Risico’s van ultrafijnstof in de buitenlucht

Aan: de staatssecretaris van Infrastructuur en Waterstaat

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

Gezondheidsraad

inhoud

Samenvatting 3

01 Inleiding 6

1.1 Achtergrond 7
1.2 Adviesaanvraag 7
1.3 Commissie en werkwijze 8
1.4 Leeswijzer 9

02 Blootstelling 10

2.1 Kenmerken 11
2.2 Bronnen 13
2.3 UFP-concentraties 17
2.4 Ontwikkeling in uitstoot en concentratie 18

03 Gezondheidseffecten 20

3.1 Werking van UFP 21
3.2 Systematiek van beoordeling 22
3.3 Gevolgen van kortdurende blootstelling 22
.4 Gevolgen van langdurige blootstelling 25
3.5 Tot slot 32

04 Aangrijpingspunten voor beleid 34

4.1 Terugdringen uitstoot 35
4.2 Afstand creëren tot bronnen 37
4.3 Monitoring van UFP-concentraties en andere aanbevelingen 37
4.4 Niet afwachten 37

Literatuur 38

samenvatting

Dat luchtverontreiniging schadelijk is voor de gezondheid is al decennia duidelijk. In 2018 schreef de Gezondheidsraad het advies *Gezondheidswinst door schonere lucht* waarin het terugdringen van fijnstof en stikstofdioxide (NO_2) in de lucht werd bepleit. Mede op basis van dit advies uit 2018 heeft de voormalige minister voor Milieu en Wonen in 2020 met gemeenten en provincies het Schone Lucht Akkoord ondertekend, waarin een pakket aan maatregelen ter verbetering van de luchtkwaliteit wordt beschreven. Vanwege een gebrek aan voldoende gegevens zijn indertijd de effecten van ultrafijnstof, onderdeel van fijnstof, buiten beschouwing gelaten.

Ultrafijnstof, verder aangeduid met de internationaal gangbare afkorting UFP (*ultrafine particles*) is een mengsel van extreem kleine deeltjes (kleiner dan 0,1 micrometer, ofwel een tienduizendste van een millimeter) van verschillende herkomst, samenstelling en grootte. Omdat ultrafijne deeltjes vrijwel niets wegen dragen ze nauwelijks bij aan de massaconcentratie fijnstof. Die is gebaseerd op het gewicht van deeltjes kleiner dan 2,5 micrometer (PM2,5) of 10 micrometer (PM10) en wordt uitgedrukt in microgram per m^3.
UFP-concentraties worden doorgaans uitgedrukt als het aantal deeltjes per cm^3.

UFP komt vooral vrij bij verbrandingsprocessen. Naast wegverkeer en vliegverkeer dragen onder andere de scheepvaart, de industrie, mobiele werktuigen (zoals aggregaten en graafmachines) en houtverbranding bij aan de uitstoot van UFP. Ook binnenshuis zijn er bronnen van UFP. Het huidige advies heeft alleen betrekking op UFP in de buitenlucht.

Inmiddels is er meer bekend over de invloed van blootstelling aan deze extreem kleine deeltjes op de gezondheid. De voormalige minister voor Milieu en Wonen heeft de Gezondheidsraad gevraagd die inzichten op een rij te zetten en aan te geven of er aanleiding is om beleidsmaatregelen te baseren op UFP. De tijdelijke Commissie Ultrafijnstof boog zich over deze vraag.

Inzicht in blootstelling beperkt

Over de blootstelling aan UFP is veel minder bekend dan over de blootstelling aan andere componenten van luchtverontreiniging. Wel is duidelijk dat de UFP-concentratie sterk verhoogd is in de buurt van lokale bronnen, zoals wegverkeer, vliegverkeer en industrie. Ook is bekend dat de UFP-concentraties van plaats tot plaats veel sterker variëren dan de concentratie ’gewoon’ fijnstof en dat verhoogde UFP-concentraties vaak, maar niet altijd samengaan met verhoogde concentraties van andere componenten van luchtverontreiniging, zoals

NO_2 en roet. UFP-concentraties worden in Nederland niet structureel gemeten of berekend. Daardoor ontbreekt grotendeels het inzicht in de langjarige trend in UFP-concentratie en de bijdrage van specifieke bronnen.

Toenemend inzicht in gezondheidseffecten

De commissie maakt onderscheid tussen de effecten van kortdurende en langdurige blootstelling aan UFP. Onderzoek naar de invloed van kortdurende blootstelling aan UFP geeft aanwijzingen voor het optreden van nadelige effecten op het hart- en vaatstelsel en op de luchtwegen (zoals veranderingen in het hartritme en astma-aanvallen). De resultaten van een onderzoek dat het RIVM samen met andere onderzoeksinstellingen uitvoerde naar kortdurende blootstelling aan UFP afkomstig van vliegverkeer rondom Schiphol wijzen ook in die richting.

Over de invloed van langdurige blootstelling aan UFP was tot voor kort weinig bekend, maar de afgelopen paar jaar is het inzicht daarin toegenomen, onder meer door de publicatie van meerdere epidemiologische studies waarin rekening is gehouden met de eventuele 'verstorende' invloed van samenhangende componenten van luchtverontreiniging. Dit als aanvulling op de eventuele verstorende invloed van andere factoren (bijvoorbeeld leeftijd, sociaal-economische factoren en rookgedrag).

Op basis van de huidige kennis concludeert de commissie dat er aanwijzingen zijn dat langdurige blootstelling aan UFP het risico op hart- en vaataandoeningen vergroot. Ook zijn er aanwijzingen voor een verhoogde kans op het ontstaan van luchtwegaandoeningen en voor een negatieve invloed op de groei van de foetus. Deze gezondheidseffecten hangen samen met blootstelling aan UFP, onafhankelijk van de invloed van blootstelling aan fijnstof en NO_2, gecorrigeerd voor belangrijke verstorende factoren. Toxicologische studies naar biologische werkingsmechanismen ondersteunen het optreden van deze gezondheidseffecten. Het RIVM doet momenteel onderzoek naar de invloed van langdurige blootstelling aan UFP van vliegverkeer rondom Schiphol. De resultaten hiervan verschijnen naar verwachting in het eerste kwartaal van 2022. Dit zal het inzicht in de gezondheidseffecten van UFP verder vergroten.

Het aantal studies naar gezondheidseffecten van UFP is in de afgelopen paar jaar toegenomen, maar valt nog in het niet bij de zeer uitvoerige informatie over fijnstof en NO_2. Daardoor is de bewijskracht voor schadelijke gezondheidseffecten van UFP geringer dan voor fijnstof en NO_2, maar naar het oordeel van de commissie bieden de gegevens toch voldoende grond voor het treffen van aanvullende maatregelen.

Beperk de uitstoot en vergroot waar mogelijk de afstand tot de bron

Veel van de huidige maatregelen om blootstelling aan fijnstof en NO_2 te verminderen dringen ook de uitstoot van UFP terug, maar daarnaast zijn aanvullende maatregelen nodig.

In de luchtvaart kan de UFP-uitstoot worden teruggedrongen door bijvoorbeeld minder vliegbewegingen en het gebruik van kerosine met een lager zwavelgehalte. Naast de verdere toepassing van roetfilters kan ook een verdere transitie naar elektrisch vervoer de bijdrage van het wegverkeer terugdringen.

Ook het stellen van eisen aan de UFP-uitstoot van diverse bronnen kan bijdragen aan het verlagen van de hoeveelheid UFP. Op de korte termijn kan de blootstelling aan UFP verder verlaagd worden door het instellen van milieu-zones en uitstootvrije zones in steden. Niet alleen aan de uitstoot van het wegverkeer, maar ook aan de uitstoot van andere bronnen (zoals mobiele werktuigen) zouden voorwaarden kunnen worden gesteld, bijvoorbeeld op bouw-plaatsen en luchthavens.

Ook de (zware) industrie kan substantieel bijdragen aan de UFP-blootstelling.
De commissie pleit ervoor om de kennis over die bijdrage en over de factoren die daaraan bijdragen te vergroten, zodat gerichte maatregelen kunnen worden genomen om de UFP-uitstoot van de industrie te beperken.
Zeker zolang de transitie naar elektrisch verkeer nog niet voltooid is, adviseert de commissie net als in het advies van de Gezondheidsraad uit 2018 om de leefomgeving zodanig in te richten dat langdurig verhoogde blootstelling wordt beperkt. Dat kan bijvoorbeeld door woningen te bouwen op zo groot mogelijke afstand van drukke (snel)wegen.

Breng de blootstelling in kaart

Dat de kennis over de blootstelling aan en gezondheidseffecten van UFP nog steeds beperkt is ten opzichte van die over fijnstof en NO_2, komt mede doordat UFP vrijwel nergens structureel wordt gemeten. Dat is niet alleen in Nederland zo, maar ook in de meeste andere landen en dit bemoeilijkt het uitvoeren van wetenschappelijk onderzoek naar gezondheidseffecten.

De commissie adviseert om UFP structureel te gaan meten in het Landelijk Meetnet Luchtkwaliteit. Om de blootstelling aan UFP van de Nederlandse bevolking te monitoren en prognoses voor de toekomst te kunnen maken is bovendien registratie van de landelijke UFP-emissie nodig. Daarvoor zijn structurele en valide modelberekeningen nodig, net zoals die er zijn voor fijnstof, NO_2 en diverse andere componenten van luchtverontreiniging.

01 inleiding

1.1 Achtergrond

Over gezondheidsschade door luchtverontreiniging is in de loop der jaren veel bekend geworden. Op basis van dit toegenomen inzicht zijn en worden nationaal en internationaal tal van maatregelen getroffen om deze gezondheidsschade waar mogelijk terug te dringen. Zo heeft in ons land de voormalige minister voor Milieu en Wonen in 2020 met gemeenten en provincies het Schone Lucht Akkoord ondertekend, waarin een pakket aan maatregelen ter verbetering van de luchtkwaliteit wordt beschreven. Eind maart 2021 werd in dit verband de Uitvoeringsagenda Schone Lucht Akkoord naar de Kamer gezonden.[1] De Gezondheidsraad besteedde in 2018 aandacht aan de wetenschappelijke kennis over dit onderwerp in het advies *Gezondheidswinst door schonere lucht*.[2]

Er blijven echter ook vragen. Eén daarvan betreft de schadelijkheid van blootstelling aan ultrafijnstof. Ultrafijnstof, verder aangeduid met de internationaal gangbare afkorting UFP (*ultrafine particles*) is een mengsel van extreem kleine deeltjes (kleiner dan 0,1 micrometer, ofwel een tienduizendste van een millimeter) van verschillende herkomst, samenstelling en grootte. Deze deeltjes komen voornamelijk vrij bij verbrandingsprocessen. Bronnen van UFP zijn onder andere het wegverkeer (auto's, bestelwagens, vrachtwagens, bussen, brommers en scooters), vliegverkeer, de industrie, energieproductie, de binnen- en zeescheepvaart, mobiele werktuigen (zoals aggregaten, graafmachines, tractoren) en houtverbranding. [3,4,5-7] Afhankelijk van de bron kan de UFP-concentratie tot op een afstand van honderden meters of tientallen kilometers verhoogd zijn.

De meeste kennis over de schadelijkheid van UFP is opgedaan in studies waar het wegverkeer de belangrijkste bron van blootstelling is. De laatste jaren is er toenemend aandacht voor het vliegverkeer als relevante bron. Zo onderzoekt het RIVM met partners momenteel het effect van UFP afkomstig van vliegverkeer op de gezondheid van omwonenden rond Schiphol.

1.2 Adviesaanvraag

Mede naar aanleiding van dit onderzoek door het RIVM heeft de voormalige minister voor Milieu en Wonen zich met een adviesaanvraag over UFP tot de Gezondheidsraad gewend. De minister vraagt wat de stand van de wetenschap op dit gebied is, in hoeverre UFP een aanvullend aangrijpingspunt voor het luchtkwaliteitsbeleid kan bieden, en welke handelingsperspectieven er op korte termijn zijn. De volledige tekst van de adviesaanvraag staat op de website van de Gezondheidsraad.[8]

1.3 Commissie en werkwijze

Ter beantwoording van deze adviesaanvraag is een multidisciplinaire commissie geformeerd, de tijdelijke Commissie Ultrafijnstof.
De samenstelling staat achter in dit advies.

De commissie heeft geconstateerd dat de epidemiologische gegevensbasis voor effecten van UFP beperkt is vergeleken met die voor fijnstof. Wel zijn de afgelopen jaren diverse epidemiologische onderzoeken gepubliceerd naar de invloed van langdurige blootstelling aan UFP op de gezondheid. De commissie acht deze onderzoeken vanuit gezondheidsoogpunt het belangrijkst, omdat effecten van langdurige blootstelling naar verwachting de grootste bijdrage leveren aan de ziektelast. De commissie richt zich in dit advies daarom vooral op epidemiologisch onderzoeken naar langdurige blootstelling. Bij de interpretatie betrekt de commissie ook onderzoeken naar de effecten van kortdurende blootstelling aan UFP en een breed spectrum aan toxicologische informatie. Dat doet zij aan de hand van overzichtspublicaties en systematische reviews. Conform de adviesaanvraag gaat dit advies alleen over UFP in de buitenlucht. Bronnen van UFP in de binnenlucht blijven buiten beschouwing, evenals nanodeeltjes die voor technologische toepassingen zijn geproduceerd.

