

Blootstelling aan ultrafijnstof

Nr. 2021/38-A2, Den Haag, 15 september 2021

Achtergronddocument bij:

Risico's van ultrafijnstof in de buitenlucht

Nr. 2021/38, Den Haag, 15 september 2021

Gezondheidsraad



inhoud

01	Kenmerken van ultrafijnstof	3
02	Meten en modelleren	6
2.1	Metten	6
2.2	Modelleren	7
03	Ultrafijnstof concentraties	10
04	Ontwikkeling in uitstoot en concentratie	14
	Literatuur	16

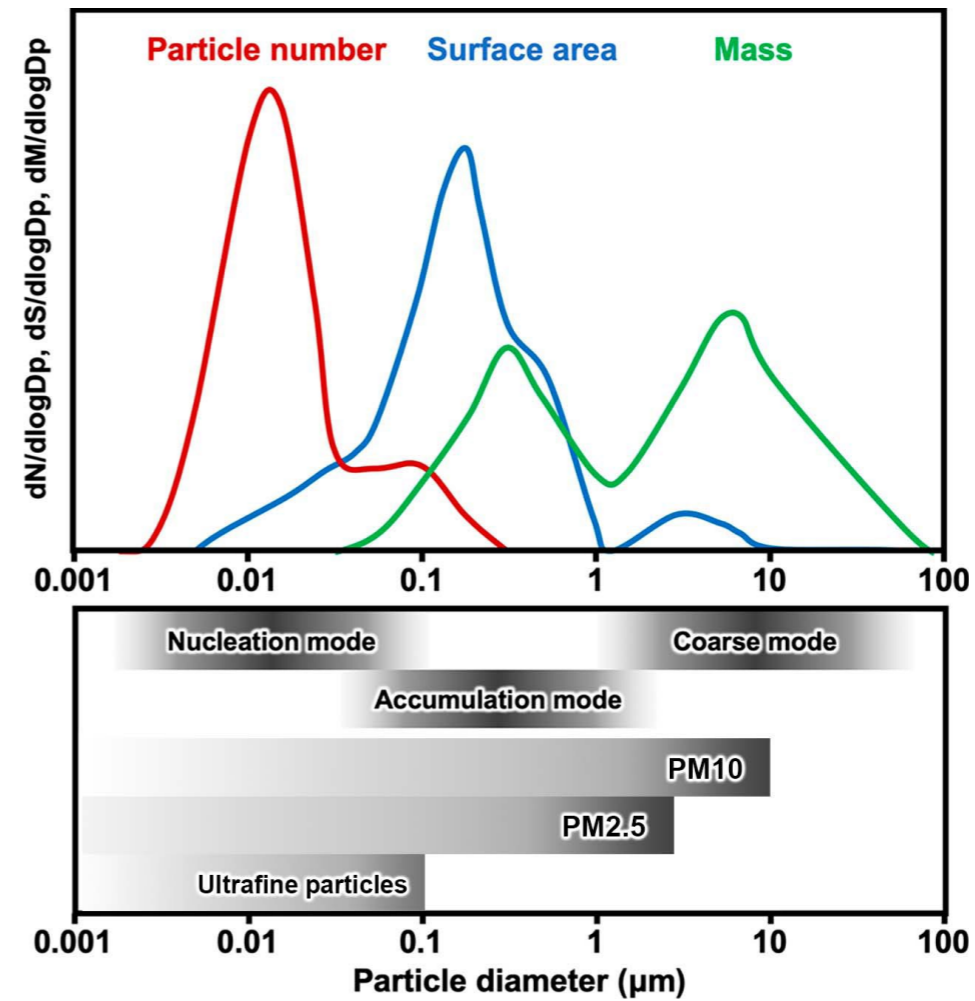


01 kenmerken van ultrafijnstof

Ultrafijnstof is een benaming voor deeltjes in de lucht met een diameter kleiner dan 100 nanometer (0,1 micrometer). Ultrafijnstof wordt ook wel PM_{0,1} genoemd en is onderdeel van fijnstof, dat is gedefinieerd op basis van de massa ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) van in de lucht zwevende deeltjes met een diameter kleiner dan 2,5 micrometer (PM_{2,5}) of kleiner dan 10 micrometer (PM₁₀). In dit advies wordt de internationale afkorting UFP (*ultrafine particles*) gebruikt.

Primair en secundair UFP

UFP is niet alleen een mengsel van deeltjes van verschillende grootte, maar ook van verschillende herkomst en samenstelling. Belangrijke bestanddelen zijn elementair koolstof (EC), metalen, organische koolstofverbindingen (OC) en zwavelverbindingen. De samenstelling varieert afhankelijk van de nabijheid van lokale bronnen. Zo is in de nabijheid van wegverkeer relatief veel elementair koolstof (EC) aanwezig, in bosrijke gebieden relatief veel organisch koolstof (OC, gevormd uit vluchtige organische verbindingen zoals terpenen) en in de wijde omgeving van luchthavens sulfaat, dat wordt gevormd uit zwavelhoudende precursorverbindingen.¹



Figuur 1 Deeltjesgrootteverdeling van atmosferisch PM uit Kwon¹

Er wordt daarnaast onderscheid gemaakt tussen primair en secundair ultrafijnstof. Primair UFP wordt rechtstreeks door bronnen uitgestoten als deeltjes en ontstaat vooral door onvolledige verbranding. Daarnaast dragen ook remmen en optrekken van wegverkeer (slijtageprocessen) bij aan de uitstoot van primair UFP.² Primaire UFP-deeltjes hebben een wat grotere diameter dan secundaire UFP-deeltjes, die ook wel *newly formed particles* (NFP) worden genoemd. Secundair UFP wordt in de lucht



gevormd door reacties van gassen, waaronder zwavelhoudende en organische gasvormige verbindingen, ammoniak en stikstofoxiden. Door oxidatie en vervolgens condensatie van deze gassen ontstaan deeltjes van molecuulgrootte, die snel via nucleatie aangroeien tot UFP-deeltjes kleiner dan 20 nanometer (=0,02 micrometer). Deze deeltjesgrootte wordt daarom de nucleatiefase genoemd. Een deel van de gassen condenseert op al in de lucht aanwezige deeltjes, wat leidt tot toename van de deeltjesgrootte. Naast condensatie draagt ook coagulatie (samenklontering) bij aan de groei van deeltjes in de lucht, die vervolgens verder aangroeien door onderlinge reacties.

