

ULTRAFIJN STOF RONDOM SCHIPHOL

In woonwijken van Amsterdam en Amstelveen zijn concentraties van ultrafijn stof verhoogd.

MENNO KEUKEN, MARCEL MOERMAN, PETER ZANDVELD, BAS HENZING, BERT BRUNEKREEF EN GERARD HOEK*

Waarom onderzoek naar ultrafijn stof rondom Schiphol?

Veelal wordt aangenomen dat de invloed van luchtverkeer op de lokale luchtkwaliteit in de omgeving van Schiphol en andere luchthavens beperkt is. De concentraties van NO_2 en PM_{10} zijn weliswaar licht verhoogd, maar dit komt vooral door druk autoverkeer op en rondom de luchthaven. Recent internationaal onderzoek laat zien dat er forse hoeveelheden ultrafijne deeltjes worden uitgestoten door vliegtuigmotoren.¹ Ultrafijne deeltjes zijn kleiner dan 100 nm en blootstelling aan verhoogde concentraties zou tot gezondheidsproblemen kunnen leiden.² Tijdens het opstijgen worden er circa 10^{17} deeltjes per seconde uitgestoten door een Airbus 330 of een Boeing 767. De emissie van een opstijgend vliegtuig is vijftig maal hoger dan een dalend vliegtuig en honderd maal hoger dan een taxiënd vliegtuig. Echter, de uitstoot van een opstijgend vliegtuig is maar zo'n twintig seconden op de start-

baan en vervolgens nog eens zo'n tien seconden in de atmosferische laag tot enkele honderden meters hoog. Lang is daarom gedacht dat het wel meevalt met de bijdrage van vliegverkeer aan ultrafijne deeltjes in de omgeving van een vliegveld. Metingen laten echter zien dat ultrafijnstofconcentraties benedenwinds van vliegvelden aanzienlijk zijn verhoogd, tot een factor 4 op een afstand van 10 km.³ Dergelijke studies en eerder onderzoek langs een startbaan van Schiphol⁴ waren aanleiding voor het onderzoek naar ultrafijn stof rondom Schiphol in 2014 door TNO. Dit artikel bespreekt de resultaten.

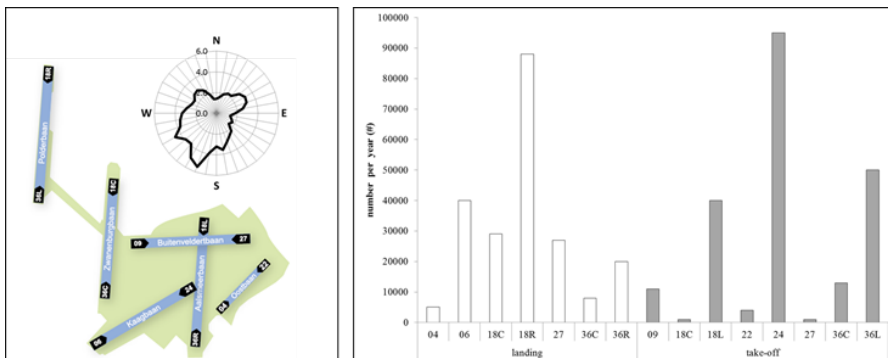
Het vliegverkeer op Schiphol

Schiphol was in 2012 de vierde luchthaven van Europa met 52 miljoen passagiers en 220.000 (landende en startende) vliegtuigen.⁵ Dit betekent dat gedurende 17 uur per dag er ongeveer elke 2 minuten een vliegtuig start en landt op Schiphol. De start- en landingsbanen, de verdeling van windrichtingen in 2012 en het baangebruik op Schiphol zijn weergegeven in figuur 1. Figuur 1 laat zien dat de meeste vliegtuigen *landen* op de Polderbaan in zuidelijke richting en de meeste vliegtuigen *vertrekken* van de Kaagbaan in

