Luchtvaartemissies, lokale luchtkwaliteit en gezondheid

Prof. dr. Greet Schoeters, Departement Biomedische Wetenschappen, Universiteit Antwerpen

Prof. dr. Wouter Dewulf, Departement Transport en Ruimtelijke Economie, Universiteit Antwerpen

Inhoudsopgave

1. Managementsamenvatting
2. Beleids- en kenniscontext
3. Expertcommentaren op voorbije studies
4. Synthesis van de kennishiaten
5. Methodologische uitgangspunten en beoordelingskader
6. Aanbevelingen en volgende stappen
7. Conclusie

Datum: 19 december 2025

1. Managementsamenvatting

Dit rapport presenteert een academisch onderbouwde verkenning naar de Nederlandse situatie van luchtvaartemissies rondom luchthavens. Het te beoordelen dossier omvat studies over de bijdrage van luchtvaartemissies aan de lokale luchtkwaliteit. In deze studies zijn emissie- en concentratiemodellen (TNO, NLR, Adecs) gebruikt die waar mogelijk getoetst werden aan op gezondheid gebaseerde toetsingswaarden en is een scenarioanalyse uitgevoerd van vlootvernieuwing (To70) en de impact ervan op luchtvaartemissies. Aanvullend worden ook overkoepelende beleids- en advieskaders (Kamerbrieven) evenals een beoordeling door een onafhankelijke expertencommissie beoordeeld. Er werd bijkomend gebruik gemaakt van literatuur en rapporten over luchtkwaliteit in relatie met gezondheid van omwonenden rondom luchthavens.

Onze kernbevinding luidt dat de afzonderlijke studies die ons werden bezorgd overwegend degelijk zijn binnen hun opdracht, maar gezamenlijk (nog) geen volledig bewijs kunnen leveren voor generieke conclusies naar mogelijke gezondheidsimpact. De drie belangrijkste oorzaken zijn: (1) een beperkte stof- en bronset in de modellering (onder meer onvoldoende aandacht voor ultrafijn stof (UFP), vluchtige en niet-vluchtige PAKs (Poly Aromatische Koolwaterstoffen), geselecteerde metalen, organofosfaatesters, de-icingcomponenten en biociden, en voor platformnabije bronnen als APU, GSE en tank- en ontluchtingsactiviteiten, alsook helikopters en zuigermotoren én geen validatie van de modellen met meetgegevens); (2) het ontbreken van achtergrondconcentraties voor meerdere Zeer Zorgwekkende Stoffen (ZZS), waardoor cumulatieve blootstelling niet volledig kan worden getoetst; en (3) een dominante focus op jaargemiddelden in plaats van kortetijdsmetriek (uur- en daggemiddelden) en piekconcentraties, die voor acute en subacute gezondheidseffecten juist relevant zijn.

Om conclusies te kunnen trekken over de gezondheidseffecten als gevolg van luchtvaartemissies en te komen tot effectieve maatregelen adviseren wij een tweesporenstrategie. Op korte termijn stellen we voor om de nadruk op no-regret bronmaatregelen te blijven leggen: in de grondfasen een APU-restrictie met strikt gebruik van FEGP/PCA en e-GPU; single-engine taxi en inzet van sleepwagens/TaxiBots; elektrificatie van GSE; route-optimalisatie; en de opzet van een transparant monitoringsysteem (inclusief UFP, PAK en formaldehyde). Parallel stellen we voor om een programmatisch meerjarenonderzoek met geharmoniseerde metingen en modellen, inclusief onzekerheidsanalyse en validatie, op te zetten en een expliciete koppeling naar gezondheid te maken. Na deze kennistrap kan heroverweging plaatsvinden van eventuele maatregelen om de lokale luchtkwaliteit te verbeteren..

2. Beleids- en kenniscontext

De beleidscontext wordt de voorbije jaren vooral bepaald door een reeks Kamerbrieven waarin het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW) enerzijds een pakket concrete operationele maatregelen aankondigt, onder meer strengere APU-restricties, elektrificatie van grondmaterieel (GSE), single-engine taxi en de inzet van sleepwagens/TaxiBots, en anderzijds expliciet erkent dat de onderliggende kennisbasis nog onvolledig is. In deze brieven aan de Tweede Kamer wordt op basis van de studierapporten en het verslag van de onafhankelijke expertencommissie gevraagd om verbreding van

het beoordeelde stoffenpakket (waaronder UFP, organofosfaatesters en geselecteerde metalen), betere validatie van modellering en transparante rapportage over mogelijke gezondheidseffecten voor omwonenden en werknemers. Verder geeft het ministerie aan om verdere stappen te willen ondernemen op basis van verder wetenschappelijke onderbouwing.

De doelstelling van dit rapport is dan ook om na te gaan in welke mate de beschikbare onderzoeken: (i) een compleet beeld geven van de bijdrage van luchtvaartemissies aan de lokale luchtkwaliteit, (ii) welke bronnen en/of stoffen onvoldoende beoordeeld zijn in eerdere onderzoeken en (iii) welke vervolgstappen wenselijk zijn en op welke wijze ze effectief zouden zijn voor het verbeteren van de lokale luchtkwaliteit.

Dit rapport evalueert bestaande onderzoeken en genereert op zichzelf geen nieuwe gegevens, maar sluit aan bij de beleids- en kennisagenda door de bestaande studies over luchtkwaliteit rond Nederlandse luchthavens te synthetiseren. Wij doen geen uitspraken over de gezondheidsschade of de ernst ervan voor omwonenden van luchthavens, maar peilen naar de volledigheid van gegevens en benaderingen om sluitende conclusies te kunnen trekken over de bijdrage tot lokale luchtkwaliteit en de mogelijke impact van de kwaliteit van de leefomgeving in de buurt van luchthavens op gezondheid van omwonenden. Naast de door de oorspronkelijke onafhankelijke expertgroep beoordeelde studies van TNO, NLR, Adecs en To70, nemen wij drie bijkomende onderzoeken op: het RIVM-programma over gezondheidseffecten van UFP rond Schiphol, het RIVM-sterfteonderzoek en het HGR-advies (België, 2024). We evalueren de uitgebreidheid van stoffen en bronnen die meegenomen werden in de bestaande onderzoeken op hun relevantie voor beoordeling van de luchtkwaliteit van de leefomgeving en we benoemen de belangrijkste lacunes. Op basis van deze evaluatie doen we een voorstel voor vervolgstappen met het benadrukken van het belang van het opvolgen en handhaven van de reeds voorgestelde maatregelen, het opvullen van kennishiaten die nodig zijn om de huidige conclusies verder te duiden en eventueel bij te sturen. We schetsen ook een onderzoeksprogramma dat metingen, modellering en gezondheidsduiding systematisch met elkaar verbindt en benadrukken hierbij het belang om via een geïntegreerde benadering de gezondheidsduiding te versterken.

