



Dedicated to innovation in aerospace

NLR-CR-2023-148-PT-2 | augustus 2024

Zeer Zorgwekkende Stoffen concentraties rondom Nederlandse luchthavens

Aanvullende toetsing PAK's en crotonaldehyde

OPDRACHTGEVER: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat



Koninklijke NLR - Nederlands Lucht- en Ruimtevaartcentrum

Zeer Zorgwekkende Stoffen concentraties rondom Nederlandse luchthavens

Aanvullende toetsing PAK's en crotonaldehyde

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. Ook ontbreekt momenteel het inzicht in de uitstoot van ZZS door de luchtvaart en de daaruit voortkomende gevolgen voor de concentraties op leefniveau.

In opdracht van het Ministerie van IenW heeft NLR de verspreiding van de door TNO berekende ZZS uitstoot van vliegtuigen en de daaruit volgende concentraties van ZZS rondom luchthavens berekend met de STACKS luchtvaartmodule. De resultaten zijn waar mogelijk vergeleken met de toen bekende Maximaal Toelaatbaar Risiconiveaus (MTR) voor lange-termijnblootstelling die zijn opgesteld door het RIVM. De resultaten van deze studie zijn oktober 2023 opgeleverd (NLR-CR-2023-148). Uit deze studie bleek dat de berekende concentraties benzeen, 1,3-butadien, formaldehyde en isopropylbenzeen door luchtvaartemissies onder het geldende MTR blijven. Voor naftaleen, 1-methylnaftaleen, 2-methylnaftaleen (samen onderdeel van de groep polycyclische aromatische koolwaterstoffen ofwel PAK's) en crotonaldehyde was het op basis van de toen beschikbare informatie niet mogelijk om de concentraties te toetsen.

Beschrijving van de werkzaamheden

NLR heeft op basis van nieuwe informatie van RIVM en TNO de ZZS crotonaldehyde, naftaleen, 1-methylnaftaleen en 2-methylnaftaleen vergeleken met de laatste MTR. Hierbij is, tenzij anders vermeld, uitgegaan van dezelfde aannames en werkwijze als bij de voorgaande ZZS concentratiestudie. Voortschrijdend inzicht heeft geleid tot nieuwe aannames voor het berekenen van de warmte-inhoud van de uitlaatpluim. Deze nieuwe aannames zijn toegepast bij de BaP-verspreidingsberekeningen. De eerdere VOS-verspreidingsberekeningen

RAPPORTNUMMER

NLR-CR-2023-148-PT-2

AUTEUR(S)



RUBRICERING RAPPORT

ONGERUBRICEERD

DATUM

Augustus 2024

KENNISGEBIED(EN)

Luchtverontreiniging door de luchtvaart

TREFWOORD(EN)

ZZS
Lucht kwaliteit
STACKS

zijn gemaakt met de oude aannames. Het effect hiervan is onderzocht: de nieuwe aannames leiden tot hogere concentraties op leefniveau, maar de berekende concentraties zijn nog altijd beneden het MTR en hebben geen invloed op de eindconclusies van deze en de voorgaande concentratiestudie.

Resultaten en conclusies

Op basis van de aangeleverde emissiecijfers en de berekende concentraties zijn voor geen enkele stof en geen enkele luchthaven overschrijdingen van het MTR vastgesteld. Daarnaast kan voor benzeen worden vastgesteld dat de totale concentratie inclusief andere bronnen ook onder het MTR blijft. Voor de overige stoffen is geen achtergrondconcentratie bekend. De resultaten zijn in de tabel samengevat:

ZZS	Toetsing (MTR)	Bevinding (max concentratie luchtvaart/MTR)
<i>1,3-Butadieen</i>	Vliegtuigemissies (3 µg/m ³)	Concentratie onder MTR (4%). Totaal incl. andere bronnen onbekend
<i>Formaldehyde</i>	Vliegtuigemissies (10 µg/m ³)	Concentratie onder MTR (8%). Totaal incl. andere bronnen onbekend
<i>Benzeen</i>	Vliegtuigemissies incl. achtergrond (5 µg/m ³)	Totale concentratie incl. andere bronnen onder MTR (alleen luchtvaart 2%, incl. andere bronnen 12%)
<i>Isopropylbenzeen</i>	Vliegtuigemissies (870 µg/m ³)	Concentratie ver onder MTR (<<1%). Totaal incl. andere bronnen onbekend. Luchtvaart als significante bron onwaarschijnlijk
<i>Mengsel van: Naftaleen 1-Methylnaftaleen 2-Methylnaftaleen</i>	Vliegtuigemissies PAK-mengsel gemeten als BaP (1 ng/m ³)	Concentratie onder MTR (32%). Totaal incl. andere bronnen onbekend
<i>Crotonaldehyde</i>	Vliegtuigemissies (8,3 µg/m ³)	Concentratie ver onder MTR (1%). Totaal incl. andere bronnen onbekend. Luchtvaart als significante bron onwaarschijnlijk

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 seizoenseffecten. De resultaten zeggen door het ontbreken van achtergrondconcentraties ook niets over de relatieve bijdrage van vliegtuigen ten opzichte van andere bronnen.

NLR

Anthony Fokkerweg 2

1059 CM Amsterdam

p) +31 88 511 3113

e) info@nlr.nl i) www.nlr.nl



Dedicated to innovation in aerospace

NLR-CR-2023-148-PT-2 | augustus 2024

Zeer Zorgwekkende Stoffen concentraties rondom Nederlandse luchthavens

Aanvullende toetsing PAK's en crotonaldehyde

OPDRACHTGEVER: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat



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

Research summary

The goal of this study and the corresponding previous study was to assess the concentrations of substances of very high concern due to aircraft(-engine) emissions and to compare these with available (non-legally binding) standards for long-term exposure.

The aircraft emissions were calculated by the Dutch Research Institute for Applied Physics (TNO) following the methodology of *Emissieregistratie*, involving emission indices from the ICAO engine database and airport specific time-in-mode (TIM) for each of the standard ICAO flight phases (take-off, climb-out, idle, approach). Emissions were calculated based on 2019 traffic for Amsterdam Airport Schiphol, Eindhoven Airport (civil traffic only), Groningen Airport Eelde, Maastricht Aachen Airport, and Rotterdam The Hague Airport. The emissions of buta-1,3-diene, formaldehyde, benzene, cumene, and crotonaldehyde were derived from volatile organic compound (VOC) emissions. Benzo[a]pyrene (BaP) served as the marker substance for the mixture of naphthalene, 1-methylnaphthalene and 2-methylnaphthalene and was derived from emissions of elementary carbon. Only aircraft main engine emissions during taxi and airborne operations and APU emissions of aircraft using kerosene have been considered.

