

Memo

Aan RIVM - Linda de Jong en Sander Jonkers
Van Mark Bolech en Stijn Dellaert
Onderwerp 060.67566 - Actualisering bronkarakteristieken
luchtvaart

www.tno.nl
mark.bolech@tno.nl
+31613018020

Datum
16 juli 2026
Onze referentie
TNO 2026 - 17124

Voorstel verbetering en actualisatie default emissiekarakteristieken GCN-sectoren en AERIUS Calculator

1. Inleiding

In Dröge et al. (2010) en Dröge & Koch (2022) worden bronkarakteristieken voor emissiebronnen bij de luchtvaart beschreven per GCN-sector. Het gaat hierbij om de volgende bronkarakteristieken: uittreedhoogte, warmte-inhoud en spreiding. Deze bronkarakteristieken kunnen worden gebruikt voor de verspreidingsmodellering van emissiebronnen in de luchtvaart.

De huidige default bronkarakteristieken voor luchtvaart die worden toegepast bij de monitoring van landelijke concentraties en deposities zijn ontleend aan Dröge & Koch (2022) en zijn opgenomen in AERIUS Calculator. Met AERIUS Calculator kunnen projectspecifieke berekeningen worden uitgevoerd voor de luchtvaart.¹

De huidige default bronkarakteristieken voor luchtvaart staan in **Tabel 1.1**.

Tabel 1.1: Huidige default bronkarakteristieken in AERIUS Calculator 2025.

AERIUS-sector	Uittreedhoogte	Warmte-inhoud	Spreiding	Temporele variatie
Stijgen	450 meter	0 MW	450 meter	Continue emissie
Landen	450 meter	0 MW	450 meter	Continue emissie
Taxiën	6 meter	0,04 MW	3 meter	Continue emissie
Bronnen luchthaventerrein	6 meter	0,04 MW	3 meter	Continue emissie

In de RIVM kennisnotitie KN-2025-0005 (Jonkers et al., 2025) worden suggesties gegeven voor verbeteringen en actualisatie van deze default bronkarakteristieken. Daarnaast wordt vermeld dat de bestaande AERIUS-sectorindeling niet volledig aansluit bij de GCN-sectorindeling. Het harmoniseren van deze sectorindeling kan onderbouwing en gebruik van de bronkarakteristieken eenvoudiger maken. Ook een recente vraag van NLR over de warmte-inhoud van APU's (Auxiliary Power Units) gaf aanleiding om de bronkarakteristieken te actualiseren.

In dit document beschrijven we een voorstel voor het actualiseren van deze default bronkarakteristieken op basis van de meest recente wetenschappelijke inzichten. Het doel is om te komen tot representatieve en goed onderbouwde emissiekarakteristieken van de luchtvaartbronnen.

¹ In de praktijk zal bij de modellering van luchtvaartbronnen waar mogelijk en gewenst worden uitgegaan van meer verfijnde emissiekarakteristieken. Dit sluit ook aan op wat in de Instructie Gegevensinvoer voor AERIUS Calculator 2025 van Bij12 (<https://www.aeriusproducten.nl/documenten/2025/10/7/instructie-gegevensinvoer-aerius-calculator-2025>) is aangegeven: "De modellering van luchtverkeer vereist specialistische kennis. De sector luchtvaart valt buiten de scope van deze instructie."

De karakteristieken kunnen worden gehanteerd voor:

- › De monitoring van de landelijke luchtkwaliteit (GCN kaarten) en depositie (AERIUS Monitor).
- › Als default bronkarakteristiek in AERIUS Calculator;

Daarbij worden als uitgangspunt de volgende GCN- en AERIUS-sectoren onderscheiden:

Tabel 1.2: Overzicht van de diverse GCN- en AERIUS-sectoren.