Vertrekpunt voor de commissie vormt de in 2019 door de Environmental Protection Agency (EPA) gepubliceerde update van de zogeheten Integrated Science Assessment (ISA).[4] In de ISA is de wetenschappelijke literatuur over dierexperimenteel, humaan experimenteel en observationeel (epidemiologisch) onderzoek naar de gezondheidseffecten van fijnstof en UFP tot 2017 samengevat. Op basis van een integrale evaluatie is een oordeel gegeven over de bewijskracht voor gezondheidseffecten van kortdurende blootstelling (enkele minuten tot 1 maand) en langdurige blootstelling (1 maand tot ongeveer 10 jaar).
De ISA vormt de wetenschappelijke basis voor de herziening van de Amerikaanse luchtkwaliteitsnormen. Ongeveer gelijktijdig met het verschijnen van de ISA is in 2019 een review verschenen van epidemiologische studies naar UFP in de periode 2011 tot en met mei 2017.[9] Dit overzicht sluit aan op een eerdere review van het Health Effects Institute in 2013 waarin de epidemiologische studies vanaf de eerste studie naar UFP in 1997 tot en met 2010 zijn beoordeeld.[10]

De commissie heeft verder geïnventariseerd welke nieuwe epidemiologische onderzoeken naar de effecten van langdurige blootstelling aan UFP vanaf 2017 en tot mei 2021 beschikbaar zijn gekomen. Bij de beoordeling van de bewijskracht volgt zij de systematiek van de EPA. Dat houdt in dat het wetenschappelijk bewijs uit experimentele en epidemiologische studies wordt gewogen en integraal wordt beoordeeld op basis van consistentie, coherentie, biologische plausibiliteit en onzekerheden.[11] Meer informatie over de systematiek is te vinden in het achtergronddocument *Gezondheidseffecten ultrafijnstof*. Wat betreft de effecten van kortdurende blootstelling baseert de commissie zich, in

aanvulling op de beide al genoemde overzichtspublicaties die de literatuur tot en met 2017 samenvatten, op reviews die na 2017 zijn verschenen.[4,9]

In de lucht maakt UFP deel uit van een cocktail aan componenten, waaronder roet, grotere fijnstofdeeltjes en stikstofoxiden. Uit epidemiologische studies valt niet altijd op te maken of de gezondheidseffecten worden veroorzaakt door verhoogde concentraties UFP of door gelijktijdig verhoogde concentraties van andere componenten van luchtverontreiniging. Studies waarin voor die componenten is gecorrigeerd (zogeheten tweecomponenten-modellen) hebben een grotere zeggingskracht. De commissie gaat in verband hiermee steeds na of in studies is gecorrigeerd voor de invloed van andere componenten.

De beoordeling van de toxicologische bewijskracht is gebaseerd op dierexperimentele en humaan experimentele studies die zijn beschreven in reviews van de EPA en het Health Effects Institute, aangevuld met recente overzichtsartikelen. Daarbij is een bredere definitie van UFP gehanteerd dan bij de beoordeling van de epidemiologische studies. Veel kennis over werkingsmechanismen van UFP is afkomstig uit experimenteel onderzoek met deeltjes gemaakt van bijvoorbeeld metaaloxides, silicium of koolstof en met dieselemissies. In het achtergronddocument *Gezondheidseffecten ultrafijnstof* is hierover meer informatie te vinden.

1.4 Leeswijzer

De opbouw van het advies is als volgt. In hoofdstuk 2 beschrijft de commissie de eigenschappen van UFP, alsmede de bronnen en methoden voor het bepalen van de blootstelling. Hoofdstuk 3 gaat over de verbanden tussen blootstelling aan UFP en gezondheidseindpunten. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen kortdurende en langdurige blootstelling. In hoofdstuk 4 zet de commissie op een rij welke aangrijpingspunten er zijn om de blootstelling aan UFP te verminderen en doet zij enkele aanbevelingen.

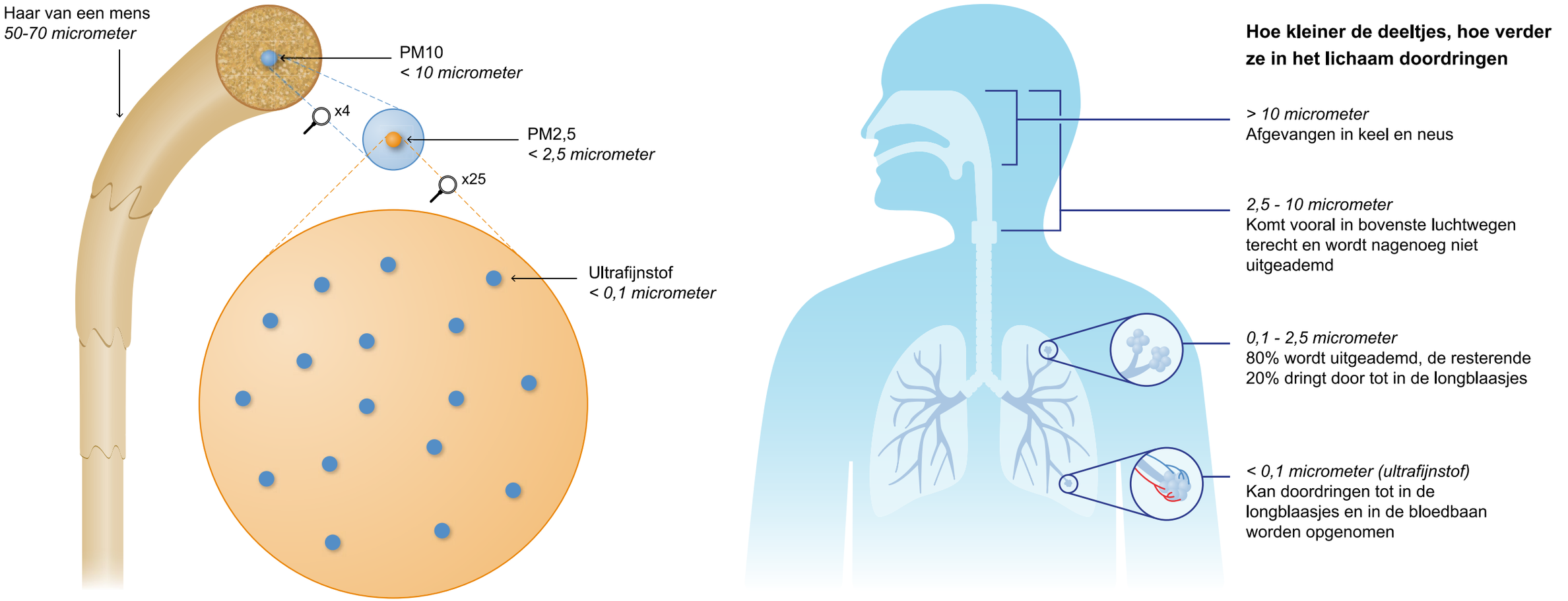
02 blootstelling

UFP-concentraties worden niet structureel gemeten in Nederland. Dit hangt onder meer samen met het ontbreken van normen, het gebrek aan kennis over emissiefactoren en het beperkte inzicht in de vorming en verdwijning van UFP in de lucht. Daardoor is het inzicht in de bijdrage van verschillende bronnen en in de blootstelling en trends daarin beperkt vergeleken met andere componenten van luchtverontreiniging, zoals fijnstof en NO_2.

2.1 Kenmerken

UFP is de benaming voor in lucht zwevende deeltjes met een diameter kleiner dan 100 nanometer (0,1 micrometer). UFP-deeltjes maken onderdeel uit van 'gewoon' fijnstof: in de lucht zwevende deeltjes met een diameter kleiner dan 2,5 micrometer (PM2,5) of 10 micrometer (PM10) (figuur 1).

Een ultrafijnstofdeeltje is slechts een fractie van de diameter van een mensenhaar groot en kan tot in de bloedbaan doordringen



Figuur 1 Weergave van de grootte van verschillende fijnstoffracties en de mate waarin ze in het lichaam kunnen doordringen

Vanwege hun geringe diameter kunnen UFP-deeltjes diep in de longen terechtkomen en zelfs tot in de bloedbaan doordringen.[10]

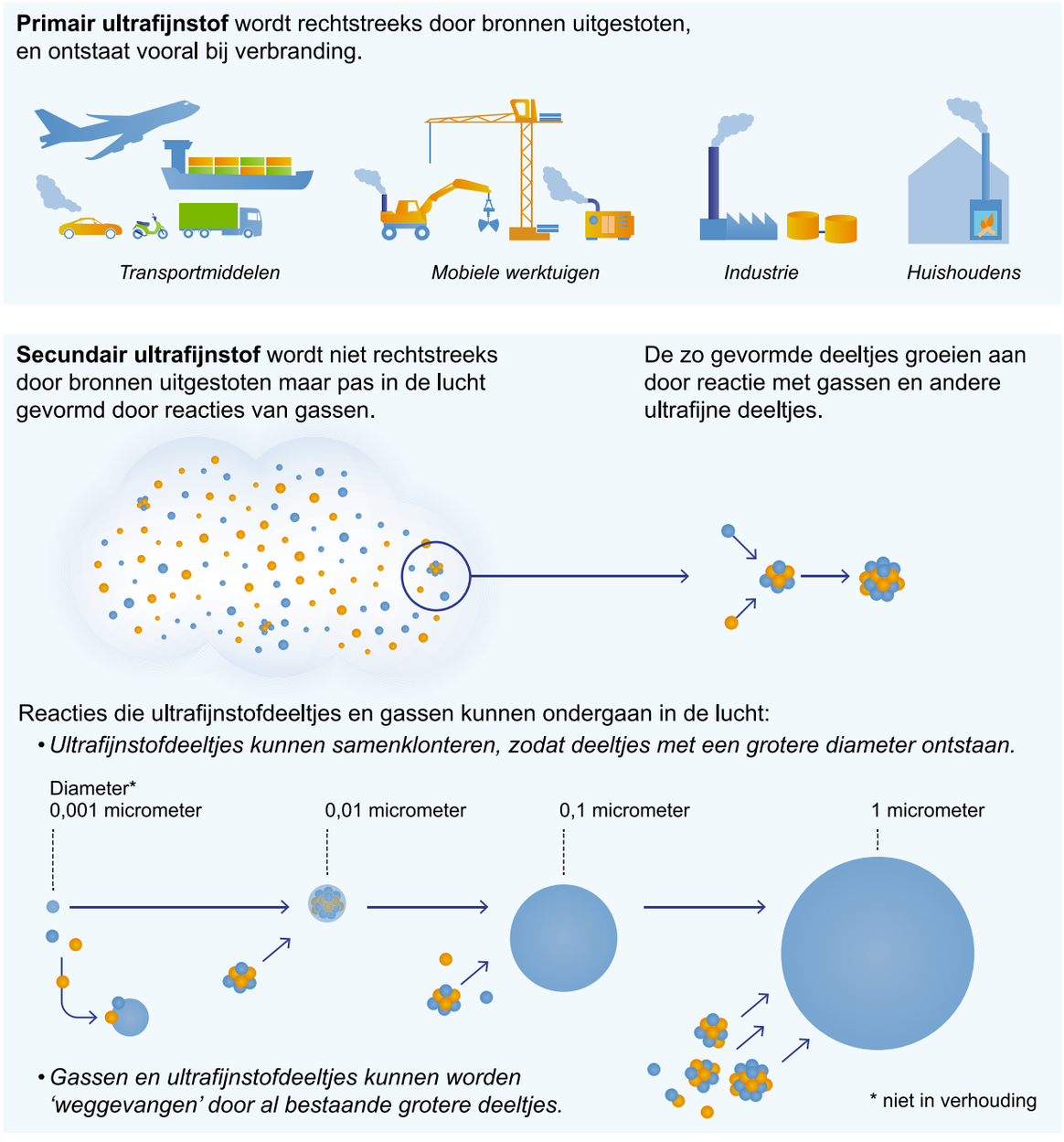
Hoewel UFP onderdeel is van 'gewoon' fijnstof, dragen ultrafijne deeltjes vanwege hun geringe diameter en gewicht nauwelijks bij aan de concentratie van PM10 en PM2,5 die wordt gedefinieerd op basis van massa per volume (massa-concentratie; µg/m^3).[10] Uitgedrukt in aantallen deeltjes is UFP daarentegen verantwoordelijk voor circa 90% van het totaal.[10,12]

PNC

In dit advies wordt het totale aantal deeltjes per cm^3 lucht gehanteerd als maat voor de UFP-concentratie. Hiervoor wordt de term *particle number concentration* (PNC) gebruikt.

Er is primair en secundair UFP. Primair UFP wordt rechtstreeks uitgestoten door bronnen en ontstaat vooral bij onvolledige verbrandingsprocessen. Secundair UFP wordt pas in de lucht gevormd door reacties van gasvormige stoffen, zoals zwavelhoudende en organische verbindingen, ammoniak en stikstofoxiden. De vorming van secundair UFP in de lucht begint met deeltjes van molecuulgrootte, die snel samenklonteren tot iets grotere deeltjes (nucleatiefase). Een deel van die gasvormige verbindingen (en net gevormde UFP-deeltjes in de nucleatiefase) kan echter ook worden 'weggevangen' door al in de lucht aanwezige grotere fijnstofdeeltjes (*scavenging*). Vervolgens neemt de grootte nog verder toe, totdat deeltjes ontstaan die groter zijn dan 100 nm en niet meer onder UFP vallen, maar wel onder PM2,5 en PM10. [3] Dat gebeurt overigens bij zowel secundair als primair gevormde deeltjes. (figuur 2). De snelheid waarmee UFP-deeltjes in de lucht aangroeien tot grotere deeltjes hangt onder meer af van de concentratie gassen en fijnstof in de lucht en van het weer (temperatuur, windsnelheid, hoeveelheid zonlicht). De gemiddelde 'atmosferische levensduur' van UFP-deeltjes bedraagt enkele uren.[3,13]

Ultrafijnstof wordt rechtstreeks uitgestoten of gevormd door reactie van gassen en groeit snel aan tot grotere deeltjes



Figuur 2 Primair en secundair ultrafijnstof en de reacties die ultrafijnstofdeeltjes en gassen kunnen ondergaan in de lucht

Doordat UFP-deeltjes continu in de atmosfeer worden gevormd, maar ook weer verdwijnen, varieert de UFP-concentratie veel sterker dan de PM10- en PM2,5-concentratie, zowel in ruimte als in tijd.[4,10]

Verschillen en overeenkomsten tussen UFP en roet

Roet komt vrij bij onvolledige verbranding van koolstofhoudende brandstoffen. Vooral bij de verbranding van diesel komt veel roet vrij. Roetdeeltjes bestaan uit elementair koolstof met daaraan gehechte metalen en organische verbindingen, zoals polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK's). De meeste roetdeeltjes bevinden zich in de ultrafijne fractie, deeltjes dus met een diameter kleiner dan 100 nm. De roetconcentratie op massabasis wordt echter vooral bepaald door deeltjes groter dan 100 nm.[14] UFP kan ook bestaan uit niet-koolstofhoudende verbindingen, gevormd door verbranding van zwavelhoudende brandstoffen en/of tot deeltjes gecondenseerde organische moleculen. Met roet wordt dus een ander deel van fijnstof beschreven dan met UFP: UFP bevat roet maar daarnaast andere stoffen, terwijl roet ook deeltjes bevat die qua diameter groter zijn dan UFP.[3]

2.2 Bronnen

Hieronder worden de belangrijkste bronnen van UFP beschreven. De huidige kennis is niet toereikend om voor elke bron de bijdrage te schatten aan de blootstelling aan UFP in de Nederlandse bevolking. UFP dringt vanuit de buitenlucht ook door in de binnenlucht. De mate waarin dat gebeurt hangt af van allerlei omstandigheden. Zo kan natuurlijke ventilatie

een rol spelen en zijn UFP zo klein dat ze ook via naden en kieren in de woning kunnen doordringen. Daarnaast zijn er ook specifieke bronnen van UFP in woningen, zoals koken, braden, bakken en roken.[15] Conform de adviesaanvraag valt UFP in het binnenmilieu echter buiten het bestek van dit advies.