The aircraft emissions were spatially distributed by NLR. For Schiphol, NLR based the spatial distribution on 2019 traffic data including gate and runway information. For the other airports NLR defined taxi routes between apron and runway. For approach and climb-out straight-in/straight-out routes (as runway extensions) were assumed. The concentrations of the substances of very high concern due to aircraft emissions were calculated using the STACKS *luchtvaartmodule*, a Gaussian based model approved for concentration studies by the Dutch government. The results represent annual averages. New insights led to a different approach to modelling the heat contents of the exhaust plume. This has been applied to the new BaP-calculations, but not to the earlier VOC-calculations. The new assumption increases the concentrations by approximately a factor of 2. Yet, the calculated concentrations are so low in comparison to the standards that this does not alter the conclusions of the studies. To assess the tolerability of the concentrations, the findings were compared with (non-legally binding) standards for long-term exposure determined by the Dutch National Institute for Public Health and the Environment (RIVM). The conclusions are summarized in the table below:

Substance	Tolerability assessment	Conclusion
<i>Buta-1,3-diene</i>	Aircraft emissions have been compared to the standard for long-term exposure set at 3 µg/m ³	Concentrations from aircraft emissions well below the standard (4%). Total concentration including other sources unknown.
<i>Formaldehyde</i>	Aircraft emissions have been compared to the standard for long-term exposure set at 10 µg/m ³	Concentrations from aircraft emissions below the standard (8%). Total concentration including other sources unknown.
<i>Benzene</i>	Aircraft emissions including background have been compared to the standard for long-term exposure set at 5 µg/m ³	Concentrations from aircraft emissions including other sources below the standard (aircraft only 2%, all sources 18%).
<i>Cumene</i>	Aircraft emissions have been compared to the standard for long-term exposure set at 870 µg/m ³	Concentrations from aircraft emissions well below the standard (<<1%). Total concentration including other sources unknown. Unlikely that aircraft emissions are significant source of emissions.
<i>Naphthalene</i> <i>1-Methylnaphthalene</i> <i>2-Methylnaphthalene</i>	Aircraft emissions have been compared to the standard for long-term exposure, using BaP as marker, set at 1 ng/m ³ .	Concentrations from aircraft emissions below the standard (32%). Total concentration including other sources unknown.
<i>Crotonaldehyde</i>	Aircraft emissions have been compared to the standard for long-term exposure set at 8.3 µg/m ³	Concentrations from aircraft emissions well below the standard (1%). Total concentration including other sources unknown. Unlikely that aircraft emissions are significant source of emissions.

Inhoudsopgave

Afkortingen	5
1 Introductie	6
2 Nieuwe informatie	7
2.1 Benzo[a]pyreen-emissies	7
2.2 MTR voor PAK's	8
2.3 MTR voor crotonaldehyde	8
2.4 Warmte-inhoud	9
3 Aanpak	10
3.1 Aanvullende toetsing PAK's	10
3.2 Aanvullende toetsing crotonaldehyde	11
4 Resultaten	12
4.1 Amsterdam Airport Schiphol	12
4.2 Eindhoven Airport (civiel)	13
4.3 Groningen Airport Eelde	14
4.4 Maastricht Aachen Airport	15
4.5 Rotterdam The Hague Airport	16
5 Conclusies	17
5.1 Resultaten	17
5.2 Beperkingen studie	18
5.3 Aanbevelingen	20
6 Referenties	21

Afkortingen

ACRONIEM	OMSCHRIJVING
BaP	Benzo[a]pyreen
EC	<i>Elementary Carbon</i> , elementair koolstof ofwel het niet vluchtige deel uit de PM _{2,5} -fractie
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i> , een VN-organisatie gericht op standaardisatie en harmonisatie van luchtvaart
LTO	<i>Landing and take-off</i> , door ICAO gebruikte afbakening van het gedeelte van de vlucht van landen tot en met opstijgen
MTR	<i>Maximaal Toelaatbaar Risiconiveau</i> , grenswaarde voor langdurige blootstelling bepaald door het RIVM
ng	Nanogram, ofwel 10 ⁻⁹ gram
NLR	Koninklijke NLR - Nederlandse Lucht- en Ruimtevaartcentrum
PAK	Polycyclische Aromatische Koolwaterstoffen
PM ₁₀	Fijnstof met een diameter van maximaal 10 µm (micrometer)
PM _{2,5}	Fijnstof met een diameter van maximaal 2,5 µm (micrometer)
RIVM	Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu
SRM	Standaardrekenmethode
TNO	Nederlandse organisatie voor Toegepast-Natuurwetenschappelijk Onderzoek
VN	Verenigde Naties
VOS	Vluchtige Organische Stoffen
ZZS	Zeer Zorgwekkende Stoffen
µg	Microgram, ofwel 10 ⁻⁶ gram
µm	Micrometer, ofwel 10 ⁻⁶ meter

1 Introductie

Context

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 Zeer Zorgwekkende Stoffen (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). Vervolgens heeft NLR de concentraties berekend die volgen uit deze ZZS-emissies. De resultaten van deze studie zijn oktober 2023 opgeleverd (NLR-CR-2023-148, hierna ‘voorgaande concentratiestudie’ of ‘voorgaande studie’ genoemd). Uit deze studie bleek dat de berekende concentraties benzeen, 1,3-butadieen, formaldehyde en isopropylbenzeen door luchtvaartemissies onder de geldende Maximaal Toelaatbaar Risiconiveaus (MTR) voor lange-termijnblootstelling blijven. Voor naftaleen, 1-methylnaftaleen, 2-methylnaftaleen (samen onderdeel van de groep polycyclische aromatische koolwaterstoffen, hierna PAK’s genoemd) en crotonaldehyde (ook bekend als 2-butenal) was het op basis van de beschikbare informatie niet mogelijk om de concentraties te toetsen.

Dit rapport

NLR heeft op basis van nieuwe informatie van RIVM en TNO de ontbrekende ZZS (crotonaldehyde en de PAK’s) alsnog vergeleken met het MTR. Dit rapport laat zien waar de in deze studie onderzochte stoffen door vliegtuigverkeer worden uitgestoten, hoe zij zich verspreiden en tot welke concentratiebijdragen ze leiden. Net als in de voorgaande studie wordt uitgegaan van door TNO berekende emissietotalen voor emissies van civiel vliegverkeer op kerosine. Emissies van vliegverkeer dat gebruik maakt van een andere brandstof zoals Avgas en emissies van mobiele bronnen zijn niet berekend. Omwille van de consistentie is hierbij, tenzij anders vermeld, uitgegaan van dezelfde aannames en werkwijze als bij de voorgaande ZZS concentratiestudie.

Het rapport is als volgt opgebouwd:

- Hoofdstuk 2 geeft een kort overzicht van de nieuwe informatie van RIVM en TNO op basis waarvan de toetsing heeft plaatsgevonden.
- Hoofdstuk 3 geeft een omschrijving van de gevolgde werkwijze en de gemaakte aannames voor zo ver deze afwijken van de voorgaande studie.
- Hoofdstuk 4 presenteert de berekende concentraties per luchthaven met behulp van contourplots. Deze plots laten de lezer zien waar de hoogste jaargemiddelde concentraties optreden. Per stof wordt vervolgens ingegaan op de berekende concentraties in relatie tot de MTR-waarden.
- Hoofdstuk 5 trekt conclusies over de berekende concentraties en de beperkingen van het onderzoek. Ten slotte worden enkele aanbevelingen gedaan om meer inzicht te krijgen in de ZZS-concentraties op en rondom luchthavens.

