NPOV

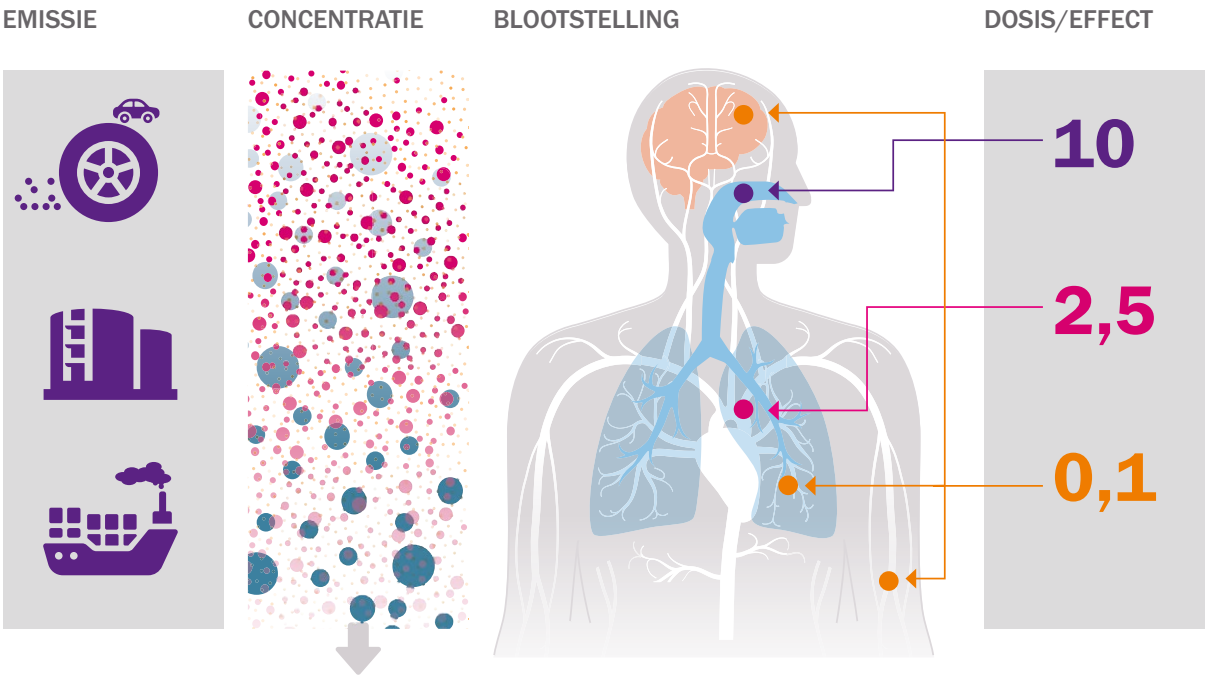
FIJNSTOF: NORM GEHAALD PROBLEEM NIET OPGELOST

BETER ONDERSCHEID LEIDT TOT MEER GEZONDHEIDSWINST

Hugo Denier van der Gon
Ingeborg Kooter
Paula Bronsveld
Fred Hartendorf
Ties Korstanje
Marinke Wijngaard
Ardi Dortmans

SAMENVATTING

De fijnstofnorm die we momenteel in Nederland gebruiken, is gebaseerd op de massa van alle fijnstofdeeltjes die in een kubieke meter lucht aanwezig zijn. Dat kan beter. Niet elk fijnstofdeeltje heeft namelijk dezelfde impact op de gezondheid. De gezondheidsimpact hangt samen met de reactiviteit van de deeltjes in het fijnstof, en deze wordt weer bepaald door andere eigenschappen zoals de chemische samenstelling en de grootte van de deeltjes. Zo zullen bijvoorbeeld de heel kleine deeltjes, die dus nauwelijks iets wegen, dieper in de longen terechtkomen.



