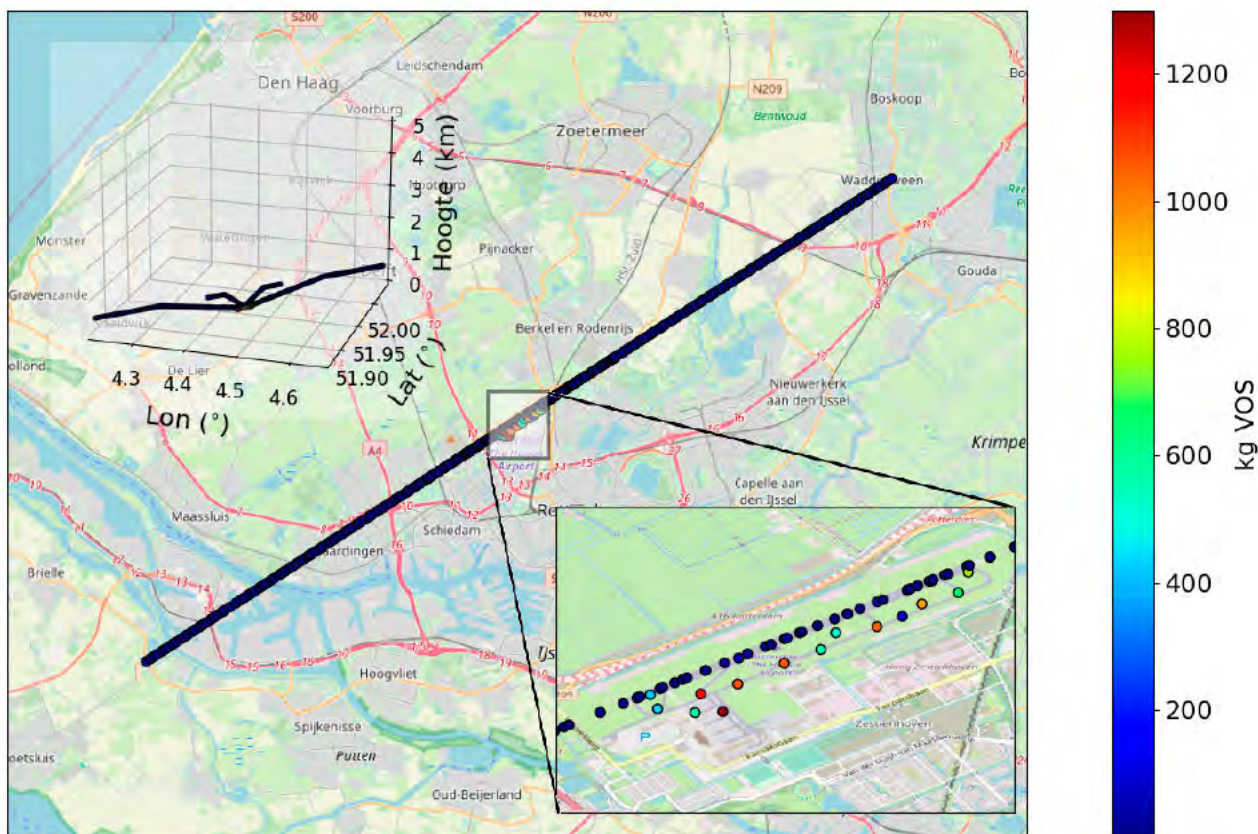


Figuur 20: Verdeling van VOS-emissies op en rondom Maastricht Aachen Airport over een gemiddelde dag. De staven geven de jaaremissietotalen aan in kg VOS per uur van de dag

Figuur 20 toont de VOS emissieverdeling voor het vliegverkeer op en rondom Maastricht Aachen Airport, per uur van de dag, gesommeerd voor alle dagen in het jaar. Hierin is het verschil tussen dag en nacht goed zichtbaar. Tussen 10u en 15u piekt het vliegverkeer, met totale VOS jaaremissies tussen de 400 en 500 kg per uur van de dag.

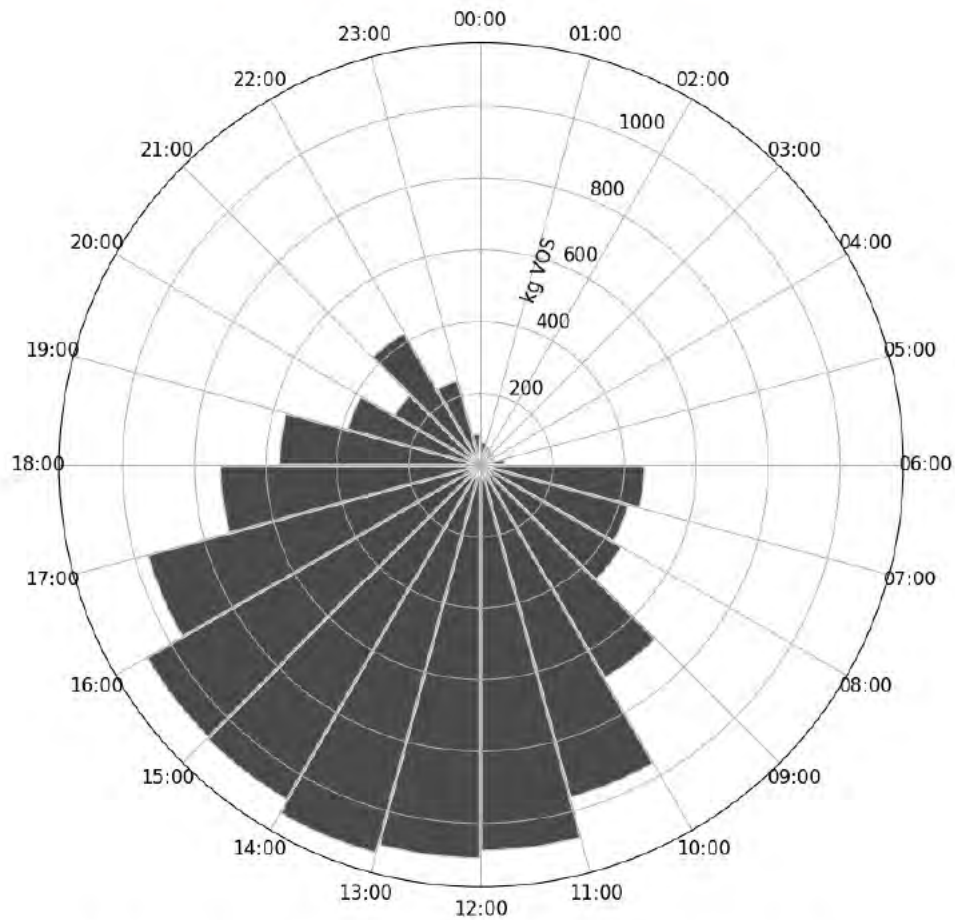
3.1.5 Rotterdam The Hague Airport

Figuur 21 toont de VOS-emissies van vliegverkeer op en rondom Rotterdam. VOS-emissies zijn een directe graadmeter voor de uitstoot van ZZS.



Figuur 21: Ruimtelijke verdeling van VOS-emissies op en rondom Rotterdam The Hague Airport. De kleuren geven de hoeveelheid emissies aan in kg per jaar

Het merendeel van de VOS-emissies wordt op het luchthaventerrein langs de taxibanen uitgestoten. De hoogste emissies vinden plaats op de taxibanen. In de omgeving van de luchthaven vinden de emissies in het verlengde van de start en landingsbanen plaats.



Figuur 22: Verdeling van VOS-emissies op en rondom Rotterdam The Hague Airport over een gemiddelde dag. De staven geven de jaaremissietotalen aan in kg VOS per uur van de dag

Figuur 22 toont de VOS emissieverdeling voor het vliegverkeer op en rondom Rotterdam The Hague Airport, per uur van de dag, gesommeerd voor alle dagen in het jaar. Hierin is het verschil tussen dag en nacht goed zichtbaar. VOS jaaremissies zitten tussen 11u en 16u boven de 1,000 kg per uur van de dag.