GCN-sector en emissieoorzaak	AERIUS sector	sector_description_NL	sector_description_EN
3610 Vluchtfase: Climb out	3610	Klimmen	Climb out
3610 Vluchtfase: Approach	3620	Dalen	Approach
3610 Vluchtfase: Idle	3630	Taxiën	Idle
3610 Vluchtfase: Take Off	3650	Opstijgen	Take Off
3620 Platform: APU	3660	APU	APU
3620 Platform: GSE en overige bronnen	3670	GSE en overige bronnen luchthaventerrein	GSE and other sources airport site

2. Aanpak

Bij het onderzoek naar verbetering en actualisatie van de default emissiekarakteristieken is allereerst gekeken naar de bestaande defaultwaarden en hun onderbouwing. Vervolgens is een kort literatuuronderzoek uitgevoerd om te onderzoeken of er nieuwe of betere (wetenschappelijke) inzichten beschikbaar zijn. Voor het bepalen van een representatieve (gewogen) gemiddelde warmte-inhoud voor de 4 vluchtfasen en de APU, is het CLEO model van TNO gebruikt (Dellaert & Hulskotte, 2017). In dit model zijn voor een groot aantal motortypen en APU-typen het brandstofverbruik per seconde opgenomen per vluchtfase. Daarnaast volgt uit dit model de verhouding in toepassing van de verschillende motortypen en APU-typen in Nederland. Het is goed daarbij op te merken dat de laatste jaren, onder andere door bredere inzet van gate-power, het gebruik van APU's is afgenomen.

In relatie tot de bronhoogte is het goed te vermelden dat reeds in Dröge et al. (2010) en Dröge & Koch (2022) werd opgemerkt dat een absolute bronhoogte in combinatie met een daadwerkelijke warmte-inhoud zeer waarschijnlijk tot een onjuiste verspreidingsmodellering van de emissies van vliegtuigmotoren (en APU) zou leiden omdat het gebruikte OPS-model emissiebronnen voorstelt als industriële schoorstenen. Daarom is voor de vluchtfasen ook een “effectieve bronhoogte” opgesteld. Hierin wordt de pluimstijging direct na emissie als gevolg van de warmte-inhoud van de pluim meegenomen. Op verzoek is ook in dit onderzoek altijd de “effectieve bronhoogte” gegeven. Bij gebruik van deze effectieve hoogte, zou in de verspreidingsmodellering dan **geen** warmte-inhoud moeten worden gebruikt om overschatting van de pluimstijging te voorkomen.

Op basis van de hierboven beschreven aanpak is een onderbouwd advies opgesteld voor de defaultwaarden van alle beschouwde categorieën bronkarakteristieken voor luchtvaart.

3. Actualisatie van bronkarakteristieken

3.1. Overzicht

Tabel 3.1 toont voor iedere GCN-sector de voorgestelde defaultwaarde voor de warmte-inhoud, effectieve bronhoogte en verticale spreiding. Als de emissiebron te vergelijken is met een industriële schoorsteen kan de absolute hoogte gebruikt worden in combinatie met de warmte-inhoud (de absolute

uitstoothoogte is opgenomen in de tabelbijlage). Emissies in de luchtvaart zijn in de meeste gevallen afkomstig uit turbinemotoren. In dat geval is het beter om de effectieve uitstoothoogte te gebruiken in de emissiemodellering en **niet** de warmte-inhoud op te geven (zie uitleg hierboven). De warmte-inhoud is wel relevant voor de geschatte of waargenomen effectieve uitstoothoogte, daarom wordt deze als onderbouwing wel genoemd.

Voor alle LTO vluchtfasen is de warmte-inhoud gebaseerd op het typische brandstofverbruik per seconde voor de verschillende vliegtuigmotoren zoals opgenomen in het CLEO model (Dellaert & Hulskotte, 2017). Per fase is een gewogen gemiddelde berekend (gewogen naar totaal brandstofverbruik) over alle vluchten in Nederland in 2024. Dit brandstofverbruik is vervolgens omgerekend naar een warmte-inhoud door te vermenigvuldigen met de energie-inhoud van jet fuel (43,5 MJ/kg) en te corrigeren voor het motorrendement. Het motorrendement ligt op ca. 40% tijdens take off, climb-out en approach, en rond de 20% tijdens idle. De onderkant en bovenkant van de ranges zijn gebaseerd op de gewogen gemiddelden van de 8 verschillende vliegtuigcategorieën (zie Time in Mode (TIM) categorieën zoals vermeld in Dellaert & Hulskotte, 2017). De categorie met typisch de laagste waarden is PISTON (vliegtuigen met zuigermotoren). De categorie met de hoogste waarden is JUMBO (passagiersvliegtuigen zwaarder dan 200 ton MTOW²).

