

**Energy & Materials
Transition**

www.tno.nl

+31 88 866 42 56

info@tno.nl

TNO 2024 R011629 – 4 september 2024

Emissies van benzo(a)pyreen op Nederlandse luchthavens door uitstoot van vliegtuigen

Auteurs	Dellaert, S.N.C.
Rubricering verslag	TNO Publiek
Titel	TNO Publiek
Samenvatting	TNO Publiek
Verslagtekst	TNO Publiek
Aantal pagina's	13
Aantal bijlagen	0
Opdrachtgever	Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
Projectnummer	060.60817

Alle rechten voorbehouden

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

© 2024 TNO

Samenvatting

Om de concentraties van verontreinigende stoffen in de buitenlucht op en rond luchthavens te berekenen is meer inzicht nodig. Dan gaat het met name om inzicht in de emissies van vliegtuigen die op de luchthavens landen, worden afgehandeld en weer opstijgen. Deze emissies worden jaarlijks op landelijk niveau berekend in het kader van de Emissieregistratie. NLR voert in opdracht van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat berekeningen uit aan de luchtkwaliteit rondom luchthavens. TNO is gevraagd om de emissies van benzo(a)pyreen (B(a)P) aan te leveren voor de vijf grootste luchthavens in Nederland. Voor deze specifieke berekeningen is het onderscheid naar de verschillende vluchtfases relevant.

In deze studie is de huidige berekeningsmethode, zoals gehanteerd in de Emissieregistratie, vergeleken met een verbeterde methode op basis van nieuwe wetenschappelijke inzichten om de emissies van benzo(a)pyreen te bepalen per luchthaven en per vluchtfase voor het jaar 2019, waarbij emissies boven 3000 voet (ruim 900 meter) niet worden meegenomen.

Uit het uitgevoerde onderzoek blijkt dat in de verbeterde methode (gebaseerd op recente refereerbare bronnen) een beduidend hogere emissie van B(a)P wordt berekend dan in de tot op heden gehanteerde methode (gebaseerd op historische aannames). De verbeterde methode geeft aanleiding om de methode ook in de Emissieregistratie toe te passen.

Inhoudsopgave

Samenvatting	3
1 Inleiding	5
2 Methode.....	6
3 Resultaten	8
4 Discussie en conclusie	10
5 Referenties	11
Ondertekening.....	12

1 Inleiding

In opdracht van de Nederlandse Emissieregistratie berekent TNO jaarlijks de emissies van luchtvaart in Nederland. Naast de emissie berekeningen van vliegtuigen (tijdens landing, afhandeling en opstijgen) omvat dit ook berekeningen van de emissies van tanken, banden- en remslijtage, en de emissies van grondmaterieel op luchthavens. Emissies van vliegtuigen worden berekend aan de hand van de gestandaardiseerde LTO (landing and take-off) cyclus, waarin emissies worden meegenomen tot een hoogte van 3000 voet (ca. 900 meter). Naast emissies uit de hoofdmotoren, worden ook de emissies uit de auxiliary power unit¹ (APU) bepaald waar van toepassing. Ook de luchtverontreinigende emissies boven 3000 voet (tijdens de zogenaamde 'cruise' fase van de vlucht) worden berekend voor de Emissieregistratie, echter deze gelden in internationale rapportages als 'memo-item' omdat emissie boven deze hoogte een beperktere invloed heeft op de luchtkwaliteit op grondniveau.

Polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAKs) is een categorie stoffen met negatieve gezondheidseffecten waaronder een carcinogene werking. Benzo(a)pyreen (B(a)P), één van deze PAKs, wordt in Europese richtlijnen als marker beschouwd voor de carcinogene effecten van deze categorie stoffen (RIVM, 2022). De meeste PAKs, inclusief benzo(a)pyreen, zijn opgenomen op de lijst ZZS (zeer zorgwekkende stoffen) van het RIVM².