2.2.1 Wegverkeer

Over de bijdrage van wegverkeer als bron van UFP is relatief het meeste bekend. Met name oudere dieselvoertuigen (auto's, vrachtwagens, bussen en bestelauto's) zijn een grote bron van UFP. Nieuwere dieselvoertuigen moeten aan steeds strengere Europese uitstooteisen voldoen en de introductie van het roetfilter heeft de UFP-uitstoot sterk teruggedrongen. Sinds 2009 hebben lichte dieselvoertuigen een roetfilter en sinds 2014 is dat zo voor vrachtwagens. Sinds 2017 worden er ook uitstooteisen gesteld aan de emissie van het aantal deeltjes op de weg. Oudere benzineauto's stoten relatief weinig UFP uit. Dat geldt niet voor de nieuwe, zuinige benzineauto's met directe benzine-injectie (*gasoline direct injection* (GDI)) tot 2019, die veel meer UFP uitstoten dan nieuwe diesel-auto's.[3,16] Bij modellen vanaf 2019 wordt dat ondervangen door toepassing van *gasoline particle*-filters, vanwege de zojuist bedoelde deeltjeseisen op de weg. Bij het wegverkeer is de uitstoot van UFP vooral, maar niet uitsluitend, het gevolg van uitlaatemissies. Ook slijtageprocessen van remmen, banden en wegdek vormen een bron van uitstoot.[4,3,17]

Nog een bron zijn brommers en scooters.[18] Metingen in Nederlandse steden hebben laten zien dat passage van met name tweetakt maar ook viertakt brom- en snorfietsen kan leiden tot kortdurende hoge pieken in de UFP-concentratie op het fietspad.[6] In de afgelopen 10 jaar is het aantal snorfietsen (met een maximum snelheid van 25 km/uur) bijna verdubbeld, al worden tweetakt snorfietsen sinds 2010 nauwelijks meer verkocht. In het Klimaatakkoord is vastgelegd dat vanaf 2025 alleen nog emissieloze snorfietsen mogen worden verkocht.[19]

2.2.2 Luchtvaart

Het grootste deel van UFP afkomstig van vliegverkeer wordt niet rechtstreeks als UFP uitgestoten, maar pas in de lucht gevormd door reacties van zwavelhoudende gasvormige verbindingen die vrijkomen bij de verbranding van kerosine. Het zwavelgehalte in kerosine ligt meestal tussen de 550-750 ppm, al is het maximale toegestane zwavelgehalte 3.000 ppm (0,3 %). [20] Ter vergelijking: bij diesel is dat 10 ppm (0,001%). UFP afkomstig van vliegverkeer bestaat vooral uit zwavelhoudende deeltjes kleiner dan 20 nm. UFP komt vooral vrij bij het opstijgen van vliegtuigen en daarnaast bij het taxiën en landen.[21] Hierdoor komen rondom luchthavens, waaronder Schiphol, sterk verhoogde UFP-concentraties voor. Meer details daarover zijn te vinden in het achtergronddocument *Blootstelling aan ultrafijstof*.

2.2.3 Mobiele werktuigen

NRMM, de Engelse afkorting van *Non-Road Mobile Machinery*, is de verzamelnaam voor allerlei machines met een verbrandingsmotor die niet tot wegvoertuigen, zeeschepen of vliegtuigen behoren. Deze groep van apparaten omvat naast 'mobiele werktuigen' (landbouwtrekkers, vorkheftrucks, graafmachines, aggregaten en andere bouwmachines) tegenwoordig ook binnenvaartschepen en dieseltreinen.[22] Het grootste deel van de mobiele werktuigen wordt door dieselmotoren zonder roetfilter aangedreven en kent een relatief hoge uitstoot van UFP.[23] Over de toepassing van mobiele werktuigen in Nederland en de bijdrage aan de UFP-concentraties is onvoldoende bekend. Wel hebben metingen van TNO laten zien dat diverse typen mobiele werktuigen in de praktijk een forse uitstoot hebben.[24]

Verschillende Europese steden, waaronder Londen, Kopenhagen, Zürich en Stockholm, hebben milieuzones voor mobiele werktuigen ingesteld. Sinds 2019 geldt voor nieuwe mobiele werktuigen met een vermogen tussen 19 en 560 kW een Europese eis aan de maximale uitstoot van deeltjesaantallen (stage V-norm). Daarin worden eisen gesteld aan de uitstoot van het totale aantal (vaste) deeltjes groter dan 23 nm. Omdat de motoren een lange levensduur hebben en er geen controle is op de uitstoot van mobiele werktuigen in de praktijk, zal het nog lang duren voordat de Stage V-norm zal leiden tot een afname van de UFP-uitstoot.

2.2.4 Scheepvaart

Ook (zee)scheepvaart draagt bij aan de UFP-emissies,[25,26] maar het is niet goed bekend in welke mate deze bronnen bijdragen aan de UFP-concentraties in Nederland. Metingen langs het Amsterdam-Rijnkanaal en de Waal lieten kortdurende piekconcentraties tot 60.000 deeltjes/cm^3 zien na passage van binnenvaartschepen.[27,28] Het maximale zwavelgehalte van scheepsbrandstoffen in (o.a.) de Noordzee is sinds 2015 gesteld op 1.000 ppm (0,1%).[29] Bij de binnenvaart is dat maximaal 10 ppm (0,001%).[30] Wat betreft uitstooteisen vallen binnenvaartschepen tegenwoordig onder NRMM (zie 2.2.3): vanaf 2020 moeten alle nieuwe hoofd- en hulpmotoren voor de binnenvaart met een vermogen van meer dan 300 kW voldoen aan de Stage V-norm. Omdat motoren voor de binnenvaart een lange levensduur hebben, zal het nog vele jaren duren voordat alle schepen hieraan voldoen. Deze eis geldt overigens niet voor hoofd- en hulpmotoren met minder dan 300 kW vermogen. Voor nieuwe motoren met een vermogen groter dan 560 kW (voor grote binnenvaartschepen) geldt Stage IIIb. Daarvoor worden wel eisen gesteld aan de maximale uitstoot van fijnstof, maar zijn er geen aanvullende eisen voor UFP.

2.2.5 Industrie

Kennis over de uitstoot van UFP door de industrie is beperkt. Naar we wel weten varieert de UFP-uitstoot sterk en is deze afhankelijk van het industriële proces, zwavelemissies en diverse andere factoren.[7,31,32]

Bovendien worden in de industrie geen eisen gesteld aan de uitstoot van deeltjesaantallen. Metingen rondom zware industrie in het IJmond- en Rijnmondgebied laten zien dat daar sterk verhoogde UFP-concentraties voorkomen, vergelijkbaar met wat rond Schiphol en nabij drukke wegen wordt gemeten.[31,33] Meer informatie over de UFP-concentraties in het IJmond- en Rijnmondgebied is te vinden in het achtergronddocument *Blootstelling aan ultrafijnstof*.

2.2.6 Houtverbranding

De verbranding van hout leidt tot de uitstoot van fijnstof en UFP. Het is echter nog niet duidelijk in welke mate houtverbranding bijdraagt aan de UFP-concentraties in de omgeving. De hoeveelheid UFP die ontstaat bij de verbranding van hout (houtsnippers, houtpellets) is onder meer afhankelijk van de temperatuur. Naarmate de verbranding efficiënter verloopt neemt de gemiddelde deeltjesgrootte af.[5] Het is aannemelijk dat het toenemend gebruik van houtstook ten behoeve van de energie-voorziening leidt tot een toename van de UFP-uitstoot. Toepassing van filters in biomassacentrales kan het aantal uitgestoten deeltjes drastisch terugdringen.[34]

2.2.7 Huishoudens

Ook in de binnenlucht zijn er bronnen van UFP. Onder meer bij koken op gas, bakken en braden, frituren, roken, het branden van kaarsen en het stoken van hout (zie 2.2.6) ontstaat UFP.[10] Afhankelijk van de bron wordt een deel daarvan rechtstreeks afgevoerd naar de buitenlucht (via rookkanalen, afzuigkap). Een ander deel komt terecht in de binnenlucht en zal uiteindelijk via ventilatie in de buitenlucht terecht komen. Dit advies richt zich echter, zoals gezegd, alleen op de kwaliteit van de buitenlucht.

2.2.8 Landbouw

De landbouw stoot relatief weinig primair UFP uit, omdat verbrandings-processen in deze sector een minder grote rol spelen. Fijnstof afkomstig uit stallen heeft een grotere diameter dan 100 nm. Wel draagt de landbouw via de uitstoot van ammoniak bij tot vorming van secundair UFP. [35]

2.2.9 Andere bronnen

In de nabijheid van restaurants en fastfoodketens worden hogere UFP-concentraties gemeten, omdat bij onder meer frituren, bakken en braden en wokken veel UFP wordt gevormd.[36,37] Daarnaast kan UFP in de lucht worden gevormd uit gasvormige verbindingen onder invloed van zonlicht. Ook komt UFP vrij bij branden en bosbranden.[3,7]

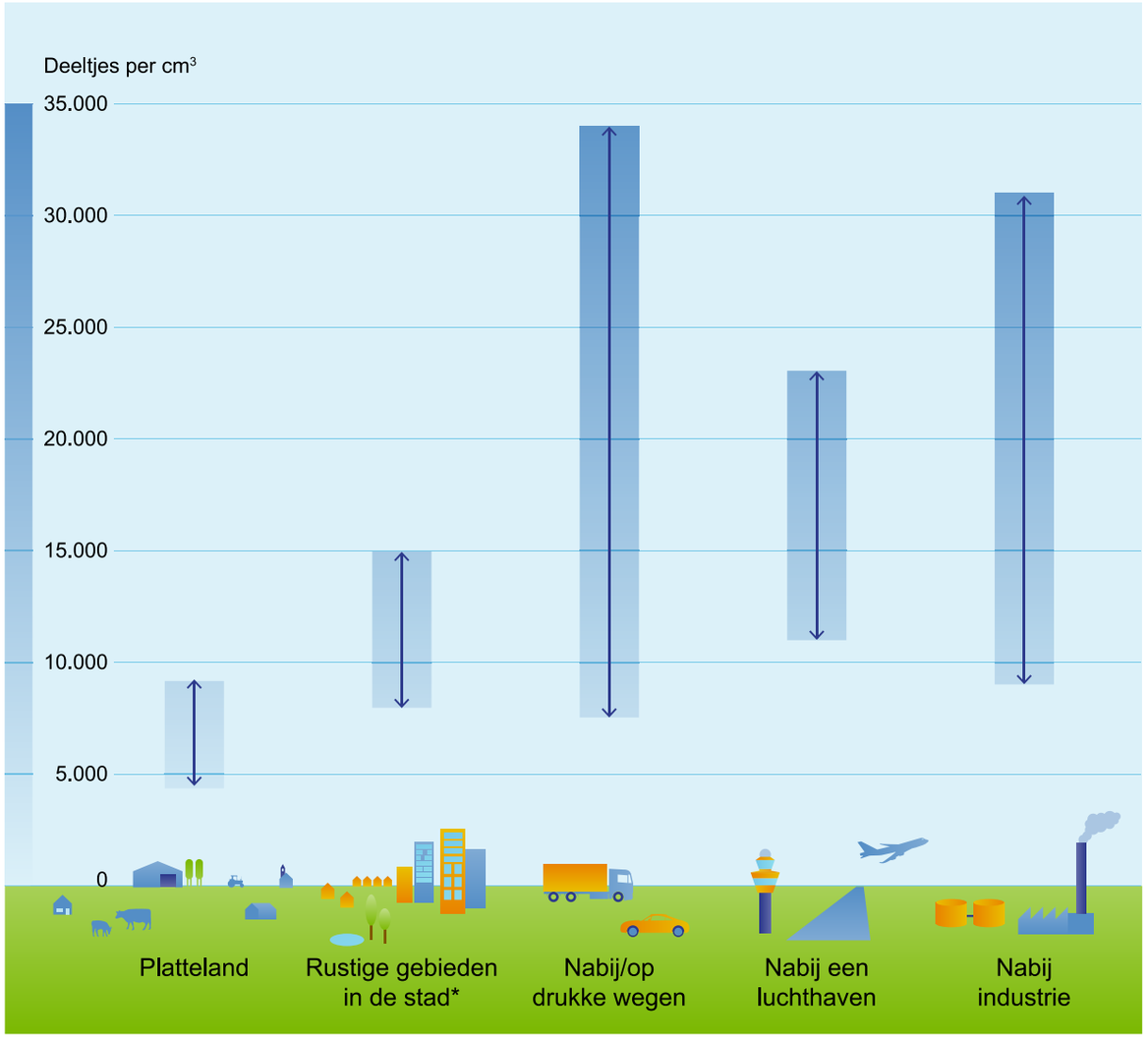
2.3 UFP-concentraties

De kwaliteit van de lucht wordt in Nederland gemeten in het Landelijk Meetnet Luchtkwaliteit van onder meer het RIVM. Continu worden op enkele tientallen plaatsen verspreid over het land metingen van verschillende componenten uitgevoerd. Daarnaast wordt de luchtkwaliteit in het hele land jaarlijks berekend, waarbij ook prognoses voor de toekomstige luchtkwaliteit worden gemaakt. Deze structurele metingen en berekeningen worden uitgevoerd voor onder meer PM10, PM2,5, roet en NO_2, maar niet voor UFP.

De kennis over UFP-concentraties in Nederland is afkomstig uit onderzoeksprojecten met gerichte meetcampagnes, vaak aangevuld met modelberekeningen. In de nabijheid van bronnen kunnen sterk verhoogde UFP-concentraties voorkomen. Door verdunning en samenklontering nemen die concentraties af als de afstand tot de bron toeneemt.
De snelheid waarmee dat gebeurt, hangt (afgezien van variatie in weersomstandigheden) onder andere af van de uitstoothoogte en de mate waarin secundair UFP wordt gevormd uit door diezelfde bron uitgestoten gasvormige verbindingen. Afhankelijk van de bron kan de UFP-concentratie tot op een afstand van honderden meters of tientallen kilometers verhoogd zijn; meer informatie daarover is te vinden in het achtergronddocument *Blootstelling aan ultrafijnstof*. Ook informatie over de samenhang tussen de UFP-concentraties en de concentratie van andere componenten van luchtverontreiniging is opgenomen in dit achtergronddocument.