2 Nieuwe informatie

Deze sectie omschrijft de nieuwe informatie ontvangen na de eerste ZZS concentratieberekening op basis waarvan de aanvullende toetsing plaatsvindt. Het gaat om twee brokken informatie: Benzo[a]pyreen (BaP) emissies van vliegtuigen op de vijf onderzochte luchthavens en een nieuwe MTR-waarde voor crotonaldehyde. Beiden worden hieronder beschreven. Ten slotte wordt ingegaan op de nieuwe aanname voor de berekening van de warmte-inhoud en de impact hiervan op de berekende concentraties.

2.1 Benzo[a]pyreen-emissies

Ook bij deze aanvullende toetsing wordt uitgegaan van door TNO berekende vliegtuigemissies. In dit geval gaat het om de emissies van BaP. Hierbij wordt wederom uitgegaan van de methodiek zoals deze bij Emissieregistratie wordt toegepast. Echter, er is voor een aangepaste werkwijze gekozen die nog niet eerder is toegepast. Hierbij worden de BaP-emissies niet langer afgeleid uit emissies van vluchtige organische stoffen (VOS), maar uit de emissies van elementair koolstof (EC). TNO is voornemens om bij de volgende uitgave van de Emissieregistratie te werken met de nieuwe werkwijze.

Net als bij de voorgaande studie zijn de emissies opgeleverd per luchthaven en per vluchtfase en wordt er gerekend met emissiecijfers uit 2019. Om meer inzicht te krijgen in het verschil tussen de oude methodiek op basis van VOS-emissies en de nieuwe methodiek op basis van EC zijn voor beide stoffen verhoudingsgetallen berekend met BaP.

Voor een toelichting op de werkwijze en wetenschappelijke motivatie wordt verwezen naar de hiervoor opgestelde notitie (TNO, 2024). Om de lezer tegemoet te komen worden enkele onderdelen van de notitie hieronder samengevat. De notitie van TNO is echter leidend.

Wat houdt de aangepaste werkwijze in?

De berekening van de emissies is gebaseerd op de meting van emissies van zowel fijnstof als individuele PAK's voor vier, veelvoorkomende vliegtuigmotoren bij vier verschillende gashendelstanden. Hierbij is de aanname gedaan dat de vorming en emissie van PAK's ook voor andere type motoren dan gemeten op een vergelijkbare manier correleert met de vorming en uitstoot van EC, waarbij EC een fractie vormt van fijnstof.

Waarom een aangepaste werkwijze?

TNO is tot de conclusie gekomen dat de oude werkwijze op basis van VOS-emissies verbeterd kon worden. De nieuwe werkwijze is wetenschappelijk beter onderbouwd en zou beter op de werkelijkheid moeten aansluiten. TNO geeft echter aan dat ook de nieuwe werkwijze grote onzekerheden kent doordat de onderliggende metingen grote variaties laten zien, zelfs voor motoren van hetzelfde type, maar stelt ook dat de nieuwe werkwijze de meest robuuste werkwijze is om BaP-emissies te berekenen.

Welke gevolgen heeft de nieuwe werkwijze voor de berekende BaP-emissies?

De nieuwe werkwijze heeft grote gevolgen voor de hoeveelheid berekende BaP. Met de nieuwe werkwijze neemt de berekende uitstoot van BaP in 2019 toe van 0,24 kg tot 6,6 kg voor alle vijf de luchthavens gezamenlijk. Ook de verdeling over de vluchtfasen verschilt. Beide werkwijzen leiden tot een vergelijkbare verhouding tussen emissies op de grond en in de lucht, maar met de nieuwe werkwijze is de uitstoot van de APU een stuk hoger in verhouding tot de

emissies van de hoofdmotoren. Op sommige luchthavens zijn de APU-emissies zelfs groter dan de taxi-emissies. Hierbij plaatst TNO de kanttekening dat de APU-emissies niet zijn gemeten in de onderliggende studie. In plaats hiervan is dezelfde verhouding tot EC aangenomen als tijdens de *approach* fase. De verdeling tussen grondgebonden emissies en emissies tijdens de vlucht wijzigt slechts marginaal: onder de nieuwe werkwijze vindt 90% van de uitstoot op de grond plaats; dit was 96%.

Welke gevolgen heeft de nieuwe werkwijze voor de berekende BaP-concentraties?

Doordat de nieuwe werkwijze op basis van EC tot een andere verdeling van emissies over de vluchtfasen leidt ten opzichte van de voorgaande werkwijze op basis van VOS, heeft dit gevolgen voor de ruimtelijke verdeling van BaP-emissies en de hieruit volgende BaP-concentraties. Nog altijd vindt 90% van de emissies op de grond plaats, echter deze zijn meer geconcentreerd op vliegtuig-opstelplaatsen waar de APU aanstaat.

2.2 MTR voor PAK's

Het RIVM heeft op 22 januari 2022 een MTR opgesteld voor PAK's. In deze norm wordt de Europese luchtkwaliteit Richtlijn 2004/107/EG gevolgd. Deze gaat uit van een streefwaarde van 1 ng (nanogram¹) BaP per m³. Als er sprake is van een PAK-mengsel, dan voldoet deze aan de norm als de jaargemiddelde concentratie BaP in de omgevingslucht lager ligt dan deze streefwaarde. Als er geen sprake is van een mengsel, dan kan de uitgestoten stof getoetst worden aan het MTR van deze stof (RIVM, 2022).

2.3 MTR voor crotonaldehyde

Het RIVM heeft op 29 april 2024 een nieuwe MTR voor crotonaldehyde opgesteld. Deze vervangt de oude MTR-waarde uit 2004. Het genoemde MTR is een advieswaarde. Het Ministerie kan het RIVM-advies gebruiken om indicatieve milieukwaliteitsnormen vast te stellen. Deze vaststelling heeft nog niet plaatsgevonden. Op het moment van schrijven is het nieuwe MTR nog niet publiek beschikbaar. Net als het voorgaande advies, heeft deze MTR de status 'indicatief'. Dit houdt in dat het advies is getoetst volgens interne RIVM-kwaliteitsprocedures en een Wetenschappelijke Klankboordgroep.

Waarom een nieuwe MTR?

In de documentatie geeft het RIVM aan dat het voorgaande advies is afgeleid met een methode die nu niet meer gehanteerd wordt. Naar aanleiding van een vergunningsverlening heeft het RIVM dit jaar een nieuwe waarde opgesteld op basis van de beschikbare toxicologische studies. Hierbij merkt het RIVM op dat meerdere instanties de stof hebben onderzocht, maar geen gezondheidskundige waarden hebben afgeleid.

Vergelijking oude en nieuwe MTR

Op basis van de beschikbare studies komt het RIVM tot een "indicatieve humane limietwaarde voor inhalatie" van 8,3 µg/m³ (MTR_{lucht}). Dit is een hogere waarde dan de eerder afgeleide 4,36 x 10⁻³ µg/m³. Op basis hiervan lijkt crotonaldehyde minder schadelijk voor lange-termijnblootstelling bij inhalatie dan eerder gedacht.