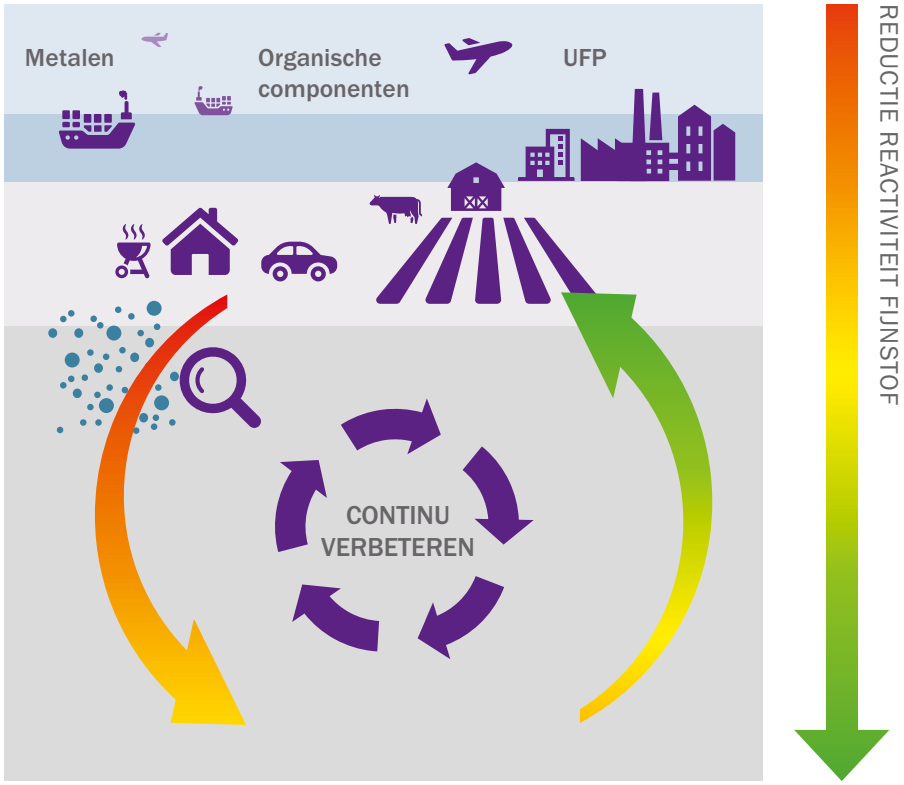
Huidige regulering
Sturing op reductie fijnstof massa; Grote deeltjes dragen meer bij.

Onderscheid in fijnstofdeeltjes op basis van reactiviteit
Focus op verlagen totale fijnstofreactiviteit voor meer gezondheidswinst.
(sturing op maatstaven zoals ultrafijnstof en samenstelling)

De samenstelling van fijnstof, en daarmee de schadelijkheid, is ook niet in elke omgeving hetzelfde. Concentreert schadelijk fijnstof zich bijvoorbeeld op een drukke plek in de stad waar veel mensen wonen? Dan vraagt zo'n situatie om acute actie.

Bij de huidige normen voor fijnstof, en de metingen daarvan, worden deze belangrijke eigenschappen van fijnstof nog niet bepaald. Als TNO vinden we dat een verontrustende situatie. Momenteel is het weliswaar mogelijk om de fijnstofnorm netjes te halen, maar de gezondheidsrisico's zijn hiermee niet verholpen. Daarbij gaat het om gezondheidsrisico's met verstrekkende gevolgen: jaarlijks overlijden er in Nederland nog altijd 9.000 mensen vroegtijdig doordat ze aan fijnstof zijn blootgesteld. Door fijnstof veroorzaakte gezondheidsproblemen leiden tot directe zorgkosten van ongeveer een half miljard euro per jaar. En de sociale kosten? Die liggen nog vele malen hoger: naar schatting 10 tot 15 miljard euro per jaar, gebaseerd op een bedrag van 1.250 euro per stedelijke inwoner.

FIJNSTOFMENGSEL



Het niet specifieker naar fijnstof kijken, heeft dus gevolgen. Als TNO zijn we daarom op zoek gegaan naar oplossingsrichtingen. Wat is er precies nodig om tot een fijnstofaanpak te komen die beter aansluit bij de daadwerkelijke gezondheidsrisico's? Welke metingen moeten we daarvoor in Nederland uitvoeren? En vooral: in hoeverre is de benodigde technologie al voorhanden?