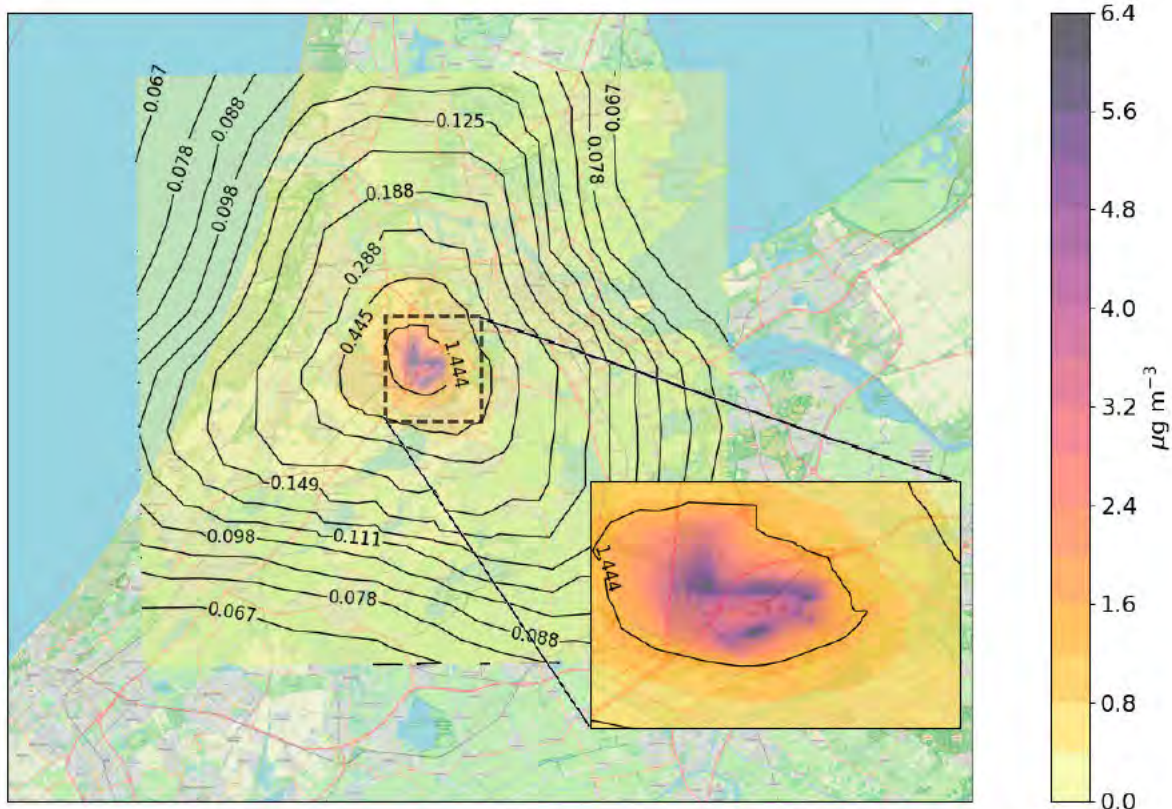
3.2 Berekende ZZS-concentraties

De emissies verspreiden zich na uitstoot door de lucht en verhogen de concentraties van ZZS op leefniveau. Om tot de concentraties te komen is de werkwijze gevolgd die in Sectie 2.4 is uitgelegd. De berekende concentraties worden hieronder per luchthaven getoond en toegelicht. Omdat de uitstoot van de verschillende ZZS een vaste massaverhouding hebben met de uitstoot van VOS, is de aanwezige concentratie VOS ook een directe maatstaf voor de concentraties van de verschillende ZZS. Om het overzicht te bewaren, worden voor elke luchthaven alleen de VOS-concentraties in het studiegebied getoond.

Met behulp van contourlijnen kan zichtbaar worden gemaakt binnen welk gebied de ZZS-concentraties de MTR-waarden overschrijden. In geval van crotonaldehyde geeft het RIVM aan dat de norm opnieuw moet worden vastgesteld. In geval van de PAK's 1-methylnaftaleen, naftaleen en 2-methylnaftaleen moet eerst een PM10-berekening gemaakt worden voordat deze, als groep, getoetst kunnen worden. Toetsing van individuele PAK's afgeleid uit VOS-concentraties is niet mogelijk (zie Sectie 2.5). Voor alle andere ZZS waren de MTR wel geschikt en zijn geen jaargemiddelde concentraties gevonden die boven de MTR uitkomen. Het studiegebied is zo gekozen dat ook op basis van deze, eigenlijk niet goed toepasbare normen, er buiten het gebied geen overschrijdingen plaatsvinden.

3.2.1 Amsterdam Airport Schiphol

Figuur 23 toont de VOS-concentraties als gevolg van vliegverkeer op en rondom Amsterdam Airport Schiphol. VOS-concentraties zijn een directe graadmeter voor ZZS-concentraties. In de figuur wordt zowel met contourlijnen als met kleur de concentratie aangegeven.



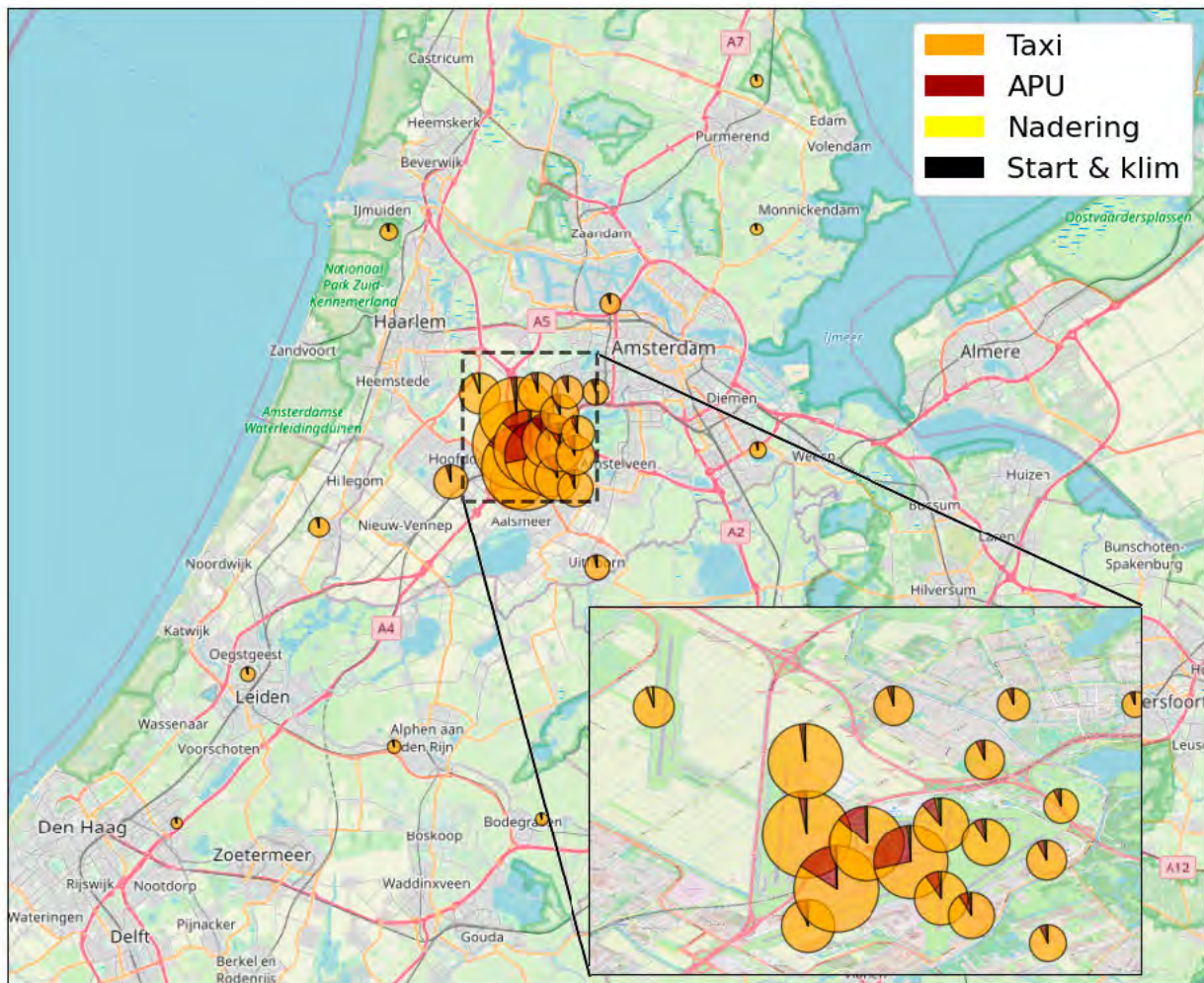
Figuur 23: VOS-concentraties op en rondom Amsterdam Airport Schiphol

Voor 1,3-butadien, formaldehyde, benzeen en isopropylbenzeen wordt het MTR nergens overschreden. Voor crotonaldehyde is alleen een verouderde MTR-waarde beschikbaar, welke het RIVM afraadt om te gebruiken. De concentratie van de PAK's 1-methylnaftaleen, naftaleen en 2-methylnaftaleen kunnen niet getoetst worden op basis van VOS-concentraties.

Bij de maximale VOS-concentratie van $6,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bedragen de concentraties 1,3-Butadien, formaldehyde en isopropylbenzeen respectievelijk $0,11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (4% van het MTR), $0,80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (8% van het MTR) en $1,95 \cdot 10^{-4} \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($2,24 \cdot 10^{-5}$ % van het MTR). Echter, doordat de achtergrondconcentratie van deze stoffen onbekend is, kan niet worden vastgesteld of het MTR door de gezamenlijke emissies van luchtvaart- en niet-luchtvaartbronnen wordt overschreden. Voor benzeen is de achtergrondconcentratie wel bekend en kan vastgesteld worden dat de totale concentratie inclusief de bijdrage van vliegtuigen onder de MTR blijft.