Dit geldt overigens ook voor primaire ultrafijnstofdeeltjes. Ultrafijnstofdeeltjes zijn dus continu aan verandering onderhevig; na een korte verblijftijd (minuten tot uren) in de atmosfeer, kunnen ze uitgroeien tot 'gewone' fijnstofdeeltjes. Tegelijkertijd worden er in de atmosfeer ook continu nieuwe secundaire UFP-deeltjes gevormd uit gasvormige verbindingen. Mede doordat UFP-deeltjes continu uit de atmosfeer verdwijnen en worden gevormd, varieert de UFP-concentratie veel sterker dan de PM10- en PM2.5-concentratie in ruimte en tijd; dat geldt met name voor deeltjes in de nucleatiefase (kleiner dan 20 nm).^{3,4}

Correlatie met andere componenten

UFP is onderdeel van PM10 en PM2.5, waarvoor wettelijke grenswaarden en gezondheidskundige advieswaarden zijn opgesteld. Daarnaast zijn er, zoals beschreven in het hoofddocument, overeen-

komsten (en verschillen) tussen UFP en roet. Voor onderzoek en beleid is daarom de vraag relevant wat de samenhang (correlatie) is tussen de UFP-concentratie en de concentratie PM2.5 en roet. Hoe sterker die in tijd en ruimte met elkaar samenhangen, hoe kleiner de meerwaarde van het meten van beide componenten en hoe moeilijker de beoordeling van de gezondheidseffecten van beide componenten afzonderlijk. De sterkte van de correlaties wordt gedefinieerd op basis van de correlatiecoëfficiënt R: lage correlatie ($R < 0,40$), matige correlatie ($R \geq 0,40$ en $< 0,70$) en hoge correlatie ($R > 0,70$).⁵

Bij wegverkeer als bron is de correlatie tussen UFP en roet hoog; dit geldt niet voor UFP-deeltjes met een zwavelkern, zoals in de nabijheid van vliegverkeer. In het Schiphol-onderzoek was de correlatie (R) tussen de op schoolpleinen in Aalsmeer en Badhoevedorp gemeten daggemiddelde roet- en *particle number concentration* (PNC) slechts 0,18.⁶ De correlatie tussen uurgemiddelde PNC en PM2,5-concentraties in een groot aantal steden varieert van $R=0,08$ in Barcelona tot maximaal 0,39 in Helsinki.⁷ Met name de correlatie met de allerkleinste UFP-deeltjes is laag; naarmate de deeltjesgrootte toeneemt, neemt de correlatie met PM2,5 toe.⁸ Naarmate de tijdsduur waarover de concentratie wordt bepaald toeneemt, neemt de correlatie tussen PN- en PM2,5-concentratie toe, althans in steden. Veel bronnen (zoals wegverkeer) stoten zowel UFP als PM2,5 uit; in de buurt van die bronnen is de PNC veel sterker verhoogd (ten opzichte van de achter-



grond) dan de PM_{2,5}-concentratie. Dat resulteert in een lage correlatie tussen uurgemiddelde (en in iets mindere mate daggemiddelde) UFP- en PM_{2,5}-concentratie. Beschouwd over een langere periode, bijvoorbeeld een jaar, dan is de op verschillende locaties gemeten correlatie tussen UFP en PM_{2,5} beduidend hoger; kortetermijnfluctuaties in lokale bijdrage en in achtergrondconcentratie, die sterk afhankelijk zijn van het weer (windrichting, windsnelheid) middelen over langere termijn uit.

Ter illustratie; in de periode 2002-2004 werd zowel PM_{2,5} als PNC continu gemeten op een achtergrondlocatie in Amsterdam, namelijk op het dak van het Tropenmuseum. De correlatie (R) tussen de uurgemiddelde PN- en PM_{2,5}-concentratie was slechts 0,19. De mediane R tussen de in diezelfde periode bepaalde langetermijn-PN- en PM_{2,5}-concentratie nabij 50 woningen verspreid over de stad (op basis van metingen gedurende een week en temporele correctie) was 0,66.⁹ In een recente studie in Pittsburgh werd, op basis van metingen op 32 locaties, een gemiddelde R van 0,36 gevonden tussen uurgemiddelde PM_{2,5}- en PN-concentratie. De gemiddelde R tussen de langetermijnconcentratie (gemiddelde in de winter) was 0,64.¹⁰ Er was een ruimtelijke samenhang tussen de langetermijn-PN- en PM_{2,5}-concentratie in Pittsburgh, als gevolg van de aanwezigheid van bronnen die zowel UFP als PM_{2,5} uitstoten. Hoe grover de ruimtelijke schaal waarop gemodelleerd wordt, hoe hoger de correlatie tussen UFP en PM_{2,5}.



02 meten en modelleren

Omdat ultrafijnstofdeeltjes zo klein zijn dat ze nauwelijks massa hebben, is het bij de concentraties die in de buitenlucht heersen vrijwel onmogelijk om de concentratie via wegingen te meten en uit te drukken in microgram/m³. Soms wordt de concentratie uitgedrukt als *surface area*: het totale oppervlakte van de ultrafijne deeltjes of als *lung deposited surface area*. Maar meestal wordt de concentratie UFP uitgedrukt op basis van het aantal deeltjes per volume-eenheid (cm³). Er zijn verschillende methoden voor het meten van de PN-concentratie; deze verschillen in de ondergrens en ook de bovengrens van de deeltjesgrootte.

2.1 Meten

Het betrouwbaar meten van UFP in de buitenlucht is technisch ingewikkeld en kostbaar, onder meer omdat de meetmethode gevoelig is voor vocht (waterdruppeltjes). Apparatuur om deeltjesaantallen te meten bestaat al sinds de jaren '70, maar de ondergrens van de deeltjesgrootte is in de loop der jaren afgenomen van >10 nm naar 2 nm door de verbeterde technologie.⁵ Een scherp gedefinieerde bovengrens ontbreekt, wat in de praktijk betekent dat ook deeltjes >100 nm worden meegeteld. Dit heeft weinig invloed op de PN-concentratie, omdat deze voor het grootste deel wordt bepaald door deeltjes <100 nm.^{3,11} Dit wordt geïllustreerd in figuur 1 in hoofdstuk 1. Die illustreert ook dat de onder-

grens wél van invloed is op de PN-concentratie; hoe lager de ondergrens van de meetmethode, hoe hoger de PN-concentratie. Dit geldt vooral nabij bronnen.

Sensoren en ander optische deeltjestellers zijn (nog) niet in staat om deeltjes in de ultrafijne fractie te detecteren; daarnaast zijn ze zeer gevoelig voor vocht. Het is daarom niet mogelijk PN-concentraties met sensoren te meten.

Ultrafijnstof wordt niet routinematig gemeten in het Landelijk Meetnet Luchtkwaliteit (LML), met uitzondering van één meetstation (Amsterdam-Osdorp), waar in de periode 2018 t/m 2021 routinematig UFP (het aantal deeltjes >7 nm/cm³) wordt gemeten door de GGD Amsterdam.

Tot medio 2019 gebeurde dit als onderdeel van het RIVM-onderzoek naar gezondheidseffecten van Schiphol, daarna in opdracht van de gemeente Amsterdam.

Daarnaast worden metingen van de deeltjesgrootteverdeling uitgevoerd door onder meer TNO in het kader van diverse internationale (o.a. EUCAARI, TRANSPHORM, ACTRIS) en nationale (Ruisdael) onderzoeksprojecten. Sinds 2005 worden metingen uitgevoerd op regionaal achtergrondstation Cabauw (provincie Utrecht). Deze metingen maken geen onderdeel uit van het LML. Voor het Europese onderzoeksprogramma ACTRIS zijn recent ook in Ludjewad (Noord-Groningen)



metingen van de deeltjesgrootteverdeling gestart. Deze metingen dienen onder meer als input (calibratie) voor het ontwikkelen van grootschalige verspreidingsmodellen samen met andere Europese landen.

Ook in andere landen in en buiten Europa wordt UFP nauwelijks routinematig gemeten; dit is mede een gevolg van het ontbreken van grenswaarden. Daardoor is er geen verplichting is voor het meten van UFP.