Er blijkt al verrassend veel mogelijk te zijn om het fijnstofprobleem in Nederland steviger aan te pakken. Dat is het positieve nieuws. Maar om tot een nieuwe fijnstofaanpak te komen, moet er zowel organisatorisch als qua middeleninzet nog veel gebeuren. Zo vraagt een nieuwe aanpak om een andere werkwijze en nieuwe samenwerkingsvormen. Een grote uitdaging. Ondertussen tikt de klok door. In het Schone Lucht Akkoord staat de doelstelling om in 2030 (ten opzichte van 2016) een gezondheidswinst van minimaal 50 procent te halen.

Als we nu beginnen, is het mogelijk om over twee jaar het benodigde meet- en modelinstrumentarium geïnstalleerd te hebben. En de nieuwe inzichten die dat oplevert, kan de overheid vanaf 2025 meenemen bij het aanscherpen van het fijnstofbeleid. Dat maakt een gerichtere aanpak van dit probleem mogelijk, zodat de doelstelling voor 2030 gehaald kan worden.

Een bron-specifieke aanpak voor fijnstof, monitoring op basis van reactiviteit, en een koppeling met de lokale situatie. Dat is waar TNO voor pleit.
We hebben ook al ideeën over hoe we dat in Nederland kunnen realiseren door middel van een concreet stappenplan:

50%
gezondheidswinst
2030 t.o.v. 2016

1. **Brongericht en iteratief de fijnstofsamenstelling bepalen.** Hoeveel fijnstof komt er in een bepaald gebied voor? Om wat voor soort fijnstofdeeltjes met bijbehorende eigenschappen gaat het? Wat zijn de bronnen? In deze verkennende fase spelen vooral onafhankelijke (kennis)instellingen een belangrijke rol.
2. **Brongerichte en specifieke monitoringsstrategie inrichten.** Provincies, gemeenten, (milieu)omgevingsdiensten en kennisinstellingen gaan aan de slag met lange-termijn-monitoring van fijnstofeigenschappen, zoals grootte en reactiviteit. Daarbij maken zij gebruik van een meetinstrumentarium om doelgericht beleid te ontwikkelen.
3. **In kaart brengen van luchtkwaliteit in ruimte en tijd.** Zo is het mogelijk om op lokaal niveau te achterhalen hoe de fijnstofkaart eruit ziet en wat de meest belaste plekken zijn. En met de nodige ondersteuning van kennisinstellingen, omgevingsdiensten en GGD kunnen gemeenten en/of provincies gepaste maatregelen nemen om de blootstelling op de meest belaste locaties te verminderen.
4. **Lokaal een gezondheidsrelevante indicator voor fijnstofmengsels bepalen.** Hier bepalen we de impact van lokale fijnstofmengsels op de volksgezondheid. Vooral op dit vlak hebben we nog een grote informatieachterstand en zullen we dus op zoek moeten naar nieuwe manieren om meer inzicht te krijgen in de gezondheidsimpact van verschillende fijnstofdeeltjes. Innovatieve (data) technologie zou een belangrijke rol kunnen spelen. Op basis van alle verzamelde informatie en analyses wordt het mogelijk om sneller in te spelen op een lokale situatie. Hiermee kunnen kennisinstellingen, omgevingsdiensten en GGD in de toekomst gericht aangeven welke maatregelen er lokaal nodig zijn en welke gezondheidswinst dat oplevert.
5. **Lokaal fijnstofbeleid voor gezondheidswinst opzetten.** De (lokale) overheid maakt op basis van het voorgaande een fijnstofbeleid dat rekening houdt met de factoren die in een specifieke omgeving van belang zijn. Niet op elke plek zijn veel maatregelen nodig, het gaat om de juiste maatregel op de juiste plek. Om dat zo gericht mogelijk te kunnen doen, gaat de overheid in gesprek met gezondheidsdiensten en (industriële) stakeholders. Zo houdt de overheid niet alleen een vinger aan de pols, maar leveren die gesprekken ook informatie op die weer van pas komt bij het doorvoeren van verbeteringen. Naast een goede monitoring is er ook een vorm van lokale handhaving nodig om erop toe te zien dat alle partijen zich aan de afspraken houden.