In Figuur 24 zijn de relatieve bijdragen van de verschillende vluchtfasen – taxi (idle), APU, nadering en start + klim – aan de totaal gemodelleerde VOS-concentraties (Figuur 23) weergegeven op 30 locaties binnen het studiegebied. Uit Figuur 24 blijkt dat de taxi-emissies de grootste concentratiebijdrage leveren over het gehele studiegebied, ook op tientallen kilometers van de luchthaven waar taxi-emissies ca. 95% bijdragen aan de lokale VOS-concentraties. Ver van Amsterdam Airport Schiphol dragen APU-emissies ca. 1%-2% bij aan de totale concentraties, wat oploopt tot

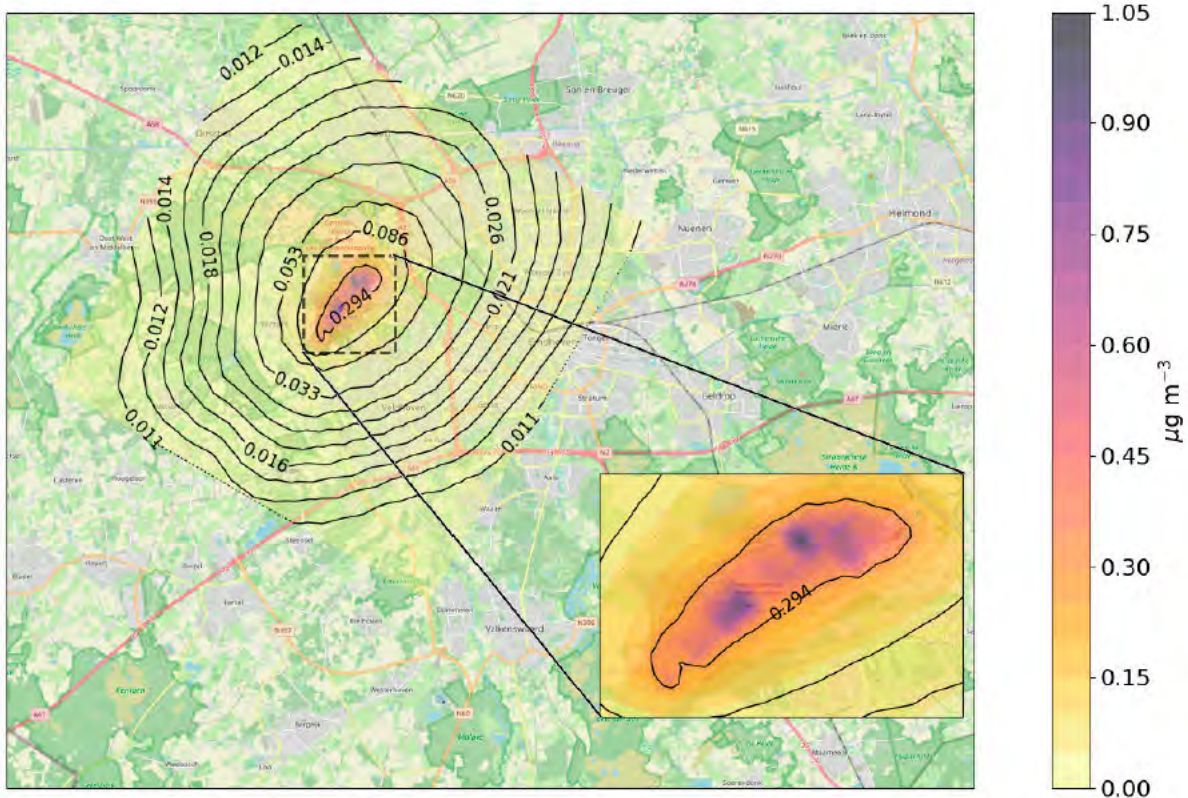
maximaal een derde op de hoofdplatforms van de luchthaven. De relatieve concentratiebijdragen van de APU's vertonen daarmee de sterkste ruimtelijke afhankelijkheid van alle vluchtfasen. Voor emissies tijdens nadering en vertrek (start + klim) geldt dat deze nergens binnen het studiegebied meer dan respectievelijk 4% en 3% bijdragen aan de lokale concentraties.



Figuur 24: Relatieve bijdragen van de verschillende vluchtfasen aan de totale VOS-concentraties op en rondom Amsterdam Airport Schiphol. De diameter van het cirkeldiagram geeft de totale VOS-concentraties ter plekke aan (bijvoorbeeld een twee keer zo grote diameter op locatie A t.o.v. locatie B geeft aan dat de VOS-concentraties op locatie A twee keer zo hoog zijn dan op locatie B)

3.2.2 Eindhoven Airport (civiel)

Figuur 25 toont de VOS-concentraties als gevolg van vliegverkeer op en rondom Eindhoven Airport. VOS-concentraties zijn een directe graadmeter voor de ZZS-concentraties. In de figuur wordt zowel met contourlijnen als met kleur de concentratie aangegeven.

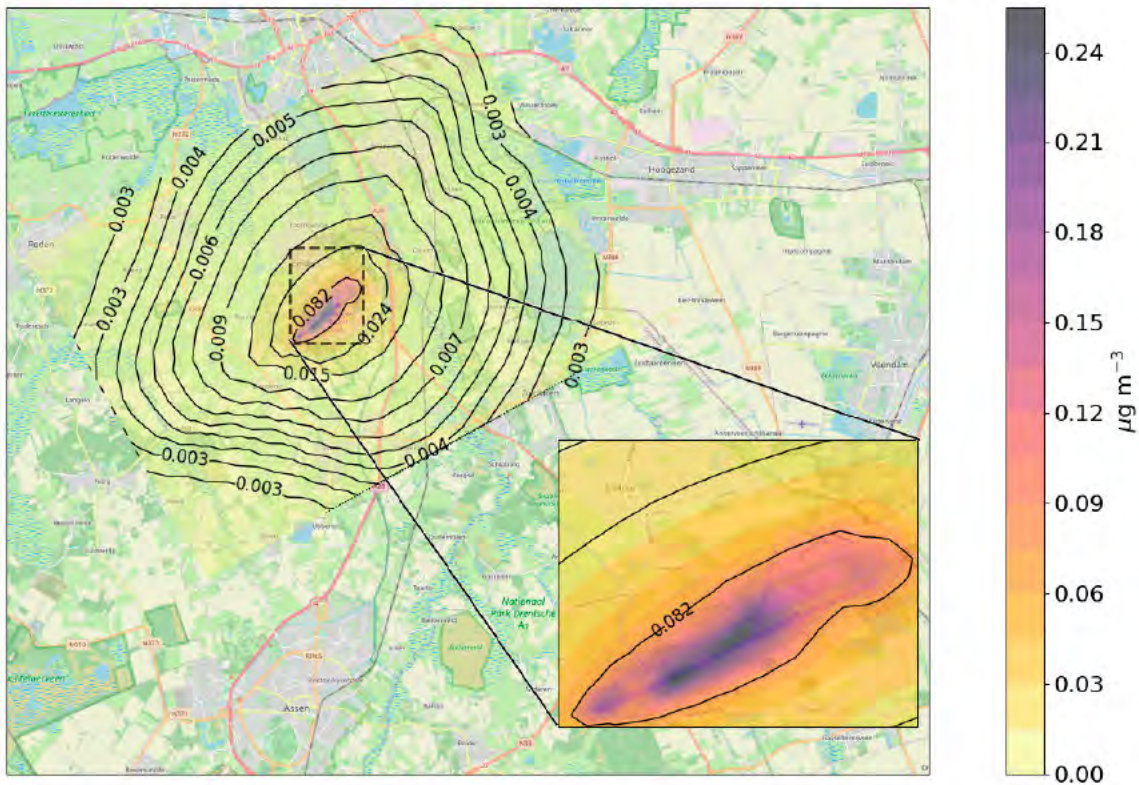


Figuur 25: VOS-concentraties op en rondom Eindhoven Airport

Voor 1,3-butadien, formaldehyde, benzeen en isopropylbenzeen wordt het MTR nergens overschreden. Voor crotonaldehyde is alleen een verouderde MTR-waarde beschikbaar, welke het RIVM afraadt om te gebruiken. De concentratie van de PAK's 1-methylnaftaleen, naftaleen en 2-methylnaftaleen kunnen niet getoetst worden op basis van VOS-concentraties.

3.2.3 Groningen Airport Eelde

Figuur 26 toont de VOS-concentraties als gevolg van vliegverkeer op en rondom Groningen Airport Eelde. VOS-concentraties zijn een directe graadmeter voor de ZZS-concentraties. In de figuur wordt zowel met contourlijnen als met kleur de concentratie aangegeven.