Bij toetsing aan wettelijke grenswaarden is het noodzakelijk om volgens Europese standaarden te meten. Dit gebeurt op automatische meetstations in het LML en andere Europese meetnetten voor onder andere de componenten PM10, PM2,5 en NO₂. De Europese standaarden garanderen dat de gemeten concentraties met de vereiste nauwkeurigheid worden gemeten.

Hoewel er geen wettelijke grenswaarden zijn voor ultrafijnstof is er sinds 2016 wel een Europese standaard voor het meten van de PN-concentratie in de buitenlucht (EN 16976). De ondergrens is 7 nm; er is geen duidelijke bovengrens: die is gedefinieerd als 'enkele micrometers'.¹² Sinds maart 2020 is er ook een Europese standaard voor het meten van de deeltjesgrootteverdeling (met SMPS) (EN-17434).¹³ Deze standaard schrijft voor hoe in deeltjesgrootten tussen 10 en 800 nm moet worden gemeten met een *Mobility Particle Size Spectrometer*. Als er Europese regelgeving voor

UFP zou komen, dan moet de gebruikte apparatuur in meetnetten aan deze meetstandaarden voldoen.

In de diverse studies en onderzoeksprojecten worden verschillende soorten apparatuur en *Condensation Particle Counters* (CPC) met vaak verschillende ondergrens gebruikt.³

2.2 Modelleren

In Nederland worden emissiefactoren van voertuigen, vaartuigen, mobiele werktuigen en andere bronnen voor onder andere PM10, PM2,5, stikstofoxiden en EC (als fractie van PM2.5) jaarlijks vastgesteld en als input gebruikt voor het uitvoeren van luchtkwaliteitsberekeningen. Voor UFP gebeurt dit niet. Er vindt voor UFP dus ook geen jaarlijkse monitoring plaats van de nationale emissies via de emissieregistratie, via grootschalige concentratiekaarten (GCN-kaarten) en van lokale concentraties via de monitoringstool. Daardoor is het inzicht in de (ontwikkeling van de) uitstoot, bronbijdragen en blootstelling beperkt. Dat bemoeilijkt het uitvoeren van onderzoek naar de gezondheidseffecten van ultrafijnstof, dat nodig is om uiteindelijk wettelijke grenswaarden te kunnen vaststellen. Wel zijn er grootschalige verspreidingsmodellen ontwikkeld in het kader van Europese projecten en zijn in het verleden ook emissiefactoren voor diverse typen bronnen afgeleid.^{14,15,16}



Er kan onderscheid worden gemaakt tussen modellen op basis van uitstoot en verspreiding (chemisch transportmodellen, dispersiemodellen) en empirische modellen op basis van metingen (zoals LUR-modellen, Kriging).

Chemisch transportmodellen

Chemisch transportmodellen (CTM) worden gebruikt om grootschalige achtergrondconcentraties te berekenen op basis van de uitstoot, verspreiding, verdunning en chemische eigenschappen van de te modelleren stof die de vorming en verwijdering uit de lucht bepalen (reactiesnelheden, depositiegedrag en -snelheden).

In Europa wordt het CTM-model PMCAMx-UF gebruikt om de bijdrage van primair UFP en de vorming van secundair UFP aan de PN-concentraties te bepalen.^{17,18,19} Dit model berekent zowel het totale aantal deeltjes als het aantal deeltjes >10 nm, >50 nm en >100 nm op een grid van 36 x 36 km in 14 verticale lagen tot een hoogte van 6 km. Het model wordt gecalibreerd aan metingen van de deeltjesgrootteverdeling op regionale achtergrondstations in Europa, waaronder het KNMI-meetstation in Cabauw in de provincie Utrecht. Hier worden door TNO metingen met SMPS uitgevoerd in het kader van Europese onderzoeksprojecten.

Dispersiemodellen

Dispersiemodellen berekenen de bijdrage van een specifieke bron op gedetailleerde ruimtelijke schaal. Op basis van emissiefactoren, de exacte locatie van de bron(nen), meteorologie en locatiespecifieke kenmerken die de verspreiding beïnvloeden, wordt de bronbijdrage op receptorpunten berekend. In Nederland zijn dispersiemodellen beschikbaar voor binnenstedelijk wegverkeer, snelwegverkeer, puntbronnen (zoals industrie en veehouderijen) en binnenvaart. Geen daarvan is 'standaard' in staat om UFP-bijdragen te berekenen, omdat de emissiefactoren voor UFP die daarvoor nodig zijn ontbreken. Als onderdeel van het RIVM-onderzoek naar UFP rondom Schiphol is een dispersiemodel ontwikkeld om de bijdrage van vliegverkeer aan de PN-concentraties te bepalen.

De emissiefactoren voor vliegverkeer zijn afgeleid van die voor PM10 en het model is geïkt op basis van metingen in de omgeving.²⁰

Op vergelijkbare wijze zijn op basis van meetcampagnes in Rotterdam en Amsterdam PN-bijdragen van wegverkeer en industrie gemodelleerd.^{21,22}

Land Use Regression modellen

Land Use Regression (LUR)-modellen worden veel gebruikt om de ruimtelijke variatie in de blootstelling te schatten ten behoeve van epidemiologisch onderzoek. In de meeste studies naar langetermijneffecten van UFP wordt de blootstelling geschat op basis van LUR-modellen, zoals is weergegeven in tabel 1 in het achtergronddocument *Gezondheidseffecten ultrafijnstof*. LUR-modellen zijn



multivariate lineaire regressiemodellen waarbij de variatie in concentratie (gemeten op enkele tientallen tot honderden locaties) wordt verklaard op basis van kenmerken van de locatie zoals intensiteit van bebouwing, hoeveelheid groen en water in de nabije omgeving, afstand tot (snel) wegen, hoeveelheid verkeer binnen een bepaalde afstand etc. Met die modellen kan vervolgens voor elke plek in een stad de concentratie worden voorspeld op basis van de verklarende variabelen. Omdat op veel plekken metingen moeten worden uitgevoerd, zijn dit per definitie kortdurende metingen, die mobiel (met meetapparatuur in auto, op de fiets of lopend)^{23,24} of stationair worden uitgevoerd, bijvoorbeeld met meetapparatuur in een geparkeerd voertuig²⁵ of met meetapparatuur aan de gevel van woningen.⁹ Op basis van continue metingen op een vast meetpunt wordt gecorrigeerd voor temporele variatie. In Nederlandse steden zijn LUR-modellen voor UFP opgesteld in Amsterdam, Utrecht en Maastricht.^{25,26,23} LUR-modellen worden vooral gebruikt om de binnenstedelijke variatie te modelleren, maar onder meer in Nederland is nu ook een LUR-model ontwikkeld dat de regionale achtergrondconcentratie modelleert met een combinatie van mobiele metingen en achtergrondmetingen.²⁷

Kriging-modellen

Modellen gebaseerd op interpolatie van metingen, bijvoorbeeld Kriging-modellen, worden gebruikt om achtergrondconcentraties op grotere schaal te modelleren. Kriging is een geostatistische techniek

voor interpolatie van metingen. De aanname die hierbij wordt gedaan is dat elke meetlocatie informatie bevat over dichtbij gelegen locaties en representatief is voor eenzelfde ruimtelijk gebied.