Aan de kenniszijde vormt het meerjarige UFP-programma van het RIVM rond Schiphol momenteel het meest vergevorderde empirische onderzoek: langdurige metingen en epidemiologische analyses laten verbanden zien tussen ultrafijn stof en korte termijn veranderingen in gezondheid, en leveren indicatieve aanknopingspunten voor effecten op langere termijn. De Kamerstukken uit 2019 onderstrepen dat dergelijke onderzoeksprogramma's structureel verankerd moeten worden in meetnetten en verfijnde blootstellingsmodellering. Daarnaast pleit de Hoge Gezondheidsraad (HGR, 2024) in België voor een geïntegreerde beoordeling van geluid en luchtkwaliteit, met bijzondere aandacht voor cumulatie van stressoren, kwetsbare groepen en de leefomgevingskwaliteit in brede zin.

3. Expertcommentaren op voorbije studies

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste studies over luchtvaartemissies en lokale luchtkwaliteit besproken. Per studie onderscheiden wij kort de opzet en kernresultaten, gevolgd door onze beoordeling, een geïntegreerde kerncommentaar en aanbevelingen voor vervolgstappen. Eerst komen de studies aan bod die door de oorspronkelijke expertgroep zijn beoordeeld (TNO, NLR, Adecs, en To70). Vervolgens

bespreken wij drie bijkomende onderzoeken die wij als extra referentiekader toevoegen: het integrale RIVM-rapport over UFP rond Schiphol, het RIVM-sterfteonderzoek en het HGR-advies (België, 2024).

3.1 TNO – Notitie emissieberekeningen ZZS (10 februari 2023)

Kern van de studie

TNO levert een verkennende emissie-inventaris voor een selectie van vluchtige ZZS op en rond de Nederlandse luchthavens. Emissieberekeningen zijn afgeleid als fractie van VOS op basis van emissieregistratie en literatuurprofielen, uitgesplitst naar operationele fasen (idle, taxi, take-off/landing). De notitie is helder over haar verkennende aard en signaleert terecht dat emissies in de grondfasen de grootste relevantie hebben voor nabij-grondse concentraties en blootstelling.

Onze beoordeling

Hoewel de notitie een bruikbare start biedt, is zij methodologisch beperkt. De indirecte afleiding van specifieke ZZS uitgaande van een vaste massaverhouding van ZZS tov VOS introduceert modelonzekerheid die zonder metingen niet sluitend kan worden gekwantificeerd. Immers factoren zoals het vlieggedrag van de piloot, snelheid van opstijgen, brandstofverbruik en onvolledige verbranding kunnen de emissies beïnvloeden. Belangrijke componenten, zoals hogere-ring PAK en geselecteerde metalen en organofosfaatesters blijven buiten scope, evenals meerdere operationele nevenbronnen (APU, GSE, tank- en ontluchtingsactiviteiten). De kwalificatie ‘worst-case’ mist kwantitatieve bandbreedten en een gevoeligheidsanalyse; een piekdynamiek ontbreekt, terwijl de uitstoot per uur heel erg kan verschillen tussen drukke vluchturen (ochtend en avond) en luwe periodes zoals ‘s nachts. De analogie met industriële puntbronnen is slechts beperkt passend gezien het diffuse, mobiele karakter van luchtvaartemissies.

Wij bevelen aan om de stoffenlijst te verbreden met enkele stoffen waarvan vaststaat dat de blootstelling daarvan gezondheidsschade veroorzaakt. De voorgestelde verbreding bevat UFP, niet-vluchtige PAK, VOS met ozonvormend potentiaal, geselecteerde metalen en organofosfaatesters, en de broninventaris expliciet uit te breiden met APU, GSE en brandstofhandelingen. Daarnaast is het nodig om onzekerheden en gevoeligheden systematisch te kwantificeren en vroege validatiemetingen te organiseren, indien het gewenst is de VOS-afleiding voor individuele ZZS empirisch te toetsen en bij te stellen.

Aanbevolen vervolgstappen

a. Opzet van een meet-en-model-koppel (co-design) met parallelle metingen op het platform en in randwijken. Meetposten op verschillende afstand van de luchthaven kunnen een indicatie hiervoor geven. Het selectief meten van UFP (10-50 nm) geeft ook specifieke informatie over luchtvaartemissies (zie VITO/VMM rapport, 2019);
b. Integratie van brandstofsamenstelling (zwavel- en aromatengehalte) en motorinstellingen;
c. Explicitering van de emissies van APU, GSE en tankactiviteiten in de totale balans;
d. Publicatie van onzekerheids- en gevoeligheidsanalyses met parametersets die externe toetsing mogelijk maken.

3.2 NLR – Concentraties ZZS op en rondom luchthavens (NLR-CR-2023-148; PT-2, augustus 2024)

Kern van de studie

NLR vertaalt emissies naar ruimtelijk expliciete concentraties op leefniveau en toetst waar mogelijk aan MTR-waarden. De resultaten tonen geen jaargemiddelde overschrijdingen binnen de beschouwde stoffen- en bronnenkeuze, en laten zien dat taxiën en APU sleutelrollen spelen in de ruimtelijke verdeling. De aanvullende PT-2-ronde verfijnt de representatie van PAK's (via een BaP-proxy) en bevestigt de dominantie van grondfasen voor nabij-grondse waarden. De correctie voor de thermische efficiënte van de uitlaatpluim heeft een impact op de berekende concentraties.

Onze beoordeling

De studie is zorgvuldig en transparant, ze houdt bij de modellering van de luchtconcentraties afkomstig van vliegverkeer rekening met klimatologische informatie en de vliegbewegingen. De gehaltes worden berekend in functie van de afstand van de bronnen op de luchthaven. Er wordt aangetoond dat de emissies langs de taxiroutes meer dan 90% bijdragen aan de VOC (Volatile Organic Compounds – Vluchtige Aromatische Stoffen) emissies op kilometerafstand. Er werd berekend dat de concentraties benzeen, 1,3-butadieen, formaldehyde en isopropylbenzeen door luchtvaartemissies onder de geldende MTR blijven.