In opdracht van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat voert NLR berekeningen uit aan de luchtkwaliteit rondom luchthavens. TNO is gevraagd om de emissies van benzo(a)pyreen aan te leveren voor de vijf grootste luchthavens in Nederland: Amsterdam Schiphol Airport, Rotterdam/The Hague Airport, Eindhoven Airport, Groningen Airport Eelde en Maastricht Aachen Airport. Daarin is ook het onderscheid naar de verschillende vluchtfases relevant. In deze studie is de huidige berekeningsmethode, gehanteerd in de Emissieregistratie, vergeleken met een verbeterde methode op basis van nieuwe inzichten om de emissies van benzo(a)pyreen te bepalen per luchthaven en per vluchtfase (LTO en APU) voor het jaar 2019. Emissies boven 3000 voet worden niet meegenomen. Ook emissies van zuigermotoren (m.n. kleinere vliegtuigen) worden niet meegenomen.

Omdat de huidige in de Emissieregistratie gehanteerde berekeningsmethode gebaseerd is op historische aannames én omdat de aandacht voor ZZS (waaronder B(a)P) groeit, is binnen dit onderzoek een nieuwe verbeterde berekeningsmethodiek ontwikkeld op basis van wetenschappelijk onderzoek waarin specifieke metingen naar de B(a)P zijn uitgevoerd. Dit onderzoek biedt een betere wetenschappelijke onderbouwing van de emissieschattingen.

De nieuwe inzichten en de emissieberekeningen op basis van de nieuwe verbeterde methode uit dit rapport zullen vanaf 2025 in de Emissieregistratie worden meegenomen.

¹ Een APU is een kleine turbine in de staart van het vliegtuig die de energie levert voor het starten van de hoofdmotoren en het vliegtuig voorziet van elektriciteit en airconditioning wanneer de hoofdmotoren niet draaien

² <https://rvs.rivm.nl/onderwerpen/zeer-zorgwekkende-stoffen>

2 Methode

Voor de bepaling van de emissies van benzo(a)pyreen zijn twee verschillende rekenmethoden beschikbaar:

1. De huidige rekenmethode van de Nederlandse Emissieregistratie, waarbij benzo(a)pyreen wordt bepaald als fractie van de totale emissies van vluchtige organische stoffen (VOS).
2. Een verbeterde rekenmethode, waarbij benzo(a)pyreen wordt bepaald als fractie van de totale emissie van elementair koolstof (EC), het niet-vluchtige deel van de fijnstofemissies (PM_{2.5}).

De emissies van VOS en EC worden in de Emissieregistratie per vliegtuigtype, luchthaven en vluchtfase bepaald met het CLEO model volgens de methodologie die is beschreven in Dellaert & Hulskotte (2017) en Geilenkirchen et al. (2024), waarbij emissiefactoren worden gebruikt uit de ICAO emissiedatabank³. De EC emissiefactoren zijn berekend uit het gerapporteerde *smoke number* met behulp van de FOA4 methode (ICAO, 2020).

Ad 1: Huidige rekenmethode Emissieregistratie:

De huidige rekenmethode van de Emissieregistratie is gebaseerd op verouderde fracties waarvan de herkomst niet bekend is (zie tabel 8.8B in Geilenkirchen et al., 2024). De fractie die tot op heden tot de Emissieregistratie wordt gebruikt staat in Tabel 2.1. Er is hierbij geen onderscheid tussen de verschillende vluchtfases. In deze methode wordt de emissie van B(a)P berekend als fractie van de totaal VOS emissies.

Tabel 2.1: Fractie benzo(a)pyreen binnen emissies van VOS, bron onbekend

Stof	Fractie van totaal VOS
Benzo(a)pyreen	6,50E-07

In deze rekenmethode worden de VOS emissies, gesommeerd naar luchthaven en vluchtfase, vermenigvuldigd met de fractie uit Tabel 2.1 om de benzo(a)pyreen emissie te bepalen. In deze rekenmethode wordt geen rekening gehouden met dat zwaardere PAKs (zoals benzo(a)pyreen) niet vluchtig zijn, maar aan deeltjes zijn gebonden, wat wil zeggen dat ze onderdeel zijn van de totale fijnstofemissie (Banks et al., 2019; RIVM, 2022). De verwachting is daarom dat een methodiek waarbij B(a)P afgeleid wordt van fijnstofemissies betere emissieschattingen oplevert.