Voor- en nadelen

Met LUR-modellen en Kriging-modellen kan op basis van metingen relatief eenvoudig en zonder aannames over emissiefactoren de ruimtelijke verdeling in beeld worden gebracht. Het nadeel is dat er veel metingen uitgevoerd moeten worden, die moeilijk op een grote schaal kunnen worden gedaan. Chemisch transportmodellen en dispersiemodellen vereisen aannames over emissiefactoren en kenmerken die de verspreiding beïnvloeden; voor veel bronnen zijn die emissiefactoren nog grotendeels onbekend. Het voordeel van CTM en dispersiemodellen is dat hiermee ook toekomstige scenario's en effecten van maatregelen kunnen worden doorgerekend.

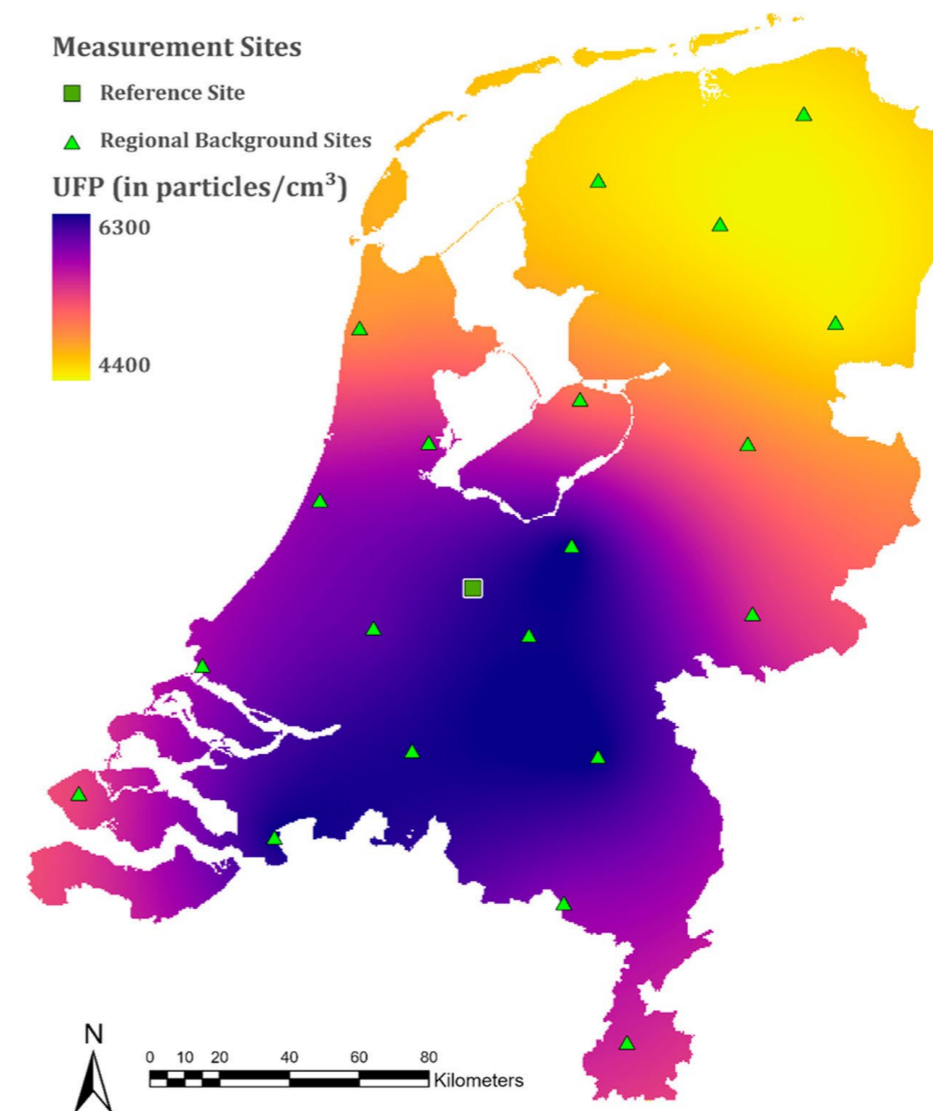


03 ultrafijnstof concentraties

De kennis over UFP-concentraties in Nederland is afkomstig van onderzoek en meetcampagnes door TNO, RIVM, GGD Amsterdam en Universiteit Utrecht, al dan niet in combinatie met modelberekeningen. Deze studies variëren onder meer in meetmethoden (inclusief de bemonsterde deeltjesgrootten) en meetperiode (korte campagnes versus langdurige, wel of geen vertaling van kortdurende metingen naar een jaargemiddelde) en moeten daarom als indicatie voor de blootstelling worden gezien en niet als absolute niveaus, omdat meetmethoden en meetperiode van invloed (kunnen) zijn op de gemeten PN-concentraties. De regionale achtergrondconcentratie is recent voor Nederland in kaart gebracht door de Universiteit Utrecht, op basis van een Kriging-model op 20 locaties verspreid over het land.²⁷ Op 19 locaties zijn deeltjesaantallen (tussen 10-300 nm) gemeten tijdens drie meetperioden van twee weken per meetpunt. Op één locatie (Bunnik) zijn deze metingen continu, gedurende de hele meetperiode uitgevoerd. Op basis daarvan zijn de metingen op de andere meetlocaties gecorrigeerd voor seizoensvariabiliteit. De meetlocaties zijn bewust gekozen op grote afstand van lokale bronnen zoals luchthavens, drukke wegen, scheepvaart en industrie.

De PN-achtergrondconcentratie varieert van 4.400 deeltjes/cm³ in het dunbevolkte noordoosten tot 6.300 deeltjes/cm³ in de zuidelijke helft van Nederland.²⁷ (zie figuur 2). Op regionaal achtergrondstation Cabauw werd

in de periode 2008-2015 door TNO de deeltjesgrootteverdeling gemeten. Het aantal deeltjes tussen 30-500 nm was gemiddeld 9.200 deeltjes/cm³. Andere deeltjesgrootten zijn niet gerapporteerd. Het aantal deeltjes tussen 30-500 nm was in 2015 ongeveer hetzelfde als in 2008.²⁸



Figuur 2 Regionale achtergrondconcentratie PN op basis van metingen met MiniDisc (10-300 nm) in 2016/2017 en interpolatie met Kriging-model.²⁷



Bovenop de regionale achtergrondconcentratie komt in meer dichtbevolkte gebieden de stedelijke bijdrage en daarbovenop de lokale bijdrage van bronnen zoals wegverkeer, luchthavens, scheepvaart, huishoudens en industrie. Metingen in Amsterdam, Rotterdam, Utrecht en Maastricht laten een variatie in de stadsachtergrondconcentratie zien tussen ongeveer 8.000-15.000 deeltjes/cm³.^{22,29,30,11,25} In Amsterdam wordt de stadsachtergrondconcentratie mede beïnvloed door de afstand tot Schiphol. In het Vondelpark (circa 14 km van Schiphol) bedraagt de achtergrondconcentratie ongeveer 9.500 deeltjes/cm³¹¹, in Osdorp (circa 6 km van Schiphol) werden in 2018 en 2019 jaargemiddelde PN-concentraties gemeten van ongeveer 14.000 en 15.000 deeltjes/cm³.^{31,32}