We noteren dat voor BaP (Benzo(a)Pyreen) de berekende jaargemiddelde maximale concentratie op leefniveau en direct afkomstig van vliegverkeer in de directe buurt van Schiphol 32% bedraagt van de MTR. Voor de andere VOCs is dat minder dan 5%, voor formaldehyde is dat 8%. Dit zijn de maximale jaargemiddelde concentraties, die gemeten worden op de luchthaven. Op basis van de figuren in het rapport kan men aannemen dat de gehaltes dalen met de afstand van de luchthaven.

De correctie voor thermische efficiëntie van de uitlaatpluim heeft belangrijke gevolgen: 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. Deze correctie werd niet uitgevoerd voor de andere VOCs maar een proefberekening geeft aan dat dit ongeveer tot een verdubbeling van de VOS gehaltes zou leiden. Het toont ook de gevoeligheid van de modelleringen voor de aannames en benadrukt ons inziens de nood aan validatie met metingen.

Daarnaast ontbreken er validerende metingen voor de belangrijke stoffen. Verder is de bronset nog te beperkt (APU, GSE, tankactiviteiten, helikopters en zuigermotoren zijn onvoldoende in samenhang meegenomen) om de totale luchthavensituatie te kunnen karakteriseren. De afwezigheid van achtergrondconcentraties voor meerdere stoffen beperkt de betekenis van de MTR-toets tot de emissies van de luchtvaart, zonder rekening te houden met de reeds aanwezige gehaltes afkomstig van andere bronnen. Het resultaat 'onder MTR' kan daarom niet worden vertaald naar 'afwezig gezondheidsrisico'. De afleiding van PAKs concentraties op basis van emissies van elementaire koolstof is bovendien een aanname en is mogelijk niet geheel terecht voor de vluchtige PAKs.

Voor een vollediger beeld adviseren wij (i) het bepalen van achtergrondconcentraties en het toepassen van cumulatieve toetsing; (ii) uitbreiding van de broninventaris met APU, GSE, tankactiviteiten, helikopters en zuigermotoren; en (iii) gerichte validatiemetingen, met prioriteit voor PAK's en formaldehyde.

Aanbevolen vervolgstappen

a. Toevoegen van receptor-modellering of source-apportionment om bronbijdragen beter te scheiden;
b. Opzetten van meettransecten dwars op taxi-routes en platformranden en woonkernen;
c. Testen van alternatieve dispersie-parameterisaties voor grondnabije uitlaatpluimen; en
d. Rapporteren van onzekerheidsbanden bij MTR-vergelijkingen.

3.3 Adecs – Bijdrage luchtvaart aan lokale luchtkwaliteit (versies 2.3, 2023; 3.0, 2024)

Kern van de studie

Adecs kwantificeert relatieve en absolute bijdragen van luchtvaart aan meerdere componenten (NO_2, PM_{10}/$PM_{2.5}$, SO_2, CO, VOS en geselecteerde ZZS) binnen zones tot 3 km rond luchthavens. Algemeen blijken jaargemiddelde bijdragen in woonkernen beperkt, terwijl op het luchthaventerrein, vooral voor NO_2, hogere bijdragen kunnen voorkomen. De update v3.0 corrigeert het zwavelgehalte in kerosine naar recente inzichten, waardoor de berekende SO_2-bijdragen toenemen en de gevoeligheid van resultaten voor aannames over brandstof duidelijker wordt.

Onze beoordeling

De studie biedt een consistent vergelijkingskader tussen bronnen, maar is beperkt in stofkeuze (onder meer UFP ontbreekt) en validatie. De 3-km-afbakening kan bijdragen langs aanvlieg- en vertrekassen onderschatten, en het laat de focus op jaargemiddelden piek- en seizoenseffecten buiten beeld. Er is evidentie is dat meteorologie een invloed heeft op luchtpollutie (Perez et al, 2020) en dat er piekbelastingen optreden op drukke vluchturen zoals in de ochtend en 's avonds zoals waargenomen werd voor UFP rond Brussels airport (Peters et al, 2019). Voor gezondheidsklachten zoals respiratoire aandoeningen zijn piekblootstellingen belangrijk. Vrijwel alle kernconclusies staan of vallen met aannames over emissiefactoren, motorinstellingen, vlieggedrag en brandstofsamenstelling. Robuuste onzekerheids- en gevoeligheidsanalyses zijn daarom een gewenst vervolg.

Wij bevelen aan om (i) UFP en een bredere PAK-set te integreren, (ii) APU, GSE en tankactiviteiten expliciet te modelleren, (iii) validatie uit te voeren in woonkernen en op het platform en (iv) gevoeligheidsanalyses te rapporteren voor brandstofsamenstelling (zwavel- en aromatengehalte), operatieprofielen en meteorologie.

Aanbevolen vervolgstappen

a. Koppeling met het voorgestelde meetnet (platform plus randwijken) om modelvalidatie en parameterafstemming mogelijk te maken;

b. Uitwerken van scenario's met APU-restrictie, GSE-elektrificatie en taxi-optimalisatie; en
c. Integratie van achtergrondniveaus en cumulatieve toetsing aan EU-normen, WHO-richtwaarden en MTR's.

3.4 To70 – Effect van vlootontwikkeling op emissies

Kern van de studie

To70 projecteert emissietrends tot 2035 als gevolg van vlootvernieuwing voor vier regionale luchthavens. Meerdere componenten laten dalingen of stabilisaties zien, terwijl voor NO_x locatie- en vlootspecifieke verschillen optreden. Schiphol valt buiten scope, en APU-emissies en UFP/$PM_{2.5}$ worden niet expliciet geadresseerd.

Onze beoordeling

De studie is bruikbaar als indicatieve trendanalyse, maar de beleidswaarde voor lokale luchtkwaliteit is beperkt doordat cruciale grondbronnen (APU en GSE) en fijn fractie-componenten (UFP en $PM_{2.5}$) ontbreken en er geen koppeling is met concentraties, pieken en gezondheid. Bovendien is harmonisatie met de nationale rekenmethodiek wenselijk om consistentie te borgen met MER- en vergunningstrajecten.