Voor wat betreft gewogen gemiddelde aan warmte-inhoud moet opgemerkt worden dat er een aanzienlijk verschil tussen verschillende motortypen bestaat. Het gewogen gemiddelde dat in de tabel staat, wordt sterk beïnvloed door de karakteristiek van de zwaarste vliegtuigen. Een luchthaven die ook de allergrootste verkeersvliegtuigen afhandelt, heeft heel andere bronkarakteristieken dan een kleine regionale luchthaven waar vooral kleine propellervliegtuigen (vaak met zuigermotoren) gebruik van maken. In de tabel staat nu een zeer brede range aan warmte-inhouden (de grootste is ruim twee ordegroottes groter dan de kleinste). In de tabelbijlage wordt ook voor de 8 verschillende vliegtuigcategorieën de gewogen gemiddelde warmte-inhoud per vluchtfase gegeven.

Op verzoek van RIVM is er ook een (gewogen) gemiddelde bronkarakteristiek opgesteld voor alle emissiebronnen op het platform (APU en GSE). Hierbij is gekeken naar de verhouding in emissietotalen van NO_x tussen de emissiebronnen APU en GSE op verschillende Nederlandse luchthavens in recente jaren (2022-2024) volgens de cijfers van de Emissieregistratie³. Op basis van de gerapporteerde emissiecijfers is een verhouding van 1:1 voor APU en GSE gebruikt.

² MTOW: Maximum Take Off Weight

³ Zie <https://www.emissieregistratie.nl/data/vliegvelden>

Tabel 3.1: Warmte-inhoud van verschillende emissiebronnen toe te passen in combinatie met de effectieve bronhoogte (in de effectieve bronhoogte is de pluimstijging ten gevolge van warmte-inhoud verdisconteerd). De opgegeven getallen worden ingezet voor landelijke luchtkwaliteit- en depositiemonitoring en AERIUS calculator. De spreiding geeft de range aan voor verschillende (vliegtuig)categorieën. In de tabelbijlage worden getallen gepresenteerd voor absolute uitstoothoogte en warmte-inhoud en voor verschillende vliegtuigcategorieën. GCN-sector "Platform: totaal" wordt niet toegepast in AERIUS Calculator, maar wordt mogelijk toegepast in de berekeningen van de GCN-kaarten en AERIUS Monitor.

GCN-sector en emissieoorzaak	Toe te passen warmte-inhoud (MW)	Effectieve hoogte (m)	Spreiding (m)
3610 Vluchtfase: Climb out	0	450	450
3610 Vluchtfase: Approach	0	450	450
3610 Vluchtfase: Idle	0	20	10
3610 Vluchtfase: Take Off	0	50	20
3620 Platform: APU	0	20	10
3620 Platform: GSE en overige bronnen	0,14 (0,10 - 0,18)	1,5*	1,5
3620 Platform: totaal	0	12	6

* GSE heeft meestal een omhoog-gerichte uitlaat, waarbij de impuls van de pluim ervoor zorgt dat de bron effectief 1.5m hoger komt te liggen. Bij toepassing in OPS berekeningen wordt de pluimstijging door impuls echter niet in rekening gebracht, wanneer er ook sprake is van een warmte-inhoud.

Hieronder worden per GCN-sector de voorgestelde defaultwaarden toegelicht.