Het wegverkeer zorgt lokaal voor sterk verhoogde concentraties; de concentraties nemen exponentieel af met afstand tot de weg. In een situatie zonder bebouwing in de omgeving van een snelweg nemen de PN-concentraties binnen de eerste 100 meter met circa 50% af en bereiken op een afstand van enkele honderden meters het achtergrondniveau.³ Nabij woningen in drukke straten in Amsterdam en Rotterdam werd een gemiddelde PN-concentratie gemeten van 15.500 deeltjes/cm³, nabij (<100 meter) snelwegen werd een gemiddelde PN-concentratie gemeten van 14.500 deeltjes/cm³, ten opzichte van een achtergrond van ongeveer 10.000.³⁰ Nabij wegen wordt een range in PN-concentratie beschreven van 11.600 tot 80.000 deeltjes/cm³ in Europese steden; in de VS en Canada 22.000-33.867 en in Zuidoost-Azië 38.400-327.000

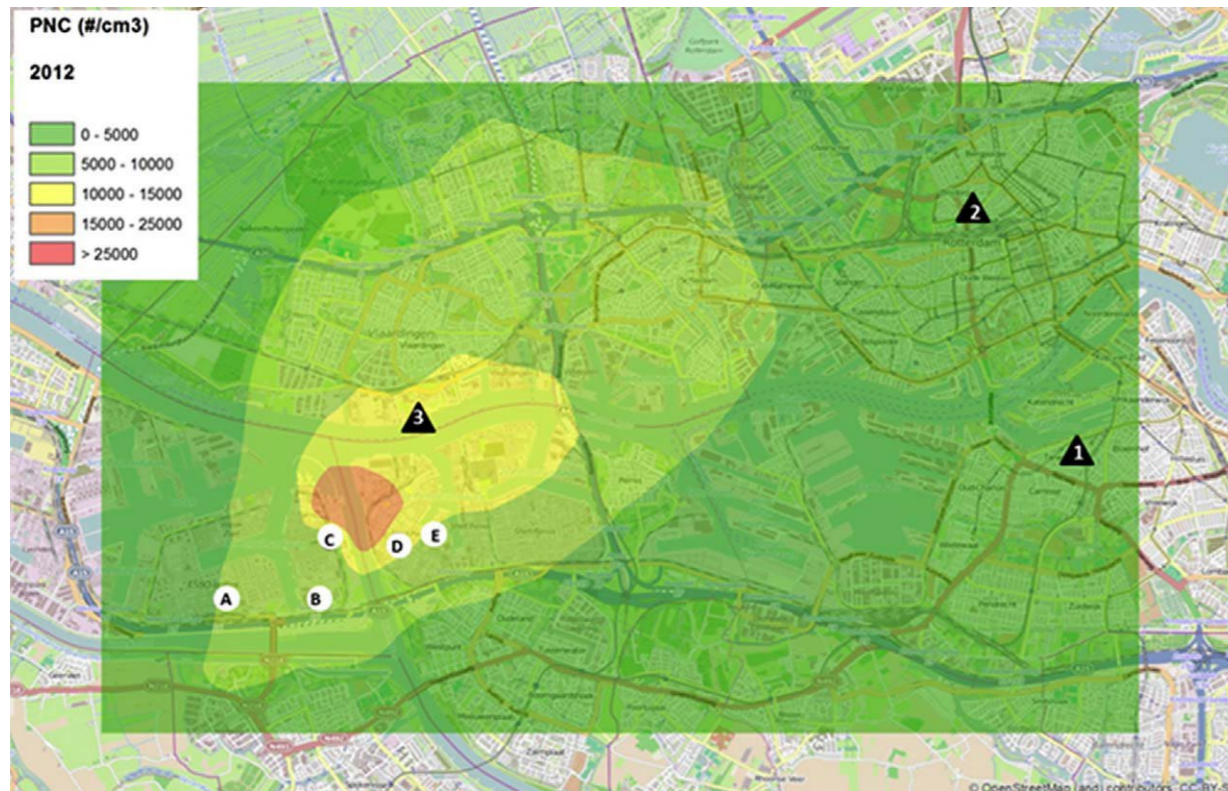
deeltjes/cm³.³³ Voor Nederland worden in die studie concentraties van 31.000 deeltjes/cm³ gerapporteerd langs drukke wegen in Amsterdam.³⁴

In een recente studie is de blootstelling aan UFP voor heel Nederland gemodelleerd op basis van (onder meer) herhaalde kortdurende metingen op de weg in grote en middelgrote steden in Nederland. Gemiddeld in Nederland werd op hoofdwegen een PN-concentratie gemeten van 18.500 deeltjes/cm³ en op minder drukke wegen van 12.000 deeltjes/cm³, een verschil van circa 55%. Om een indruk te geven van de spreiding in de gemeten concentraties: het 10- en het 90-percentiel van de op hoofdwegen gemeten concentraties in heel Nederland bedroeg respectievelijk 7.500/cm³ en 34.000/cm³. In Amsterdam en Utrecht werden de hoogste concentraties gemeten (gemiddeld 22.000 deeltjes/cm³ op hoofdwegen). Ingedeeld naar regio werden in het westen de hoogste (gemiddeld 18.500 op hoofdwegen) en in het noorden de laagste PN-concentraties (gemiddeld 16.000 op hoofdwegen) gemeten, maar de verschillen zijn beperkt. De stedelijke achtergrondconcentraties variëren van 6.000/cm³ in het noorden tot 10.500/cm³ in het westen en bedroeg in Amsterdam en Utrecht 11.500/cm³.³⁵

Het vliegverkeer en de industrie kunnen tot op een afstand van tientallen kilometers bijdragen aan verhoogde PN-concentraties.^{22,29} In Rotterdam werd de bijdrage van vijf typen zware industrie met hoge SO₂-emissies (waaronder twee olieraffinaderijen) aan de PN-concentratie onderzocht.



De bijdrage van de industrie was, omgerekend naar jaargemiddelde, 23.000 deeltjes/cm³ op 1 km afstand, 2.600-9.100/cm³ op 8 km afstand en 1.000/cm³ op 40 km afstand.²² In figuur 3 wordt dit geïllustreerd. Bovenop die bijdrage komt overigens nog de achtergrondconcentratie.