Figuur 3 geeft een indruk van de achtergrondconcentraties in Nederland en de bronbijdragen van wegverkeer, vliegverkeer en industrie. Voor de overige bronnen van UFP is deze kennis niet beschikbaar.
Informatie over de studies waarop figuur 3 is gebaseerd is te vinden in het achtergronddocument.

Niveaus van ultrafijnstof in Nederland variëren sterk



Indicatie van de bandbreedte in concentraties op het platteland, in de stad, nabij/op drukke wegen, nabij luchthaven en industrie. Daar waar alleen bron*bijdragen* bekend zijn uit onderzoek (zoals nabij een luchthaven) is de concentratie geschat uitgaande van een achtergrondconcentratie van ongeveer 8.000/cm^3. De concentraties ultrafijnstof kunnen verhoogd zijn tot een afstand van enkele honderden meters van drukke wegen en tot tientallen kilometers van een luchthaven en zware industrie.

* Bijvoorbeeld parken, of straten met weinig verkeer

Figuur 3 UFP-concentraties en bronbijdragen in Nederland

Er is een grote spreiding in deze concentraties. Dat komt door variaties in bronsterkte, afstand tot de bron, meetduur en meetperiode, maar ook door verschillen in meetmethoden. UFP-concentraties worden meestal gemeten met zogeheten condensatie-deeltjestellers. Daarvan zijn verschillende typen in gebruik, met wisselende onder- en bovengrenzen voor de deeltjesgrootte. Algemeen geldt: hoe lager de ondergrens, hoe hoger de gemeten UFP-concentratie. De apparatuur om deeltjesaantallen te meten wordt steeds gevoeliger en daarmee verschuift de ondergrens van de meetmethode naar een steeds kleinere diameter.[4] Het gebruik van een uniforme en valide meetmethode zal de vergelijkbaarheid tussen de in diverse studies gemeten UFP-concentraties ten goede komen.

Er is sinds 2016 een Europese standaard voor het meten van het totale aantal deeltjes in de buitenlucht.[38] De voorgeschreven meetmethode telt de deeltjes met een ondergrens van 7 nm na condensatie van een oplosmiddel in het instrument (een zogenoemde condensatiedeeltjesteller of *condensation particle counter*). De bovengrens is gedefinieerd als 'enkele micrometers'. Sinds 2020 is er ook een Europese standaard-methode voor het meten van de deeltjesgrootteverdeling.[39]

2.4 Ontwikkeling in uitstoot en concentratie

Voor de belangrijkste componenten van luchtverontreiniging wordt de jaarlijkse uitstoot per bron bepaald en vastgelegd in de emissieregistratie van het RIVM. Voor UFP gebeurt dat niet. UFP wordt ook niet gemeten in

het Landelijk Meetnet Luchtkwaliteit; daardoor zijn er geen langjarige meetreeksen beschikbaar. Het inzicht in de ontwikkeling van de uitstoot, de bijdragen van verschillende bronnen en de concentratie is dus beperkt.

Om de jaarlijkse uitstoot van luchtverontreinigende componenten te kunnen bepalen zijn onder andere emissiefactoren per bron nodig. Voor UFP ontbreken die grotendeels. Inzicht in de UFP-emissies is echter nodig om de effecten van uitstootbeperkende maatregelen te kunnen berekenen, prognoses op te stellen en inzicht te krijgen in de atmosferische processen die de UFP-concentraties bepalen.
Op dit moment kunnen nationale emissies, grootschalige achtergrond-concentraties en lokale concentraties niet goed worden gemodelleerd.

Er zijn in het verleden wel grootschalige verspreidingsmodellen en emissie-inventarisaties ontwikkeld in het kader van Europese projecten, onder andere door TNO.[40,41] Hiermee kunnen regionale achtergrond-concentraties met een grove resolutie worden geschat. Deze modellen zijn echter niet geschikt om de kleinschalige ruimtelijke variatie te schatten, die bepalend is voor de lokale blootstelling. In epidemiologisch onderzoek worden *Land Use Regression* (LUR) modellen veel gebruikt om de ruimtelijke variatie in de blootstelling te schatten. Details over deze en andere modellen zijn te vinden in het achtergronddocument.

De beperkte meetgegevens die voorhanden zijn suggereren dat de UFP-concentraties in Nederland het afgelopen decennium ongeveer gelijk zijn gebleven. Dat blijkt onder meer uit metingen van de deeltjesgrootteverdeling door TNO op het regionaal achtergrondstation in Cabauw in de provincie Utrecht.[42] In het buitenland is er soms wel en soms niet sprake van een afname. Ook daar wordt UFP overigens nauwelijks routinematig gemeten. Meer informatie is opnieuw te vinden in het achtergronddocument.

Bezien vanuit ingezette maatregelen en technische ontwikkelingen komt voor de emissie van UFP geen eenduidig beeld naar voren. Enerzijds zijn er al allerlei maatregelen getroffen om de uitstoot van fijnstof en NO_2 terug te dringen, die ook leiden tot minder UFP-uitstoot. Een voorbeeld is de introductie van roetfilters bij het wegverkeer. Ook worden er steeds strengere emissie-eisen gesteld aan de uitstoot van wegverkeer, worden in veel steden milieuzones en emissievrije zones ingesteld en wordt elektrisch vervoer gestimuleerd. Anderzijds zijn er ontwikkelingen die juist voor een toename van UFP zorgen, zoals de toepassing van directe benzine-injectie in personenauto's.[43] Daarnaast is het aannemelijk dat ook het toenemend gebruik van houtverbranding voor de energievoorziening bijdraagt aan een hogere uitstoot van UFP.[5,34,44] Ook de gestage toename van het vliegverkeer (tot aan de COVID-19-pandemie) heeft daaraan bijgedragen.

03 gezondheidseffecten

De afgelopen jaren zijn diverse epidemiologische onderzoeken gepubliceerd over de mogelijke gevolgen van langdurige blootstelling aan UFP. Die richten zich met name op luchtwegaandoeningen, hart- en vaataandoeningen en een ongunstige groei en ontwikkeling van de foetus. Vooral op basis van deze onderzoeken vindt de commissie dat volgens de door de EPA voorgestelde en eveneens door de commissie gehanteerde beoordelingssystematiek de bewijskracht voor de betreffende effecten omhoog is gegaan: van 'onvoldoende' naar 'indicatief'. Nadere onderbouwing daarvoor bieden ook onderzoeken naar de invloed van kortdurende blootstelling aan UFP en experimentele studies naar het werkingsmechanisme van ultrafijne deeltjes.

Dat de betreffende gezondheidseffecten ook onafhankelijk van andere componenten van luchtverontreiniging optreden, rechtvaardigt naar het oordeel van de commissie extra, op UFP gerichte, maatregelen om de luchtkwaliteit verder te verbeteren.

3.1 Werking van UFP

De eerste hypothesen over een mogelijk schadelijke invloed van blootstelling aan ultrafijne stofdeeltjes dateren van enkele decennia geleden. Op basis van dierexperimentele studies werd toen gesuggereerd dat het aantal deeltjes een relevantere blootstellingsmaat zou zijn voor de gezondheidseffecten van fijn stof dan de massa.[45,46,47]
Per volume-eenheid is het aantal ultrafijne deeltjes namelijk groot. Daarnaast hebben deze deeltjes een groot (reactief) oppervlak, waardoor ze cellen en weefsels snel activeren. Na inademing via de neus wordt een deel van de ultrafijne deeltjes in de neusholte gedeponeerd. Na inademing via de mond kunnen ze diep in de longen doordringen. De verdedigingsmechanismen van het lichaam zijn minder goed in staat ultrafijne deeltjes op te ruimen dan bij grotere deeltjes het geval is. Daardoor kunnen ultrafijne deeltjes zich ophopen in de neusholte, longblaasjes en bronchioli, wat kan leiden tot ontstekingsprocessen.[48,49] De ontstekingsmediatoren (lichaamseigen afweerstoffen) die bij dit proces worden vrijgemaakt, kunnen zich via de bloedbaan en de lymfe door het lichaam verpreiden.[50] Daarnaast wordt een klein deel van de ultrafijne deeltjes vanuit de longblaasjes in de bloedbaan opgenomen. Dit kan effect hebben op onder andere de bloedstolling en het functioneren van de bloedvaten. Ook kunnen ultrafijne deeltjes via de bloedbaan door het hele lichaam verspreid worden en diverse membranen in het lichaam, die van nature een verdedigingslinie vormen, zoals de bloed-hersenbarrière en de placenta, passeren.[51,52] Ook is gebleken in dierexperimenteel onderzoek dat ultrafijne deeltjes die in de neusholte zijn gedeponeerd via opname door het neusslijmvlies en de reukzenuwen rechtstreeks de hersenen kunnen bereiken.[53] In onderzoek bij vrijwilligers bleek de hersenactiviteit te worden beïnvloed door piekblootstelling aan UFP. Dit onderbouwt het mechanisme dat UFP de hersenen kunnen bereiken.[54]

3.2 Systematiek van beoordeling

Kort samengevat wordt de bewijskracht voor een oorzakelijk verband tussen componenten van luchtverontreiniging en gezondheidseffecten gebaseerd op de volgende criteria:

- Consistentie: in hoeverre wijzen onderzoeksuitkomsten bij verschillende populaties en onder verschillende omstandigheden in eenzelfde richting?
- Coherentie: in hoeverre stemmen uitkomsten van epidemiologische en experimentele onderzoeken overeen?
- Biologische plausibiliteit: in hoeverre zijn bevindingen verklaarbaar op grond van kennis van werkingsmechanismen?
- Onzekerheid: in hoeverre spelen factoren een rol die vertekening kunnen veroorzaken, onder andere met betrekking tot blootstelling, invloed van verstorende factoren en effecten van andere componenten van luchtverontreiniging?

Aan de hand van deze criteria geeft de EPA een oordeel over de bewijskracht voor een oorzakelijk verband.[11] Daarbij onderscheidt de EPA vijf niveaus: 'aangetoond', 'waarschijnlijk', 'indicatief', 'onvoldoende' en 'onwaarschijnlijk'. Deze niveaus staan nader uitgewerkt in het achtergronddocument *Gezondheidseffecten ultrafijnstof*. De commissie hanteert deze niveaus eveneens, maar wijst er daarbij op dat de onderlinge weging van de criteria op een deskundigenoordeel berust en per gezondheidseindpunt verschillend kan uitvallen. Zo tellen goed uitgevoerde epidemiologische onderzoeken voor de commissie zwaar mee. Bovendien heeft de commissie steeds aandacht voor het totaalbeeld dat uit dergelijke onderzoeken naar voren komt. Resultaten uit dierexperimentele studies en humane blootstellingstudies leggen echter ook duidelijk gewicht in de schaal, vooral als voldoende epidemiologische gegevens – vooralsnog – ontbreken.

3.3 Gevolgen van kortdurende blootstelling

De commissie vindt dat er indicatief bewijs is dat kortdurende blootstelling aan UFP een effect heeft op de luchtwegen, het hartvaatstelsel en het zenuwstelsel. Voor een effect op metabole aandoeningen en sterfte is het bewijs onvoldoende. Tabel 1 geeft een overzicht van de bewijskracht.

Tabel 1 Bewijskracht voor gezondheidseffecten van **kortdurende** blootstelling aan UFP

	Oordeel EPA	Oordeel commissie
Luchtwegaandoeningen	Indicatief	Indicatief
Hart- en vaatziekten	Indicatief	Indicatief
Neurologische effecten	Indicatief	Indicatief
Metabole effecten	Onvoldoende	Onvoldoende
Totale sterfte	Onvoldoende	Onvoldoende

In studies naar kortdurende blootstelling wordt de relatie bestudeerd tussen tijdelijk verhoogde blootstelling aan UFP en gezondheidsuitkomsten. 'Kortdurend' is gedefinieerd als een periode variërend van enkele minuten tot ongeveer een maand.[4] Het overgrote deel van de

epidemiologische studies naar kortdurende blootstelling heeft overigens betrekking op de gemiddelde blootstelling tijdens een dag of enkele dagen.

Sinds de publicatie in 1997 van de eerste epidemiologische studie naar de invloed van kortdurende blootstelling aan UFP zijn meer dan 200 van dergelijke studies uitgevoerd. De meeste hebben betrekking op het optreden van hart- en vaatziekten en de indicatoren die de kans op het ontstaan van hart- en vaatziekten vergroten. Een kleiner deel heeft betrekking op (indicatoren voor) het optreden van luchtwegaandoeningen en in slechts een paar studies is de relatie met andere uitkomstmaten, zoals depressieve klachten en totale sterfte, onderzocht.[4,9] Meestal is niet gecorrigeerd voor de mogelijke invloed van gelijktijdig verhoogde concentraties van andere componenten van luchtverontreiniging. Naast onzekerheden over de blootstelling aan UFP beperkt dit de zeggingskracht van de onderzoeksuitkomsten. In het achtergronddocument *Gezondheidseffecten ultrafijnstof* zijn details te vinden over de beoordeelde studies.

Luchtwegaandoeningen

Er is 'indicatief bewijs' voor een kortetermijneffect van blootstelling aan UFP op het optreden van luchtwegaandoeningen**.** Vooral met ontstekingsmarkers in de luchtwegen worden consistente associaties gevonden, ook na correctie voor andere componenten van luchtverontreiniging.

De resultaten van studies naar ziekenhuisopnames en sterfte zijn minder consistent.

Hart- en vaatziekten

Er is 'indicatief bewijs' voor een kortetermijneffect van blootstelling aan UFP op het hart- en vaatstelsel. Vooral met de subklinische markers van oxidatieve stress, verhoogde hartslag en afwijkingen in het hartritme worden binnen enkele uren na verhoogde blootstelling aan UFP-consistente associaties gevonden. Dat geldt in mindere mate voor bloedstolling en een verhoogde bloeddruk. Ook de resultaten van studies naar ziekenhuisopnames en sterfte als gevolg van hart- en vaatziekten zijn minder consistent. Op basis van experimenteel onderzoek acht de commissie de associaties wel biologisch plausibel.