Wij adviseren om emissieprojecties te verrijken met operationele maatregelen (single-engine taxi, inzet van sleepwagens/TaxiBots), GSE-elektrificatie en brandstofsamenstelling; en om de emissietrends te koppelen aan concentraties, kortetijdsmetriek en gezondheidsindicatoren, bijvoorbeeld via attributable fractions of DALY (aantal verloren gezonde levensjaren) -achtige metrics.

Aanbevolen vervolgstappen

a. Opnemen van APU en GSE in de emissiebalans;
b. Uitbreiden met UFP/$PM_{2.5}$-projecties;
c. Opnemen van expliciete scenario's met bronmaatregelen en hun impact op blootstelling;
d. Validatie tegen meetreeksen waar beschikbaar.

3.5 Aanvullend referentiekader: RIVM- en HGR-studies

Naast de studies die door de oorspronkelijke expertgroep zijn beoordeeld, betrekken wij drie bijkomende onderzoeken die niet onder hun mandaat vielen, maar die wij bewust toevoegen om het perspectief op luchtvaartemissies, blootstelling en gezondheid te verbreden. Het gaat om het integrale RIVM-rapport over gezondheidseffecten van ultrafijn stof (UFP) rond Schiphol, het RIVM-sterfteonderzoek (2016) en het advies van de Hoge Gezondheidsraad (HGR, 2024) in België over de geïntegreerde beoordeling van geluid en luchtverontreiniging. Deze rapporten worden in dit document niet inhoudelijk beoordeeld of van gedetailleerd commentaar voorzien, maar fungeren als aanvullende literatuur die richting geeft aan de interpretatie van de bestaande emissie- en concentratiestudies en aan de uitwerking van het voorgestelde onderzoeksprogramma.

Het UFP-programma van het RIVM laat zien dat omwonenden periodiek worden blootgesteld aan episodisch verhoogde UFP-niveaus en dat kortdurende verhogingen in UFP-concentraties samenhangen met veranderingen in respiratoire en cardiovasculaire indicatoren. Methodologisch is belangrijk dat dit programma langdurige meetreeksen en modellering met epidemiologische analyses combineert, met onderscheid tussen UFP-fracties die primair aan vliegverkeer (airside) zijn toe te schrijven en fracties die vooral door wegverkeer (landside) worden bepaald. Daarmee illustreert deze studie (enkel voor UFP) in de praktijk wat ook uit internationale literatuur blijkt: dat luchtvaartgerelateerde emissies een herkenbaar blootstellingsprofiel creëren voor UFP, maar ook voor andere componenten zoals organofosfaatesters (OPE) en geselecteerde metalen, met karakteristieke ruimtelijke patronen in functie van windrichting en afstand tot de luchthaven (Lefebvre et al, 2019; Bendtsen et al, 2021; Li et al. 2019). In samenhang met metingen en case-studies rond andere luchthavens bevestigt dit dat UFP niet als louter abstracte modelcomponent kan worden beschouwd, maar als een gemeten, gezondheidsrelevant onderdeel van het mengsel waaraan omwonenden en werknemers in de nabijheid van luchthavens worden blootgesteld.

Het RIVM-sterfteonderzoek rond Schiphol (2016) beschrijft ruimtelijke patronen in mortaliteit in de ruimere omgeving van de luchthaven, zonder dat daaruit een scherp afgebakende cluster naar voren komt die ondubbelzinnig aan luchtvaartactiviteiten kan worden toegeschreven. Het rapport is expliciet exploratief: het werkt met mortaliteit als relatief grove en weinig gevoelige uitkomstmaat voor subacute en chronische blootstellingen en kon nog niet steunen op historische UFP-reeksen, gedetailleerde gegevens over mengselblootstelling of fijnmazige individuele blootstellingsschattingen. In het licht van de expertopinie betekent de afwezigheid van duidelijke sterfte-“hotspots” dan ook geen bewijs van afwezigheid van gezondheidseffecten, maar hooguit een aanwijzing dat deze benadering, op basis van globale sterftecijfers en beperkte blootstellingsinformatie, onvoldoende is om subtielere effecten op morbiditeit, medicatiegebruik, subklinische markers of kwetsbare subgroepen zichtbaar te maken. Dit onderstreept de noodzaak van meer fijnmazige blootstellingsdata, langere follow-up en gebruik van gevoeligere gezondheidsindicatoren in toekomstige epidemiologische studies rond luchthavens wanneer meer definitief uitsluitsel gegeven moet worden over de gezondheidseffecten, ziekte en sterfte als gevolg van blootstelling aan luchtvaartemissies.

Het advies van de Hoge Gezondheidsraad (HGR, 2024) ten slotte pleit voor een geïntegreerde benadering waarin geluid en luchtkwaliteit niet los van elkaar, maar gezamenlijk worden beoordeeld, met nadruk op cumulatie van stressoren, kwetsbare groepen zoals jonge kinderen of asthmatici en een expliciete vertaling naar gezondheidswinst en -verlies in termen van verloren gezonde levensjaren (DALY’s). Dit kader sluit nauw aan bij de bevindingen uit de expertopinie: het benadrukt dat omwonenden worden blootgesteld aan mengsels van polluenten (VOS, UFP, OPE, PAK’s, metalen) én geluid, en dat deze gecombineerde belasting in een brede leefomgevingscontext moet worden geplaatst. Voor de Nederlandse situatie is dit advies relevant omdat het uitnodigt om luchtvaartemissies niet louter te benaderen als een technisch emissie- of modelprobleem, maar als onderdeel van een breder gezondheids- en omgevingsbeleid, waarin emissiereductie, blootstellingsreductie, structurele gezondheidsmonitoring, open data, periodieke evaluatie en onafhankelijke audit in één bestuurlijk raamwerk worden gekoppeld.

Gezamenlijk bieden deze drie bijkomende studies dus geen “eindoordeel”, maar wel een bredere wetenschappelijke achtergrond waartegen de Nederlandse emissie- en concentratiestudies moeten worden gelezen en waaruit concrete richtingwijzers kunnen voortkomen voor de versterking van metingen, modellering en gezondheidsonderzoek.