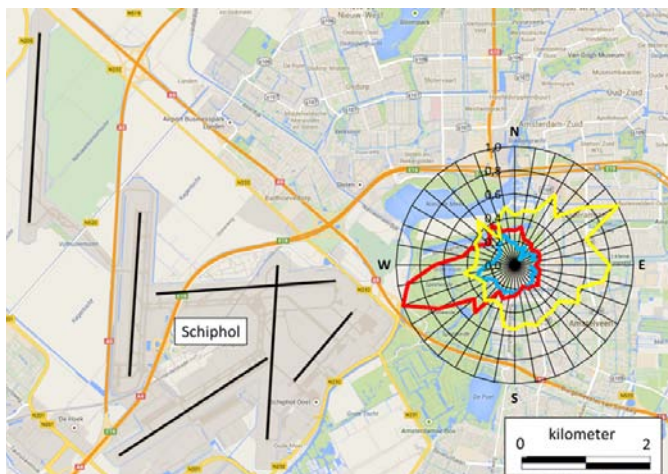
zuidwestelijke richting, gevolgd door de Polderbaan in noordelijke richting en de Aalsmeerbaan in zuidelijke richting. Het meeste vliegverkeer is tussen 6 uur 's ochtends en 11 uur 's avonds ('dagelijkse' uren) met circa 5% van het vliegverkeer in de overige uren ('nachtelijke' uren).

De aanpak van het onderzoek

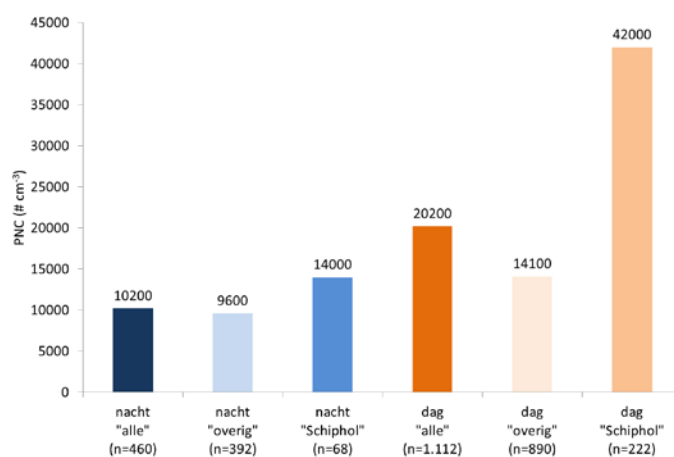
Op een meetlocatie in het Amsterdamse Bos circa 7 km ten oosten van Schiphol is de luchtkwaliteit gemeten van maart tot mei 2014. Verder zijn metingen uitgevoerd in 2012 op de regionale achtergrondlocatie in Cabauw opnieuw bekeken. Cabauw ligt circa 40 km ten zuiden van Schiphol in de buurt van Lopik. Op beide locaties zijn continu de aantallen gemeten van totaal aantal deeltjes ('particle number concentrations': PNC) en de deeltjesgrootteverdeling. Tegelijkertijd is de massa van roet (onvolledig verbrande brandstof) als elementair koolstof (Elementary Carbon, EC) gemeten. De uurgemiddelde meetresultaten van PNC en EC zijn gebruikt om windrozen te maken met gemiddelde concentraties per windrichting. Windrichtingen met hoge concentraties zijn een aanwijzing voor bronnen van PNC en EC bovenwinds van beide locaties. De deeltjesgrootteverdeling van PNC geeft informatie welke deeltjes qua grootte het meest voorkomen en geeft daarmee inzicht in de aard van de bronnen. De verspreiding van PN rondom Schiphol is gemodelleerd voor het jaar 2012 met een uur-tot-uur-versie van het standaard pluimmodel. Vervolgens is de concentratie PNC afkomstig van Schiphol berekend in woonwijken van Amsterdam en Amstelveen ten noordoosten van Schiphol.



Figuur 1: De start- en landingsbanen met baancodes en de verdeling van windrichtingen (%) in 2012 (links) en het aantal landende en startende vliegtuigen volgens de baancodes op Schiphol in 2012 (rechts).