Neurologische effecten

Er is geen epidemiologisch onderzoek beschikbaar naar neurologische kortetermijneffecten van UFP. Hiermee wordt bedoeld: gedragsveranderingen, beïnvloeding van het leervermogen en/of concentratie, beïnvloeding van het autonome zenuwstelsel en (markers voor) ontstekingsprocessen in de hersenen. Dierexperimenteel onderzoek naar ontstekingsprocessen in de hersenen na kortdurende blootstelling aan UFP is er wel en is de reden dat de EPA in 2019 de bewijskracht als indicatief heeft beoordeeld. De commissie sluit zich daarbij aan.

Metabole effecten

Met metabole effecten wordt in dit advies bedoeld: het ontstaan van diabetes mellitus en metabool syndroom. Metabool syndroom is een chronische verstoring van de stofwisseling en een verzameling van risicofactoren voor het ontstaan van diabetes en hart- en vaatziekten (zoals overgewicht, hoog cholesterolgehalte, hoge bloeddruk en insulineresistentie). Er is vrijwel geen epidemiologische en toxicologische onderbouwing voor het optreden van metabole effecten als gevolg van kortdurende blootstelling aan UFP. De bewijskracht wordt daarom zowel door de EPA als door de commissie beoordeeld als onvoldoende.

Totale sterfte

De definitie van totale sterfte is in de Integrated Science Assessment van de EPA: de sterfte aan alle doodsoorzaken, met uitzondering van ongelukken.[4] Oorzaakspecifieke sterfte, zoals sterfte aan hart- en vaatziekten, is in dit advies meegenomen bij de beoordeling van de desbetreffende eindpunten. Er is vrijwel geen epidemiologische en toxicologische evidentie voor een toegenomen kans op totale sterfte als gevolg van UFP. De bewijskracht wordt daarom zowel door de EPA als door de commissie beoordeeld als onvoldoende.

Onderzoek rond Schiphol

Het RIVM en partners doen onderzoek naar het effect van UFP op de gezondheid van mensen die in de omgeving van Schiphol wonen. Uit het eerste deel van dit onderzoek blijkt dat kortdurende verhoogde blootstelling aan UFP de long- en hartfunctie negatief kan beïnvloeden. De gevonden verbanden gelden zowel voor blootstelling aan alle bronnen van UFP samen als voor de bijdrage die specifiek afkomstig is van het vliegverkeer. Ook na correctie voor de mogelijke invloed van andere componenten van luchtverontreiniging blijven de verbanden bestaan.[55,56] Details over dit onderzoek staan in het achtergronddocument. Uitkomsten van het nog lopende onderzoek naar langetermijneffecten van blootstelling aan UFP rond Schiphol verschijnen naar verwachting in het eerste kwartaal van 2022.

3.4 Gevolgen van langdurige blootstelling

De commissie constateert dat er steeds meer aanwijzingen zijn uit wetenschappelijk onderzoek dat langdurige blootstelling aan UFP negatief kan uitpakken voor de gezondheid. Met name de luchtwegen, hart en vaten en de ontwikkeling en groei van de foetus kunnen schade oplopen. Ten tijde van het overzichtsrapport van de EPA[4] waren tien studies naar langetermijneffecten van UFP gepubliceerd. Ook een overzichtsartikel van Ohlwein[9] baseerde zich op deze tien studies. Inmiddels zijn de resultaten gepubliceerd van 26 studies (tabel 2). Vooral de toename van het aantal cohortstudies heeft het wetenschappelijk inzicht in langetermijneffecten van UFP-blootstelling vergroot. In de meeste nieuwe studies is de blootstelling zorgvuldig in kaart gebracht en is zo goed mogelijk gecorrigeerd voor de invloed van verstorende variabelen. In een groot deel van de studies is daarnaast ook gecorrigeerd voor andere componenten van luchtverontreiniging ("co-pollutants"). Voorheen ontbrak het daaraan, wat ook in de evaluatie van de EPA en het advies van de Gezondheidsraad uit 2018 als zwak punt werd bestempeld.[4] De zeggingskracht van de studies neemt daardoor toe. Dat neemt niet weg dat er ook onzekerheid blijft. Vergeleken met 'gewoon' fijnstof is de gegevensbasis voor UFP beperkt. Ook is er dikwijls sprake van een aanzienlijke onzekerheid in de blootstellingsschatting.

Tabel 2 Aantal onderzoeken naar gezondheidseffecten van langdurige blootstelling aan UFP en aantal onderzoeken waarin is gecorrigeerd voor andere componenten van luchtverontreiniging ('co-pollutants')

Gezondheidseffect	Aantal studies t/m 2017	Waarvan met correctie voor co-pollutants	Aantal studies na 2017	Waarvan met correctie voor co-pollutants
Luchtwegaandoeningen	1	0	3	2
Systemisch*	4	2	3	1
Hart- en vaatziekten	2	0	3	3
Ongunstige groei en ontwikkeling van de foetus	3	0	2	2
Neurologische effecten	1	0	0	0
Metabole effecten	0	0	3	1
Kanker	0	0	5	4
Sterfte (totaal)	1	0	0	0
Totaal	*12*	*2*	*19*	*13*
Aantal unieke studies	*10*	*2*	*16*	*13*

* Ontstekingsreacties en oxidatieve stress in de bloedbaan zijn geassocieerd met het ontstaan van hart- en vaatziekten maar ook met effecten in de hersenen en kunnen in principe in het hele lichaam effecten verzoorzaken.

De commissie oordeelt dat voor met name hart- en vaatziekten maar ook voor luchtwegaandoeningen en een ongunstige groei en ontwikkeling van de foetus de bewijskracht voor een effect van langdurige blootstelling is toegenomen ten opzichte van het oordeel van de EPA in 2019 (zie tabel 3).

Tabel 3 Beoordeling van de bewijskracht voor gezondheidseffecten van langdurige blootstelling aan UFP

	Oordeel EPA 2019	Oordeel commissie
Luchtwegaandoeningen	Onvoldoende	Indicatief
Hart- en vaatziekten	Onvoldoende	Indicatief
Foetale groei en ontwikkeling	Onvoldoende	Indicatief
Neurologische effecten	Indicatief	Indicatief
Metabole effecten	Onvoldoende	Onvoldoende
Kanker	Onvoldoende	Onvoldoende
Sterfte (totaal)	Onvoldoende	Onvoldoende

Hieronder worden de studies per gezondheidseindpunt kort beschreven. Meer informatie is te vinden in het achtergronddocument *Gezondheids-effecten ultrafijnstof*. Daarin is ook een samenvattende tabel opgenomen met de kenmerken van alle 26 epidemiologische studies naar langetermijnblootstelling. Behalve informatie over de gevonden associaties met UFP geeft deze tabel informatie over onder meer de onderzochte populatie, karakterisering van de blootstelling, niveaus van UFP, correctie voor verstorende variabelen (confounders) en correctie voor co-pollutants.

3.4.1 Luchtwegaandoeningen

In twee grote Canadese cohortonderzoeken is de invloed van langdurige blootstelling aan UFP op het ontstaan van astma bij kinderen en het ontstaan van astma en COPD bij volwassenen onderzocht. In beide studies is de blootstelling aan UFP geschat op basis van hetzelfde *Land Use Regression* (LUR) model, gebaseerd op metingen van deeltjesaantallen (PNC) op de weg[57]. Bij kinderen werd een significant verband gevonden tussen blootstelling aan UFP vanaf de geboorte en de incidentie van astma tot 6-jarige leeftijd; die nam toe met 3% bij een toename van 11.000 deeltjes/cm^3 in UFP-concentratie.[58] Bij volwassenen werd een significant verband gevonden met het ontstaan van COPD; die nam toe met 6% bij een toename van 11.000 deeltjes/cm^3 in UFP-concentratie. Ook met het ontstaan van astma bij volwassenen werd een significant verband gevonden, maar de associatie was zo zwak dat die niet goed te interpreteren is.[59] Ook is in beide studies gecorrigeerd voor de mogelijke invloed van voor andere componenten van lucht-verontreiniging en voor andere verstorende factoren. Dit reduceert de sterkte en statistische significantie van de gerapporteerde bevindingen.

In een cohortstudie in Californië, gebaseerd op de met een verspreidings-model geschatte PM0,1-concentratie op een vrij grove resolutie (4x4 km) werd geen verband gevonden tussen blootstelling aan UFP en sterfte aan luchtwegaandoeningen.[60] Ook in een dwarsdoorsnede-onderzoek onder schoolkinderen in Brisbane werd geen relatie gevonden tussen blootstelling aan UFP en het voorkomen van chronische luchtweg-aandoeningen en een verminderde longfunctie. Het gehalte ontstekings-markers in uitademingslucht was niet verhoogd, maar een hogere blootstelling aan UFP was wel geassocieerd met toename van een marker voor systemische ontstekingsprocessen in het bloed. In de subgroep van kinderen met een atopische aanleg een significante associatie gevonden

tussen UFP-blootstelling en markers voor systemische ontstekings-processen en ontstekingen in de luchtwegen.[61]

Concluderend vindt de commissie dat het oordeel van de EPA over de bewijskracht ('onvoldoende') moet worden aangepast naar 'indicatief'. Primair berust het oordeel van de commissie op de gevonden verbanden in de twee grote cohortstudies met correcties voor de mogelijke invloed van andere componenten van luchtverontreiniging en andere verstorende factoren. Verder heeft zij laten meewegen dat er uit dier- en humaan experimenteel onderzoek ook enige evidentie naar voren komt over effecten van kortdurende blootstelling aan UFP op de luchtwegen. In verband hiermee acht de commissie het aannemelijk dat herhaalde kortdurende effecten het risico op chronische effecten vergroten.

3.4.2 Hart- en vaatziekten

In twee longitudinale studies, uitgevoerd in eenzelfde cohort van ruim 1 miljoen inwoners van Toronto, nam het risico op hypertensie toe met 3%[62] en nam ook het risico op hartfalen en hartinfarct toe met 3%[63] bij een toename van 10.000 deeltjes/cm^3. In beide studies, die gebaseerd waren op dezelfde schatting van de blootstelling, bleven deze associaties aanwezig na correctie voor andere componenten van luchtverontreiniging en belangrijke verstorende factoren op individueel niveau. Er waren geen aanwijzingen voor een verhoogde gevoeligheid van bepaalde groepen mensen.

In een cohortstudie in Californië werd een toename van 5% in sterfte aan ischemische hartziekten gevonden bij een toename van 1 µg/m^3 in PM0,1 massaconcentratie.[60] Hier is niet gecorrigeerd voor andere componenten van luchtverontreiniging. In een cohortstudie in Nederland is de associatie tussen UFP-blootstelling en het ontstaan van hart- en vaatziekten onderzocht bij volwassenen uit Amsterdam, Utrecht en Maastricht die bij aanvang van de follow-up periode van 15 jaar geen hart- en vaatziekten hadden. De langetermijnblootstelling op het huisadres werd met een LUR model geschat. De kans op het ontstaan van hartfalen, hartinfarct en coronaire hartziekten nam significant toe bij hogere UFP-blootstelling. Na correctie voor de mogelijke invloed van PM10 en PM2,5 bleef alleen de associatie met de gecombineerde incidentie van hart- en vaatziekten significant. De gecombineerde incidentie van hart- en vaatziekten nam toe met 18% bij een toename van 10.000 deeltjes/cm^3.[64]

Verder zijn verschillende dwarsdoorsnede-onderzoeken gedaan waarin de associatie met indicatoren voor het ontstaan van hart- en vaatziekten is onderzocht. Een Zwitserse studie vond een statistisch significant verband met een interne verdikking van de halsslagader, een goede voorspeller voor atherosclerose.[65] Na correctie voor PM2,5 en PM10 was deze associatie niet langer statistisch significant, maar door de sterke correlatie van UFP met deze beide componenten (correlatie van 0,9) kunnen de afzonderlijke effecten niet goed worden bepaald.

In vier andere dwarsdoorsnedestudies bleek het bloedgehalte aan CRP, een eiwit dat duidt op milde chronische ontsteking in de bloedvaten, verhoogd bij hogere blootstelling aan UFP, al was deze toename in alle vier de studies net niet statistisch significant.[66,67,68,69] Worden echter de uitkomsten van de vier studies tezamen genomen door de commissie, dan is het geschatte effect van langdurige blootstelling aan 10.000 deeltjes per cm^3 een verhoging in CRP van 11% (95%-betrouwbaarheidsinterval: 8% – 14%). Voor de stollingsfactor fibrinogeen werd geen verband gevonden.[67,66] Ook ontbrak een associatie met bloeddruk[68], cytokines[66] en het totale aantal witte bloedcellen.[67]

Daarnaast wijzen resultaten van dier- en humaan experimenteel onderzoek met kortdurende blootstelling op een ongunstig effect van UFP op de bloedstolling en de werking van de bloedvaten.[70] De commissie acht het aannemelijk dat hierdoor tevens het risico op chronische effecten toeneemt.

De nieuwe epidemiologische studies duiden op consistente effecten over de hele breedte van de onderzochte eindpunten. Belangrijk daarbij is dat in veel gevallen gecorrigeerd is voor de mogelijke invloed van andere componenten van luchtverontreiniging. Beperkingen zijn er echter ook. Zo zijn niet alle gevonden verbanden van UFP met effecten afzonderlijk bekeken van andere componenten in de lucht, steeds statistisch significant in de individuele studie, en kon soms alleen indirect en niet op individueel niveau worden gecorrigeerd voor de verstorende invloed van factoren als roken en overgewicht. Al met al is er naar het oordeel van de commissie inmiddels echter voldoende grond om de beoordeling door de EPA ('onvoldoende bewijs') te herzien. De commissie kwalificeert de bewijskracht bij de huidige stand van kennis als 'indicatief'.