Ad 2: Verbeterde rekenmethode op basis van nieuwe inzichten

De verbeterde rekenmethode is gebaseerd op metingen door Agrawal et al. (2008), waarin zowel de emissie van fijnstof (PM_{2.5} en EC) als de emissie van individuele PAKs zijn gemeten voor 4 (veelvoorkomende) vliegtuigmotoren, bij 4 verschillende vermogensniveaus. Dezelfde metingen worden gepresenteerd in Lobo et al. (2007) en zijn opgenomen in de SPECIATE database⁴ van de US EPA. Door de emissies van de individuele PAKs te delen op de emissie van EC, en dan het gemiddelde te nemen van de 4 gemeten motoren, is per stof een fractie

³ <https://www.easa.europa.eu/en/domains/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank>

⁴ <https://www.epa.gov/air-emissions-modeling/speciate>

berekend die kan worden toegepast om de emissies van PAKs af te leiden uit de totale EC emissies op Nederlandse luchthavens. Hierbij is de aanname gedaan dat de vorming en emissie van PAKs, waaronder benzo(a)pyreen, ook voor andere type motoren dan die zijn gemeten, op een vergelijkbare manier verloopt als voor EC.

Het is belangrijk om te vermelden dat de metingen door Agrawal et al. grote variaties aan zowel EC en PAK emissies laten zien tussen de motoren, zelfs voor 2 motoren van hetzelfde type. Dit toont aan dat het toepassen van een gemiddelde van deze metingen op alle vluchten in Nederland gepaard gaat met een significante onzekerheid in de resultaten. Desalniettemin lijkt deze methode op dit moment de meest robuuste voor het bepalen van de totale emissies van benzo(a)pyreen op de Nederlandse luchthavens omdat deze is gebaseerd op relatief recente metingen aan veelvoorkomende vliegtuigmotoren. Daarbij is de vorming en emissie van EC een betere maatstaf gebleken voor de bepaling van benzo(a)pyreen, dan de vorming en emissie van VOS. De gebruikte fracties per vluchtfase staan in Tabel 2.2. Agrawal et al. (2008) hebben geen APU gemeten. Er is hier gekozen om dezelfde fractie te gebruiken als voor de *approach* fase omdat deze fase een vergelijkbare motorbelasting kent.

Tabel 2.2: Fractie benzo(a)pyreen binnen emissie van EC, per vluchtfase, afgeleid uit Agrawal et al. 2008

Stof	Vluchtfase/bron	Fractie van EC
Benzo(a)pyreen	Idle	3,56E-03
	Approach	2,65E-04
	Take-off / Climb-out	1,06E-04
	APU	2,65E-04

In deze nieuwe verbeterde methode worden de EC emissies, gesommeerd naar luchthaven en vluchtfase, vermenigvuldigd met de fracties uit Tabel 2.2 om de benzo(a)pyreen emissie te bepalen.

3 Resultaten

De uitgebreide resultaten zijn opgeleverd in een MS Excelbestand ("TNO_Emissies_NL_Vliegvelden_2019_PM_BaP.xlsx"). In de tabellen hieronder worden de belangrijkste resultaten uitgelicht.

Tabel 3.1: EC emissies (kg) in 2019 per luchthaven en vluchtfase/bron, berekend met CLEO model.

Vluchtfase/bron	Eindhoven	Groningen	Maastricht	Rotterdam	Schiphol	Totaal
Approach	10	12	13	18	566	620
APU	421	20	110	225	3.195	3.971
Climb-out	294	18	50	107	2.607	3.076
Idle	13	17	17	29	1.299	1.374
Take-off	141	13	33	60	1.538	1.785
Totaal	879	80	222	440	9.206	10.826

Tabel 3.2: Benzo(a)pyreen emissies (kg) in 2019 per luchthaven en vluchtfase/bron, o.b.v. huidige fracties Emissieregistratie.