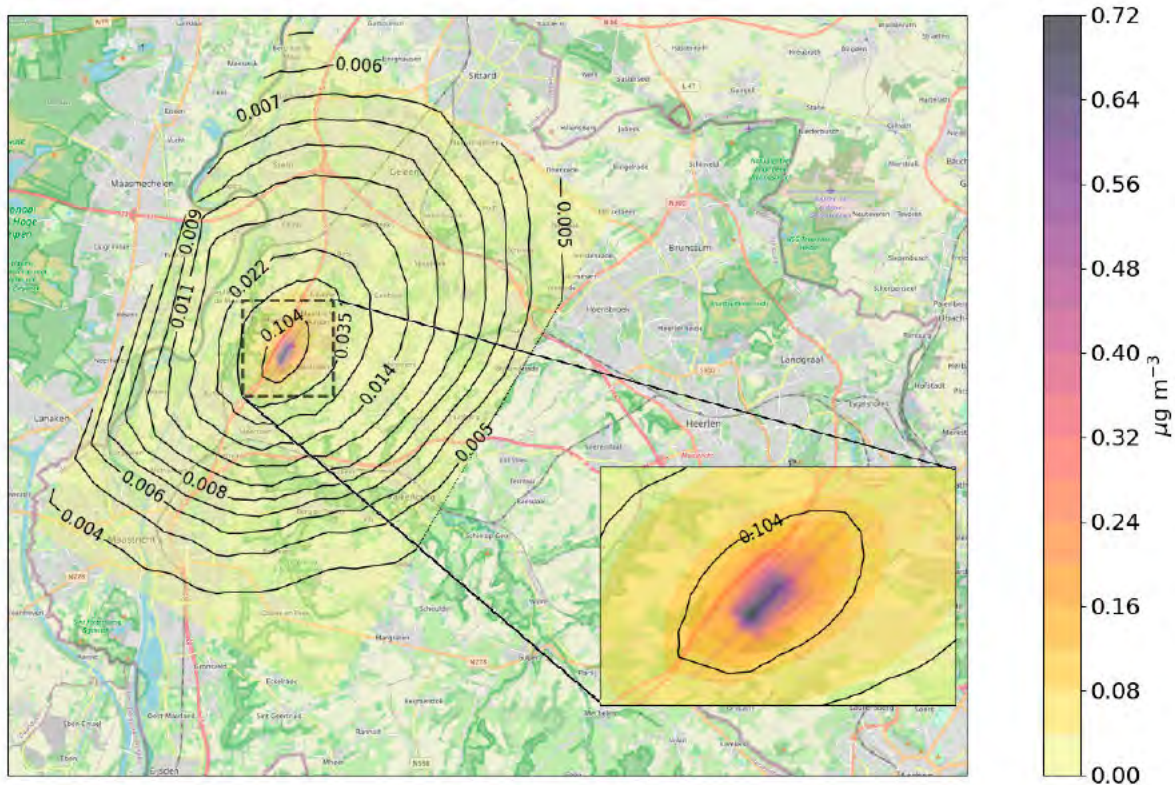


Figuur 26: VOS-concentraties op en rondom Groningen Airport Eelde

Voor 1,3-butadien, formaldehyde, benzeen en isopropylbenzeen wordt het MTR nergens overschreden. Voor crotonaldehyde is alleen een verouderde MTR-waarde beschikbaar, welke het RIVM afraadt om te gebruiken. De concentratie van de PAK's 1-methylnaftaleen, naftaleen en 2-methylnaftaleen kunnen niet getoetst worden op basis van VOS-concentraties.

3.2.4 Maastricht Aachen Airport

Figuur 27 toont de VOS-concentraties als gevolg van vliegverkeer op en rondom Maastricht Aachen Airport. VOS-concentraties zijn een directe graadmeter voor de ZZS-concentraties. In de figuur wordt zowel met contourlijnen als met kleur de concentratie aangegeven.

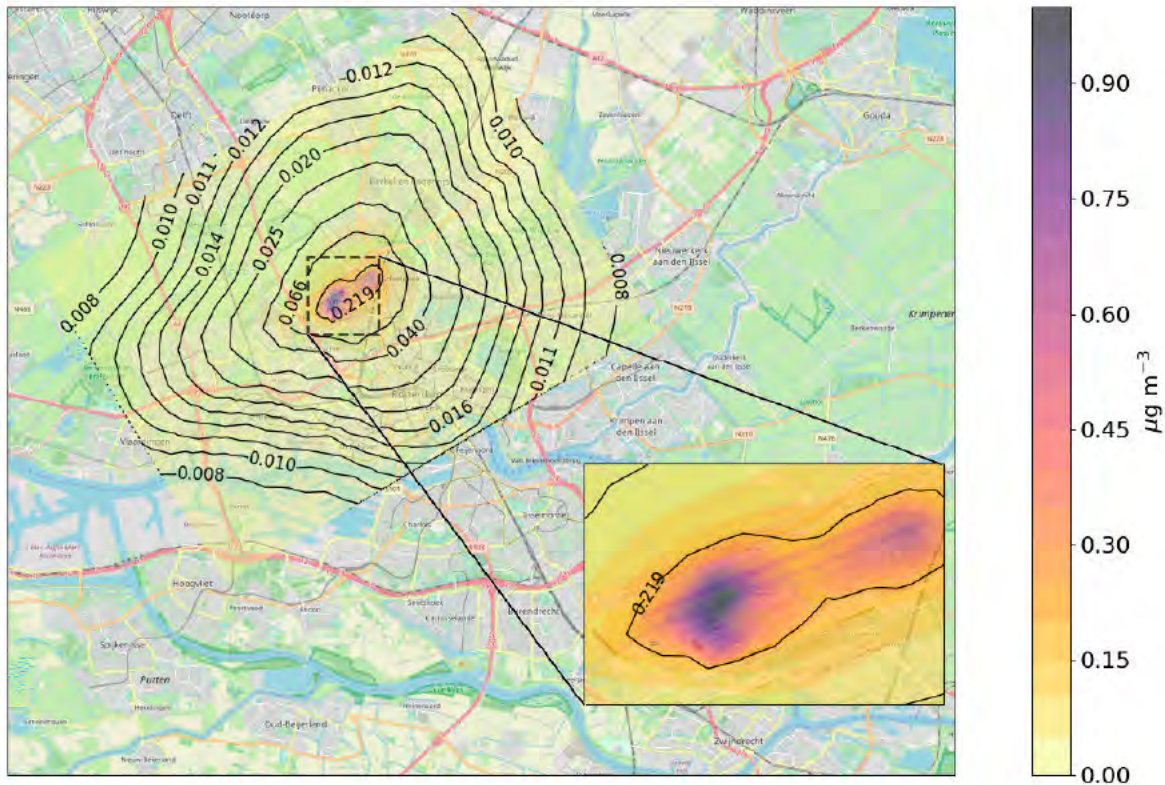


Figuur 27: VOS-concentraties op en rondom Maastricht Aachen Airport

Voor 1,3-butadien, formaldehyde, benzeen en isopropylbenzeen wordt het MTR nergens overschreden. Voor crotonaldehyde is alleen een verouderde MTR-waarde beschikbaar, welke het RIVM afraadt om te gebruiken. De concentratie van de PAK's 1-methylnaftaleen, naftaleen en 2-methylnaftaleen kunnen niet getoetst worden op basis van VOS-concentraties.

3.2.5 Rotterdam The Hague Airport

Figuur 28 toont de VOS-concentraties als gevolg van vliegverkeer op en rondom Rotterdam The Hague Airport. VOS-concentraties zijn een directe graadmeter voor de ZZS-concentraties. In de figuur wordt zowel met contourlijnen als met kleur de concentratie aangegeven.



Figuur 28: VOS-concentraties op en rondom Rotterdam The Hague Airport

Voor 1,3-butadien, formaldehyde, benzeen en isopropylbenzeen wordt het MTR nergens overschreden. Voor crotonaldehyde is alleen een verouderde MTR-waarde beschikbaar, welke het RIVM afraadt om te gebruiken. De concentratie van de PAK's 1-methylnaftaleen, naftaleen en 2-methylnaftaleen kunnen niet getoetst worden op basis van VOS-concentraties.

3.3 Vergelijking met andere bronnen van ZZS

Het RIVM beheert de Grootschalige Concentratie- en Depositiekaarten Nederland (GCN en GDN) waarin achtergrondconcentraties zijn opgenomen van een 14-tal stoffen (RIVM, 2022). Van deze stoffen is alleen benzeen een ZZS die wordt uitgestoten door de luchtvaart. Hierdoor is niet met zekerheid te zeggen hoe de andere ZZS-emissies van vliegverkeer op en rondom de Nederlandse luchthavens zich verhouden tot andere bronnen. Kijkend naar de GCN van 2022 dan valt op dat de achtergrondconcentratie van benzeen (inclusief luchtvaart) in stedelijk gebied tussen de 0,5 en 1,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ligt en in landelijk gebied tussen de 0,3 en 0,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Rondom de luchthavens in deze studie bedraagt de achtergrondconcentratie benzeen tussen de 0,6 en 0,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. De hoogste benzeenconcentraties zijn te vinden rond Pernis (>6.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), de laagste waarden op de Waddeneilanden (0,1-0,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

De hoogste luchtvaartbijdrage naan benzeen-concentraties op basis van verkeersinformatie voor 2019 zijn in deze studie berekend rond Amsterdam Schiphol, op het luchthaventerrein bedroeg deze maximaal 0,109 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. In 2022¹⁴ was de achtergrondconcentratie in de Haarlemmermeer 0,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Dit zou neerkomen op een relatieve bijdrage van het vliegverkeer aan de totale benzeenconcentratie van 18%. Het MTR voor benzeen bedraagt 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en wordt niet overschreden.