4. Synthese van de kennishiaten

Er is een gedetailleerde emissieschatting uitgewerkt voor acht VOC's, gebaseerd op officiële emissieregistraties en literatuurprofielen, en bovendien uitgesplitst per operationele fase. Dit levert een sterke basis om emissies beter te begrijpen en gericht te analyseren. Tegelijk blijft verdere verfijning mogelijk via validatie met metingen en door extra relevante bronnen mee te nemen.

De toetsing aan de MTR's wijst erop dat de berekende luchtvaartgerelateerde immissies voor de onderzochte VOC's en BaP onder de MTR-niveaus blijven, en dat de concentraties afnemen met toenemende afstand tot de luchthaven. Dat is een bemoedigend signaal. Voor een nog robuustere onderbouwing kan dit in een volgende stap versterkt worden met meetgegevens, een transparante bespreking van modelaannames, en het expliciet meenemen van achtergrondconcentraties uit andere bronnen.

Onze synthese van de beschikbare studies en de aanvullende literatuur wijst op vier hoofdhiaten in de huidige kennisbasis over luchtvaartemissies, lokale luchtkwaliteit en gezondheid. Deze hiaten verklaren waarom op basis van de huidige studies geen sluitende gezondheidsconclusies kunnen worden getrokken.

1. Ten eerste is de stof-set ontoereikend. De aanvullende RIVM- en HGR-studies onderstrepen dat vliegverkeer ook andere schadelijke componenten zoals UFP, niet-vluchtige PAK, metalen, organofosfaatesters, de-icingcomponenten en biociden kunnen uitstoten. Deze worden slechts beperkt of niet in kaart gebracht. UFP is de meest relevante component, ook omdat de zeer fijne deeltjes (10-20 nm) die specifiek zijn voor vliegtuigemissies afzonderlijk kunnen worden gemeten. Verder is het aanbevolen om eerst de profielen te bepalen van geëmitteerde VOS inclusief de oxy-VOS, metalen en fijnstof opgedeeld naar deeltjesgrootte. Het karakteriseren van deze profielen kan inzicht geven in de specificiteit van de met luchthavenverkeer geassocieerde emissies en immissies. Vanuit die profielen kunnen dan verder gidsstoffen worden afgeleid voor een meetnet. Bovendien is de bronset ontoereikend: eerdere luchtvaartgerelateerde bronnen (APU, GSE, tank- en ontluchtingsactiviteiten, helikopters, zuigermotoren en militair verkeer) zijn onvoldoende expliciet gemodelleerd. Het geheel van deze componenten en bronnen zijn relevant voor gezondheidsduiding.

2. Ten tweede ontbreken systematische achtergrondconcentraties en een robuuste bronbijdrage-scheiding, waardoor cumulatieve blootstelling slechts onvolledig kan worden beoordeeld. De meeste rapporten vergelijken de gemodelleerde luchtvaartbijdrage rechtstreeks met MTR- of andere advieswaarden zonder de bestaande achtergrond, terwijl omwonenden de som ervaren van alle bronnen.

3. Ten derde is er een gebrek aan dag- en uurgemiddelden en piekanalyses naast jaargemiddelden. De huidige modellering legt sterk de nadruk op jaarwaarden, terwijl kortdurende piekblootstellingen en seizoenspatronen juist van belang zijn voor acute en subacute gezondheidseffecten. Het RIVM-UFP-programma laat zien dat blootstellingspieken en kortetermijnveranderingen in gezondheid wél empirisch aantoonbaar zijn voor UFP.

4. Ten vierde zijn validatie en onzekerheidskwantificering beperkt, ondanks een grote gevoeligheid van de uitkomsten voor emissiefactoren, motorinstellingen, operationele profielen en meteorologie. De aannames in de loop van de rapportage zijn gewijzigd (thermische pluim, zwavelgehalte van de brandstof) met belangrijke gevolgen voor de resultaten, zonder dat dit steeds gepaard ging met een systematische onzekerheidsanalyse.

Deze vier hiaten samen maken dat de huidige studies weliswaar nuttige deelinformatie opleveren maar dat het bestaande kenniskader kan versterkt worden om de emissies en hun impact op de lokale luchtkwaliteit beter te evalueren. Als er verder naar impact op gezondheid wordt gekeken is het mengsel van stoffen en rekening houden met alle bronnen samen belangrijk.

5. Methodologische uitgangspunten en beoordelingskader

Op basis van de beoordeelde studies en de aanvullende literatuur formuleren wij onderstaande methodologische uitgangspunten die kunnen dienen als beoordelingskader voor de huidige onderzoeken en als ontwerpprincipe voor een eventueel voorgesteld vervolgonderzoek.

Onze beoordeling en aanbevelingen steunen op vijf kernprincipes die voortbouwen op de aangeleverde studies en op de aanvullende expertopinie. Deze principes bieden een raamwerk om zowel de huidige onderzoeken te herinterpreteren als toekomstige werkzaamheden beter te structureren.

De vijf kernprincipes luiden als volgt:

1. Scopestriktheid: conclusies worden strikt binnen de reikwijdte van elk rapport geïnterpreteerd. Generieke gezondheidsclaims vergen aanvullende onderbouwing en integratie van meerdere bronnen, waaronder epidemiologische gegevens en externe validatie.

2. Verbreding van stoffen en bronnen: het te beschouwen pakket omvat expliciet UFP, niet-vluchtige PAK, geselecteerde metalen, de-icingcomponenten en biociden, én de relevante bronnen (APU, GSE, tank- en ontluchtingsactiviteiten, helikopters, zuigermotoren, militair verkeer en verkeersinductie).

3. Tijdsresolutie in modellering: modellen beschrijven niet alleen jaargemiddelden, maar ook dag- en uurgemiddelden en piekconcentraties, omdat juist deze kortetijdsvariaties vaak bepalend kunnen zijn voor acute en subacute gezondheidseffecten ten gevolge van luchtpollutie (Faustini et al, 2013, Ye et al, 2017).

4. Achtergrond en cumulatie: achtergrondconcentraties zijn noodzakelijk voor een valide toetsing aan gezondheidskundige referentiewaarden en voor het beoordelen van cumulatieve belasting. Een beoordeling die uitsluitend naar de luchtvaartbijdrage kijkt is weliswaar relevant voor het treffen van luchtvaartspecifieke maatregelen, maar onderschat het gezondheidsrisico.