Dit is een korte samenvatting van de vijf stappen waar we in deze publicatie dieper en gedetailleerder op in gaan.

Het door ons voorgestelde stappenplan levert niet alleen een bijdrage aan een schonere lucht en daardoor een betere volksgezondheid, maar ook aan het innovatieve vermogen van Nederland. Onze ambitie: een nieuwe aanpak van de fijnstofproblematiek en daarmee als Nederland een wereldwijde voorloper worden in het verbeteren van de luchtkwaliteit. Maar zoals gezegd: dan moeten we wel *nu* beginnen.

INHOUD

Samenvattting 2

1 Wat is het probleem? De gevolgen van luchtvervuiling en fijnstof in Nederland 6

2 Welke factoren beïnvloeden de schadelijkheid van fijnstof op de gezondheid? 11

3 Wat zit er in fijnstof en waar komt het vandaan? 14

4 Wat is nodig voor verdere gezondheidswinst? 17

5 Een op gezondheidswinst gericht fijnstofbeleid (in vijf stappen) 21

6 Baten (en kosten) van een nieuw fijnstofbeleid 28

7 Conclusie 30

8 Vooruitblik 31

9 Referenties 32

1. WAT IS HET PROBLEEM? DE GEVOLGEN VAN LUCHTVERVUILING EN FIJNSTOF IN NEDERLAND

Het inademen van vervuilde lucht leidt wereldwijd tot veel gezondheidsschade. Naar schatting van de Wereldgezondheidsorganisatie (WHO) veroorzaakt luchtvervuiling het vroegtijdig overlijden van 7 miljoen mensen per jaar en een nog veel groter verlies aan gezonde levensjaren.[1] Voor Nederland wordt dit voor 2015 geschat op 11.000 vroegtijdige sterfgevallen waarvan ongeveer 9.000 fijnstof-gerelateerd. Het verlies aan levensjaren is vergelijkbaar met die door (ernstig) overgewicht of te weinig bewegen (Figuur 1).[2]

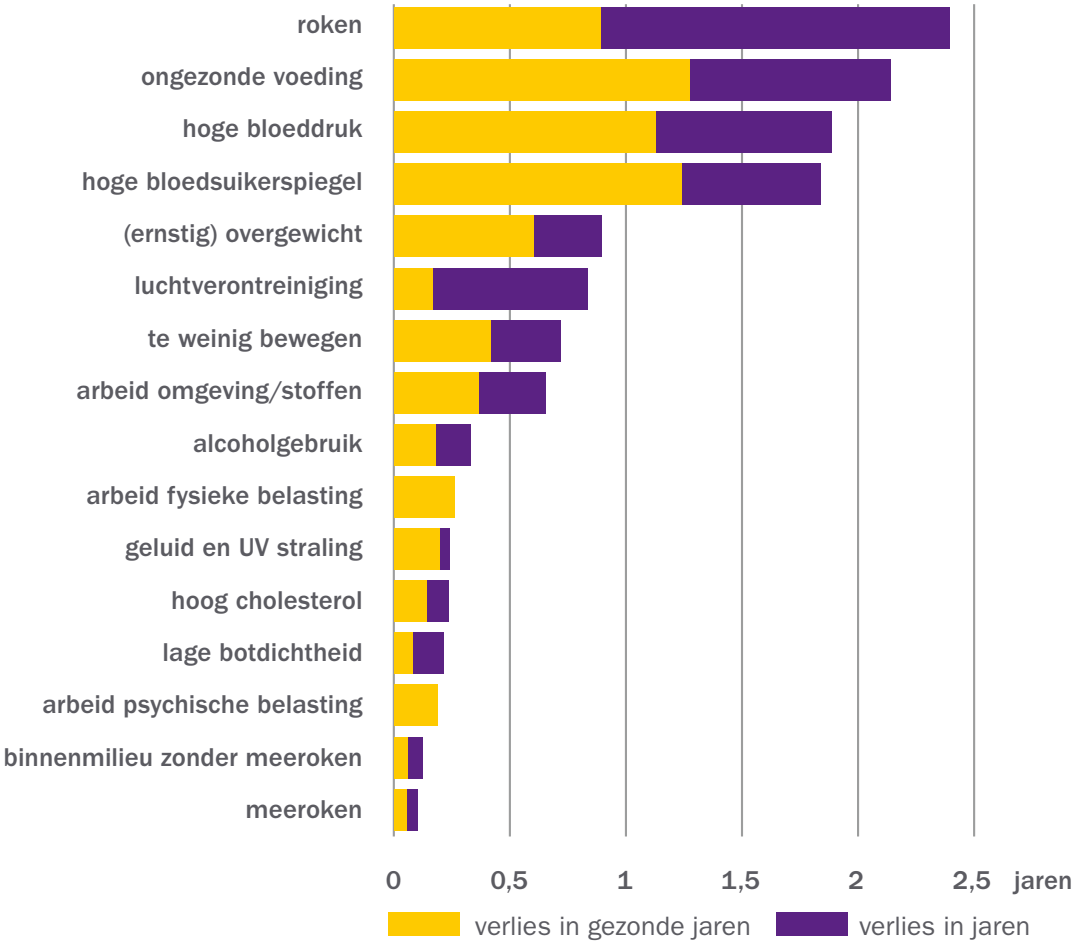
Naast al het menselijk leed dat luchtvervuiling veroorzaakt, leidt het ook tot kosten. In Nederland worden de directe zorgkosten ten gevolge van de luchtkwaliteit op een half miljard euro geschat.[2] Daarnaast zijn er nog sociale kosten die door luchtvervuiling ontstaan. Zo leidt een ziekenhuisopname of ongeneeslijke ziekte zoals COPD al snel tot welvaartsverlies.
Dat welvaartsverlies wordt ingeschat via het *willingness-to-pay*-principe: gezonde dagen zijn voor iemand veel meer waard dan enkel het economische verlies van een werkdag (salaris). Hierbij gaat het uiteraard om een hypothetische situatie, want gezonde dagen zijn helaas niet te koop.