3.4.3 Ongunstige groei en ontwikkeling van de foetus

Te vroeg geboren baby's (geboren na een zwangerschapsduur van minder dan 37 weken) en baby's met een te laag geboortegewicht (<2.500 gram bij een zwangerschapsduur van 37 weken of meer) hebben een grotere kans op ziekte en sterfte rondom de geboorte en in het eerste levensjaar. Ook hebben ze een grotere kans op zintuiglijke, motorische en verstandelijke beperkingen en op het ontstaan van chronische aandoeningen op latere leeftijd, waaronder astma, diabetes en hart- en vaatziekten.[71,72,73] Mogelijke verklaringen voor de negatieve invloed op de groei en ontwikkeling van de foetus zijn hormonale verstoring, een verminderde werking van de placenta of het ontstaan van oxidatieve stress.[74,75]

Er zijn twee studies gepubliceerd naar de relatie tussen blootstelling van de moeder aan UFP tijdens de zwangerschap en het risico op een baby met een te laag geboortegewicht.[76,77] In beide studies is de blootstelling aan primair UFP (PM0,1) geschat op een vrij grove ruimtelijke schaal, met een verspreidingsmodel waarin de UFP-uitstoot van alle bronnen is

opgenomen. Het onderzoek in heel Californië liet geen verband zien met PM0,1. Evenmin werd een verband gevonden met de gemodelleerde PN-concentraties afkomstig van wegverkeer, behalve voor een kleine groep zwangere vrouwen waarvoor de blootstelling nauwkeuriger kon worden geschat.[77] In het in Los Angeles uitgevoerde onderzoek werd wel een significant verband gevonden.[76] In dat onderzoek is de relatie met UFP afkomstig van wegverkeer niet onderzocht. In beide studies is niet gecorrigeerd voor andere componenten van luchtverontreiniging.

Verder zijn er twee studies gedaan naar de relatie tussen UFP-blootstelling van de moeder en de kans op een vroeggeboorte, dat wil zeggen een zwangerschapsduur van minder dan 37 weken.

Een case-controlstudie naar de relatie met vroeggeboorte, eveneens uitgevoerd in Californië door dezelfde onderzoekers, liet een significant verband zien met blootstelling aan gemodelleerd primair PM0,1. Met de PN-concentratie afkomstig van wegverkeer werd geen verband gevonden, behalve voor het deel van de zwangere vrouwen waarvoor de blootstelling nauwkeuriger kon worden geschat.[78] In een andere case-controlstudie naar vroeggeboorte is de relatie met de gemodelleerde blootstelling aan UFP afkomstig van vliegverkeer rond de luchthaven van Los Angeles onderzocht.[79] Na correctie voor verstorende variabelen, waaronder de mogelijke invloed van stikstofdioxide en het geluid van vliegverkeer, werd een concentratie-responsrelatie gevonden tussen de gemodelleerde bijdrage van vliegverkeer aan de PN-concentraties en het risico op een vroeggeboorte.

Een beperking is dat alle vier studies naar geboortegewicht en vroeggeboorte zijn uitgevoerd op basis van gegevens van de Californische geboorteregistratie. Daar staat tegenover dat Californië een grote staat is met bijna 40 miljoen inwoners, een grote variatie heeft in UFP-concentratie en een grote variatie in bronbijdragen. Daarnaast zijn significante associaties gevonden met totaal-UFP (PM0,1 massa), UFP afkomstig van wegverkeer en UFP afkomstig van vliegverkeer. Onzekerheid in de blootstellingschatting speelt zeker een rol, ook omdat in drie van de vier studies geen exacte woonadressen zijn gebruikt. Dit heeft waarschijnlijk een onderschatting van het effect van UFP tot gevolg. Dat blijkt ook uit het feit dat de effectschatting toenam als de analyse werd beperkt tot vrouwen waarvoor een meer gedetailleerde blootstelling-schatting mogelijk was.

In Toronto werd onderzoek gedaan naar het verband tussen blootstelling van zwangere vrouwen aan ultrafijne deeltjes, op basis van gemodelleerde PN-concentraties, en aangeboren hartafwijkingen bij hun baby's.[80] De onderzoekers vonden geen verband met de incidentie van zeven typen aangeboren hartafwijkingen. Ook werd geen associatie gevonden met het voorkomen van een atriumseptumdefect (een opening in het kamertussenschot). Wel kwam een significant verband met het

voorkomen van een ventrikelseptumdefect (een opening in het boezemtussenschot) naar voren. Na correctie voor de invloed van andere componenten van luchtverontreiniging bleef die associatie significant.

Toxicologisch onderzoek duidt op biologische plausibiliteit van de onderzochte verbanden.[51] Duidelijk is dat ultrafijne deeltjes van verschillende oorsprong in het vruchtwater en de bloedsomloop en organen van de zich ontwikkelende foetus terecht kunnen komen. Ook is gebleken dat deeltjes makkelijker de placentabarrière weten te passeren en de foetus kunnen bereiken naarmate ze kleiner zijn. Volgens de commissie is nog onduidelijk welke schade hierdoor ontstaat. Hypothesen hierover zijn dat de werking van de placenta vermindert, er een hogere oxidatieve stress is of de hormonale balans verstoord raakt.[81]

De commissie concludeert dat er weliswaar nog diverse onzekerheden bestaan over de mogelijke risico’s en dat de beschikbare epidemiologische onderzoeken nog manco’s vertonen, maar beoordeelt op basis van het geheel aan informatie de bewijskracht als ‘indicatief’.

3.4.4 Neurologische effecten

Voor een oordeel over het effect van UFP op het zenuwstelsel is er met name experimenteel onderzoek beschikbaar. Zo kunnen ultrafijne deeltjes de bloed-hersenbarrière passeren, via de bloedbaan in het hersenvocht worden opgenomen en bovendien via de reukzenuwen rechtstreeks naar de hersenen worden getransporteerd. Er zijn daarnaast aanwijzingen dat blootstelling aan UFP kan leiden tot ontstekingsreacties in de hersenen. Deze reacties kunnen neurodegeneratieve ziekten verergeren en gevolgen hebben voor de morfologie van de hersenen en afgifte van neurotransmitters die van invloed zijn op het geheugen en gedrag.[52]

Er is slechts één epidemiologische studie op dit gebied.[82] Daarin is gekeken naar de relatie met de cognitieve groei bij schoolkinderen uit Barcelona. Gedurende een jaar werden herhaaldelijk hun werkgeheugen en concentratievermogen getest. Kinderen die aan hogere UFP-concentraties werden blootgesteld, vooral afkomstig van wegverkeer, vertoonden in de loop van een jaar een iets mindere cognitieve groei dan hun leeftijdgenoten die aan lagere niveaus blootstonden. In deze studie is gecorrigeerd voor geluid (van wegverkeer), maar niet voor andere componenten van luchtverontreiniging. Zodoende valt niet uit te sluiten dat dit effect aan andere factoren kan worden toegeschreven.

Op basis van voornamelijk experimenteel onderzoek beoordeelde de EPA de bewijskracht voor het optreden van neurologische effecten als ‘indicatief’. In dit geval geven het experimentele onderzoek en de biologische plausibiliteit ook voor de commissie de doorslag, en sluit zij zich aan bij het oordeel van EPA.

3.4.5 Metabole effecten

Over de relatie tussen langdurige blootstelling aan UFP en metabole aandoeningen zijn drie epidemiologische onderzoeken gepubliceerd, alle na 2017. Een cohortstudie in Toronto liet, ook na correctie voor de mogelijke invloed van PM2,5 en PM10, een significant verband zien met een toename van de incidentie van diabetes onder volwassenen. De blootstelling aan UFP in dit onderzoek is geschat op basis van hetzelfde LUR model als bij de andere studies in dit Canadese cohort, gebaseerd op metingen van deeltjesaantallen (PNC) op de weg.[57] Het risico op diabetes nam toe met 6% bij een toename van 10.000 deeltjes/cm^3.[62] In een Duits onderzoek werd een associatie gevonden tussen de UFP-concentratie op het huisadres en een toename van een marker voor insulineresistentie in het bloed.[83] In een dwarsdoorsnede-studie bij schoolkinderen uit Barcelona werd een positieve, maar net niet significante associatie gevonden tussen blootstelling aan UFP en overgewicht en obesitas.[84] In beide laatstgenoemde studies is wel gecorrigeerd voor belangrijke individuele factoren zoals sociaal-economische factoren en roken, maar is niet gecorrigeerd voor de mogelijke invloed van andere componenten van luchtverontreiniging.

De onderzoeken kunnen duiden op een mogelijk verband met metabole effecten, maar er is geen onderbouwing uit experimentele studies. Al met al acht de commissie de bewijskracht op dit punt onvoldoende.

3.4.6 Kanker

Alle studies naar een mogelijk verband van UFP met kanker zijn uitgevoerd in Toronto en Montreal door dezelfde onderzoekers. De blootstelling aan UFP is geschat op basis van hetzelfde LUR model als bij de andere studies in dit Canadese cohort, gebaseerd op metingen van deeltjesaantallen (PNC) op de weg.[57] Er werd geen relatie gevonden tussen langdurige blootstelling aan UFP en het risico op longkanker in een cohortstudie bij ruim een miljoen volwassenen.[59] In een case-controlstudie is evenmin een relatie gevonden met borstkanker bij postmenopauzale vrouwen.[85]. Een case-controlstudie liet wel een significant verband zien met een risico op prostaatkanker. Dit nam toe met 10% bij een toename van 4.000 deeltjes/cm^3.[86] In een cohortstudie werd ook een significante associatie gevonden met hersentumoren (10% toename per 10.000 deeltjes/cm^3).[87] Weinig eenduidig waren de resultaten van een cohort-studie naar de relatie tussen langdurige blootstelling aan UFP van moeder en kind en de incidentie van kanker.[88] In deze studie zijn zo veel soorten kanker en blootstellingsvariabelen onderzocht dat toevalsbevindingen een grote rol spelen.

Aan de studie naar kanker bij kinderen kan de commissie daarom geen conclusies te verbinden. De zeggingskracht van de studies naar UFP-blootstelling en kanker wordt beperkt doordat elk type kanker in slechts één studie is onderzocht. Er werd geen verband gevonden met de incidentie van longkanker en borstkanker; wel met de incidentie van

hersentumoren en prostaatkanker, maar onderbouwing daarvoor uit experimentele studies ontbreekt. De International Agency for Research on Cancer van de WHO heeft buitenluchtverontreiniging in haar totaliteit gekwalificeerd als bewezen kankerverwekkend.[89] Of dit ook voor UFP geldt en zo ja in welke mate, is volgens de commissie onvoldoende duidelijk. Enige aanwijzingen zijn er wel. Zo blijkt kortdurende blootstelling aan UFP verband te houden met een toename van biomarkers voor DNA-schade in bloed en urine.[90] Voor een eindoordeel op dit punt is het echter te vroeg. De commissie acht de bewijskracht voor een oorzakelijk verband tussen langdurige blootstelling aan UFP en verhoogde risico's op kanker dan ook onvoldoende.

3.4.7 Totale sterfte

Er is één studie waarin de relatie tussen langdurige blootstelling aan primair UFP (PM0,1) en totale sterfte is onderzocht. In dit in 2015 gepubliceerde cohortonderzoek, uitgevoerd in Californië, werd geen associatie gevonden.[60] De commissie concludeert dat er onvoldoende bewijs is voor een verband tussen langdurige blootstelling aan UFP en totale sterfte.

3.5 Tot slot

In het Gezondheidsraadadvies *Gezondheidswinst door schonere lucht* uit 2018 is de ziektelast van de Nederlandse bevolking berekend als gevolg van blootstelling aan fijnstof, NO_2 en ozon. Dat is gedaan voor de aandoeningen waarvoor de bewijskracht door de EPA in 2009 als 'bewezen' of 'waarschijnlijk' werd beoordeeld. Voor deze aandoeningen is voldoende kennis aanwezig over de relatie tussen concentratie en effect (zogeheten CRF's: concentratie-responsfuncties). De becijferingen waren mogelijk op basis van meta-analyses van een groot aantal studies. Voor UFP zijn die CRF's nog niet vast te stellen. Ten eerste doordat er, vanwege het kleine aantal studies per aandoening, nog geen meta-analyses zijn gepubliceerd. Ten tweede doordat de manier waarop de blootstelling aan UFP is bepaald verschilt tussen studies, zowel door het gebruik van verschillende meetapparatuur (met verschillende ondergrenzen van de deeltjegrootte) als door metingen op verschillende locaties. Zo vallen de UFP-concentraties in de studies in het relatief 'schone' Toronto hoog uit (gemiddeld 28.000 deeltjes/cm^3), doordat de metingen zijn uitgevoerd met een rijdende auto op de weg. In de Nederlandse studie, waar de blootstellingsschatting is gebaseerd op metingen aan de gevel van woningen en dus op grotere afstand van het verkeer, is de UFP-concentratie met gemiddeld 11.000 deeltjes/cm^3 een stuk lager.[64] Dergelijke verschillen beïnvloeden de bepaling van de blootstelling aan UFP en dus ook de sterkte van de relatie tussen de blootstelling aan UFP en de verschillende aandoeningen. Mede daardoor is het ook nog te vroeg om gezondheidskundige advieswaarden op te kunnen stellen.

Hoewel het aantal epidemiologische studies naar de relatie tussen blootstelling aan UFP en gezondheid de afgelopen jaren flink is

toegenomen, is de kennis over de invloed van UFP nog steeds beperkt in vergelijking tot de kennis over fijnstof, NO_2 en ozon. Evengoed zijn er steeds meer aanwijzingen dat ook UFP, onafhankelijk van de andere componenten van luchtverontreiniging, kan leiden tot gezondheids-effecten. Omdat deze betrekking hebben op veel voorkomende aandoeningen in de Nederlandse bevolking, zou dat een substantiële bijdrage kunnen leveren aan de ziektelast in de Nederlandse bevolking.

Naar het oordeel van de commissie vraagt dit om nadere maatregelen ter bescherming van de volksgezondheid.

04 aangrijpingspunten voor beleid

Met het Schone Lucht Akkoord en het Klimaatakkoord is al veel in gang gezet om de luchtkwaliteit in ons land te verbeteren. Voor de aanpak van UFP zijn de getroffen en voorgenomen maatregelen echter niet toereikend. Gelet op het toegenomen bewijs over de gezondheidsschade door UFP is aanvullende actie gerechtvaardigd.

Voorop staan maatregelen om de uitstoot van UFP te verminderen. Ook is het belangrijk om de blootstelling aan UFP structureel te monitoren. Daarnaast is het stellen van emissie-eisen een belangrijk beleids-intrument. Voor sommige bronnen, zoals wegverkeer, bestaan al Europese uitstooteisen ten aanzien van het aantal (vaste) deeltjes.

4.1 Terugdringen uitstoot

Per bron zijn er aangrijpingspunten om de blootstelling aan UFP terug te dringen. Vanwege het beperkte inzicht in de bijdrage van bronnen (anders dan vlieg- en wegverkeer) aan de UFP-concentraties is het prioriteren van dergelijke maatregelen volgens de commissie op wetenschappelijke gronden nog niet mogelijk. De commissie kan evenmin kwantitatieve uitspraken doen over het effect van de maatregelen op UFP-concentraties.