5. Beleidsrobustheid: robuuste beleidskeuzes vereisen expliciete onzekerheids- en gevoeligheids-analyses, modelvalidatie aan meetreeksen en maximale transparantie over aannames, parameters en datakwaliteit.

6. Aanbevelingen en volgende stappen

Indien definitieve conclusies getrokken moeten worden over de gezondheidseffecten van de blootstelling aan luchtvaartemissies stellen wij voor om expliciet in te zetten op het versterken van de volledige keten meting –> blootstelling –> effect.

Om de impact op de luchtkwaliteit beter te kunnen beoordelen adviseren wij:

1. Het huidige reken- en beoordelingskader methodologisch te verankeren door modellen structureel te valideren aan meetreeksen en bij alle kernuitkomsten expliciete onzekerheids- en gevoeligheids-analyses te rapporteren. De rapportage zou moeten aangevuld worden met dag- gemiddelden en piekconcentraties. Dit is zeker relevant voor UFP en VOCs. Time serie studies tonen aan dat voornamelijk respiratoire effecten, maar ook hospitaalopnames ten gevolge van cardiovasculaire effecten geassocieerd worden met korte termijn blootstellingen (Faustini et al, 2013, Ye et al, 2017).

2. Het stoffenpakket dient te worden uitgebreid met UFP (per grootteklasse), niet-vluchtige (inclusief hogere ringen), formaldehyde en geselecteerde metalen vermits die in andere studies in de wijdere omgeving van de luchthaven worden gedetecteerd (HGR, 2024). Voor platformmedewerkers is het ook relevant om emissies van OPE, aangevuld met relevante residuen van de-icingmiddelen en biociden te meten.

Om de doortaling naar gezondheidseffecten te maken adviseren wij:

1. Toetsing aan MTRs te doen voor de achtergrondconcentraties en luchtvaartgeassocieerde emissies samen en met alle bronnen rekening te houden die geassocieerd zijn met luchtvaartemissies.

2. Dat het beleid en onderzoek expliciet rekening houdt met mengselblootstelling. Omwonenden en werknemers worden in de praktijk blootgesteld aan een combinatie van VOS, UFP, OPE, metalen en PAK's, in combinatie met geluid, terwijl de gezondheidseffecten van dergelijke mengsels nog onvoldoende gekend zijn. Wij adviseren daarom een geïntegreerde aanpak waarin mengselprofielen expliciet worden gekarakteriseerd om van hieruit gidsstoffen af te leiden die dan in een meetnet kunnen worden geïntegreerd.

3. Om een nieuw gezondheidsonderzoek bij omwonenden op te zetten, geïnspireerd op de studie van sterftecijfers maar methodologisch geactualiseerd en gebaseerd op recente literatuurgegevens.

Om conclusies te kunnen trekken over de gezondheidseffecten als gevolg van luchtvaartemissies en te komen tot effectieve maatregelen formuleren wij op basis van de voorgaande analyse aanbevelingen langs twee sporen: (i) een pakket kortetermijn- en middellangetermijnmaatregelen dat de emissies in de grondfasen terugdringt en de blootstelling van omwonenden en werknemers vermindert en (ii) een meerjarig onderzoek dat de belangrijkste kennishiaten adresseert.

6.1 Aanbevolen onderzoeksprogramma (blauwdruk)

Hieronder doen wij, aan de hand van samenhangende werkpakketten, een voorstel voor de invulling van een onderzoeksprogramma dat de belangrijkste kennishiaten rond luchtvaartgerelateerde luchtverontreiniging en mogelijke gezondheidseffecten systematisch adresseert. Daarbij moet de nadruk liggen op het opbouwen van een robuuste, empirisch onderbouwde evidence base via (i) representatieve metingen (incl. UFP, uitgebreide PAK-profielen, VOS/oxy-VOS, metalen en deeltjesgrootteverdelingen) en (ii) geharmoniseerde en gevalideerde modellering, inclusief expliciete onzekerheids- en gevoeligheidsanalyses.

De andere onderdelen van het onderzoeksprogramma kunnen hierop voortbouwen door achtergrondniveaus en bronbijdragen te kwantificeren (source-apportionment), blootstelling en gezondheid/arbeid beter te onderbouwen (kwetsbare groepen en platformmedewerkers, pieken en cumulatie), en de resultaten te borgen via transparantie, governance en beleidsvertaling (open data, audit, periodieke syntheses, scenario's en MKBA-achtige afwegingen). Wij hebben in dit voorstel geen rekening gehouden de wettelijke verantwoordelijkheden, de bevoegdheidsverdeling en de concrete handhavings- en uitvoeringsarchitectuur (incl. institutionele rolverdeling tussen overheid, uitvoeringsdiensten en luchthavenactoren). Deze aspecten vergen een parallel traject om de onderzoeksagenda effectief te kunnen verankeren.

Werkpakket 1 - Metingen

- Richt een gecoördineerd meetnet in rond de grote en enkele regionale luchthavens met vaste stations in omliggende woonwijken (achtergrondlocaties en randen) en mobiele platforms (platform-micro-omgevingen, transecten dwars op taxi-routes).
- Meet UFP (aantalconcentraties per grootteklasse), uitgebreide PAK-profielen (inclusief BaP en hogere ringen), VOS waaronder formaldehyde en geselecteerde metalen.
- Zorg voor QA/QC-protocollen, kalibratie en een goede representativiteit in tijd (seizoenen, dagdelen) en ruimte (windsectoren).
- Wij adviseren om eerst de profielen te bepalen van VOS inclusief de oxy-VOS, metalen en fijnstof opgedeeld naar deeltjesgrootte. Het karakteriseren van het profiel van VOS, metalen, PAKs kan inzicht geven in de specificiteit van de met luchthavenverkeer geassocieerde emissies en immissies. Vanuit die profielen kunnen dan verder gidsstoffen worden afgeleid voor een meetnet.

Werkpakket 2 - Modelharmonisatie

- Integreer emissie- en concentratiemodellen tot een uniforme nationale methode. Neem APU, GSE, tank- en ontluchtingsactiviteiten, helikopters en zuigermotoren expliciet op. Ontwikkel scenario's voor operationele maatregelen (single-engine taxi, inzet van sleepwagens/TaxiBots, route-optimalisatie), GSE-elektrificatie en brandstofsamenstelling (zwavel- en aromatengehalte, SAF-bijmenging).
- Lever expliciete onzekerheids- en gevoeligheidsanalyses en publiceer parametersets voor externe toetsing.