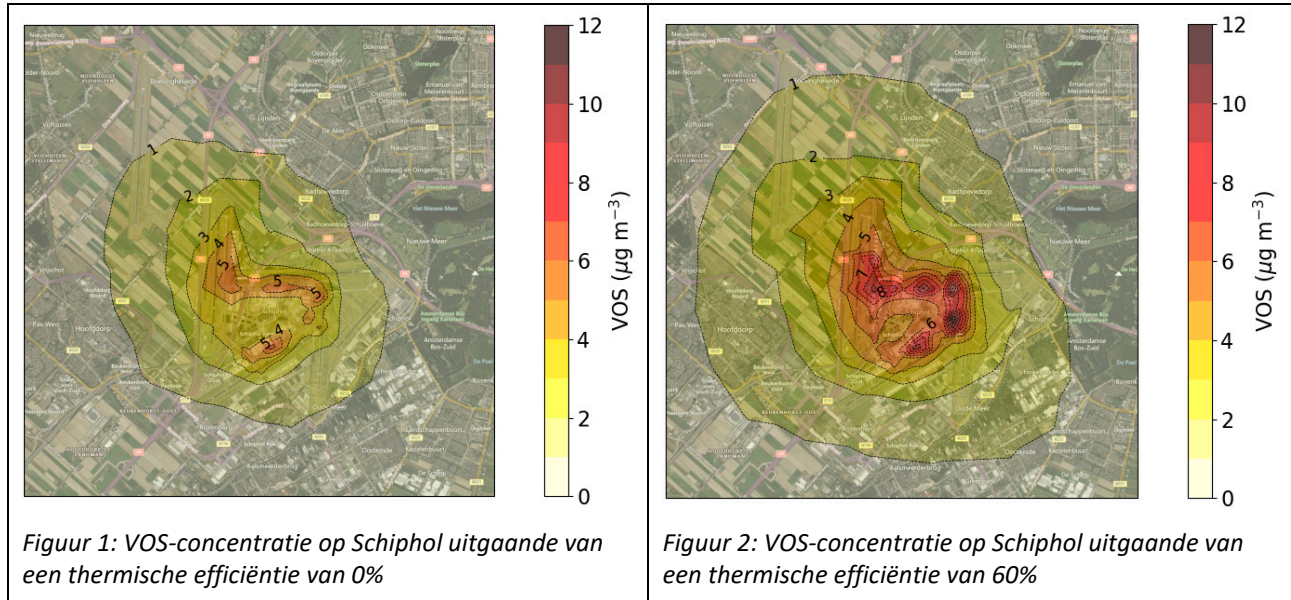
¹ Een nanogram staat gelijk aan één-duizendste microgram.

2.4 Warmte-inhoud

Gasturbines zoals de motoren van de meeste passagiersvliegtuigen zetten de energie uit kerosine om in warmte en stuwkracht. De warmte-inhoud van de uitlaatpluim is een belangrijke factor voor de mate van stijging van de uitlaatpluim en hiermee voor de concentraties op leefniveau.

In de voorgaande studie is de aanname gemaakt dat alle energie wordt omgezet in warmte. Dit is een aanname die door voortschrijdend inzicht is heroverwogen. Voor de berekening van de BaP-concentraties wordt nu uitgegaan van een thermische efficiëntie van ongeveer 60%. Dit betekent dat 40% van de energie in kerosine wordt omgezet in warmte. Deze waarde is bepaald voor de CFM56 gasturbine; een veelvoorkomende motor en tevens de motor die is gemeten voor het bepalen van de BaP-emissiefactoren. Voor de APU geldt een soortgelijke overweging en wordt nu uitgegaan van een thermische efficiëntie van 37%.

Een hogere thermische efficiëntie leidt tot minder pluimstijging en hogere concentraties op leefniveau. Dit betekent dat de eerder berekende VOS-concentraties zoals gebruikt voor het toetsen van de ZZS 1,3-butadien, formaldehyde, benzeen, isopropylbenzeen en crotonaldehyde met de nieuwe aanname hoger zouden uitvallen dan met de oude aanname. Een proefberekening voor de VOS-concentratie op Schiphol laat zien dat de concentratie ongeveer 2x zo hoog is met de nieuwe aanname. Dit betekent dat ook de concentraties van alle ZZS die afgeleid worden uit VOS 2x zo hoog zouden uitvallen. Dit verschil is groot genoeg om hier te vermelden en toont het belang van juiste aannames voor warmte-inhoud aan. Het verschil is echter niet dermate dat de conclusies over de lange-termijnblootstelling veranderen. Ook bij 2x zo hoge waarden zijn de ZZS concentraties nog altijd ruim lager dan het MTR.



3 Aanpak

Tenzij anders vermeld zijn de aannames en aanpak gelijk aan de voorgaande ZZS concentratiestudie.

3.1 Aanvullende toetsing PAK's

Het RIVM geeft aan dat zodra meerdere stoffen behorende tot de PAK-groep aanwezig zijn, deze als mengsel getoetst moeten worden in plaats van als individuele stoffen. Omdat de samenstelling van dit mengsel van situatie tot situatie kan verschillen, wordt er gewerkt met een zogeheten *marker*. Dit is een andere stof die als plaatsvervangende indicator wordt gebruikt. Voor de toetsing van PAK's wordt BaP gebruikt als *marker*.

Stap 1 BaP-emissies

TNO heeft op verzoek van NLR de BaP-emissies door vliegtuigen in 2019 berekend. Hierbij is een vernieuwde werkwijze van de Emissieregistratie gevolgd (zie hiervoor 2.1). De resultaten zijn, gelijk aan voorgaande concentratiestudie, geleverd per luchthaven, per vluchtfase en per vliegtuigtype.

Stap 2 Ruimtelijke verdeling van emissies

Voor de ruimtelijke verdeling van de emissies is dezelfde werkwijze gevolgd als bij de voorgaande concentratiestudie. De geïnteresseerde lezer wordt verwezen naar hoofdstuk 2.3 van het bijbehorende rapport. Voor Schiphol is hierbij uitgegaan van het baangebruik in 2019, voor de overige luchthavens zijn handmatig taxiroutes aangemaakt. Bij zowel de nadering als de klim is uitgegaan van *straight-in/straight-out* routes in het verlengde van de baan.

Stap 3 Concentratieberekening met de STACKS-luchtvaartmodule

Voor de concentratieberekening met de STACKS-luchtvaartmodule is dezelfde werkwijze gevolgd als bij de voorgaande concentratiestudie. De geïnteresseerde lezer wordt verwezen naar hoofdstuk 2.4 van het bijbehorende rapport. Bij de concentratieberekening is per luchthaven een representatieve uur-verdeling afgeleid uit het vliegtuigvolgsysteem FANOMOS. De warmte-inhoud van de uitlaatpluim is afgeleid uit het brandstofverbruik. Nieuw voor deze studie is dat bij de BaP-concentratieberekening ook rekening is gehouden met de thermische efficiëntie van de motor. Er is gewerkt met een vaste thermische efficiëntie van 60%, afgeleid van de veelvoorkomende CFM56-motor. Voor de APU is nu gerekend met een thermische efficiëntie van 37%. Voor meteo en oppervlakteruwheid wordt de informatie opgehaald uit de PreSRM-module. De STACKS-luchtvaartmodule berekent de verspreiding van EC op dezelfde wijze als de verspreiding van VOS.

Stap 4 Toetsing aan het MTR

Ten slotte wordt de berekende concentratie BaP op leefniveau getoetst aan de MTR-waarde voor PAK-mengsels van 1 ng (nanogram) per m³. Wanneer de concentratie onder deze waarde blijft, voldoen de concentraties van naftaleen, 1-methylnaftaleen en 2-methylnaftaleen gezamenlijk aan de norm voor lange-termijnblootstelling (zie hiervoor 2.2).