Figuur 3 Bijdrage van 5 industriële bronnen met hoge SO₂-emissies aan de jaargemiddelde PN-concentratie in Rotterdam/Vlaardingen in 2012. De letters A t/m E geven de ligging van de industriële bronnen weer, de nummers 1 t/m 3 geven de meetlocaties weer.²²

Tijdens een meetcampagne van 2 maanden in de winter van 2019/2020 is de PN-concentratie gemeten op drie meetlocaties in het IJmond-gebied. In Wijk aan Zee, dat bij de overheersende windrichting het meest belast

wordt door emissies vanaf (onder meer) het nabijgelegen industrieterrein werd een gemiddelde PN-concentratie van 29.500 deeltjes/cm³ gemeten. In Beverwijk werd een PN-concentratie gemeten van 19.800 deeltjes/cm³ en in IJmuiden, dat het grootste deel van de tijd benedenwinds van het industrieterrein lag 12.630 deeltjes/cm³. Analyse van de concentraties in relatie tot de windrichting lieten een duidelijke bijdrage vanuit de richting van het industrieterrein zien, hoewel niet valt af te leiden welk deel is toe te wijzen aan de industrie en welk deel aan scheepvaart en zwaar transport.³⁶

Ook (zee)scheepvaart draagt bij aan de PN-emissies,^{37,38} maar het is niet goed bekend in welke mate deze bronnen bijdragen aan de PN-concentraties in Nederland. Kortdurende metingen langs het Amsterdam-Rijnkanaal en de Waal^{39,40} lieten kortdurende piekconcentraties tot 60.000 deeltjes/cm³ zien na passage van binnenvaartschepen, maar deze metingen zijn niet te vertalen naar bijdrage aan de langdurige blootstelling. Een beperkt aantal metingen nabij vaarwegen en haven in Rotterdam en Amsterdam suggereert dat de bijdrage van scheepvaart aan PN-concentraties beperkt is.^{21,30}

Het vliegverkeer is een goed onderzochte bron van UFP, dat zich hier grotendeels in de nucleatiefase bevindt (<20 nm). Onder meer rondom luchthavens in Los Angeles, Warwick (Rhode Island), Brisbane en Kopenhagen (Winther 2015) zijn verhoogde PN-concentraties gemeten



tot op kilometers afstand van de luchthaven.^{41,42,43,44,45} In Nederland werd voor het eerst in 2012 een toename in de PN-concentraties met 20% beschreven bij wind vanaf Schiphol op het 40 km verderop gelegen regionaal achtergrondstation Cabauw.²¹ Dit werd bevestigd tijdens een meetcampagne in 2014 in het Amsterdamse bos op 7 kilometer van Schiphol, waar de PN-concentraties bij wind vanaf Schiphol met een factor 3 toenamen.²⁹ In 2015 rapporteerde het RIVM op basis van metingen op meerdere plekken rondom Schiphol en modelberekeningen dat de jaargemiddelde bijdrage van het vliegverkeer in woongebieden vlakbij Schiphol tot 15.000 deeltjes/cm³ bedroeg en op circa 15 km afstand 3.000 deeltjes/cm³.⁴⁶

Bovenop die bijdrage komt dan nog de achtergrondconcentratie. Dit beeld werd in grote lijnen bevestigd in een meer uitgebreide meetcampagne in 2017 en 2018, waarbij ook de invloed van taxiënde vliegtuigen werd meegenomen.²⁰ De roetconcentraties nabij de luchthaven zijn niet verhoogd door vliegverkeer. UFP afkomstig van vliegverkeer wijkt wat betreft grootte en samenstelling af van UFP afkomstig van wegverkeer. Het grootste deel van UFP afkomstig van vliegverkeer wordt niet rechtstreeks als UFP uitgestoten maar op zeer korte afstand van de bron in de lucht gevormd door nucleatie en condensatie van zwavelhoudende gasvormige verbindingen. UFP afkomstig van vliegverkeer heeft een zwavelkern en bevindt zich vooral in de deeltjesgrootte <20 nm. UFP

afkomstig van wegverkeer heeft een koolstofkern en bevindt zich vooral in de deeltjesgrootte tussen 50-70 nm.^{1,20}

De getallen over de spreiding van PN-concentraties zijn zoals eerder vermeld met onzekerheid omgeven vanwege verschillen in onder andere meetmethoden en meetduur. Zo wordt op regionaal achtergrondstation Cabauw met SMPS in de fractie 30-500 nm gemiddeld 9.200 deeltjes/cm³ gemeten.²⁸ Op basis van het model van de Universiteit Utrecht wordt voor Cabauw een regionale achtergrondconcentratie van 6.300 deeltjes/cm³ geschat, op basis van metingen van het totale aantal deeltjes tussen 10-300 nm. Dit illustreert de onzekerheid van de absolute UFP-concentraties, die mede een gevolg zijn van de verschillende meetmethoden.²⁷ Benadrukt moet worden dat dit voor de beoordeling van de resultaten van epidemiologische studies weinig invloed heeft op de concentratie-responsrelatie binnen de studie, zolang de metingen binnen een studie vergelijkbaar zijn. Vanzelfsprekend heeft het wel invloed op de vergelijkbaarheid van de sterkte van de concentratie-responsrelatie tussen studies. Uiteraard is het voor het afleiden van gezondheidskundige advieswaarden van groot belang op vergelijkbare wijze UFP te meten.



04 ontwikkeling in uitstoot en concentratie

De afgelopen jaren is de luchtkwaliteit verbeterd en zijn veel maatregelen genomen om de emissies van fijnstof, stikstofoxiden en andere componenten van luchtverontreiniging terug te dringen. Voor vrijwel alle componenten leidt dat ook tot een langzame maar gestage afname in de concentraties in de buitenlucht, met uitzondering van ammoniak waar de gerapporteerde emissie weliswaar afneemt maar de gemeten concentraties niet dalen. Een andere uitzondering is ozon, waarbij de jaargemiddelde concentraties niet afnemen (maar de piekconcentraties wel). Omdat de UFP-uitstoot niet wordt geregistreerd, is het niet mogelijk om de trend in uitstoot in beeld te brengen.

Op regionaal achtergrondstation Cabauw in de provincie Utrecht was de eerste jaren sprake van een toename van het aantal deeltjes tussen 30 en 500 nanometer; de laatste jaren nam dat juist af. Gemiddeld over de hele periode is het aantal deeltjes tussen 30 en 500 nm per cm³ ongeveer gelijk gebleven, terwijl in diezelfde periode op ditzelfde meetstation de PM_{2,5}-concentratie wel duidelijk afnam.²⁸

Langjarige trends buiten Nederland zijn onder andere beschikbaar in Duitsland, waar in de periode 2009-2018 de deeltjesgrootteverdeling

van UFP is geanalyseerd op 16 meetlocaties, waaronder regionale achtergrondstations, stadsachtergrondstations en verkeersbelaste stations. In de eerste jaren was er sprake van een afname, maar de laatste jaren niet meer.⁴⁷ In Spanje is de trend onderzocht op twee meetpunten, een stadsachtergrondstation in Barcelona (2013-2019) en een regionaal achtergrondstation (2014-2019). Op het stadsachtergrondstation nam de PN-concentratie af met gemiddeld 2,5% per jaar, op het regionale achtergrondstation was sprake van een toename van 3,0% per jaar.⁴⁸ In Rochester, New York, is de trend in de periode 2002-2018 geanalyseerd. Er was sprake van een afname in concentraties tussen 2002 en 2011 en een toename tussen 2011 en 2018.⁴⁹ Een vergelijkbaar beeld wordt beschreven voor Boston, waar de langste meetreeks beschikbaar is (1999-2018). Tussen 1999 en 2009 was er een afname in de PN-concentraties, tussen 2009 en 2018 een toename.⁵⁰ In Oakland, Californië hebben (technische) maatregelen om de uitstoot van het wegverkeer terug te dringen geleid tot een sterke afname in PN-concentratie tussen 2001 en 2007; sindsdien zijn de PN-concentraties niet verder gedaald.

Langjarige meetreeksen op 10 meetstations aan de oost- en westkust van de VS en Canada laten een wisselend beeld zien. Op de meeste stations nemen de PN-concentraties in de periode 2006-2016⁵¹ af, maar dat is vooral toe te schrijven aan een dalende trend in de eerste jaren (tot 2010).