Werkpakket 3 - Achtergrond en bronbijdrage

- Bepaal achtergrondconcentraties (urbaan en regionaal) en voer source-apportionment uit (receptor-modellen, isotopen of markers waar mogelijk) om luchtvaartsignalen te scheiden van overige bronnen.
- Rapporteer cumulatieve toetsingen aan bestaande EU-normen, WHO-richtwaarden en MTR's met expliciete onzekerheidsbanden.

Werkpakket 4 - Gezondheid en arbeid

- Koppel gemeten en gemodelleerde concentraties aan respiratoire, cardiovasculaire en perinatale eindpunten, met speciale aandacht voor kwetsbare groepen bij omwonenden en platformmedewerkers. Neem daggemiddelden, piekconcentraties en cumulatie mee.
- Werk met gestandaardiseerde protocollen voor gegevensbescherming en epidemiologische analyse, sluit aan bij het bestaande RIVM-UFP-programma en breid dit uit naar andere polluenten.
- De gezondheidseindpunten worden best gebaseerd op een uitvoerig literatuuronderzoek, en na berekening van het aantal studiedeelnemers die nodig zijn om voldoende statistische bewijskracht te kunnen geven. De studieopzet zou best grondig worden voorbereid samen met beleidsmakers en betrokkenen uit de regio.

Werkpakket 5 - Transparantie en governance

- Richt een publiek dashboard voor de grondactiviteiten in (UFP, PAK, formaldehyde, NO_2, PM) met open data, metadata en periodieke audit. Leg afspraken vast over datadeling, reproduceerbare scripts en een onafhankelijke begeleidingscommissie waarin wetenschap, uitvoeringsdiensten en omwonenden vertegenwoordigd zijn.

Werkpakket 6 - Synthese en beleidsvertaling

Zorg voor periodieke integrale rapportages waarin metingen, modellen en gezondheidsindicatoren gezamenlijk worden geïnterpreteerd en vertaald naar beleidsopties, inclusief maatschappelijke kosten-batenafwegingen en scenarioanalyses.

6.2 Beleidsopties op korte en middellange termijn

Korte termijn

- Volg de reeds besliste no-regretmaatregelen gericht op grondfasen op, versnel en handhaaf: strikte APU-restricties met verplichte inzet van FEGP/PCA en e-GPU, normering en handhaving van single-engine taxi waar operationeel veilig, inzet van sleepwagens/TaxiBots op geschikte trajecten, elektrificatie van GSE met passende laadinfrastructuur, en optimalisatie van taxiroutes om motorlooptijden en nabij-personeelsblootstelling te reduceren. De efficiëntie van deze maatregelen zal pas kunnen beoordeeld worden als de uitstoot van deze bronnen meegenomen wordt in de emissie en imissieberekeningen wat nu niet het geval is.

- Introduceer een sectorbrede minimalisatie- en informatieplicht voor de grondfases voor relevante ZZS en lanceer een publiek dashboard met externe audit.
- Het opvolgen en handhaven van de opgelegde maatregelen , zal de luchtkwaliteit ten goede komen, ook in de woonkernen in de nabijheid van de luchthaven.

Middellange termijn

- Na validatie en verbreding van de kennisbasis kan IenW eventuele emissiegrenswaarden (VOS, NO_x, PM, UFP) per luchthaven heroverwegen, gekoppeld aan duidelijke evaluatie- en escalatiemomenten.
- Ook kan gekeken worden naar ontwikkeling van luchtvaartspecifieke differentiatie in luchthavengelden op basis van luchtverontreinigende emissies in LTO- en grondfasen, naast bestaande prikkels voor geluid en klimaat.
- Voor arbeidsbescherming voor platformmedewerkers kan structurele borging via technische maatregelen nader worden uitgewerkt, zones met verhoogde alertheid en gerichte persoonlijke beschermingsstrategieën.

7. Conclusie

De huidige Nederlandse studies van TNO, NLR, Adecs en To70, aangevuld met recente RIVM-rapporten en het HGR-advies, geven relevante deelinzichten in emissies, immissies en mogelijke gezondheidseffecten rond luchthavens. De conclusie is dat onderzoeken zorgvuldig zijn uitgevoerd en op deelgebieden waardevolle conclusies opleveren. Het geaggregeerde beeld uit de geanalyseerde onderzoeken lijkt te wijzen op een beperkte impact van luchtvaartemissie op de lokale luchtkwaliteit, zeker in gebieden verder gelegen van de luchthaven. De onderzoeken leveren echter samen slechts een gedeeltelijk antwoord op de vraag in welke mate luchtvaartemissies bijdragen aan de lokale luchtkwaliteit en negatieve effecten hebben op de gezondheid van omwonenden en werknemers.

Op basis van de aangeleverde analyses kan die vraag niet eenduidig worden beantwoord en als gevolg kan niet worden uitgesloten dat de huidige luchtvaartemissies gezondheidsrelevante effecten veroorzaken. Daar zijn drie hoofdredenen voor: (1) beperkte validatie van modellen met metingen, met nadruk op jaargemiddelden en een beperkte stofkeuze; (2) een incompleet stoffenpakket, waarbij UFP, OPE en geselecteerde metalen onvoldoende worden meegenomen; en (3) een onvolledige bronneninventaris (APU, GSE, tank- en ontluchtingsactiviteiten, helikopters, zuigermotoren en andere luchthavengebonden bronnen) en onvoldoende inzicht in mengselblootstelling. De combinatie van deze factoren maakt dat de huidige modellen en metingen wel richting geven, maar nog niet toereikend zijn om risico's voor omwonenden en werknemers met voldoende zekerheid te kwantificeren.

De bewijsbasis is daarmee onvoldoende om gezondheidsschade met zekerheid uit te sluiten. Beleidsmatig wordt daarom een tweesporenaanpak geadviseerd: enerzijds directe emissiereductie van bekende bronnen, vooral in de grondfasen, en anderzijds een versnelde opbouw van een robuuste meet- en kennisinfrastructuur om resterende onzekerheden gericht te verkleinen. In dit rapport is dat uitgewerkt in een kortetermijnpakket van no-regretmaatregelen en een meerjarig onderzoeksprogramma waarin met name UFP, OPE, metalen en gezondheidseffecten expliciet worden meegenomen.