Zoals TNO ook opmerkte wordt er relatief weinig onderzoek gepubliceerd over ZZS-emissies door de luchtvaart (TNO, 2017). Hierdoor is het moeilijk om de berekende ZZS-concentraties op basis van internationaal onderzoek in context van andere bronnen te plaatsen. Een recente Chinese studie naar VOS-emissies in 2017 in de regio Shenzhen schat de bijdrage van luchthaven-gerelateerde bronnen aan de VOS-concentratie op 19% (Zhu, et al., 2023). Hierbij moet worden opgemerkt dat dit een enkele studie betreft in een zeer sterk geïndustrialiseerde en dichtbevolkte regio die zich waarschijnlijk niet goed laat vergelijken met Nederland. In de studie zijn luchtvaart-gerelateerde VOS-concentraties gemeten op de plaatselijke luchthaven, die zijn geschat op 4,3 *parts-per-billion*. Dit komt ongeveer overeen¹⁵ met een concentratie van 14,5 μg VOS per m^3 . In deze studie bedraagt de hoogst berekende VOS concentratie op Amsterdam Schiphol 6,5 μg VOS per m^3 . Daarbij moet worden opgemerkt dat het begrip “luchtvaart-gerelateerde bronnen” in de Shenzhen-studie veelomvattender is dan in deze studie waarin enkel vliegtuigemissies zijn meegenomen. Op het gebied van luchtvaartbewegingen is de luchthaven van Shenzhen – met 50 miljoen passagiers in 2019 – circa 30% kleiner dan Amsterdam Schiphol (Shenzhen Airport Group, 2023; Royal Schiphol Group, 2020).

¹⁴ De kaartenviewer toont enkel de meest recente informatie, dit was op moment van schrijven de concentraties voor 2022.

¹⁵ Uitgaande van VOS met een massa van 79 g/mol.

4 Conclusies

4.1 Resultaten

De studie laat eerst zien hoe de door TNO berekende ZZS-emissies van luchtvaart zich verspreiden en tot welke jaargemiddelde concentraties op leefniveau deze emissies leiden. Vervolgens zijn de berekende concentraties waar mogelijk vergeleken met Maximaal Toelaatbare Risiconiveau (MTR) waarden voor deze stoffen. Dit zijn maximale toelaatbare jaargemiddelde concentraties voor langdurige blootstelling.

Zoals verwacht op basis van het eerdere werk van TNO, concentreren de meeste emissies zich langs de taxiroutes en de opstelplaatsen op de luchthaventerreinen. Langs de vliegpaden voor nadering en vertrek is de uitstoot lager, en daarmee ook de bijdrage aan de concentraties. Ook op kilometers afstand van de luchthaven draagt de taxi-fase meer dan 90% bij aan de luchtvaart gerelateerde concentraties. De bijdrage van APU-emissies aan ZZS-concentraties op het platformterrein van Amsterdam Airport Schiphol loopt lokaal op tot ruim 30%.

De benzeenconcentratie op Amsterdam Schiphol bedraagt maximaal $0,109 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (uitgaande van vliegverkeer van 2019) bij een achtergrond van $0,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (in 2022). Hiermee is de bijdrage van vliegverkeer 18% van de lokale concentratie. Voor benzeen staat vast dat ook inclusief achtergrond de MTR-waarde niet wordt overschreden. Voor isopropylbenzeen is het op basis van de hoogst gemodelleerde concentratie van $1,95 \cdot 10^{-4} \mu\text{g}/\text{m}^3$ hoogst onwaarschijnlijk dat vliegtuigemissies significant bijdragen aan een overschrijding van het MTR mocht deze plaatsvinden (de MTR bedraagt $870 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Voor formaldehyde en 1,3-butadien leidt de ZZS-emissie uit vliegtuigen niet tot een overschrijding van de bijbehorende MTR-waarden, maar kan door het ontbreken van informatie over achtergrondconcentraties niet met zekerheid gesteld worden of vliegverkeer een significante emissiebron is.

Het toetsen van de concentraties naftaleen, 1-methylnaftaleen, 2-methylnaftaleen (samen onderdeel van PAK's) en crotonaldehyde aan de MTR-waarden bleek binnen deze studie niet mogelijk. De PAK's zijn enkel als groep te toetsen en wel op basis van benzo[a]pyreen in plaats van VOS. De hiervoor benodigde informatie over benzo[a]pyreen concentraties ontbrak echter binnen de studie.

De MTR voor crotonaldehyde bleek bij navraag verouderd en het RIVM raadt af deze waarde te gebruiken totdat een nieuwe grenswaarde beschikbaar is. Toetsen aan de huidige norm is op zijn best indicatief. Een nieuwe waarde moet nog worden vastgesteld door RIVM. Wanneer een actuele MTR voor crotonaldehyde beschikbaar komt, kan per luchthaven worden beoordeeld of de concentratie veroorzaakt door vliegtuigemissies de MTR overschrijdt. Door het ontbreken van informatie over de achtergrondconcentratie kan echter niet worden bepaald in welke mate luchtvaartemissies bijdragen aan de totale concentratie.

Internationaal is er weinig gepubliceerd over de ZZS-emissies door luchtvaart. Een Chinese studie over de Shenzhen-regio wijst op een bijdrage van luchtvaart-gerelateerde bronnen aan de totale VOS-concentratie van 19%. De op luchthaven Shenzhen gemeten concentratie uit luchtvaart-gerelateerde bronnen is ruim twee keer zo hoog als in voorliggende studie is gemodelleerd op Amsterdam Airport Schiphol.

4.2 Beperkingen studie

Ook deze studie kent beperkingen. Deze komen deels voort uit de gemaakte aannames, de gebruikte modellen en de randvoorwaarden bij de studie en deels uit de beschikbaarheid van normen om de berekende concentraties aan te toetsen.

Invoerdata

Omwillen van een consistente aanpak is zo veel mogelijk aangesloten op het eerdere werk van TNO. De ZZS-emissies en concentraties zijn afgeleid van de uitstoot van onverbrande koolwaterstoffen (HC). Over HC-emissies is relatief weinig bekend en de onzekerheidsmarge van de Emissieregistratie is dan ook relatief groot. Er is bij het berekenen van deze emissies gebruik gemaakt van certificatiewaarden en vaste *time-in-mode*-tijden per luchthaven. Hierbij is geen rekening gehouden met de in de certificatiewaarden aanwezige marges en de afwijkingen die in de praktijk plaatsvinden ten opzichte van de gebruikte gashendelstanden en aangenomen TIM-tijden. Verder wordt geen rekening gehouden met afwijkende (brandstof-besparende) procedures zoals het taxiën op minder motoren. Dit zou in theorie tot een flinke verlaging van de taxi-emissies kunnen leiden, maar niet elk vliegtuig is geschikt voor deze procedure en in de praktijk moet ook rekening gehouden worden met het opwarmen en afkoelen van de motoren. Het effect van deze aanname is daardoor onbekend. Ook is alleen de emissie van vliegverkeer op kerosine onderzocht. Hiermee blijft ongeveer 1% van de totale VOS-emissies van vliegverkeer buiten beeld. Ten slotte heeft TNO enkel APU-emissies en hoofdmotoremissies meegenomen in hun studie, waarbij niet is gekeken naar andere luchtvaart-gerelateerde bronnen op de luchthaven zoals grondgebonden apparatuur en voertuigen.

Ruimtelijke verdeling

Bij de ruimtelijke verdeling in deze studie zijn door NLR aannames gedaan over onder andere de taxiroutes, APU-locaties en hoogteprofielen. Hierbij is uitgegaan van verifieerbare en eerder gevalideerde bronnen. Hierdoor geeft deze studie naar inzicht van NLR samen met het eerdere werk van TNO een goed onderbouwd inzicht in de totale jaargemiddelde ZZS-concentraties van luchtvaart op en rondom Nederlandse luchthavens van nationale betekenis. Echter, de gemiddelde concentratie kan lokaal nog steeds hoger of lager uitvallen. In deze studie is gerekend op basis van jaarcijfers voor het verkeer. Hierdoor biedt de studie geen inzicht in de dag- en uurgemiddelde concentraties.

Achtergrondconcentraties en normen

Met uitzondering van benzeen zijn er geen achtergrondconcentraties bekend voor ZZS. Hierdoor is niet met zekerheid te zeggen hoe de ZZS-emissies van vliegtuigen op en rondom de onderzochte Nederlandse luchthavens zich verhouden tot andere bronnen, en daarmee of luchtvaart in Nederland een significante bijdrage levert aan de totale concentratie en eventuele overschrijding van het MTR. Voor de PAK's is, op basis van de beschikbare emissiegegevens, niet vast te stellen hoe de vliegtuigemissies zich verhouden tot het MTR voor PAK. Voor crotonaldehyde is de onzekerheid omtrent de eerder vastgestelde MTR-waarde te groot om te toetsen.

Gevolgen voor de gezondheid

Tenslotte acht het NLR zich niet deskundig op het gebied van de ernst en/of mogelijke gezondheidsrisico's van de berekende concentraties. NLR kan vaststellen of de uitstoot van vliegverkeer leidt tot concentraties boven het MTR voor langetermijnblootstelling, maar weet niet of deze MTR-waarden voortkomen uit mogelijke schade aan mensen of ecosystemen – en, dus, of de vastgestelde concentratie dergelijke schade toebrengt. Ook is bij NLR niet bekend of er sprake is van een drempelwaarde. Tevens is NLR niet deskundig om de onderbouwing en nauwkeurigheid van de bepaalde MTR te beoordelen, al is op basis van de via het RIVM verkregen informatie geconcludeerd dat de MTR-waarde voor crotonaldehyde verouderd en daarmee slechts indicatief is. Voor een verdere duiding van de hiermee gezondheidsrisico's en de onderbouwing van het MTR verwijst NLR door naar het RIVM of andere kundige partijen.