4.1.1. Wegverkeer

In vergelijking met andere bronnen van UFP zijn bij het wegverkeer al belangrijke stappen gezet om de uitstoot terug te dringen, waaronder de introductie van roetfilters en eisen aan de maximale uitstoot van het aantal deeltjes waaraan nieuwe voertuigen moeten voldoen (vanaf emissienorm euro VI/6). Een fors deel van het wagenpark bestaat echter (nog) uit oudere voertuigen. Op de korte termijn kan de blootstelling aan UFP verder verlaagd worden door het instellen van milieuzones voor diverse typen voertuigen (personenauto's, bestelauto's, vrachtwagens, bussen, brommers en scooters) en uitstootvrije zones in steden. Ook de transitie naar actief transport (fietsen, lopen) draagt bij aan een verminderde UFP-uitstoot. Dat heeft als bijkomend voordeel dat meer bewegen grote gezondheidsvoordelen heeft.[91,92]

Verder is volgens de commissie een voortgaande transitie naar elektrisch vervoer essentieel. Zeker als de daarvoor benodigde energie afkomstig is van duurzame bronnen, draagt dit bij aan het terugdringen van de UFP-uitstoot door het wegverkeer.

4.1.2 Luchtvaart

Verlaging van het zwavelgehalte in kerosine kan de UFP-emissies van het vliegverkeer sterk terugdringen. Het ontwikkelen van synthetische brandstoffen kan daar op de lange termijn aan bijdragen. De overheid heeft in de Luchtvaartnota al aangegeven zich in te zetten voor onder meer het benutten en ontwikkelen van duurzame brandstoffen en efficiënte vliegtuigmotoren en voor elektrisch taxiën. Ook versnelde omschakeling op elektrisch transport op en rond luchthavens leidt tot

beperking van de uitstoot. Ook zou de UFP-uitstoot worden teruggedrongen door vermindering van het aantal vliegbewegingen. UFP komt vooral vrij bij het opstijgen van vliegtuigen en daarnaast bij het taxiën en landen.[21]

4.1.3 Mobiele werktuigen en scheepvaart

Met de introductie van Europese eisen aan de uitstoot van deeltjesaantallen voor NRMM (Stage V) zijn eerste stappen gezet om de UFP-emissie terug te dringen. Aan belangrijke groepen motoren (zoals bij kleinere binnenvaartschepen, goederentreinen, zware aggregaten) worden echter geen eisen gesteld. Volgens de commissie is dit wel nodig. Doordat motoren voor (onder meer) mobiele werktuigen en binnenvaartschepen doorgaans een zeer lange levensduur hebben, zullen 'vervuilende' mobiele werktuigen en schepen echter nog lang in omloop zijn.

De uitstoot van UFP door mobiele werktuigen zou onder meer kunnen worden beperkt door milieuzones in te stellen. In zulke zones zouden dan alleen 'schone' aggregaten en machines mogen worden gebruikt op bouwplaatsen. Verder zou de UFP-emissie door mobiele werktuigen geregistreerd kunnen worden via bijvoorbeeld een 'APK voor mobiele werktuigen'. Nu ontbreekt een dergelijke registratie nog, waardoor er nauwelijks inzicht is in de totale uitstoot, de ruimtelijke verdeling van die uitstoot en de bijdrage daarvan aan de concentratie in de lucht.

Toepassing van roetfilters op binnenvaartschepen, overschakelen op synthetische brandstoffen en een hybride aandrijving kan de UFP-uitstoot van de binnenvaart beperken. Efficiënte motoren zijn voor de scheepvaart als geheel ook van groot belang. Daarnaast is de luchtkwaliteit te verbeteren als schepen die in de haven liggen niet hun generatoren en hulpmotoren gebruiken, maar elektriciteitsvoorzieningen aan de wal (walstroom).

4.1.4 Industrie, houtverbranding, huishoudens

Aan de industrie en de energieproductie worden nog geen uitstooteisen gesteld op basis van deeltjesaantallen. De commissie beveelt aan om het inzicht in de bijdrage van industriële bronnen aan de UFP-concentraties in de omgeving te vergroten. Ook adviseert de commissie te onderzoeken welke maatregelen nodig zijn om deze uitstoot terug te dringen.

Verder is aannemelijk dat ook het toenemend gebruik van houtstook voor de energievoorziening debet is aan een hogere emissie van UFP. Het monitoren van de deeltjesaantallen in de uitstoot van biomassacentrales kan daar inzicht in geven. Minder stoken van hout door particulieren zal ook bijdragen aan vermindering van de uitstoot.

4.2 Afstand creëren tot bronnen

Een tweede aangrijpingspunt om de blootstelling aan UFP te verminderen is door afstand te creëren tussen mensen en de bronnen van verontreiniging. Zolang de transitie naar elektrisch vervoer nog niet voltooid is, kan de leefomgeving zodanig worden ingericht dat langdurig verhoogde blootstelling aan UFP zoveel mogelijk wordt beperkt. Dat kan bijvoorbeeld door bij de bouw van nieuwe woningen een zo groot mogelijke afstand aan te houden tot drukke (snel)wegen. Omgekeerd kan bij de aanleg van nieuwe wegen rekening worden gehouden met de aanwezigheid van woningen. Ook in het advies uit 2018 benadrukte de Gezondheidsraad het belang van afstand houden tot bronnen.[2]

4.3 Monitoring van UFP-concentraties en andere aanbevelingen

Omdat UFP tot nu toe niet routinematig wordt gemeten, adviseert de commissie om op enkele strategisch gekozen meetlocaties in het Landelijk Meetnet Luchtkwaliteit gestandaardiseerde metingen van UFP toe te voegen. Bepaling van emissiefactoren, het registreren van UFP-emissies en het ontwikkelen van verspreidingsmodellen zijn voorwaarden om uiteindelijk UFP-concentraties in Nederland goed te kunnen monitoren en prognoses op te stellen, net zoals dat wordt gedaan voor PM10, PM2,5, NO_2, roet en diverse andere componenten van luchtverontreiniging.

Bovendien zijn routinematige UFP-metingen en een betere schatting van de blootstelling van belang voor nader epidemiologisch onderzoek naar CRF's (concentratie-responsfuncties). De huidige stand van kennis laat, zoals de commissie in hoofdstuk 3 al opmerkte, over deze functies nog geen heldere conclusies toe. Ook aanvullend toxicologisch onderzoek kan hierbij meer licht op de zaak werpen, met name bij niveaus zoals die in de buitenlucht en in de nabijheid van bronnen voorkomen.

4.4 Niet afwachten

Hoewel nadere inzichten en preciezere bepalingen gewenst zijn, is het volgens de commissie niet nodig om te wachten met het treffen van maatregelen. Er zijn namelijk steeds sterkere aanwijzingen dat UFP de gezondheid kan schaden. Bovendien dringen veel maatregelen ook de uitstoot van andere componenten van luchtverontreiniging terug.

literatuur

1 Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. *Uitvoeringsagenda Schone Lucht Akkoord 2021-2023*. Den Haag: rapport 26-3-2021.

2 Gezondheidsraad. *Gezondheidswinst door schonere lucht*. Den Haag, 2018; publicatie nr. 2018/01.

3 Kwon HS, Ryu MH, Carlsten C. *Ultrafine particles: unique physicochemical properties relevant to health and disease*. Exp Mol Med 2020; 52(3): 318-328.

4 EPA US. U.S. Environmental Protection Agency. *Integrated Science Assessment (ISA) for Particulate Matter* Washington, DC, 2019; EPA/600/R-19/188.

5 Trojanowski R, Fthenakis V. *Nanoparticle emissions from residential wood combustion: A critical literature review, characterization, and recommendations*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2019; 103: 515-528.

6 Zuurbier M, Willems J, Schaap I, Van der Zee S, Hoek G. *The contribution of moped emissions to ultrafine and fine particle concentrations on bike lanes*. Sci Total Environ 2019; 686: 191-198.

7 Presto AA, Saha PK, Robinson AL. *Past, present, and future of ultrafine particle exposures in North America*. Atmospheric Environment: X Open AccessVolume 10 April 2021 Article number 100109.

8 Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. *Adviesaanvraag ultrafijn stof 10 januari 2020*. Den Haag.

9 Ohlwein S, Kappeler R, Kutlar Joss M, Kunzli N, Hoffmann B. *Health effects of ultrafine particles: a systematic literature review update of epidemiological evidence*. Int J Public Health 2019; 64(4): 547-559.

10 Health Effects Institute. *Understanding the health effects of ambient ultrafine particles*. Boston, 2013.

11 EPA. U.S. Environmental Protection Agency. *Preamble To The Integrated Science Assessments (ISA)*. Washington, DC., 2015; EPA/600/R-15/067, 2015.

12 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.

13 Wang M, Kong W, Marten R, He XC, Chen D, Pfeifer J, et al. *Rapid growth of new atmospheric particles by nitric acid and ammonia condensation*. Nature 2020; 581(7807): 184-189.

14 Massoli P, Onasch TB, Cappa CD, Nuamaan I, Hakala J, Hayden K, et al. *Characterization of black carbon-containing particles from soot particle aerosol mass spectrometer measurements on the R/VAtlantisduring CalNex 2010*. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 2015; 120(6): 2575-2593.

15 Morawska L, Ayoko GA, Bae GN, Buonanno G, Chao CYH, Clifford S, et al. *Airborne particles in indoor environment of homes, schools, offices and aged care facilities: The main routes of exposure*. Environ Int 2017; 108: 75-83.

16 Giechaskiel B. *Investigation of vehicle exhaust sub-23 nm particle emissions, Aerosol Science and Technology*. Aerosol Science and Technology 2017; 51(5): 626-641.

17 Grigoratos T, Martini G. *Brake wear particle emissions: a review*. Environ Sci Pollut Res Int 2015; 22(4): 2491-2504.

18 Eijk ARA, Van Mensch, P, Elstgeest, M. TNO. *Tailpipe emissions of mopeds in the Dutch fleet*. Den Haag, 2017; R11495.

19 Stelwagen U, Holmes, G, Ligterink, N, Van Mensch, P. TNO. *Effecten uitfasering snorfietsen met verbrandingsmotor in 2025.* TNO 2020 R11867v2.

20 Kapadia ZZ, Spracklen DV, Arnold SR, Borman DJ, Mann GW, Pringle KJ, et al. *Impacts of aviation fuel sulfur content on climate and human health*. Atmospheric Chemistry and Physics 2016; 16(16): 10521-10541.

21 Voogt M. RIVM. *Metingen en berekeningen van ultrafijn stof van vliegverkeer rond Schiphol*. Bilthoven, 2019; 2019-0074.

22 Ligterink N, Louwman, R, Buskermolen, E, Verbeek, R.. TNO. *De inzet van bouwmachines en de bijbehorende NO_x- en CO_2 emissies*. Den Haag, 2018; TNO 2018 R10465.

23 Committee-for-European-Construction-Equipment. *Requirements relating to gaseous and particulate pollutant emission limits and type-approval for internal combustion engines for non-road mobile machinery.* Frequently asked questions Regulation (EU) 2016/1628.

24 Vermeulen R. *Real-world emissions of non-road mobile machinery*. Den Haag: TNO, 2021; TNO 2021 R10221.

25 Donateo A, Gregoris E, Gambaro A, Merico E, Giua R, Nocioni A, et al. *Contribution of harbour activities and ship traffic to PM2.5, particle number concentrations and PAHs in a port city of the Mediterranean Sea (Italy)*. Environ Sci Pollut Res Int 2014; 21(15): 9415-9429.

26 González Y, Rodríguez S, Guerra García JC, Trujillo JL, García R. *Ultrafine particles pollution in urban coastal air due to ship emissions*. Atmospheric Environment 2011; 45(28): 4907-4914.

27 van der Zee SC, Dijkema MBA, van der Laan J, Hoek G. *The impact of inland ships and recreational boats on measured NOx and ultrafine particle concentrations along the waterways*. Atmospheric Environment 2012; 55: 368-376.

28 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.

29 European Commission. *Air pollution from the main sources / Air emissions from maritime transport*. https://ec.europa.eu/environment/air/sources/maritime.htm. Geraadpleegd: 14 juni 2021.

30 Verbeek R, Karaarslan, S, Quispel, M, Tachi, K. TNO. *Impact assessment biobrandstoffen voor de binnenvaart*. Den Haag, 2020; R11455.

[31] 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.

[32] Riffault V, Arndt J, Marris H, Mbengue S, Setyan A, Alleman LY, et al. *Fine and Ultrafine Particles in the Vicinity of Industrial Activities: A Review*. Critical Reviews in Environmental Science and Technology 2015; 45(21): 2305-2356.

[33] Weijers E, Vonk J. RIVM. *Verkennende metingen aan ultrafijn stof in het IJmond gebied*. Bilthoven, 2020; 2020-0095.

[34] Torvela T, Tissari J, Sippula O, Kaivosoja T, Leskinen J, Virén A, et al. *Effect of wood combustion conditions on the morphology of freshly emitted fine particles*. Atmospheric Environment 2014; 87: 65-76.

[35] 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.

[36] Vert C, Meliefste K, Hoek G. *Outdoor ultrafine particle concentrations in front of fast food restaurants*. J Expo Sci Environ Epidemiol 2016; 26(1): 35-41.

[37] Saha PK, Zimmerman N, Malings C, Hauryliuk A, Li Z, Snell L, Subramanian R, Lipsky E, Apte JS, Robinson AL, Presto AA. *Quantifying high-resolution spatial variations and local source impacts of urban ultrafine particle concentrations.* Sci Total Environ 2019; 10 (655): 473-481.

[38] 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.

[39] 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.

[40] Kukkonen J, Karl M, Keuken MP, Denier van der Gon HAC, Denby BR, Singh V, et al. *Modelling the dispersion of particle numbers in five European cities*. Geoscientific Model Development 2016; 9(2): 451-478.

[41] Paasonen P, Kupiainen K, Klimont Z, Visschedijk A, Denier van der Gon HAC, Amann M. *Continental anthropogenic primary particle number emissions*. Atmospheric Chemistry and Physics 2016; 16(11): 6823-6840.

[42] Mamali D, Mikkilä J, Henzing B, Spoor R, Ehn M, Petäjä T, et al. *Long-term observations of the background aerosol at Cabauw, The Netherlands*. Sci Total Environ 2018; 625: 752-761.