Figuur 2: Genormaliseerde uurgemiddelde PNC en EC in het Amsterdamse Bos bij verschillende windrichtingen: voor EC in geel voor alle uren (n = 1.486) en voor PNC in blauw voor nachtelijke uren (n = 460) en in rood voor dagelijkse uren (n = 1.112).



Figuur 3: Uurgemiddelde PNC in het Amsterdamse Bos in maart-mei 2014 tijdens nachtelijke en dagelijkse uren (n) voor alle windrichtingen ('alle'), voor overige windrichtingen ('overig') en voor windrichtingen vanaf Schiphol: 240-270° ('Schiphol').

De resultaten van PNC en EC in het Amsterdamse Bos

De gemiddelde concentraties van PNC en EC in de meetperiode 12 maart t/m 19 mei 2014 in het Amsterdamse Bos waren respectievelijk 17.300 deeltjes per cm³ en 0,7 µg EC per m³. In Cabauw waren deze concentraties in 2012 voor PNC 9.600 deeltjes per cm³ en voor EC 0,5 µg per m³. De windrozen met uurgemiddelde PNC en EC in het Amsterdamse Bos zijn weergegeven in figuur 2.

Figuur 2 laat zien dat EC in het Amsterdamse Bos vooral is verhoogd bij windrichtingen uit Amsterdam en Amstelveen door roetemissies van wegverkeer. EC is nauwelijks verhoogd bij windrichtingen vanaf Schiphol. Daarentegen is PNC vooral overdag (en in mindere mate ook 's nachts) duidelijk verhoogd bij windrichtingen uit Schiphol (240-270°). De verdere discussie is daarom vooral gericht op ultrafijne deeltjes en niet meer op EC. In figuur 3 zijn de gemiddelde PNC tijdens dagelijkse en nachtelijke uren weergegeven voor windrichtingen uit Schiphol en overige windrichtingen.

Met de meetresultaten is de gemiddelde PNC berekend voor uren met 'overige' windrichtingen: 12.700 deeltjes per cm³ (n = 1.282). De gemiddelde PNC tijdens alle uren was 17.300 deeltjes per cm³ (n = 1.572). De gemiddelde verhoging van PNC in het Amsterdamse Bos tijdens de meetperiode was daarom

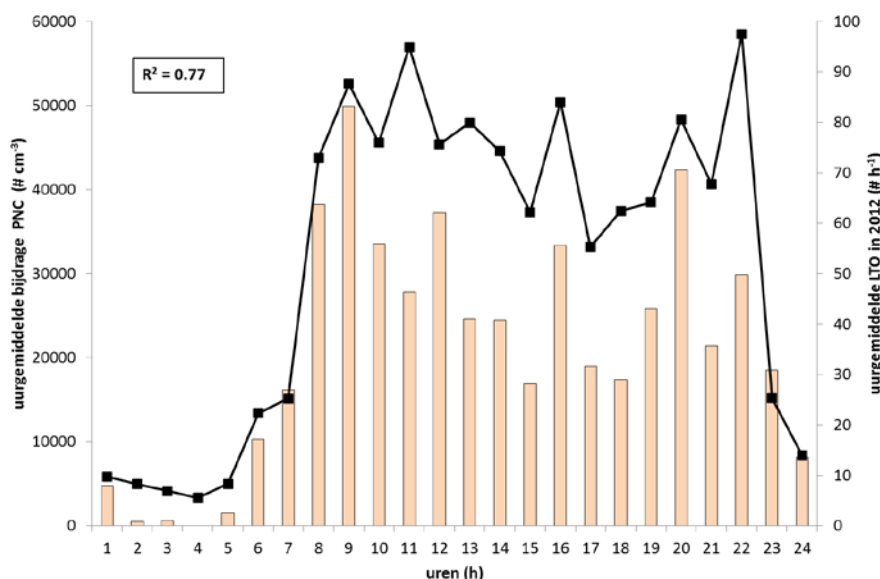
4.600 deeltjes per cm³. Figuur 3 laat zien dat tijdens dagelijkse uren met windrichtingen uit Schiphol, de gemiddelde PNC een factor drie hoger was dan in de overige windrichtingen: 42.000 tegen 14.100 deeltjes per cm³. Deze windrichtingen (240-270°) waren er gedurende 14% van de uren in de studieperiode.