In 2020 is uiteraard de COVID-19-pandemie van invloed geweest op de PN-concentraties. Zo hebben metingen nabij Boston laten zien dat de PN-concentraties met 60-68% afnamen door de sterke afname in verkeersintensiteit.⁵² De toekomst zal uitwijzen wat de invloed van de wereldwijde pandemie zal zijn op de ontwikkeling van de UFP-gehalten in de komende jaren.



literatuur

- ¹ Kwon HS, Ryu MH, Carlsten C. *Ultrafine particles: unique physicochemical properties relevant to health and disease*. *Exp Mol Med* 2020; 52(3): 318-328.
- ² Grigoratos T, Martini G. *Brake wear particle emissions: a review*. *Environ Sci Pollut Res Int* 2015; 22(4): 2491-2504.
- ³ Health Effects Institute. *Understanding the health effects of ambient ultrafine particles*. Boston, 2013.
- ⁴ Kumar Kompalli S. *The formation and growth of ultrafine particles in two contrasting environments: a case study*. *Annales Geophysicae* 2014; 32(7): 817-830.
- ⁵ EPA. U.S. Environmental Protection Agency. *Integrated Science Assessment (ISA) for Particulate Matter* Washington, DC, 2019; EPA/600/R-19/188.
- ⁶ Janssen NAH, et al. RIVM. *Onderzoek naar de gezondheidseffecten van kortdurende blootstelling aan ultrafijn stof rond Schiphol*. Bilthoven, 2019; 2019-0084.
- ⁷ de Jesus AL, Rahman MM, Mazaheri M, Thompson H, Knibbs LD, Jeong C, et al. *Ultrafine particles and PM_{2.5} in the air of cities around the world: Are they representative of each other?* *Environ Int* 2019; 129: 118-135.
- ⁸ Sabaliauskas K, Jeong C-H, Yao X, Jun Y-S, Jadidian P, Evans GJ. *Five-year roadside measurements of ultrafine particles in a major Canadian city*. *Atmospheric Environment* 2012; 49: 245-256.
- ⁹ Hoek G, Beelen R, Kos G, Dijkema M, van der Zee SC, Fischer PH, Brunekreef B. *Land use regression model for ultrafine particles in Amsterdam*. *Environ Sci Technol* 2011; 45: 622-628.
- ¹⁰ Saha PK, Sengupta S, Adams P, Robinson AL, Presto AA. *Spatial Correlation of Ultrafine Particle Number and Fine Particle Mass at Urban Scales: Implications for Health Assessment*. *Environ Sci Technol* 2020; 54(15): 9295-9304.
- ¹¹ Hofman J, Staelens J, Cordell R, Stroobants C, Zikova N, Hama SML, et al. *Ultrafine particles in four European urban environments: Results from a new continuous long-term monitoring network*. *Atmospheric Environment* 2016; 136: 68-81.
- ¹² European Committee for Standardization. *Technical specification CEN/TS 16976. Air quality: determination of the particle number concentration of atmospheric aerosol CEN/TC 264/WG 32* 2016.
- ¹³ European Committee for Standardization. *Technical specification CEN/TS 17434:2020. Ambient air -Determination of the particle size spectra of atmospheric aerosol using a Mobility Particle Size Spectrometer (MPSS) CEN/TC 264/WG 32*. 2020.
- ¹⁴ Paasonen P. International Institute for Applied Systems Analysis. *Aerosol particle number emissions and size distributions: implementation in the GAINS model and initial results*. Laxenburg:



- IIASA interim report 2013; IR-13-020. <http://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/10740/1/IR-13-020.pdf>.
- ¹⁵ Kumala M. *General overview: general overview European Integrated project on Aerosol Cloud Climate and Air Quality interactions (EUCAARI) — integrating aerosol research from nano to global scales*. Atmos Chem Phys, 2011; 11: 13061-13143.
- ¹⁶ Reddington C. *Primary versus secondary contributions to particle number concentrations in the European boundary layer*. Atmos Chem Phys, 2011; 11: 12007-120036.
- ¹⁷ Fountoukis C, Riipinen I, Denier van der Gon HAC, Charalampidis PE, Pilinis C, Wiedensohler A, et al. *Simulating ultrafine particle formation in Europe using a regional CTM: contribution of primary emissions versus secondary formation to aerosol number concentrations*. Atmospheric Chemistry and Physics 2012; 12(18): 8663-8677.
- ¹⁸ Ahlm L, Julin J, Fountoukis C, Pandis SN, Riipinen I. *Particle number concentrations over Europe in 2030: the role of emissions and new particle formation*. Atmospheric Chemistry and Physics 2013; 13(20): 10271-10283.
- ¹⁹ Julin J, Murphy BN, Patoulias D, Fountoukis C, Olenius T, Pandis SN, et al. *Impacts of Future European Emission Reductions on Aerosol Particle Number Concentrations Accounting for Effects of Ammonia, Amines, and Organic Species*. Environ Sci Technol 2018; 52(2): 692-700.
- ²⁰ Voogt M. RIVM. *Metingen en berekeningen van ultrafijn stof van vliegverkeer rond Schiphol*. Bilthoven, 2019; 2019-0074.
- ²¹ Keuken MP, Henzing JS, Zandveld P, van den Elshout S, Karl M. *Dispersion of particle numbers and elemental carbon from road traffic, a harbour and an airstrip in the Netherlands*. Atmospheric Environment 2012; 54: 320-327.
- ²² Keuken MP, Moerman M, Zandveld P, Henzing JS. *Total and size-resolved particle number and black carbon concentrations near an industrial area*. Atmospheric Environment 2015; 122: 196-205.
- ²³ Kerckhoffs J, Hoek G, Vlaanderen J, van Nunen E, Messier K, Brunekreef B, et al. *Robustness of intra urban land-use regression models for ultrafine particles and black carbon based on mobile monitoring*. Environ Res 2017; 159: 500-508.
- ²⁴ Weichenthal S, Van Ryswyk K, Goldstein A, Shekarrizfard M, Hatzopoulou M. *Characterizing the spatial distribution of ambient ultrafine particles in Toronto, Canada: A land use regression model*. Environ Pollut 2016; 208(Pt A): 241-248.
- ²⁵ van Nunen E, Vermeulen R, Tsai MY, Probst-Hensch N, Ineichen A, Davey M, et al. *Land Use Regression Models for Ultrafine Particles in Six European Areas*. Environ Sci Technol 2017; 51(6): 3336-3345.
- ²⁶ van Nunen E, Hoek G, Tsai MY, Probst-Hensch N, Imboden M, Jeong A, et al. *Short-term personal and outdoor exposure to ultrafine and fine particulate air pollution in association with blood pressure and lung function in healthy adults*. Environ Res 2020; 194: 110579.