4.3 Aanbevelingen

Op basis van de conclusies en beperkingen uit deze studie doen we de volgende 4 aanbevelingen:

1. Er wordt momenteel gewerkt aan een nationale richtlijn voor het berekenen van vliegtuigemissies. NLR onderschrijft de aanbeveling van TNO om bij publicatie van deze richtlijn te evalueren 'of' en, zo ja, 'hoe' de huidige studie geactualiseerd moet worden.
2. In een eventuele vervolgstudie kunnen met aanvullende verkeersinformatie op uur-basis ook dag- en uurgemiddelde concentraties berekend worden, tenzij overtuigend kan worden uitgesloten dat een kortdurende verhoogde belasting schadelijk is voor de gezondheid. NLR beveelt verder aan om bij een actualisatie ook de vliegtuigen en helikopters op andere brandstoffen mee te nemen in de berekening.
3. Op basis van de beschikbare invoergegevens en normen kunnen er geen sluitende uitspraken gedaan worden over de concentraties van crotonaldehyde, 1-methylnaftaleen, naftaleen en 2-methylnaftaleen. Gegeven de risico's die, per definitie, uitgaan van ZZS is het van belang dat een nieuwe MTR wordt vastgesteld voor crotonaldehyde en dat er nieuwe emissieberekeningen uitgevoerd worden die benzo[a]pyreen-emissies op basis van PM₁₀ in kaart brengen. Vervolgens kan de hieruit volgende concentraties berekend worden en getoetst worden aan de beschikbare MTR.
4. Afhankelijk van de resultaten zou ook de achtergrondconcentraties van deze stoffen, in ieder geval rond luchthavens, in kaart gebracht moeten worden om te kunnen bepalen welke bijdrage vliegtuigemissies leveren aan de totale concentraties. Ook ten aanzien van formaldehyde en, in mindere mate, 1,3-butadien kan overwogen worden om de achtergrond in kaart te brengen om uit te sluiten dat luchthavens significant bijdragen aan een eventuele overschrijding van het MTR.

5 Referenties

- DGMR. (2023). *Modules en uitbreidingen - luchtkwaliteit (SRM1, SRM2 en NNM/SRM3)*. Retrieved from DGMR: <https://dgmsoftware.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
- IenW. (2022, december 22). *Brief van de Minister van Infrastructuur en Waterstaat (Nr.1022)*. Retrieved from Tweedekamer.nl: <https://www.tweedekamer.nl/downloads/document?id=2022D56418>
- IenW. (2023, maart 30). *Zeer-zorgwekkende stoffen op luchthavens (IENW/BSK-2023/36071)*. Retrieved from Rijksoverheid.nl: <https://open.overheid.nl/documenten/ronl-6bd1f97dfcb594c195464cdbbe7b212e1d0b04c0/pdf>
- InfoMil. (2023, augustus 1). *Handleiding zeer zorgwekkende stoffen*. Retrieved from Kenniscentrum InfoMil: <https://www.infomil.nl/onderwerpen/lucht-water/lucht/zeer-zorgwekkende/>
- InfoMil. (2023, augustus 1). *Immissietoets (zeer zorgwekkende stoffen)*. Retrieved from Kenniscentrum InfoMil: <https://www.infomil.nl/onderwerpen/lucht-water/lucht/zeer-zorgwekkende/immissietoets/>
- Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer. (2007, november 9). *Bijlage 12b uit Activiteitenregeling milieubeheer*. Retrieved from Wetten.nl: <https://wetten.overheid.nl/BWBR0022830/2023-07-01/#Bijlage12b>
- RIVM. (2022). *Grootschalige Concentratie- en Depositiekaarten Nederland*. Retrieved from Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu: <https://data.rivm.nl/apps/gcn/>
- RIVM. (2022, januari 20). *Memo Luchtnormen voor PAK's*. Retrieved from https://rvs.rivm.nl/sites/default/files/2022-02/Memo_luchtnormen_voor_PAKs_met_bijlage_%20achtergrondinformatie_200122.pdf
- RIVM. (2023). *2-Butenal stofgegevens*. Retrieved from RVS zoekstelsel: <https://rvszoekstelsel.rivm.nl/stof/detail/122>
- RIVM. (2023). *Informative Inventory Report 2023*. Bilthoven, Nederland: RIVM. Retrieved from <https://www.emissieregistratie.nl/documenten/iir-rapport-2022>
- RIVM. (2023, augustus 1). *Totale lijst van Zeer Zorgwekkende Stoffen*. Retrieved from RIVM: <https://rvszoekstelsel.rivm.nl/ZZSlijst/TotaleLijst>
- RIVM. (2023, September 22). *Zeer Zorgwekkende Stoffen*. Retrieved from Website van RIVM: <https://rvs.rivm.nl/onderwerpen/zeer-zorgwekkende-stoffen>
- TNO. (2017). *Emissions of air pollutants from civil aviation in the Netherlands*. Utrecht, Nederland: TNO.
- TNO. (2023). *Notitie Emissieberekening ZZS Luchthavens (dd. 10 mei 2023)*. Utrecht: TNO.
- Tweede Kamer. (2022, maart 11). *Aanhangsel van de handelingen (2017)*. Retrieved from Overheid.nl: <https://zoek.officielebekendmakingen.nl/ah-tk-20212022-2017.html>
- Zhu, B., Cao, L.-M., Xia, S.-Y., Niu, Y.-B., Man, H.-Y., Du, K., . . . Huang, X.-F. (2023). Identifying the airport as a key urban VOC source in the Pearl River Delta, China. *Atmospheric Environment*.

Appendix A Emissiefactoren

Appendix A.1 Conversiefactoren

Tabel 5: Gebruikte conversiefactoren bij de bepaling van ZZS-emissies (TNO, 2023)

Conversie	Factor	Uitleg
HC naar VOS	1,16	1 kg HC staat gelijk aan 1,16 kg VOS
Gewicht uit VOS:		1 kg VOS bevat...
1,3-Butadieen	1,687%	16,87 g 1,3-butadieen
Formaldehyde	12,310%	123,10 g formaldehyde
Benzeen	1,681%	16,81 g benzeen
Isopropylbenzeen	0,003%	0,03 g isopropylbenzeen
Crotonaldehyde	1,033%	10,33 g crotonaldehyde

Appendix A.2 MTR-waarden

Tabel 6: Alle door TNO aangemerkte MTR-waarden (TNO, 2023)

Stof	MTR-waarde ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
1,3-Butadieen	3
Formaldehyde	10
Benzeen	5
1-Methylnaftaleen*	0,001
Naftaleen*	0,001
2-Methylnaftaleen*	0,001
Isopropylbenzeen	870
Crotonaldehyde	0,00436

*Toetsing dient te geschieden op basis van benzo[a]pyreen-concentraties met de genoemde MTR van $0,001 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Appendix B APU emissielocaties overige velden



Figuur 29: Gebruikte APU emissielocaties op Eindhoven Airport. APU-locaties zijn gemarkeerd met een ster



Figuur 30: Gebruikte APU emissielocaties op Groningen Airport Eelde. APU-locaties zijn gemarkeerd met een ster



Figuur 31: Gebruikte APU emissielocaties op Maastricht Aachen Airport. APU-locaties zijn gemarkeerd met een ster



Figuur 32: Gebruikte APU emissielocaties op Rotterdam The Hague Airport. APU-locaties zijn gemarkeerd met een ster

Appendix C Taxiroutes

Appendix C.1 Taxi-afstanden Amsterdam Airport Schiphol

Baankop	Vertrek- of aankomstroute	Platformgebied	Afstand (m)
04	Aankomst	G	460
04	Vertrek	G	2050
06	Aankomst	F	3230
06	Aankomst	G	3990
06	Aankomst	H	2480
06	Aankomst	L	570
06	Aankomst	M	1500
06	Vertrek	G	5810
09	Aankomst	G	1370
09	Vertrek	F	3730
09	Vertrek	G	4710
09	Vertrek	H	1680
09	Vertrek	L	3460
09	Vertrek	M	3130
22	Aankomst	F	2430
22	Aankomst	G	2050
22	Aankomst	H	2860
22	Aankomst	L	2260
22	Aankomst	M	1340
22	Vertrek	F	4880
22	Vertrek	G	740
22	Vertrek	H	5300
22	Vertrek	L	4710
22	Vertrek	M	3780
24	Aankomst	F	2060
24	Aankomst	G	5040
24	Aankomst	H	4850
24	Aankomst	L	1020
24	Aankomst	M	2560
24	Vertrek	F	3170
24	Vertrek	G	2680
24	Vertrek	H	2230
24	Vertrek	L	1630
24	Vertrek	M	700
27	Aankomst	F	4680
27	Aankomst	G	7710
27	Aankomst	H	1090
27	Aankomst	L	3500
27	Aankomst	M	2540