De relatie tussen verhoogde PNC in het Amsterdamse Bos en vliegverkeer op Schiphol

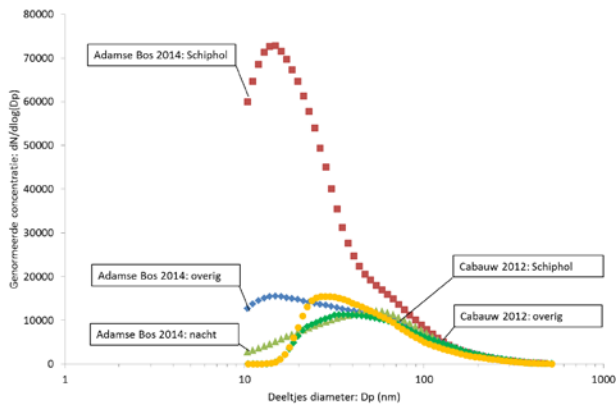
De uurgemiddelde bijdrage van Schipholemissies aan PNC-concentraties in het Amsterdamse Bos is berekend door de PNC-metingen te

'corrigeren' met de nachtelijke (9.600 deeltjes per cm³) en dagelijkse (14.100 deeltjes per cm³) achtergrondconcentraties. De verhoogde PNC in het Amsterdamse Bos bij windrichtingen vanaf Schiphol zijn weergegeven in figuur 4 samen met de intensiteit van het vliegverkeer gemiddeld over het jaar 2012.

De uurgemiddelde, verhoogde PNC in 2014 in het Amsterdamse Bos tijdens windrichtingen vanaf Schiphol komen goed overeen met het uurgemiddelde aantal vliegbewegingen op Schiphol in 2012 (R²: 0,77). PN-emissies door vliegverkeer leiden tot verhoogde PNC bene-



Figuur 4: Uurgemiddelde bijdrage aan PNC (linker Y-as) in het Amsterdamse Bos in maart-mei 2014 tijdens uren met windrichtingen vanaf Schiphol en het aantal vliegbewegingen per uur in 2012 (■) (rechter Y-as).



Figuur 5: De deeltjesgrootte verdeling van PNC in Cabauw en het Amsterdamse Bos.

denwinds van Schiphol op de meetlocatie Amsterdamse Bos.