Alles bij elkaar vormen de sociale kosten ten gevolge van luchtverontreiniging een flinke schadepost. Gemiddeld gaat het om een bedrag van 1.250 euro per jaar per stedelijke inwoner.[3] Voor Nederland (met ruim 17 miljoen inwoners, waarvan ongeveer 75 procent in een stedelijke omgeving woont) gaat het om een geschat bedrag van 10 tot 15 miljard euro per jaar.

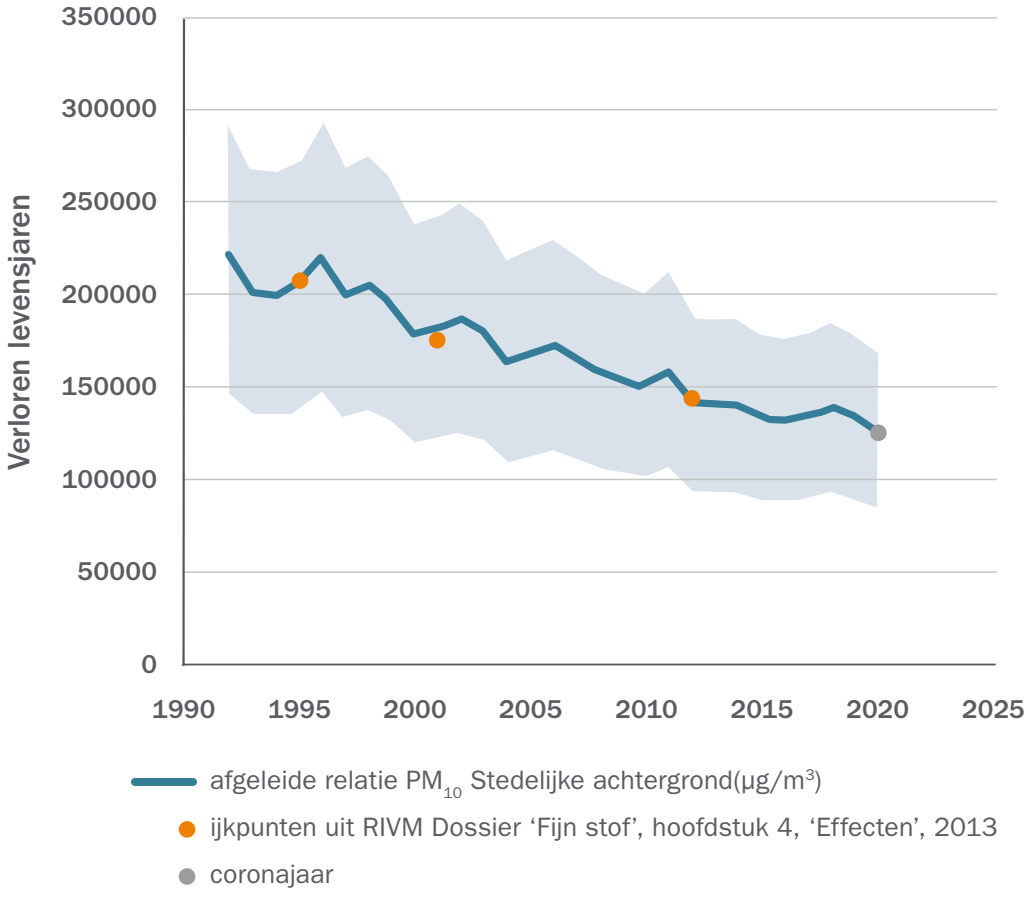
We hebben het hier dus over een groot maatschappelijk probleem dat niet alleen veel menselijk leed veroorzaakt, maar dat ook enorme kosten met zich meebrengt. Daarbij is het goed om te weten dat ruwweg 80 procent van de gezondheidsschade door luchtverontreiniging in Nederland toe te schrijven is aan fijnstof. Bij de aanpak van luchtverontreiniging is het dus goed om nader onderzoek te doen naar fijnstof, wat een verzamelnaam is voor een grote verscheidenheid aan deeltjes, en daarbij in te zoomen op de verschillende eigenschappen van de deeltjes en hoe schadelijk die zijn voor de volksgezondheid.

Het verontrustende nieuws is helaas dat ook nu de normen voor fijnstof in Nederland nagenoeg gehaald zijn, de cijfers laten zien dat er nog steeds aanzienlijke gezondheidsschade ontstaat door blootstelling aan fijnstof. Dat betekent dus dat verbetering van de luchtkwaliteit door de aanpak van fijnstof veel gezondheidswinst kan opleveren. Hierbij zullen ook de sociale kosten flink omlaag gaan. Actie is dus gewenst.