Baankop	Vertrek- of aankomstroute	Platformgebied	Afstand (m)
27	Vertrek	F	5400
27	Vertrek	G	1370
27	Vertrek	H	3150
27	Vertrek	L	3860
27	Vertrek	M	2480
18C	Aankomst	F	2500
18C	Aankomst	G	6480
18C	Aankomst	H	3390
18C	Aankomst	L	3360
18C	Aankomst	M	4200
18C	Vertrek	F	5300
18C	Vertrek	G	6830
18C	Vertrek	H	3800
18C	Vertrek	L	5030
18C	Vertrek	M	5250
18L	Vertrek	F	4790
18L	Vertrek	G	3480
18L	Vertrek	H	1800
18L	Vertrek	L	3250
18L	Vertrek	M	1870
18R	Aankomst	M	7450
18R	Aankomst	M	7070
18R	Aankomst	M	5150
18R	Aankomst	M	6650
18R	Aankomst	M	11510
18R	Aankomst	N	10650
18R	Aankomst	N	10270
18R	Aankomst	N	8350
18R	Aankomst	N	9850
18R	Aankomst	N	14690
18R	Aankomst	S	8420
18R	Aankomst	S	9360
18R	Aankomst	S	8500
18R	Aankomst	S	7620
18R	Aankomst	S	12470
36C	Aankomst	F	5070
36C	Aankomst	G	8330
36C	Aankomst	H	3570
36C	Aankomst	L	4310
36C	Aankomst	M	4850
36C	Vertrek	F	2480
36C	Vertrek	G	6260
36C	Vertrek	H	3370
36C	Vertrek	L	2220
36C	Vertrek	M	3750

Baankop	Vertrek- of aankomstroute	Platformgebied	Afstand (m)
36L	Vertrek	FM	6780
36L	Vertrek	FN	9980
36L	Vertrek	FS	7750
36L	Vertrek	GM	10440
36L	Vertrek	GN	13640
36L	Vertrek	GS	11410
36L	Vertrek	HM	5280
36L	Vertrek	HN	8480
36L	Vertrek	HS	8630
36L	Vertrek	LM	6520
36L	Vertrek	LN	9710
36L	Vertrek	LS	7480
36L	Vertrek	MM	6730
36L	Vertrek	MN	9930
36L	Vertrek	MS	9020
36R	Aankomst	F	4240
36R	Aankomst	G	1960
36R	Aankomst	H	1290
36R	Aankomst	L	1700
36R	Aankomst	M	930
36R	Vertrek	XG	3180

Appendix C.2 Taxi-afstanden Eindhoven Airport

Baankop	Vertrek- of aankomstroute	Platformgebied	Afstand (m)
03	Aankomst	-	490
03	Vertrek	-	3510
21	Aankomst	-	3280
21	Vertrek	-	450

Appendix C.3 Taxi-afstanden Groningen Airport Eelde

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

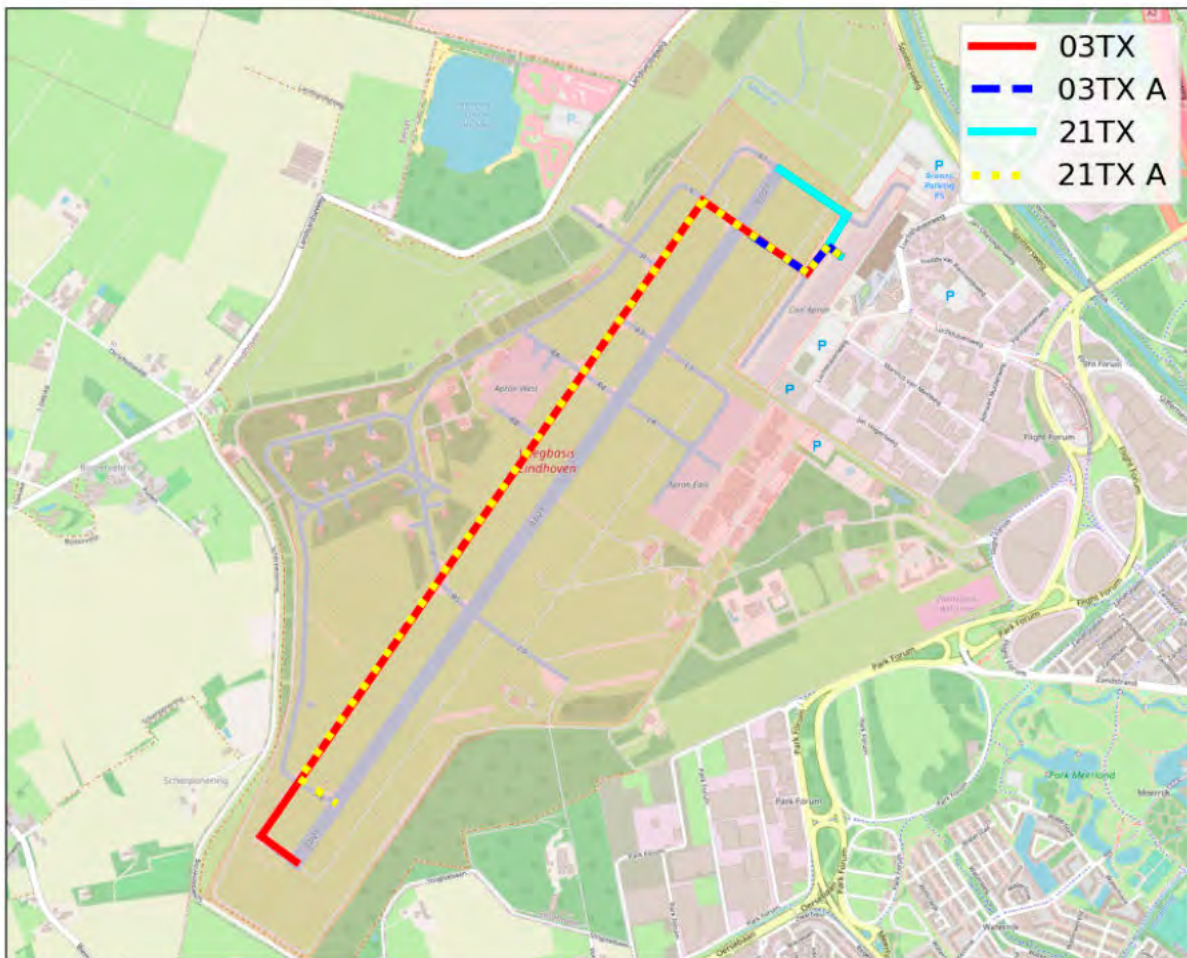
Appendix C.4 Taxi-afstanden Maastricht Aachen Airport

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

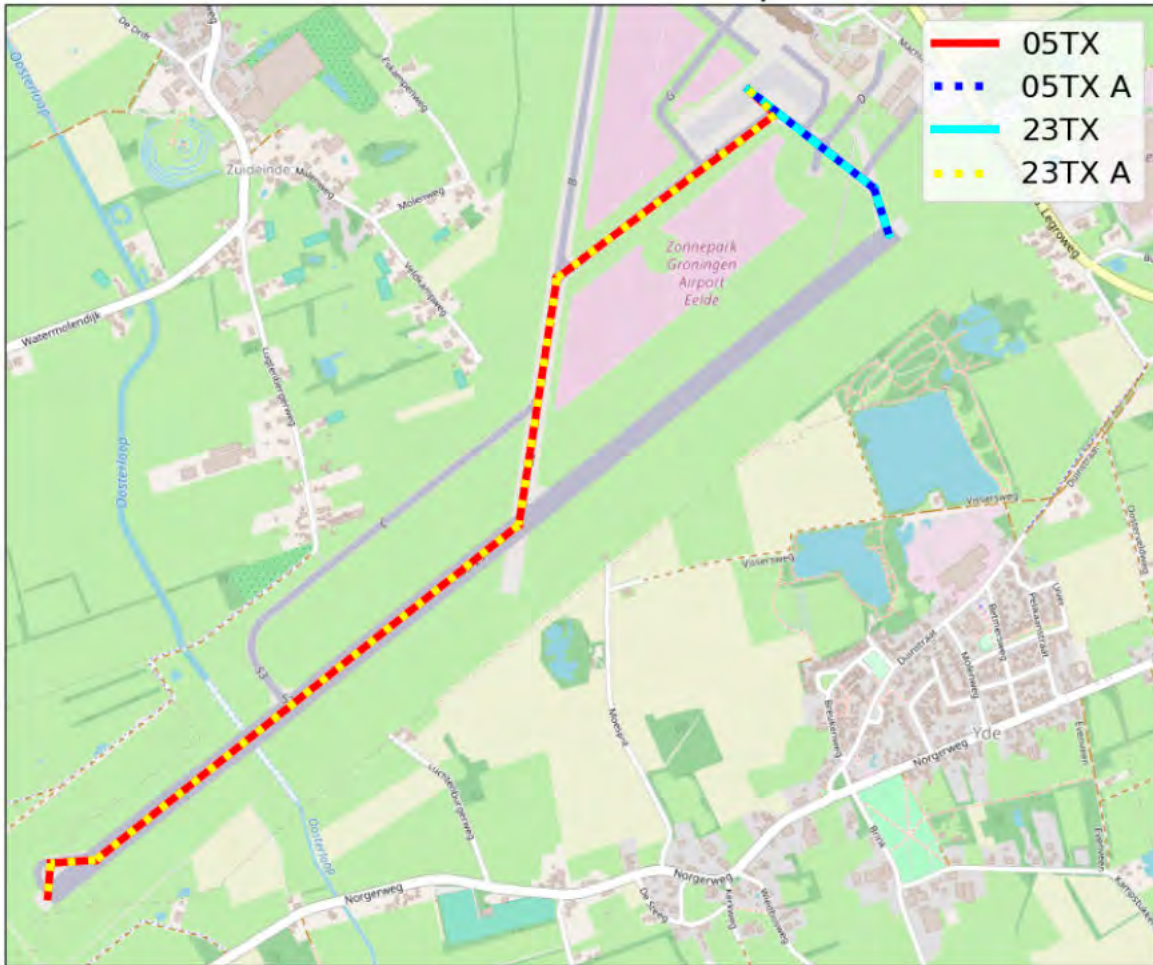
Appendix C.5 Taxi-afstanden Rotterdam The Hague Airport