De deeltjesgrootteverdeling van PNC in het Amsterdamse Bos en Cabauw

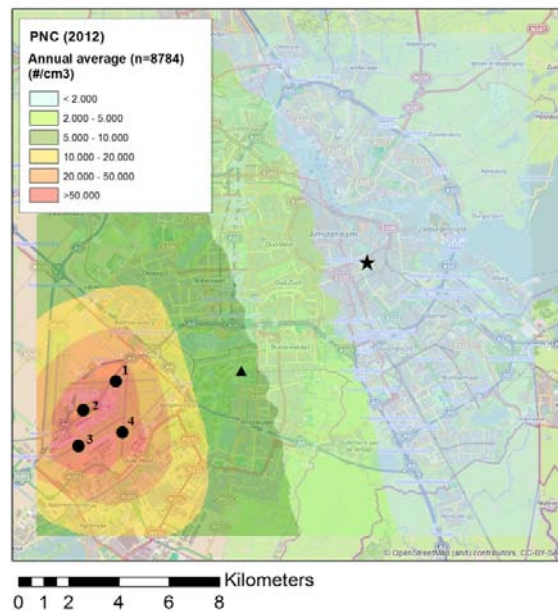
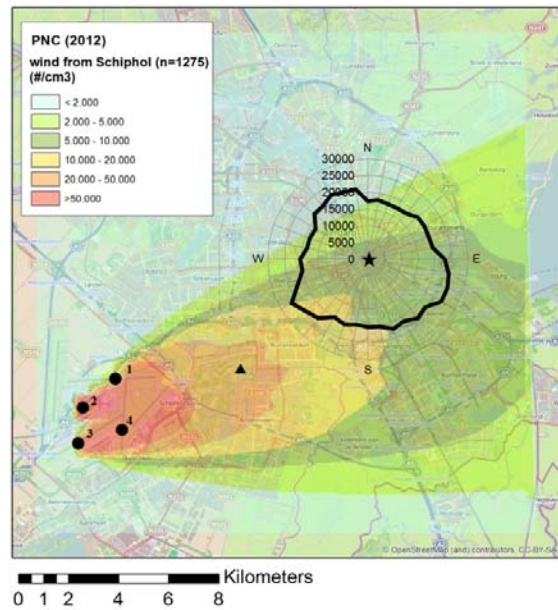
Vervolgens is de deeltjesgrootteverdeling van PN afkomstig van Schiphol onderzocht en vergeleken met die van PN in overige windrichtingen in het Amsterdamse Bos (2014) en op de achtergrondlocatie Cabauw (2012). De deeltjesgrootteverdeling van PNC is gemeten in grootteklassen van 10 tot 500 nm. De metingen in Cabauw zijn gemiddeld voor windrichtingen vanaf Schiphol (340-350°) en de overige windrichtingen. In het Amsterdamse Bos zijn de verdelingen gemiddeld voor PNC tijdens alle nachtelijke uren, terwijl voor de dagelijkse uren een onderscheid is gemaakt voor windrichting vanaf Schiphol en de overige windrichtingen. Deze vijf grootteverdelingen zijn weergegeven in figuur 5.

Figuur 5 laat zien dat de grootteverdeling van PNC in het Amsterdamse Bos bij windrichtingen vanaf Schiphol wordt gekenmerkt door een relatief hoge bijdrage van deeltjes van 10 tot 20 nm. Juist deeltjes kleiner dan 50 nm komen diep in de longen terecht. Bij Cabauw is de grootteverdeling bij windrichtingen vanaf Schiphol verschoven naar iets grotere deeltjes van 20 tot 40 nm tijdens de afstand die ze van Schiphol tot Cabauw hebben afgelegd. De grootteverdeling van ultrafijn stof in de windrichtingen van Schiphol is typerend voor verbrandingsemissies van benzine, diesel en kerosine. Kerosine heeft een gemiddeld zwavelgehalte van 400 mg per kg brandstof en daarom zijn

ultrafijne deeltjes in vliegtuigemissies voor een belangrijk deel zwavelzuur gemengd met koolstofdeeltjes en organische verbindingen. Ultrafijn stof in emissies van wegverkeer bestaat vooral uit smeerolie, koolstofdeeltjes en organische verbindingen en relatief weinig zwavelzuur vanwege het lagere zwavelgehalte van minder dan 10 mg per kg diesel en benzine. Verder is de deeltjesgrootteverdeling van PNC rondom een drukke snelweg vanaf enkele honderden meters vergelijkbaar met die van achtergrondconcentraties, terwijl zelfs op een afstand van 7 km van Schiphol de grootteverdeling in het Amsterdamse Bos nog wordt gedomineerd door deeltjes van 10 tot 20 nm. Dit illustreert de forse bronsterkte van ultrafijn stof op Schiphol.

Jaargemiddelde concentraties van PNC en blootstelling in Amsterdam en Amstelveen

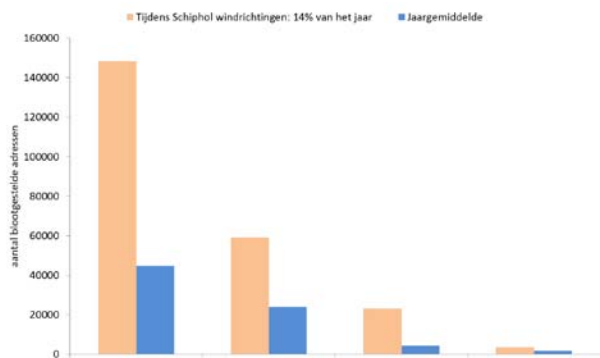
De verspreiding van ultrafijn stof afkomstig van Schiphol is berekend in woonwijken van Amsterdam en