[43] Kontses A, Triantafyllopoulos G, Ntziachristos L, Samaras Z. *Particle number (PN) emissions from gasoline, diesel, LPG, CNG and hybrid-electric light-duty vehicles under real-world driving conditions*. Atmospheric Environment 2020; 222: 117126.

[44] Myllari F, Pirjola L, Lihavainen H, Asmi E, Saukko E, Laurila T, et al. *Characteristics of particle emissions and their atmospheric dilution during co-combustion of coal and wood pellets in a large combined heat and power plant*. J Air Waste Manag Assoc 2019; 69(1): 97-108.

[45] Oberdörster G, Ferin J, Finkelstein G, Wade P, Corson N.1990. *Increased pulmonary toxicity of ultrafine particles? II. Lung lavage studies.* J Aerosol Sci 21: 384-387.

[46] Ferin J. *Pulmonary retention and clearance of particles*. Toxicology Letters 1994; 72; 121-125.

[47] Raia-Barjat T, Prieux C, Leclerc L, Sarry G, Grimal L, et al. *Elemental fingerprint of human amniotioc fluids and relationship with potential sources of maternal exposure*. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, Elsevier, 2020, 60, pp.126477.

[48] Miller MR, Shaw CA, Langrish JP. *From particles to patients: oxidative stress and the cardiovascular effects of air pollution*. Future Cardiol 2012; 8(4): 577-602.

[49] Miller MR, Raftis JB, Langrish JP, McLean SG, Samutrtai P, Connell SP, et al. *Inhaled Nanoparticles Accumulate at Sites of Vascular Disease*. ACS Nano 2017; 11(5): 4542-4552.

[50] Cassee FR. *Particulate matter beyond mass: recent health evidence on the role of fractions, chemical constituents and sources of emission.* Inhal Toxicol 2013; 25(14): 802-812.

[51] Bongaerts E, Nawrot TS, Van Pee T, Ameloot M, Bove H. *Translocation of (ultra)fine particles and nanoparticles across the placenta; a systematic review on the evidence of in vitro, ex vivo, and in vivo studies*. Part Fibre Toxicol 2020; 17(1): 56.

[52] Heusinkveld HJ, Wahle T, Campbell A, Westerink RHS, Tran L, Johnston H, et al. *Neurodegenerative and neurological disorders by small inhaled particles*. Neurotoxicology 2016; 56: 94-106.

[53] Underwood E. *The polluted brain*. Science 2017; 355(6323): 342-345.

[54] Naseri M, Jouzizadeh M, Tabesh M, Malekipirbazari M, Gabdrashova R, Nurzhan S, et al. *The impact of frying aerosol on human brain activity*. Neurotoxicology 2019; 74: 149-161.

[55] Janssen NAH. RIVM. *Onderzoek naar de gezondheidseffecten van kortdurende blootstelling aan ultrafijn stof rond Schiphol*. Bilthoven, 2019; 2019-0084.

[56] Lammers A, Janssen NAH, Boere AJF, Berger M, Longo C, Vijverberg SJH, et al. *Effects of short-term exposures to ultrafine particles near an airport in healthy subjects*. Environ Int 2020; 141: 105779.

[57] 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.

[58] Lavigne E, Donelle J, Hatzopoulou M, Van Ryswyk K, van Donkelaar A, Martin RV, et al. *Spatiotemporal Variations in Ambient Ultrafine Particles and the Incidence of Childhood Asthma*. Am J Respir Crit Care Med 2019; 199(12): 1487-1495.

[59] Weichenthal S, Bai L, Hatzopoulou M, Van Ryswyk K, Kwong JC, Jerrett M, et al. *Long-term exposure to ambient ultrafine particles and respiratory disease incidence in in Toronto, Canada: a cohort study*. Environ Health 2017; 16(1): 64.

[60] Ostro B, Hu J, Goldberg D, Reynolds P, Hertz A, Bernstein L, et al. *Associations of mortality with long-term exposures to fine and ultrafine particles, species and sources: results from the California Teachers Study Cohort*. Environ Health Perspect 2015; 123(6): 549-556.

[61] Clifford S, Mazaheri M, Salimi F, Ezz WN, Yeganeh B, Low-Choy S, et al. *Effects of exposure to ambient ultrafine particles on respiratory health and systemic inflammation in children*. Environ Int 2018; 114: 167-180.

[62] Bai L, Chen H, Hatzopoulou M, Jerrett M, Kwong JC, Burnett RT, et al. *Exposure to Ambient Ultrafine Particles and Nitrogen Dioxide and Incident Hypertension and Diabetes*. Epidemiology 2018; 29(3): 323-332.

[63] Bai L, Weichenthal S, Kwong JC, Burnett RT, Hatzopoulou M, Jerrett M, et al. *Associations of Long-Term Exposure to Ultrafine Particles and Nitrogen Dioxide With Increased Incidence of Congestive Heart Failure and Acute Myocardial Infarction*. Am J Epidemiol 2019; 188(1): 151-159.

[64] Downward GS, van Nunen E, Kerckhoffs J, Vineis P, Brunekreef B, Boer JMA, et al. *Long-Term Exposure to Ultrafine Particles and Incidence of Cardiovascular and Cerebrovascular Disease in a Prospective Study of a Dutch Cohort*. Environ Health Perspect 2018; 126(12): 127007.

[65] Aguilera I, Dratva J, Caviezel S, Burdet L, de Groot E, Ducret-Stich RE, et al. *Particulate Matter and Subclinical Atherosclerosis: Associations between Different Particle Sizes and Sources with Carotid Intima-Media Thickness in the SAPALDIA Study*. Environ Health Perspect 2016; 124(11): 1700-1706.

[66] Lane KJ, Levy JI, Scammell MK, Peters JL, Patton AP, Reisner E, et al. *Association of modeled long-term personal exposure to ultrafine particles with inflammatory and coagulation biomarkers*. Environ Int 2016; 92-93: 173-182.

[67] Viehmann A, Hertel S, Fuks K, Eisele L, Moebus S, Mohlenkamp S, et al. *Long-term residential exposure to urban air pollution, and repeated measures of systemic blood markers of inflammation and coagulation*. Occup Environ Med 2015; 72(9): 656-663.

[68] Corlin L, Woodin M, Hart JE, Simon MC, Gute DM, Stowell J, et al. *Longitudinal associations of long-term exposure to ultrafine particles with blood pressure and systemic inflammation in Puerto Rican adults*. Environ Health 2018; 17(1): 33.

[69] Pilz V, Wolf K, Breitner S, Ruckerl R, Koenig W, Rathmann W, et al. *C-reactive protein (CRP) and long-term air pollution with a focus on ultrafine particles*. Int J Hyg Environ Health 2018; 221(3): 510-518.

[70] EPA. U.S. Environmental Protection Agency. *Integrated Science Assessment (ISA) for Particulate Matter* Washington, DC, 2019; EPA/600/R-19/188.

[71] McCormick MC, Litt JS, Smith VC, Zupancic JA. *Prematurity: an overview and public health implications*. Annu Rev Public Health 2011; 32: 367-379.

[72] Chernausek SD. *Update: consequences of abnormal fetal growth*. J Clin Endocrinol Metab 2012; 97(3): 689-695.

[73] Saigal S, Doyle LW. *An overview of mortality and sequelae of preterm birth from infancy to adulthood*. The Lancet 2008; 371(9608): 261-269.

[74] Slama R, Darrow L, Parker J, Woodruff TJ, Strickland M, Nieuwenhuijsen M, et al. *Meeting report: atmospheric pollution and human reproduction*. Environ Health Perspect 2008; 116(6): 791-798.

[75] Kannan S, Misra DP, Dvonch JT, Krishnakumar A. *Exposures to airborne particulate matter and adverse perinatal outcomes: a biologically plausible mechanistic framework for exploring potential effect modification by nutrition*. Environ Health Perspect 2006; 114(11): 1636-1642.

[76] Laurent O, Hu J, Li L, Cockburn M, Escobedo L, Kleeman MJ, et al. *Sources and contents of air pollution affecting term low birth weight in Los Angeles County, California, 2001-2008*. Environ Res 2014; 134: 488-495.

[77] Laurent O, Hu J, Li L, Kleeman MJ, Bartell SM, Cockburn M, et al. *Low birth weight and air pollution in California: Which sources and components drive the risk?* Environ Int 2016; 92-93: 471-477.

[78] Laurent O, Hu J, Li L, Kleeman MJ, Bartell SM, Cockburn M, et al. *A Statewide Nested Case-Control Study of Preterm Birth and Air Pollution by Source and Composition: California, 2001-2008*. Environ Health Perspect 2016; 124(9): 1479-1486.

[79] Wing SE, Larson TV, Hudda N, Boonyarattaphan S, Fruin S, Ritz B. *Preterm Birth among Infants Exposed to in Utero Ultrafine Particles from Aircraft Emissions*. Environ Health Perspect 2020; 128(4): 47002.

[80] Lavigne E, Lima I, Hatzopoulou M, Van Ryswyk K, Decou ML, Luo W, et al. *Spatial variations in ambient ultrafine particle concentrations and risk of congenital heart defects*. Environ Int 2019; 130: 104953.

[81] Hougaard KS, Campagnolo L, Chavatte-Palmer P, Tarrade A, Rousseau-Ralliard D, Valentino S, et al. *A perspective on the developmental toxicity of inhaled nanoparticles*. Reprod Toxicol 2015; 56: 118-140.

[82] Sunyer J, Esnaola M, Alvarez-Pedrerol M, Forns J, Rivas I, Lopez-Vicente M, et al. *Association between traffic-related air pollution in schools and cognitive development in primary school children: a prospective cohort study*. PLoS Med 2015; 12(3): e1001792.

[83] Zhang S, Mwiberi S, Pickford R, Breitner S, Huth C, Koenig W, et al. *Longitudinal associations between ambient air pollution and insulin*

sensitivity: results from the KORA cohort study. The Lancet Planetary Health 2021; 5(1): e39-e49.

84 de Bont J, Casas M, Barrera-Gomez J, Cirach M, Rivas I, Valvi D, et al. *Ambient air pollution and overweight and obesity in school-aged children in Barcelona, Spain*. Environ Int 2019; 125: 58-64.

85 Goldberg MS, Labreche F, Weichenthal S, Lavigne E, Valois MF, Hatzopoulou M, et al. *The association between the incidence of postmenopausal breast cancer and concentrations at street-level of nitrogen dioxide and ultrafine particles*. Environ Res 2017; 158: 7-15.

86 Weichenthal S, Lavigne E, Valois MF, Hatzopoulou M, Van Ryswyk K, Shekarrizfard M, et al. *Spatial variations in ambient ultrafine particle concentrations and the risk of incident prostate cancer: A case-control study*. Environ Res 2017; 156: 374-380.

87 Weichenthal S, Olaniyan T, Christidis T, Lavigne E, Hatzopoulou M, Van Ryswyk K, et al. *Within-city Spatial Variations in Ambient Ultrafine Particle Concentrations and Incident Brain Tumors in Adults*. Epidemiology 2020; 31(2): 177-183.

88 Lavigne E, Lima I, Hatzopoulou M, Van Ryswyk K, van Donkelaar A, Martin RV, et al. *Ambient ultrafine particle concentrations and incidence of childhood cancers*. Environ Int 2020; 145: 106135.

89 IARC. *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans: Outdoor air pollution* Lyon, France: International Agency for Research on Cancer, 2016.

90 Liu L, Urch B, Poon R, Szyszkowicz M, Speck M, Gold DR, et al. *Effects of ambient coarse, fine, and ultrafine particles and their biological constituents on systemic biomarkers: a controlled human exposure study*. Environ Health Perspect 2015; 123(6): 534-540.

91 Giles-Corti B, Vernez-Moudon A, Reis R, Turrell G, Dannenberg AL, Badland H, et al. *City planning and population health: a global challenge*. The Lancet 2016; 388(10062): 2912-2924.

92 Gotschi T, Tainio M, Maizlish N, Schwanen T, Goodman A, Woodcock J. *Contrasts in active transport behaviour across four countries: how do they translate into public health benefits?* Prev Med 2015; 74: 42-48.

Commissie en geraadpleegd deskundigen

Samenstelling Commissie Ultrafijnstof

- Prof. dr. ir. A. Burdorf, hoogleraar Maatschappelijke Gezondheidszorg, Erasmus MC Rotterdam, *voorzitter*
- Prof. dr. E.H.D. Bel, hoogleraar Longziekten, Amsterdam UMC
- Dr. J. Boogaard, principal scientist, Health Effects Institute, Boston
- Prof. P.J.A. Borm, emeritus hoogleraar Particle toxicology, universiteit van Düsseldorf
- Dr. ir. G. Hoek, universitair hoofddocent Milieu-epidemiologie, Universiteit Utrecht
- Prof. dr. ir. E. Lebret, emeritus hoogleraar Environmental Health, Universiteit Utrecht
- Prof. dr. Anke Hilse Maitland - van der Zee, hoogleraar Precision Medicine in Respiratory Diseases, Amsterdam UMC
- Prof. dr. T. Nawrot, hoogleraar Milieu-epidemiologie, universiteit van Hasselt
- Dr. D.H.J. van de Weerdt, arts Medische Milieukunde, GGD Gelderland-Midden, Arnhem
- Dr. R.H.S. Westerink, universitair hoofddocent Neurotoxicologie, IRAS, Universiteit Utrecht
- Prof. dr. F.R. Cassee, hoogleraar Inhalatietoxicologie, Universiteit Utrecht, senior wetenschappelijk onderzoeker, RIVM Bilthoven, *structureel geraadpleegd deskundige*
- Prof. dr. ir. G. Velders, hoogleraar Luchtkwaliteit en Klimaatinteracties, Universiteit Utrecht, wetenschappelijk onderzoeker, RIVM Bilthoven, *structureel geraadpleegd deskundige*

Waarnemer

- Drs. M. van Zuilekom, IenW, Den Haag

Secretarissen:

- Drs. E.J. Schoten, Gezondheidsraad, Den Haag
- Dr. ir. S.C. van der Zee, Gezondheidsraad, Den Haag

Incidenteel geraadpleegde deskundigen:

- Dr. ir. N.E. Ligterink, Senior Research Scientist, TNO
- Dr. ir. H.A.C. Denier van de Gon, Senior Research Scientist, TNO

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. Risico’s van ultrafijnstof in de buitenlucht.
Den Haag: Gezondheidsraad, 2021; publicatienr. 2021/38

Auteursrecht voorbehouden