- ²⁷ van de Beek E, Kerckhoffs J, Hoek G, Sterk G, Meliefste K, Gehring U, et al. *Spatial and Spatiotemporal Variability of Regional Background Ultrafine Particle Concentrations in the Netherlands*. *Environ Sci Technol* 2021; 55(2): 1067-1075.
- ²⁸ Mamali D, Mikkila J, Henzing B, Spoor R, Ehn M, Petaja T, et al. *Long-term observations of the background aerosol at Cabauw, The Netherlands*. *Sci Total Environ* 2018; 625: 752-761.
- ²⁹ Keuken MP, Moerman M, Zandveld P, Henzing JS, Hoek G. *Total and size-resolved particle number and black carbon concentrations in urban areas near Schiphol airport (the Netherlands)*. *Atmospheric Environment* 2015; 104: 132-142.
- ³⁰ Klompmaker JO, Montagne DR, Meliefste K, Hoek G, Brunekreef B. *Spatial variation of ultrafine particles and black carbon in two cities: results from a short-term measurement campaign*. *Sci Total Environ* 2015; 508: 266-275.
- ³¹ Van der Zee S, Helmink HJP. GGD Amsterdam. *Meetresultaten luchtkwaliteit Amsterdam 2018*. Amsterdam: GGD Amsterdam, 2019; 19-1154.
- ³² Helmink HJP VMI. GGD Amsterdam. *Meetresultaten luchtkwaliteit Amsterdam 2019*. Amsterdam, 2020; 20-1130.
- ³³ Kumar P, Morawska L, Birmili W, Paasonen P, Hu M, Kulmala M, et al. *Ultrafine particles in cities*. *Environ Int* 2014; 66: 1-10.
- ³⁴ Puustinen A, Hämeri K, Pekkanen J, Kulmala M, de Hartog J, Meliefste K, et al. *Spatial variation of particle number and mass over four European cities*. *Atmospheric Environment* 2007; 41(31): 6622-6636.
- ³⁵ Kerckhoffs J, Hoek G, Gehring U, Vermeulen R. *Modelling nationwide spatial variation of ultrafine particles based on mobile monitoring*. *Environ Int* 2021; 154: 106569.
- ³⁶ Weijers E. RIVM. *Verkennde metingen aan ultrafijn stof in het IJmondgebied*. Bilthoven, 2020; 2020-0095.
- ³⁷ Donato A, Gregoris E, Gambaro A, Merico E, Giua R, Nocioni A, et al. *Contribution of harbour activities and ship traffic to PM_{2.5}, particle number concentrations and PAHs in a port city of the Mediterranean Sea (Italy)*. *Environ Sci Pollut Res Int* 2014; 21(15): 9415-9429.
- ³⁸ Minguillón MC, Arhami M, Schauer JJ, Sioutas C. *Seasonal and spatial variations of sources of fine and quasi-ultrafine particulate matter in neighborhoods near the Los Angeles–Long Beach harbor*. *Atmospheric Environment* 2008; 42(32): 7317-7328.
- ³⁹ van der Zee SC, Dijkema MBA, van der Laan J, Hoek G. *The impact of inland ships and recreational boats on measured NO_x and ultrafine particle concentrations along the waterways*. *Atmospheric Environment* 2012; 55: 368-376.
- ⁴⁰ Keuken MP, Moerman M, Jonkers J, Hulskotte J, Denier van der Gon HAC, Hoek G, et al. *Impact of inland shipping emissions on elemental carbon concentrations near waterways in The Netherlands*. *Atmospheric Environment* 2014; 95: 1-9.



- ⁴¹ Winther M, Kousgaard U, Ellermann T, Massling A, Nøjgaard J, Ketzel M. *Emissions of NO_x, particle mass and particle numbers from aircraft main engines, APU's and handling equipment at Copenhagen Airport*. Atmospheric Environment 2015; 100: 218-229.
- ⁴² Hsu H-H, Adamkiewicz G, Andres Houseman E, Vallarino J, Melly SJ, Wayson RL, et al. *The relationship between aviation activities and ultrafine particulate matter concentrations near a mid-sized airport*. Atmospheric Environment 2012; 50: 328-337.
- ⁴³ Hudda N, Gould T, Hartin K, Larson TV, Fruin SA. *Emissions from an international airport increase particle number concentrations 4-fold at 10 km downwind*. Environ Sci Technol 2014; 48(12): 6628-6635.
- ⁴⁴ Mazaheri M. *Particle and gaseous emissions from commercial aircraft at each stage of the landing and takeoff cycle*. 2009; 43: 441-446.
- ⁴⁵ Riley K, Cook R, Carr E, Manning B. *A systematic review of the impact of commercial aircraft activity on air quality near airports*. City and Environment Interactions 2021; 11: 100066.
- ⁴⁶ Bezemer A. RIVM. *Nader verkennend onderzoek ultrafijnstof rond schiphol*. Bilthoven: RIVM, 2015; 2015-0110.
- ⁴⁷ Sun J, Birmili W, Hermann M, Tuch T, Weinhold K, Merkel M, et al. *Decreasing trends of particle number and black carbon mass concentrations at 16 observational sites in Germany from 2009 to 2018*. Atmospheric Chemistry and Physics 2020; 20(11): 7049-7068.
- ⁴⁸ Carnerero C, Rivas I, Reche C, Pérez N, Alastuey A, Querol X. *Trends in primary and secondary particle number concentrations in urban and regional environments in NE Spain*. Atmospheric Environment 2021; 244: 117982.
- ⁴⁹ Masiol M, Squizzato S, Chalupa DC, Utell MJ, Rich DQ, Hopke PK. *Long-term trends in submicron particle concentrations in a metropolitan area of the northeastern United States*. Sci Total Environ 2018; 633: 59-70.
- ⁵⁰ Fiffer M, Kang CM, Requia WJ, Koutrakis P. *Long-term impact of PM_{2.5} mass and sulfur reductions on ultrafine particle trends in Boston, MA from 1999 to 2018*. J Air Waste Manag Assoc 2020; 70(7): 700-707.
- ⁵¹ Presto AA, Saha PK, Robinson AL. *Past, present, and future of ultrafine particle exposures in North America*. Atmospheric Environment: X 2021; 10: 100109.
- ⁵² Hudda N, Simon MC, Patton AP, Durant JL. *Reductions in traffic-related black carbon and ultrafine particle number concentrations in an urban neighborhood during the COVID-19 pandemic*. Sci Total Environ 2020; 742: 140931.



De Gezondheidsraad, ingesteld in 1902, is een adviesorgaan met als taak de regering en het parlement ‘voor te lichten over de stand der wetenschap ten aanzien van vraagstukken op het gebied van de volksgezondheid en het gezondheids(zorg)onderzoek’ (art. 22 Gezondheidswet).

De Gezondheidsraad ontvangt de meeste adviesvragen van de bewindslieden van Volksgezondheid, Welzijn en Sport; Infrastructuur en Waterstaat; Sociale Zaken en Werkgelegenheid en Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit. De raad kan ook op eigen initiatief adviezen uitbrengen, en ontwikkelingen of trends signaleren die van belang zijn voor het overheidsbeleid.

De adviezen van de Gezondheidsraad zijn openbaar en worden als regel opgesteld door multidisciplinaire commissies van – op persoonlijke titel benoemde – Nederlandse en soms buitenlandse deskundigen.

U kunt dit document downloaden van www.gezondheidsraad.nl.

Deze publicatie kan als volgt worden aangehaald:

Gezondheidsraad. Blootstelling aan ultrafijnstof.

Achtergronddocument bij Risico's van ultrafijnstof in de buitenlucht.

Den Haag: Gezondheidsraad, 2021; publicatienr. 2021/38-A2

Auteursrecht voorbehouden