Figuur 6: Bijdrage van PN-emissies van de Buitenveldertbaan (1), de Schipholgates (2), de Kaagbaan (3) en de Aalsmeerbaan (4) aan PNC ($\# \text{ cm}^{-3}$) in woonwijken in Amsterdam en Amstelveen in 2012. Boven: voor uren met windrichtingen van Schiphol ($n = 1.275$); Onder: jaargemiddelde bijdrage ($n = 8.784$). Verder zijn aangegeven de meetlocatie in het Amsterdamse Bos (▲) en een windroos met PNC gemeten in 2002-2004 op het dak van het Tropenmuseum (*).

Amstelveen ten noordoosten van Schiphol. Details van de modellering zijn beschreven in een artikel dat is opgestuurd voor publicatie naar een internationaal tijdschrift. De verspreiding van ultrafijn stof in 2012 is gemodelleerd voor alle uren ($n = 8.784$) en voor uren met windrichtingen vanaf Schiphol van 240 tot 270° ($n = 1.275$). De resultaten zijn weergegeven in figuur 6.

Figuur 6 laat zien dat de bijdrage aan PNC op Schiphol boven de 50.000 deel-



Figuur 7: Blootstelling van de bevolking aan extra PNC (#/cm³) afkomstig van Schiphol tijdens windrichtingen uit Schiphol (roze) en jaargemiddelde (blauw) in 2012.

tjes per cm³ is, zowel uur- als jaargemiddeld. Verder laat figuur 6 zien dat er vooral tijdens windrichtingen vanaf Schiphol, maar ook jaargemiddeld, een aanzienlijke verhoging is van PNC in woonwijken van Amsterdam en Amstelveen ten opzichte van de regionale achtergrond van 9.600 deeltjes per cm³.

Figuur 6 toont ook een windroos van PNC-metingen op het dak van het Tropenmuseum van november 2002 tot maart 2004, uitgevoerd door ECN in samenwerking met het IRAS en de GGD-Amsterdam.⁶ De verhoging bij windrichtingen vanaf Schiphol ten opzichte van de overige windrichtingen is circa 5.000 deeltjes per cm³. Dit komt goed overeen met de modelberekeningen voor 2012. Een tweede ondersteuning voor de berekeningen over 2012 is de vergelijking met de metingen in 2014 in het Amsterdamse Bos. De jaargemiddelde berekende en gemeten bijdrage was 6.200 (2012) respectievelijk 4.500 (2014) deeltjes per cm³ en tijdens uren met windrichtingen uit Schiphol 34.700 (2012) respectievelijk 27.900 (2014) deeltjes per cm³.

De ruimtelijke verdeling van PNC in figuur 6 is gebruikt om de blootstelling van de bevolking in te schatten. Hiervoor zijn de PNC-concentraties in cellen van 50*50 m gekoppeld met adresgegevens (woonadressen, kantoren, winkels) in deze cellen. De resultaten zijn weergegeven in figuur 7 voor jaargemiddelde blootstelling en voor piekblootstelling tijdens uren met windrichtingen uit Schiphol.

Figuur 7 laat zien dat een aanzienlijk deel van de 555.000 adressen in het

berekende gebied worden blootgesteld aan verhoogde PNC door emissies op Schiphol. In 2012 waren er bijvoorbeeld 20.000 adressen jaargemiddeld en 60.000 adressen tijdens 14% van de uren, blootgesteld aan twee- tot driemaal de regionale PNC door de bijdrage van Schiphol.

Gezondheidseffecten van de toename in ultrafijn stof?