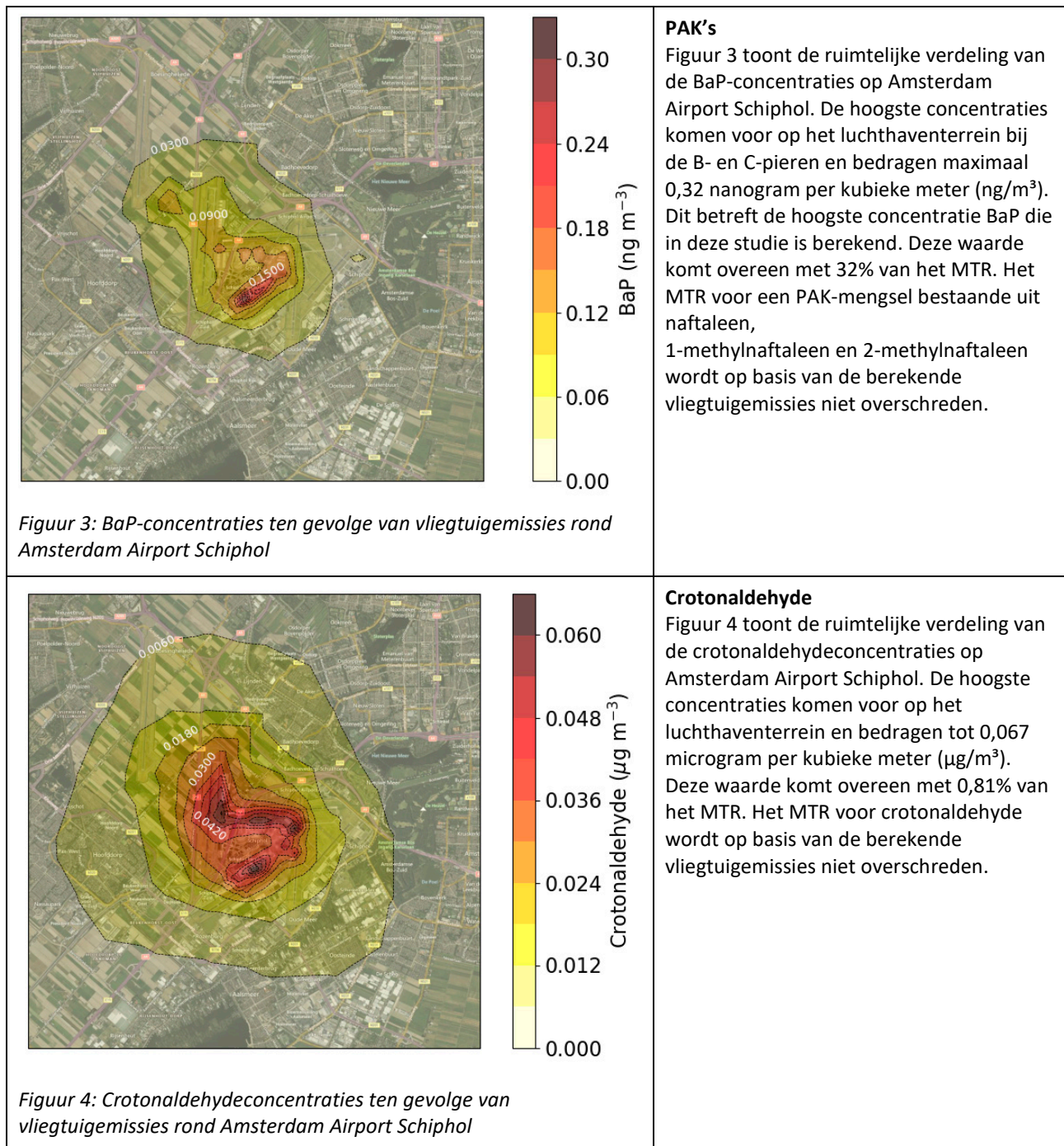
3.2 Aanvullende toetsing crotonaldehyde

De concentraties van de stof crotonaldehyde door vliegtuigemissies zijn bij de voorgaande studie op de juiste wijze berekend. De tekortkoming die toen naar boven kwam betrof de verouderde norm voor lange-termijnblootstelling; Voor deze aanvullende toetsing met de nieuwe MTR gebruikt is dan ook uitgegaan van de resultaten uit de voorgaande concentratiestudie. Ook de wijze van toetsing met vaste omrekenfactoren tussen VOS en crotonaldehyde (10,3 g crotonaldehyde per kg VOS) is gelijk gebleven. Zie voor een toelichting op het toetsen van crotonaldehyde hoofdstuk 2.5 van de voorgaande studie. De hoogte van het MTR is wel gewijzigd, zie hiervoor hoofdstuk 2.3 van dit rapport.

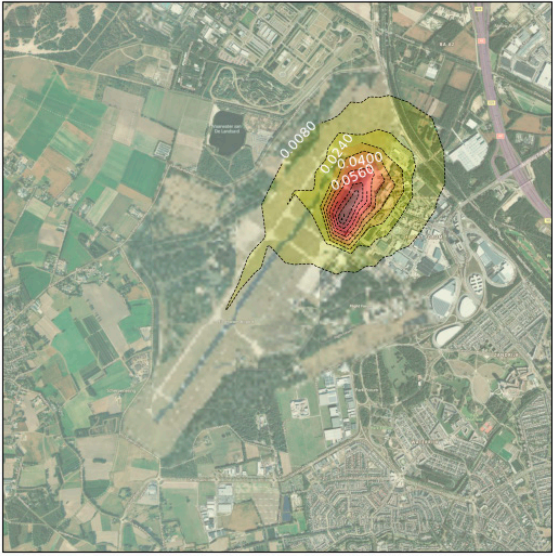
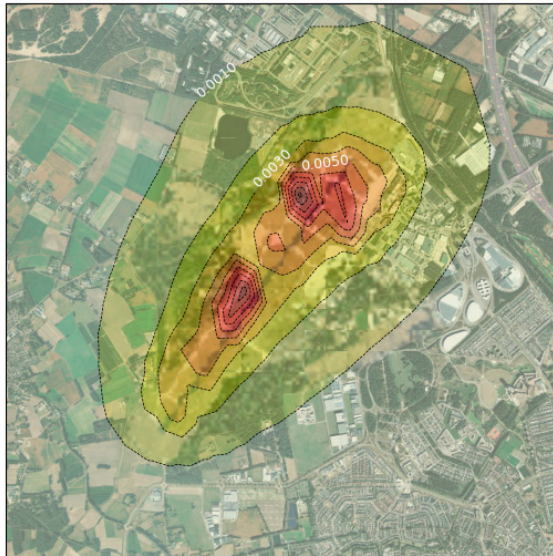
4 Resultaten

Deze sectie toont de concentraties van BaP door emissies van vliegtuigmotoren per luchthaven. Aangezien het nu om slechts twee stoffen gaat, worden deze afzonderlijk getoond en besproken.