3.2. Vluchtfase: Climb Out

Er is gekeken of de in Dröge & Koch (2022) voorgestelde defaultwaarden voor de vluchtfase climb-out nog verdedigbaar zijn. Voor deze sector wordt geconcludeerd dat er geen reden is om een andere defaultwaarde voor te stellen voor de bronhoogte en spreiding. De gemiddelde bronhoogte van 450 meter is gebaseerd op de helft van de hoogte tot waar de LTO⁴ fase reikt (3.000 voet, ca. 900 meter). Deze bronhoogte is hiermee ook onafhankelijk van het type vliegtuig. Zeer waarschijnlijk is de bronhoogte in deze vluchtfase veel groter dan de daarop volgende pluimstijging, waardoor er naar verwachting maar een beperkte afwijking is wanneer als effectieve bronhoogte deze gemiddelde absolute bronhoogte wordt gebruikt.

De gemiddelde warmte-inhoud is afgeleid uit het brandstofverbruik zoals uitgelegd in paragraaf 3.1. De standaard bronkarakteristiek voor Climb Out wordt in de praktijk nauwelijks gebruikt omdat hiervoor vaak project- of luchthaven- specifieke gegevens worden toegepast.

3.3. Vluchtfase: Approach

Hiervoor gelden dezelfde overwegingen en defaultwaarden als voor de vluchtfase Climb Out.

3.4. Vluchtfase: Idle

Voor de idle fase is de absolute bronhoogte gelijk aan de afstand tussen de grond en de motoras.

Tabel 3.2 toont de typische motorhoogte van enkele veelvoorkomende vliegtuigtypen. De gemiddelde warmte-inhoud is afgeleid uit het brandstofverbruik zoals uitgelegd in paragraaf 3.1.

⁴ Landing and Take Off

Tabel 3.2: Motorhoogtes van enkele veel ingezette vliegtuigtypen.

Vliegtuigtype	Afstand motoras tot grond bij typisch startgewicht (meter)
Airbus A320	1,5
Airbus A330	2,0
Airbus A380	3,5 (buitenste motoren)
Boeing 737-800	1,3
Boeing 747-800	3,2 (buitenste motoren)
Boeing 787-800	2,3
Embraer 190	1,3

Voor de effectieve bronhoogte leverde het literatuuronderzoek geen direct gemeten of geobserveerde waarden op. Bennett et al. (2010) hebben weliswaar ook enkele pluimen tijdens het taxiën gemeten, maar deze zijn niet opgenomen in de resultaten van het paper. Pandey et al. (2023) hebben een modelstudie uitgevoerd waarin naast de take off fase, ook emissiepluimen van de taxi (idle) fase zijn gemodelleerd. Het model neemt hierin zowel de effecten van het momentum van de emissiepluim, alsmede het *buoyancy* ("drijfvermogen") effect van de warmte en lagere dichtheid van de emissiepluim ten opzichte van de omgevingslucht mee. De modelresultaten laten zien dat de emissies die tijdens taxiën vrijkomen stijgen tot ca. 10 – 30 meter boven de grond, afhankelijk van de windsnelheid en de snelheid van het vliegtuig zelf. Bij een lagere snelheid komt de pluim en de warmte van de pluim ruimtelijk geconcentreerder vrij. Hierdoor is de directe pluimstijging als gevolg van de warmte-inhoud groter dan wanneer de snelheid van het vliegtuig of de windsnelheid groter is. Als gemiddelde stellen we hier 20 meter voor als effectieve bronhoogte voor de idle fase. Deze defaultwaarde is relatief onzeker omdat er geen directe metingen of observaties beschikbaar zijn en de daadwerkelijke waarde afhankelijk is van een groot aantal factoren waaronder de omgevingstemperatuur, wind- en grondsnelheden en de warmte-inhoud van de emissiepluim.

Pandey et al. (2023) hebben ook een aantal modelberekeningen uitgevoerd voor vliegtuigen met "*shaft-based engines*", waarmee zij doelen op zuigermotoren, turboprop, en *turboshaft*-motoren. Deze motortypen worden typisch toegepast in kleinere vliegtuigen. De uitlaatgassen van dit type motoren krijgen weinig snelheid mee. Tegelijkertijd is het *buoyancy* effect kleiner dan bij turbofan motoren. De modelresultaten voor de idle fase liggen in dezelfde range als voor de turbofanmotoren. Op basis hiervan lijkt er geen goede reden om voor kleinere vliegtuigen af te wijken van de eerder voorgestelde defaultwaarde.