Een panel van experts achtte op basis van studies met proefdieren, menselijke vrijwilligers en epidemiologisch onderzoek een causale relatie tussen blootstelling aan ultrafijn stof en sterfte waarschijnlijk. Deze inschatting wordt versterkt door een plausibel mechanisme (ontstekingsreacties in de luchtwegen). Het hiervoor genoemde panel van experts schatte op basis van de beschikbare literatuur dat een toename van de langetermijngemiddelde concentratie van 10.000 deeltjes per cm³ gemiddeld tot een toename in mortaliteit van 3% kan leiden. Een jaargemiddelde toename van 10.000-20.000 deeltjes per cm³ ten gevolge van Schipholemissies is berekend voor ongeveer 20.000 adressen nabij Schiphol. Dit zou op basis van de literatuur tot een toename van 3-6% in sterfte kunnen leiden, onder de aanname dat de uitgestoten deeltjes een zelfde toxiciteit hebben als de in eerdere epidemiologische studies onderzochte deeltjes. Dit is echter zeer onzeker. Daarom is nader onderzoek naar de gevolgen van verhoogde blootstelling aan ultrafijn stof in de omgeving van Schiphol en mogelijk andere luchthavens dringend geboden. Dit geldt te meer voor de gezondheid van mensen die op de luchthaven hun dagelijks werk verrichten.⁷

Conclusies en aanbevelingen

Het onderzoek laat zien dat Schiphol een bron is van ultrafijne deeltjes, waarvan de verspreiding tot verhoogde PNC leiden, onder andere in woonwijken van Amsterdam en Amstelveen ten noordoosten van Schiphol. Meer inzicht in blootstelling aan en gezondheidsef-

fecten van PNC op en rondom Schiphol is gewenst. Aan de hand daarvan kunnen dan mogelijk adviezen worden geformuleerd om de blootstelling te verminderen. Het verlagen van het zwavelgehalte in vliegtuigbrandstof is mogelijk een effectieve maatregel om de uitstoot van ultrafijn stof door vliegtuigen te verlagen.

Referenties

1. Masiol, M., Harrison, R.M. (2014). 'Aircraft engine exhaust emissions and other airport-related contributions to ambient air pollution: A review'. *Atmospheric Environment* 95, p. 409-455.
2. RIVM (2013). Ultrafijn stof en gezondheid. http://www.rivm.nl/Documenten_en_publicaties/Algemeen_Actueel/Brochures/Milieu_Leefomgeving/Ultrafijn_stof_en_gezondheid.
3. Hudda, N., Gould, T., Hartin, K., Larson, T.V., Fruin, S., 2014. 'Emissions from an International Airport increase particle number concentrations 4-fold at 10 km downwind'. *Environmental Science & Technology*, dx.doi.org/10.1021/es5001566.
4. Keuken, M.P., Henzing, J.S., Zandveld, P., Elshout, S. van den, Karl, M. (2012). 'Dispersion of particle numbers and elemental carbon from road traffic, a harbor and an airstrip in the Netherlands'. *Atmospheric Environment* 54, p. 320-327.
5. Schiphol, 2013. 'Jaarrapport' www.bezoekbas.nl.
6. Puustinen, A., Hämeri, K., Pekkanen, J., Kulmala, M., de Hartog, J., Meliefste, K., ten Brink, H., Kos, G., Katsouyanni, A., Kotronarou, A., Kavouras, I., Meddings, C., Thoma, S., Harrison, R., Ayres, J.G., Zee, S. van der, Hoek, G. (2007). 'Spatial variation of particle number and mass over four European cities'. *Atmospheric Environment* 41, p. 6622-6636.
7. Møller, K.L., Thygesen, L.C., Schipperijn, J., Loft, S., Bonde, J.P., Mikkelsen, S., Brauer, C. (2014). 'Occupational exposure to ultrafine particles among airport employees – combining personal monitoring and global positioning system'. *PlosOne* 9 (9), p. 1-7.

* Menno Keuken, Marcel Moerman, Peter Zandveld en Bas Henzing zijn werkzaam bij TNO. Bert Brunekreef en Gerard Hoek zijn werkzaam bij IRAS.