4.1 Amsterdam Airport Schiphol



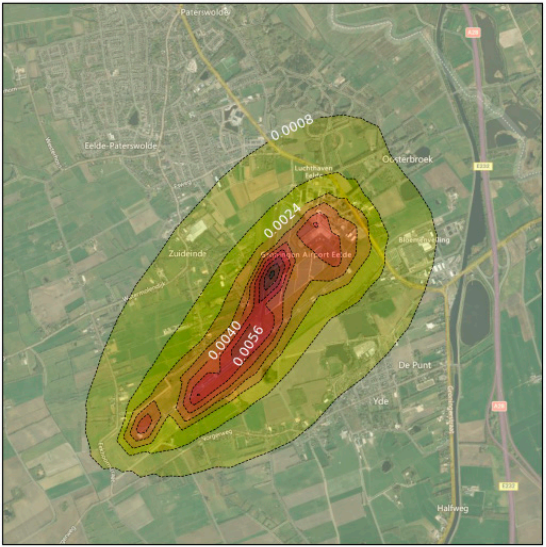
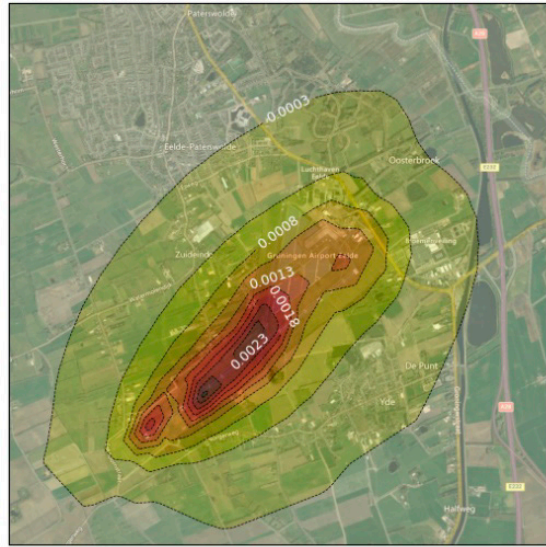
4.2 Eindhoven Airport (civiel)

	<p>PAK's</p> <p>Figuur 5 toont de ruimtelijke verdeling van de BaP-concentraties op Eindhoven Airport. Het betreft hier het civiele deel. De hoogste concentraties komen voor op het platform aan de noordkant op het luchthaventerrein. Mede door het hoge aandeel van APU emissies, zijn deze sterk lokaal verhoogd. De concentraties bedragen maximaal 0,082 ng/m³. Deze waarde komt overeen met 8,2% van het MTR. Het MTR voor een PAK-mengsel bestaande uit naftaleen, 1-methylnaftaleen en 2-methylnaftaleen wordt op basis van de berekende vliegtuigemissies niet overschreden.</p>
	<p>Crotonaldehyde</p> <p>Figuur 6 toont de ruimtelijke verdeling van de crotonaldehydeconcentraties op Eindhoven Airport. Het betreft hier het civiele deel. De hoogste concentraties komen voor op het luchthaventerrein en bedragen tot 0,010 µg/m³. Deze waarde komt overeen met 0,13% van het MTR. Het MTR voor crotonaldehyde wordt op basis van de berekende vliegtuigemissies niet overschreden.</p>

Figuur 5: BaP-concentraties ten gevolge van vliegtuigemissies rond Eindhoven Airport (civiel)

Figuur 6: Crotonaldehydeconcentraties ten gevolge van vliegtuigemissies rond Eindhoven Airport (civiel)