Vluchtfase/bron	Eindhoven	Groningen	Maastricht	Rotterdam	Schiphol	Totaal
Approach	2,07E-04	2,66E-04	1,07E-04	4,73E-04	4,68E-03	5,73E-03
APU	3,59E-04	2,47E-05	1,45E-04	2,19E-04	3,07E-03	3,82E-03
Climb-out	2,13E-04	1,83E-05	5,66E-05	9,41E-05	2,52E-03	2,90E-03
Idle	4,58E-03	2,07E-03	2,63E-03	5,87E-03	2,08E-01	2,24E-01
Take-off	9,27E-05	8,32E-05	3,34E-05	1,45E-04	1,21E-03	1,56E-03
Totaal	5,46E-03	2,46E-03	2,97E-03	6,81E-03	2,20E-01	2,38E-01

Tabel 3.3: Benzo(a)pyreen emissies (kg) in 2019 per luchthaven en vluchtfase/bron, o.b.v. fracties Agrawal et al., 2008.

Vluchtfase/bron	Eindhoven	Groningen	Maastricht	Rotterdam	Schiphol	Totaal
Approach	2,73E-03	3,12E-03	3,47E-03	4,86E-03	1,50E-01	1,64E-01
APU	1,12E-01	5,41E-03	2,90E-02	5,95E-02	8,47E-01	1,05E+00
Climb-out	3,12E-02	1,90E-03	5,31E-03	1,14E-02	2,77E-01	3,27E-01
Idle	4,58E-02	6,07E-02	5,90E-02	1,04E-01	4,62E+00	4,89E+00
Take-off	1,50E-02	1,37E-03	3,48E-03	6,38E-03	1,63E-01	1,89E-01
Totaal	2,06E-01	7,25E-02	1,00E-01	1,86E-01	6,06E+00	6,62E+00

Er zit een groot verschil in de emissies van benzo(a)pyreen zoals bepaald met de twee rekenmethoden. Er zit ruim een factor 25 tussen het totaal van de twee resultaten (0,24 kg vs. 6,6 kg). Beide rekenmethoden leggen het zwaartepunt op de *idle* vluchtfase, wanneer de motoren op lage belasting draaien, zoals tijdens het taxiën. De hoeveelheid benzo(a)pyreen die wordt uitgestoten relatief ten opzichte van de hoeveelheid EC, is het hoogste tijdens die fase (zie Tabel 2.2). Ook het gebruik van APU draagt substantieel bij aan de uitstoot van benzo(a)pyreen. Hierbij moet wel de kanttekening worden gemaakt, dat de gebruikte literatuurstudie geen APU heeft gemeten en hier is uitgegaan van eenzelfde verhouding tot EC als tijdens de *approach* fase.

4 Discussie en conclusie

In dit rapport worden de emissies gerapporteerd van benzo(a)pyreen als gevolg van de uitstoot door vliegtuigen op de grootste Nederlandse luchthavens. De huidige rekenmethode van de Emissieregistratie komt op een waarde van ca. 0,24 kg voor 2019 (circa 0,02% van de totale Nederlandse B(a)P emissie), terwijl de verbeterde rekenmethode op een totaal van ca. 6,6 kg uitkomt (ca. 0,5 % van het Nationaal totaal).

Van de twee gebruikte methoden, is de verbeterde methode o.b.v. metingen van EC en benzo(a)pyreen uit meerdere vliegtuigmotoren, de meest robuuste omdat deze is gebaseerd op relatief recente metingen aan veelvoorkomende vliegtuigmotoren. Tevens is de vorming en emissie van EC een betere maatstaf gebleken voor de bepaling van benzo(a)pyreen, dan de vorming en emissie van VOS. Dat komt omdat zwaardere PAKs zoals benzo(a)pyreen niet vluchtig, maar aan deeltjes gebonden zijn.

In het verleden was er in de Emissieregistratie minder aandacht voor de PAK emissie van de luchtvaart in Nederland mede omdat deze sector een beperkt aandeel heeft in de totale Nederlandse PAK emissie (< 1%). Verder kan voor de huidige rekenmethode niet worden achterhaald op welke metingen deze precies is gebaseerd, en dus hoe representatief deze metingen waren. Daar de aandacht voor de emissies van ZZS (waaronder B(a)P) sterk is gegroeid en er nieuwe (refereerbare) data beschikbaar zijn gekomen verklaart waarom de daadwerkelijke emissies van benzo(a)pyreen hoger liggen dan uit de huidige berekeningen van de Emissieregistratie blijkt.