3.5. Vluchtfase: Take Off

Tijdens de take off fase maakt het vliegtuig vaart op de startbaan. De fase omvat dus een flinke range aan grondsnelheden (van 0 tot ca. 75 m/s). Tijdens deze fase is het motorvermogen maximaal en heeft de pluim daarmee de hoogste warmte-inhoud. De gemiddelde warmte-inhoud is afgeleid uit het brandstofverbruik zoals uitgelegd in paragraaf 3.1. Voor het afleiden van een effectieve bronhoogte kijken we allereerst naar de studies door Wayson et al. (2004; 2008). Deze LIDAR studies geven een goed inzicht in hoe de emissiepluim zich aan het einde van startbaan gedraagt. Zij komen tot een effectieve hoogte van 10,4 – 12,9 meter, en een verticale spreiding van ca. 5 meter. Pandey et al. (2023) bouwen in hun modelstudie voort op deze metingen en komen tot de conclusie dat er zó veel warmte in de take off uitlaatgassen zit, dat ondanks aanzienlijke verdunning zowel horizontaal als verticaal, er een 'bel' warmere uitlaatgassen overblijft die uiteindelijk op een hoogte tussen de 100 en 300 meter uitkomt.

Ook Bennett et al. (2010) bouwen voort op de studies van Wayson, maar zij gebruiken ook LIDAR observaties. Het belangrijkste verschil is dat zij de pluim ook op grotere (horizontale) afstand⁵ van de bron waarnemen en niet alleen aan het einde van de startbaan. Helaas presenteren Bennett et al. geen gemiddelde waarden, alleen de resultaten van een aantal individuele metingen. Een aantal representatieve metingen suggereert dat de pluimen bij de take off fase, na een periode dicht bij de grond te blijven door het Coandă effect, inderdaad verder stijgen, en dus ook ruim boven de inschattingen van Wayson et al. (2004; 2008) uitkomen. Het middelpunt van de pluim komt in de verschillende metingen uit rond de 30 – 70 meter. De verticale spreiding is daarbij ca. 30 meter in beide richtingen. Op nog grotere afstand van de bron vallen de pluimen uiteen en zijn deze met LIDAR niet meer van ruis te onderscheiden. Deze studie laat geen pluimhoogtes zien die substantieel boven de 100 meter uitkomen, waarmee de modelresultaten van Pandey et al. (2023) niet kunnen worden bevestigd. Als defaultwaarde stellen we hier een gemiddelde van 50 meter voor, met een spreiding van 30 meter. Dat de verticale spreiding typisch van dezelfde orde grootte is als de pluimstijging wordt bevestigd door modelresultaten van Barrett et al. (2013).

Voor *shaft-based engines* komen Pandey et al. (2023) voor de take off fase wel op andere modelresultaten dan voor de turbofanmotoren. De pluimstijging ligt zo'n 40% lager dan voor turbofanmotoren. Op basis van deze resultaten bevelen we aan om voor kleinere vliegtuigen als effectieve bronhoogte de onderkant van de eerder genoemde range te nemen, dus rond de 30 meter.

3.6. Platform: APU

De huidige waarde van de warmte-inhoud van APU emissies van 40 kW is aan de lage kant. De nieuwe voorgestelde defaultwaarde is afgeleid als het gewogen gemiddelde van het brandstofverbruik per seconde van de meest voorkomende APU typen (o.b.v. Watterson *et al.*, 2004). Dit brandstofverbruik is omgerekend naar een warmte-inhoud door te vermenigvuldigen met de energie-inhoud van Jet fuel (43,5 MJ/kg), gecorrigeerd voor het rendement (brandstofefficiëntie). Het rendement van een APU wordt geschat op ca. 20% (Ardiansyah et al. (2025) noemen een range van 15 tot 25%). Het gewogen gemiddelde komt dan op 1,38 MW warmte-inhoud. In de tabelbijlage worden ook de gewogen gemiddelde warmte-inhoud van APU's zoals gekoppeld aan de verschillende vliegtuigcategorieën getoond. Hiermee kan beter een representatieve waarde voor een specifiek vliegveld gekozen worden.