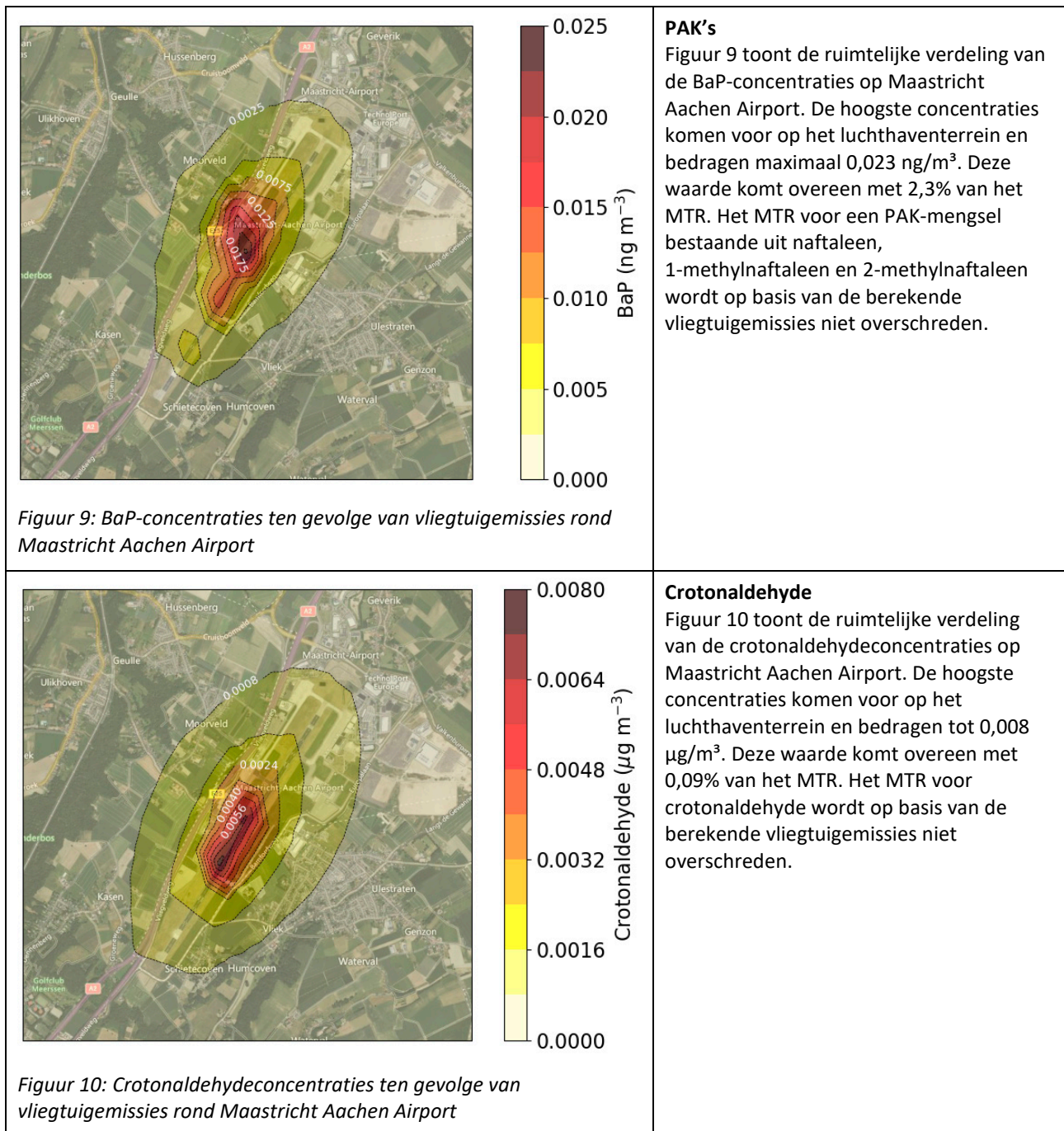
4.3 Groningen Airport Eelde

	<p>0.0080 0.0064 0.0048 0.0032 0.0016 0.0000</p> <p>BaP (ng m^{-3})</p>	<p>PAK's</p> <p>Figuur 7 toont de ruimtelijke verdeling van de BaP-concentraties op Groningen Airport Eelde. De hoogste concentraties komen voor op het luchthaventerrein. Door het lage aandeel APU emissies zijn de concentraties redelijk gelijkmatig over het luchthaventerrein verdeeld. De concentraties bedragen maximaal 0,0077 ng/m^3. Deze waarde komt overeen met 0,77% van het MTR. Het MTR voor een PAK-mengsel bestaande uit naftaleen, 1-methylnaftaleen en 2-methylnaftaleen wordt op basis van de berekende vliegtuigemissies niet overschreden.</p>
	<p>0.0025 0.0020 0.0015 0.0010 0.0005 0.0000</p> <p>Crotonaldehyde ($\mu\text{g m}^{-3}$)</p>	<p>Crotonaldehyde</p> <p>Figuur 8 toont de ruimtelijke verdeling van de crotonaldehydeconcentraties op Groningen Airport Eelde. De hoogste concentraties komen voor op het luchthaventerrein en bedragen tot 0,003 $\mu\text{g/m}^3$. Deze waarde komt overeen met 0,03% van het MTR. Het MTR voor crotonaldehyde wordt op basis van de berekende vliegtuigemissies niet overschreden.</p>

Figuur 7: BaP-concentraties ten gevolge van vliegtuigemissies rond Groningen Airport Eelde

Figuur 8: Crotonaldehydeconcentraties ten gevolge van vliegtuigemissies rond Groningen Airport Eelde

4.4 Maastricht Aachen Airport



Figuur 9: BaP-concentraties ten gevolge van vliegtuigemissies rond Maastricht Aachen Airport

Figuur 10: Crotonaldehydeconcentraties ten gevolge van vliegtuigemissies rond Maastricht Aachen Airport

5 Conclusies

5.1 Resultaten

De hoofdvraag van deze studie was tot welke concentraties de uitstoot van ZZS door vliegtuigen leidt en hoe deze zich verhouden tot normen voor lange-termijnblootstelling. Deze concentratiestudie beantwoordt de vraag voor crotonaldehyde en de PAK's naftaleen, 1-methylnaftaleen, en 2-methylnaftaleen. De overige voor luchtvaart relevante ZZS 1,3-butadien, formaldehyde, benzeen en isopropylbenzeen zijn getoetst in voorgaande concentratiestudie.

Tabel 1 toont per stof de hoogst berekende concentraties op leefniveau per luchthaven en toont daarnaast het geldende MTR. Zoals te verwachten op basis van het aantal vliegtuigbewegingen zijn de hoogste concentraties berekend voor Amsterdam Airport Schiphol. Voor geen enkele stof en voor geen enkele luchthaven zijn de berekende concentraties als gevolg van de uitstoot van vliegtuigen hoger dan het MTR.

Tabel 1: Hoogst berekende jaargemiddelde concentraties op leefniveau door vliegtuigemissies in vergelijking met MTR

ZZS	Jaargemiddelde concentraties op leefniveau door vliegtuigemissies voor 2019 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$					
	Amsterdam	Eindhoven	Groningen	Maastricht	Rotterdam	MTR
1,3-Butadien	0,11	0,017	0,0042	0,012	0,016	3
Formaldehyde	0,80	0,12	0,031	0,091	0,12	10
Benzeen	0,11	0,017	0,0042	0,012	0,016	5
Isopropylbenzeen	$2,0 \times 10^{-4}$	$3,0 \times 10^{-5}$	$7,5 \times 10^{-6}$	$2,2 \times 10^{-5}$	$2,89 \times 10^{-5}$	870
PAK's gemeten als BaP* voor mengsel van naftaleen, 1-methylnaftaleen, 2-methylnaftaleen	$0,32 \times 10^{-3}$	$0,082 \times 10^{-3}$	$0,0077 \times 10^{-3}$	$0,023 \times 10^{-3}$	$0,080 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-3}$
Crotonaldehyde	0,067	0,010	0,0026	0,0076	0,010	8,3

* Voor de BaP-verspreidingsberekening is gewerkt met een herziene aanname voor warmte-inhoud. De overige berekeningen zijn nog gemaakt met de oude aanname. Het effect hiervan wordt in 2.4 besproken

Tabel 2 toont dezelfde concentraties, maar dan als percentage van het MTR voor deze stof. Ten opzichte van het MTR zijn de concentraties op leefniveau uit luchtvaartemissies in de meeste gevallen erg klein. Voor PAK's en in mindere mate formaldehyde hangt het af van de concentraties uit andere bronnen of luchtvaartemissies een significante bron vormen. De concentraties uit alleen vliegtuigemissies blijven voor alle stoffen en alle luchthavens onder de MTR-waarde.

Tabel 2: Hoogst berekende jaargemiddelde concentraties op leefniveau per luchthaven als percentage van MTR

ZZS	Jaargemiddelde concentraties op leefniveau voor 2019 als % van MTR					
	Amsterdam	Eindhoven	Groningen	Maastricht	Rotterdam	MTR
1,3-Butadieen	3,7%	0,57%	0,14%	0,41%	0,54%	3
Formaldehyde	8,0%	1,2%	0,31%	0,91%	1,2%	10
Benzeen	2,2%	0,34%	0,084%	0,25%	0,32%	5
Isopropylbenzeen	$2,2 \times 10^{-7}\%$	$3,5 \times 10^{-8}\%$	$8,7 \times 10^{-9}\%$	$2,5 \times 10^{-8}\%$	$3,3 \times 10^{-8}\%$	870
PAK's gemeten als BaP* voor mengsel van naftaleen, 1-methylnaftaleen, 2-methylnaftaleen	32%	8,2%	0,77%	2,3%	8,0%	$1,0 \times 10^{-3}$
Crotonaldehyde	0,81%	0,13%	0,031%	0,092%	0,12%	8,3

* Voor de BaP-verspreidingsberekening is gewerkt met een herziene aanname voor warmte-inhoud. De overige berekeningen zijn nog gemaakt met de oude aanname. Het effect hiervan wordt in 2.4 besproken

Andere bronnen

Het moet worden opgemerkt dat de totale aanwezige concentratie van een ZZS bestaat uit emissies van vliegtuigmotoren en die van alle andere bronnen. Doordat de achtergrondconcentraties van ZZS, met uitzondering van benzeen, niet bekend zijn, kan niet met zekerheid worden gesteld of er een overschrijding plaatsvindt. Indien alle bronnen tezamen tot een overschrijding zouden leiden, dan zijn de berekende concentraties door emissies van vliegtuigmotoren dermate klein dat het onwaarschijnlijk lijkt dat vliegtuigemissies een significante bron zouden vormen. Voor PAK's en in mindere mate formaldehyde hangt het af van de concentraties uit andere bronnen of luchtvaartemissies een significante bron vormen. Tabel 3 vat de bevindingen per ZZS samen.