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

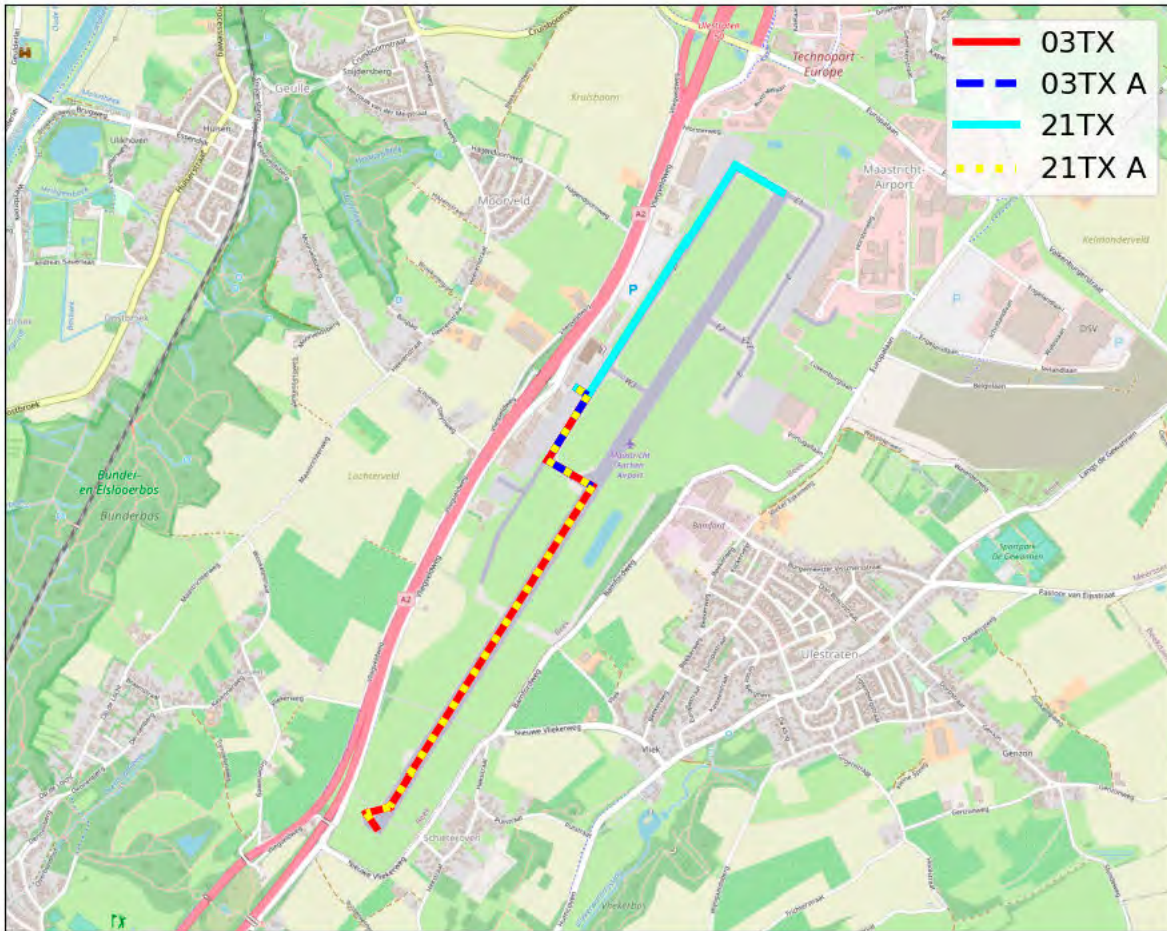
Appendix C.6 Taxiroutes overige velden



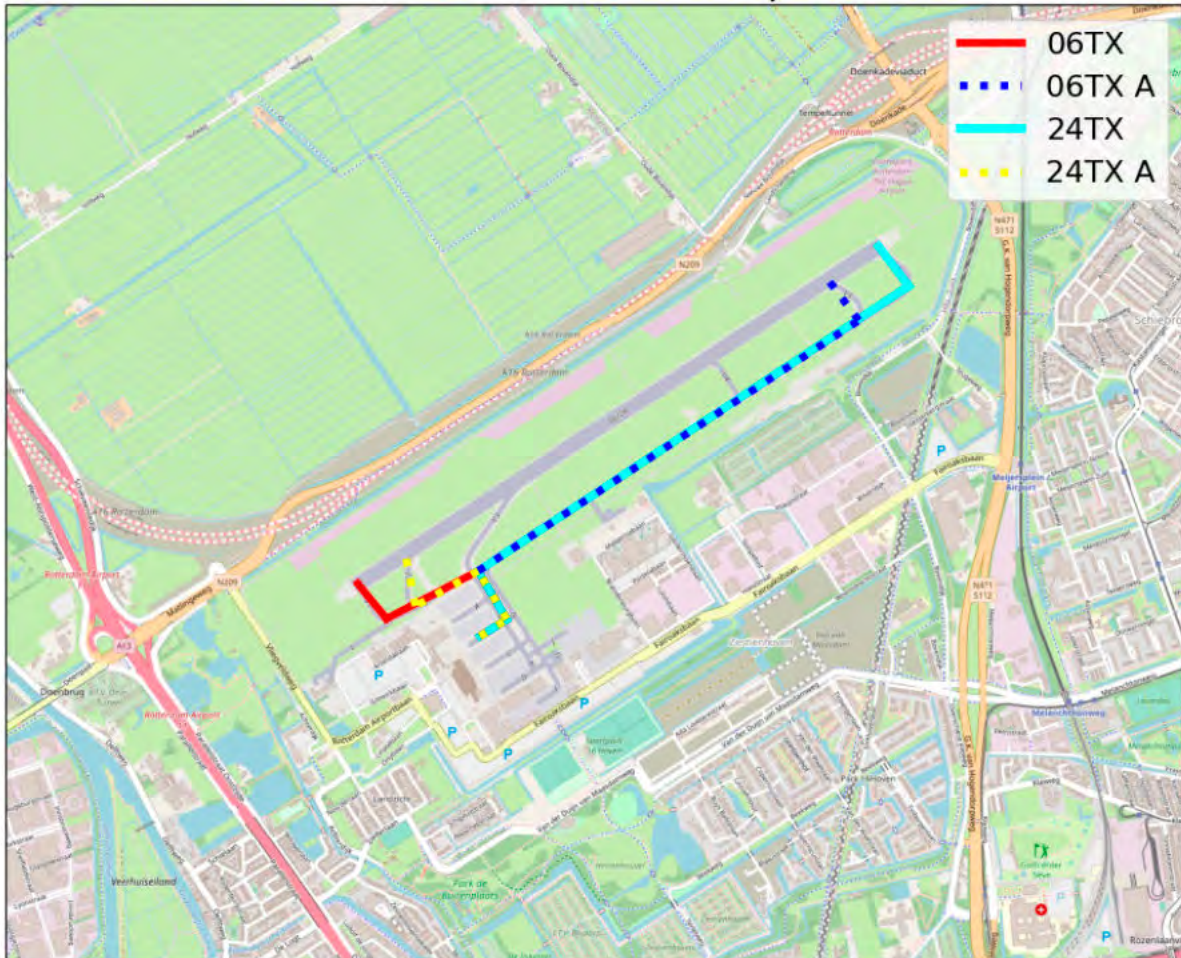
Figuur 33: Taxiroutes Eindhoven Airport. De routes eindigend op 'A' betreffen de aankomstroutes. De overige routes betreffen vertrekroutes



Figuur 34: Taxiroutes Groningen Airport Eelde. De routes eindigend op 'A' betreffen de aankomstroutes. De overige routes betreffen vertrekroutes



Figuur 35: Taxiroutes Maastricht Aachen Airport. De routes eindigend op 'A' betreffen de aankomstroutes. De overige routes betreffen vertrekroutes



Figuur 36: Taxiroutes Rotterdam The Hague Airport. De routes eindigend op 'A' betreffen de aankomstroutes. De overige routes betreffen vertrekroutes



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 overbrugt 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 Clean Sky 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