Chouak et al. (2022) geven een fraai overzicht van hoe luchtkwaliteit op en nabij een luchthaven wordt beïnvloed door APUs. In de modelstudie wordt een (absolute) bronhoogte voor de APU op 4 meter gekozen en uit het resterende werk wordt duidelijk dat de APU emissies beperkt stijgen (de studie gaat hier niet kwantitatief op in), tenzij ze door wind over obstakels als gebouwen worden geblazen. Er zijn verder geen studies bekend waarin de APU emissiepluimen zijn geobserveerd. Bij het inschatten van de effectieve uitstoothoogte baseren we ons deels op de figuren uit Chouak et al. (2022), in combinatie met de modelresultaten voor de idle fase uit Pandey et al. (2023). Een APU is ook een turbinemotor met hoge uittreedsnelheden, maar met een gemiddelde warmte-inhoud die ca. 3 maal lager is dan bij een typische turbofanmotor die stationair draait. Daarom verwachten we dat het *buoyancy* effect (warme lucht die door een lagere dichtheid opstijgt) bij de APU kleiner zal zijn dan tijdens de idle fase van een typische turbofan motor. Daarmee zou een lagere effectieve bronhoogte worden verwacht. Tegelijkertijd is de grondsnelheid lager (het vliegtuig staat typisch stil omdat de APU wordt uitgeschakeld zodra de vliegtuigmotoren zijn gestart) waardoor de pluim juist gemakkelijker stijgt omdat de warmte geconcentreerder vrijkomt. Gezien deze beide tegengestelde effecten stellen we dezelfde effectieve bronhoogte voor als voor de idle-fase, dus 20 meter (range 10 – 30 meter). Deze defaultwaarde is behoorlijk onzeker omdat er geen directe metingen of waarnemingen beschikbaar zijn.

⁵ Waaronder een observatie van een take off pluim op 950 meter horizontale afstand van de originele bronlocatie

3.7. Platform: GSE

Ground support equipment (GSE) is een brede categorie met een grote variëteit aan voertuigen en machines waaronder GPU's, tankwagens, pushback-trekkers, bussen, containerladers, transporters, luchtstart-eenheden (ASU's), waterwagens, toilet dienstvoertuigen, cateringvoertuigen, bandladers, passagierstrappen, de/anti-ijsvoertuigen, reddings- en brandbestrijdingsvoertuigen.

Binnen de categorie GSE, kunnen GPU (ground power units) wat betreft impact op sommige luchthavens een grote bijdrage hebben. Het voordeel van een GPU is het duidelijk hogere rendement vergeleken met een APU aan boord van het vliegtuig. Daarnaast hebben sommige moderne GPU's nabehandelingstechniek die nauwelijks mogelijk is bij een APU (typisch lichtgewicht en zeer compact). Om tot typische bronkarakteristieken te komen zijn een aantal GPU modellen opgezocht. Typische nominale motorvermogens liggen tussen 150 tot 250 kW. Grote vliegtuigen op de grotere luchthavens gaan echter vaker aan elektrische gate-power (lokaal uitstootvrij) waardoor de echt hoge vermogens GPU's ontbreken. Het voordeel van een elektrische GPU (gate-power) is vooral dat het rendement nog veel hoger ligt dan bij een GPU met dieselmotor (Ardiansyah et al., 2025) en dat lokale emissies wegvallen.

Voor de overige GSE-typen is een aantal modellen opgezocht van veelvoorkomende GSE voertuigen/machines, namelijk loaders, tractoren en de-icers. Typische nominale motorvermogens liggen tussen de 60 en 150 kW. Op basis van aangenomen motorbelasting en geldende inzichten in thermisch rendement van dieselmotoren is de typische warmte-inhoud van de uitlaatgassen ingeschat. De overschakeling op HVO100 voor dit soort materieel op de meeste grote luchthavens zorgt voor minder fijnstofuitstoot, maar heeft op warmte-inhoud en stikstofemissies nauwelijks invloed. Soms worden ook Air Start Units (ASU) gebruikt om bepaalde typen vliegtuigen te kunnen starten. De vermogens voor dit type apparaten kan aanzienlijk zijn (>400 kW), maar door het zeer beperkte aantal draaiuren van dit soort units, hebben ze een beperkte bijdrage aan de emissies.