Tabel 3: Wijze van toetsing en bevinding per ZZS

ZZS	Toetsing	Bevinding
1,3-Butadieen	Vliegtuigemissies getoetst o.b.v. beschikbare MTR	Concentratie t.g.v. vliegtuigemissies onder MTR. Totaal incl. andere bronnen onbekend
Formaldehyde	Vliegtuigemissies getoetst o.b.v. beschikbare MTR	Concentratie t.g.v. vliegtuigemissies onder MTR. Totaal incl. andere bronnen onbekend
Benzeen	Vliegtuigemissies incl. achtergrond getoetst o.b.v. beschikbare MTR en achtergrondinformatie	Geen overschrijding, ook niet incl. andere bronnen
PAK-mengsel bestaande uit: Naftaleen 1-Methylnaftaleen 2-Methylnaftaleen	Vliegtuigemissies getoetst als PAK-mengsel gemeten als BaP o.b.v. beschikbare MTR	Concentratie t.g.v. vliegtuigemissies onder MTR. Totaal incl. andere bronnen onbekend
Isopropylbenzeen	Vliegtuigemissies getoetst o.b.v. beschikbare MTR	Luchtvaartconcentraties dermate laag t.o.v. MTR dat het onwaarschijnlijk is dat luchtvaart een significante bron vormt. Totaal incl. andere bronnen onbekend.
Crotonaldehyde	Vliegtuigemissies getoetst o.b.v. beschikbare MTR	Luchtvaartconcentraties dermate laag t.o.v. MTR dat het onwaarschijnlijk is dat luchtvaart een significante bron vormt. Totaal incl. andere bronnen onbekend.

5.2 Beperkingen studie

In de voorgaande concentratiestudie zijn een aantal beperkingen genoemd die volgen uit de gebruikte data en gevolgde aanpak. Zie hiervoor hoofdstuk 4.2 van het bijbehorende rapport. De beperkingen ten aanzien van de

beschikbare normen zijn met deze studie verholpen. De overige beperkingen blijven bestaan. Ook zijn na publicatie van de voorgaande concentratiestudie nieuwe inzichten opgedaan voor de bepaling van de warmte-inhoud. De nieuwe aanname voor warmte-inhoud wordt in sectie 2.4 in detail besproken.

Invoerdata

Zowel bij de berekening van HC- als EC-emissies zijn er grote onzekerheidsmarges in de data. Over beide emissies en de relatie met ZZS zijn relatief weinig studies voorhanden. De gevolgde methodiek houdt hierbij geen rekening met de (verschillende) onzekerheidsmarges in de data. Ook worden afwijkende (brandstof-besparende) procedures waarbij van de ICAO-LTO-standaard² afwijkende gashendelstanden worden gebruikt of motoren worden uitgeschakeld niet meegenomen. Ten slotte beperkt de invoerdata zich tot APU-emissies en hoofdmotoremissies van vliegtuigen op kerosine. Andere emissiebronnen op de luchthaven zijn niet meegenomen.

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 onderbouwd inzicht in de ruimtelijke verdeling van de totale jaargemiddelde ZZS-concentraties van luchtvaart op en rondom Nederlandse luchthavens van nationale betekenis. Echter, de concentratie kan lokaal en in de tijd 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.

Gevolgen voor de gezondheid

NLR acht 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 lange-termijnblootstelling, maar weet niet wat de gevolgen hiervan zijn voor de gezondheid. Tevens is NLR niet deskundig om de onderbouwing en nauwkeurigheid van het bepaalde MTR te beoordelen.

Warmte-inhoud

Bij het berekenen van de VOS-concentraties welke gebruikt zijn voor het afleiden van de concentraties 1,3-butadien, formaldehyde, benzeen, isopropylbenzeen en crotonaldehyde is gerekend met een thermische efficiëntie van 0%. Bij de berekening van de BaP-concentraties op basis van PM10 zoals gebruikt voor de toetsing van de PAK's is uitgegaan van een meer realistische thermische efficiëntie van ongeveer 60%. Een proefberekening voor de VOS-concentratie op Schiphol laat zien dat de concentratie ongeveer twee keer zo hoog is met de nieuwe aanname. Dit betekent dat ook de concentraties van alle ZZS die afgeleid worden uit VOS twee keer zo hoog zouden uitvallen. Dit verschil is noemenswaardig, maar leidt niet tot andere conclusies over de lange-termijnblootstelling. Ook bij hogere waarden zijn de ZZS concentraties nog altijd ruim lager dan het MTR.

² ICAO is een deelorganisatie van de VN gericht op standaardisatie en harmonisatie van luchtvaart. ICAO gebruikt de *Landing-and-Take-Off* (LTO) cyclus om de vluchtfase van landing tot en met opstijgen aan te duiden

5.3 Aanbevelingen

Op basis van de conclusies en beperkingen uit deze en voorgaande concentratiestudie doen we de volgende drie aanbevelingen. De eerdere aanbeveling tot het actualiseren van crotonaldehyde en het opnieuw toetsen van de PAK's zijn met deze studie ingevuld.

1. Er wordt momenteel gewerkt aan een nationale rekenmethode voor het berekenen van vliegtuigemissies. NLR onderschrijft de aanbeveling van TNO om bij publicatie van deze methode te evalueren 'of' en, zo ja, 'hoe' de huidige studie geactualiseerd moet worden.
2. In een eventuele vervolgstudie kunnen ook dag- en uurgemiddelde concentraties geëvalueerd worden, tenzij overtuigend kan worden uitgesloten dat een kortdurende verhoogde belasting schadelijk is voor de gezondheid, en mits hier toetsingswaarden voor zijn vastgesteld. NLR beveelt verder aan om bij een actualisatie ook andere emissiebronnen op de luchthaven zoals de vliegtuigen en helikopters op andere brandstoffen, *ground service equipment*, en emissies van het tanken mee te nemen in de berekening.
3. Er zijn in deze en voorgaande concentratiestudie geen overschrijdingen van het MTR geconstateerd. Echter, aangezien de achtergrondconcentraties van de ZZS, met uitzondering van benzeen, niet bekend zijn, is het niet mogelijk om uit te sluiten dat emissies van alle bronnen tezamen leiden tot overschrijdingen van het MTR. In de meeste gevallen liggen de concentraties door vliegtuigemissies dermate laag dat het onwaarschijnlijk is dat deze significant bijdragen aan een eventuele overschrijding. Metingen op locatie kunnen aanvullend inzicht geven in de daadwerkelijke concentraties uit alle bronnen. Dit is met name relevant voor PAK's en in minder mate formaldehyde aangezien de concentraties van deze stoffen hoger uitvallen ten opzichte van het MTR dan die van andere ZZS.

6 Referenties

- 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>
- RIVM. (2022, januari 20). *Memo over luchtnormen PAK's*. Retrieved from Website van het RIVM: <https://rvs.rivm.nl/nieuws/memo-over-luchtnormen-paks-beschikbaar>
- RIVM. (2023, September 22). *Zeer Zorgwekkende Stoffen*. Retrieved from Website van RIVM: <https://rvs.rivm.nl/onderwerpen/zeer-zorgwekkende-stoffen>
- TNO. (2024). *Emissies van benzo[a]pyreen op Nederlandse luchthavens door uitstoot van vliegtuigen*. TNO.
- Tweede Kamer. (2022, maart 11). *Aanhangsel van de handelingen (2017)*. Retrieved from Overheid.nl: <https://zoek.officielebekendmakingen.nl/ah-tk-20212022-2017.html>



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 compositen 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