Concreet betekent dit ten eerste dat er blijvende aandacht moet gaan naar de verdere vermindering van emissies uit grondactiviteiten, met name vliegtuigen in taxifase en bagage- en passagierstransport op de tarmac. Het betrekken van de uitstoot van deze bronnen bij de berekeningen van luchvaartemissies zal een duidelijker beeld geven van de efficiëntie van deze maatregelen.

Ten tweede bevelen wij de organisatie aan van een meetnet voor immissies (VOS, UFP, PAK's en metalen) rond luchthavens, zowel voor validatie van modelberekeningen als voor continue monitoring in nabijgelegen woonkernen. Het gedetailleerd karakteriseren van het profiel van VOS, UFPmetalen en PAK's maakt het mogelijk de specifieke bijdrage van luchthavenverkeer beter te onderscheiden.

Ten derde bevelen we aan om bijkomende gegevens te verzamelen via een gezondheidsonderzoek om de associatie te bestuderen tussen blootstelling aan de combinatie van polluenten (en geluid) en gevoelige gezondheidseindpunten. Het RIVM-rapport over UFP rond Schiphol biedt hiervoor een voorlopig voorbeeld, maar dit zou uitgebreid kunnen worden naar meerdere polluenten en mengselprofielen, met inzet van exposoom-benaderingen en geavanceerde data-analysetechnieken.

Samen vormen deze drie lijnen een concreet handelingsperspectief om de tweesporenstrategie van emissiereductie en kennisopbouw daadwerkelijk te operationaliseren.

Bijlage – Bibliografie

- **TNO** (z.j.; 2023).
  Notitie luchtvaartemissies – methodiek en aannames; *Verkennende emissieberekeningen van Zeer Zorgwekkende Stoffen (ZZS) in de luchtvaartcontext*. Den Haag: TNO.

- **NLR – Koninklijk Nederlands Lucht- en Ruimtevaartcentrum** . (z.j.; 2023; 2024).
  Rapport over modellering en validatie in de omgeving van luchthavens; *Concentraties ZZS op en rondom luchthavens. Rapport CR-2023-148*; *Concentraties ZZS op en rondom luchthavens – PT-2 update*. Amsterdam: NLR.

- **Adecs / ADECS Airinfra**. (z.j.; 2023, versie 2.3; 2024, versie 3.0).
  Analyse luchtkwaliteit en emissies rond luchthavens; *Bijdrage van luchtvaart aan lokale luchtkwaliteit (NO_2, PM, SO_2, CO, VOS, ZZS)*.

- **To70** (z.j.; 2024).
  Evaluatie luchtvaartemissies en lokale luchtkwaliteit; *Effect van vlootvernieuwing op emissies in de periode tot 2035. Trendanalyse*. Rotterdam: To70 Aviation.

- **RIVM – Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu**.(z.j.; diverse jaren).
  Luchtkwaliteit en gezondheid nabij luchthavens: kennisoverzicht; *Ultrafijn stof (UFP) en gezondheid rond luchthavens; sterftepatroonanalyses*. Bilthoven: RIVM.

- **Hoge Gezondheidsraad (België)**. (z.j.; 2024).
  Advies luchtkwaliteit en gezondheidsimpact rond luchthavens; *Integraal advies luchtkwaliteit en geluid, met aandacht voor cumulatie en kwetsbare groepen*. Brussel: Hoge Gezondheidsraad.

- **Lefebvre, et al.** (2019).
  Modellering van ultrafijn stof door luchtverkeer en wegverkeer rond Brussels Airport. Vlaamse Milieumaatschappij.

- **Bendtsen, et al.** (2021).
  Organofosfaatesters (OPE) in de omgeving van luchthavens.

- **Pérez IA, García MÁ, Sánchez ML, Pardo N, Fernández-Duque B.**
  Key Points in Air Pollution Meteorology. Int J Environ Res Public Health. 2020 Nov 11;17(22):8349. https://doi.org/10.3390/ijerph17228349

- **Ye D, Klein M, Chang HH, Sarnat JA, Mulholland JA, Edgerton ES, Winquist A, Tolbert PE, Sarnat SE.** *Estimating Acute Cardiorespiratory Effects of Ambient Volatile Organic Compounds. Epidemiology.* 2017 Mar;28(2):197-206. doi: 10.1097/EDE.0000000000000607. PMID: 27984424; PMCID: PMC5285400.

- **Li, et al.** (2019).
  Afname van OPE-concentraties met afstand tot de luchthaven.

- **Abegglen et al. (2016).**
  Onderzoek naar de verspreiding van zware metalen in de bodem nabij luchthavens en de invloed van luchtvaartactiviteiten daarop.

- **Turgut et al. (2020).**
  Analyse van de concentraties van metalen in bodem en vegetatie rond Turkse luchthavens en de potentiële risico's voor de volksgezondheid.

- **Massas et al. (2018).**
  Evaluatie van e zwaremetalenvervuiling in stedelijke bodems in Griekenland en identificeerden de belangrijkste antropogene bronnen.

- **Brtnický et al. (2020).**
  Onderzoek naar het gehalte en de mobiliteit van zware metalen in bodems nabij transportinfrastructuur, waaronder luchthavens.

- **Rahim et al. (2019).**
  Studie naar de mate van metaalaccumulatie in bodem en planten nabij luchthavens in Pakistan en de implicaties voor milieu en gezondheid.

- **Turgut et al. (2019).**
  Vergelijking van de niveaus van zware metalen in verschillende milieucompartimenten (lucht, bodem, vegetatie) rond luchthavens.

- **Vlaamse Milieumaatschappij - VITO (2019).**
  Modellering van ultrafijn stof door luchtverkeer en wegverkeer rond Brussels Airport [Rapport; studie uitgevoerd door VITO in opdracht van VMM].

- **Peters, J., Van Laer, J., Frijns, E., & Berghmans, P. (2019).**
  Monitoring van de UFP-concentratie in de omgeving van Brussels Airport 2018–2019.

- **Faustini, A., Stafoggia, M., Colais, P., Berti, G., Bisanti, L., Cadum, E., Cernigliaro, A., Mallone, S., Scarnato, C., Forastiere, F., & EpiAir Collaborative Group. (2013).**
  Air pollution and multiple acute respiratory outcomes. European Respiratory Journal, 42(2), 304–313.