De absolute uitstoothoogte ligt bij de meeste GSE rond de 1,5 meter. We nemen vervolgens een directe pluimstijging als gevolg van impuls aan, zoals beschreven voor mobiele werktuigen in sectoren HDO en industrie in Dröge & Koch (2022), waardoor de effectieve uitstoothoogte op 3 meter komt. Bij gebruik in OPS moet deze 1,5 meter door impuls niet worden meegenomen, waardoor de invoerwaarde voor de effectieve uitstoothoogte op 1,5 meter blijft.

4. Referenties

- Ardiansyah, L., Siagian, P., & Gunawan, H. (2025). Comparative Analysis Of The Efficiency Of Auxiliary Power Unit (APU) And Ground Support Equipment (GSE) On The Electrical System Of Airbus A320 Aircraft. *Jurnal Media Computer Science*, 5(1), 13–20. <https://doi.org/10.37676/jmcs.v5i1.9195>
- Barrett, S. R. H., Britter, R. E., & Waitz, I. A. (2013). Impact of aircraft plume dynamics on airport local air quality. *Atmospheric Environment*, 74, 247–258. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.03.061>
- Bennett, M., Christie, S., Graham, A., & Raper, D. (2010). Lidar Observations of Aircraft Exhaust Plumes. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 27(10), 1638–1651. <https://doi.org/10.1175/2010JTECHA1412.1>
- Chouak, M., Cantin, S., Seers, P., & Garnier, F. (2022). High-fidelity CFD modeling of pollutant dispersion from aircraft auxiliary power units (APUs) at a realistic airport and the effects on airport air quality. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 230, 105208. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2022.105208>

- Dellaert, S. N. C., & Hulskotte, J. H. J. (2017). Emissions of air pollutants from civil aviation in the Netherlands (TNO 2017 R10055).
- Dröge, R., Hulskotte, J. H. J., Visschedijk, A. J. H., Jansen, B. I., & Heslinga, D. C. (2010). Verbetering en onderbouwing van de emissiekaracteristieken van individueel en collectief geregistreerde bronnen (TNO UT-01108 2010). TNO.
- Dröge, R., & Koch, W. W. R. (2022). Update Emissiekaracteristieken GCN/GDN 2022 (TNO-2022-R11734). TNO.
- Jonkers, S., de Jongh, L., & van der Maas, C.W.M. (2025). Kennisnotitie Emissiekaracteristieken luchtvaart in AERIUS-Calculator (KN-2025-0005). RIVM. <https://doi.org/10.21945/RIVM-KN-20250005>
- Pandey, G., Venkatram, A., & Arunachalam, S. (2023). Accounting for plume rise of aircraft emissions in AERMOD. *Atmospheric Environment*, 314(September), 120106. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.120106>
- Pandey, G., Venkatram, A., & Arunachalam, S. (2024). Accounting for plume rise of aircraft emissions and shoreline meteorology enhances AERMOD's description of concentrations measured around Los Angeles airport. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 74(10), 726–742. <https://doi.org/10.1080/10962247.2024.2394104>
- Watterson, J., Walker, C., & Eggleston, S. (2004). Revision to the Method of Estimating Emissions from Aircraft in the UK Greenhouse Gas Inventory (Netcen/ED47052). Netcen.
- Wayson, R. L., Fleming, G. G., Kim, B., Eberhard, W. L., & Brewer, W. A. (2004). The Use of LIDAR to Characterize Aircraft Initial Plume Characteristics (FAA-AEE-04-01).
- Wayson, R. L., Fleming, G. G., Noel, G., MacDonald, J., Eberhard, W. L., McCarty, B., Marchbanks, R., Sandberg, S., & George, J. (2008). LIDAR Measurement of Exhaust Plume Characteristics from Commercial Jet Turbine Aircraft at the Denver International Airport (FAA-AEE-08-02).