Zoals vermeld laten de meetresultaten voor de individuele motoren in Agrawal et al. (2008) een grote spreiding zien, wat onderschrijft dat het extrapoleren van deze metingen naar alle vliegtuigbewegingen op Nederlandse luchthavens tot resultaten met een grote onzekerheidsbandbreedte leidt. Gezien de negatieve gezondheidseffecten die kunnen optreden bij blootstelling aan benzo(a)pyreen en andere PAKs, is het belangrijk deze onzekerheden te onderkennen. Meer metingen aan een grotere variëteit aan motoren en onder verschillende omstandigheden (zoals weersomstandigheden, brandstofsamenstelling, onderhoud etc.), kunnen het inzicht in vorming van PAKs vergroten en de onzekerheidsbandbreedte in de totale emissies verkleinen.

De hoogste emissies vinden plaats in de *idle* fase en tijdens het gebruik van de APU. Deze activiteiten vinden beide grotendeels aan de grond plaats, en daarmee dicht bij eventuele menselijke blootstelling. Voor beide activiteiten zijn in veel situaties alternatieven mogelijk, zoals het gebruik van *gate power* en *preconditioned air* aan de gate als vervanging voor het gebruik van een APU, en alternatieven voor taxiën op de hoofdmotor(en) zoals het gebruik van een zero-emissie *aircraft tug* of een *electric nose wheel*.

De gerapporteerde emissiewaarden betreffen jaartotalen en geven geen inzicht in de daadwerkelijke blootstelling op de luchthavens. Om de blootstelling aan benzo(a)pyreen en andere PAKs in te schatten, dienen deze emissies in ruimte en tijd te worden verdeeld (t.b.v. verspreidingsberekeningen), alsmede te worden gevalideerd met lokale metingen. Dit viel niet binnen de scope van dit onderzoek.

5 Referenties

Agrawal, H., Sawant, A. A., Jansen, K., Wayne Miller, J., & Cocker, D. R. (2008). Characterization of chemical and particulate emissions from aircraft engines. *Atmospheric Environment*, 42(18), 4380–4392. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.01.069>

Banks, L. D., Harris, K. L., Harris, K. J., Mantey, J. A., Hood, D. B., Archibong, A. E., & Ramesh, A. (2019). Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. In *Biomarkers in Toxicology* (pp. 519–527). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814655-2.00029-3>

Dellaert, S. N. C., & Hulskotte, J. H. J. (2017). Emissions of air pollutants from civil aviation in the Netherlands. TNO 2017 R10055

Geilenkirchen, G., Bolech, M., Hulskotte, J., Dellaert, S., Ligterink, N., Eijk, E. van, Geertjes, K., Kosterman, M., & Hoen, M. 't. (2024). Methods for calculating the emissions of transport in the Netherlands. <https://doi.org/10.21945/RIVM-2024-0023>

International Civil Aviation Organization (ICAO). (2020). Doc 9889: Airport air quality manual (2nd ed.). https://www.icao.int/publications/Documents/9889_cons_en.pdf

Lobo, P., Whitefield, P. D., Hagen, D. E., Herndon, S. C., Jayne, J. T., Wood, E. C., Knighton, W. B., Northway, M. J., Miake-Lye, R. C., Cocker, D., , Sawant, A., Agrawal, H., & Miller, J. W. (2007). The Development of Exhaust Speciation Profiles for Commercial Jet Engines

RIVM (2022). Memo luchtnormen voor PAKs. https://rvs.rivm.nl/sites/default/files/2022-02/Memo_luchtnormen_voor_PAKs_met_bijlage_%20achtergrondinformatie_200122.pdf

Ondertekening

TNO) Energy & Materials Transition) Utrecht, 4 september 2024

Sam van Goethem
Research Manager

Bart Jansen
Project Manager

Energy & Materials Transition

Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht
www.tno.nl

TNO innovation
for life