+/- 80%
gezondheidsschade door luchtverontreiniging is toe te schrijven aan fijnstof



Figuur 1 *Verlies aan jaren door vroegtijdige sterfte en gezonde jaren door ziekte voor verschillende determinanten in 2015.*[2]



Figuur 2 *Verloren levensjaren in NL bevolking door langdurige blootstelling aan fijnstof 1992-2020 op basis van data in RIVM.*[4] *Hierbij is fijnstof massa (PM_{10}) concentratie als indicator voor gezondheidseffecten gebruikt. Tussen 2015 en 2019 is er geen verdere daling in de stedelijke concentratie. 2020 is niet representatief vanwege de corona-lockdowns met minder wegverkeer en economische activiteit.*

1.1 HOE KWANTIFICEREN WE GEZONDHEIDSEFFECTEN?

Langdurige blootstelling aan fijnstof, zoals die wordt ervaren door mensen die jarenlang in gebieden met hoge deeltjesconcentraties wonen, is in verband gebracht met:

- verkorting van de levensduur
- hart- en vaatziekten
- een verminderde longfunctie
- de ontwikkeling van chronische bronchitis
- mogelijk zelfs vroeggeboorte

Maar hoe kunnen we gezondheidseffecten het best uitdrukken? In vroegtijdige sterfte of verloren levensjaren? Hier is al veel discussie over geweest. Uiteindelijk zal iedereen overlijden, hoe schoon de lucht ook is. Het is dus niet mogelijk om het over 'doden door fijnstof' te hebben. 'Vroegtijdige sterfte' en 'levensduurverkorting' zijn correcter. In epidemologische studies geven onderzoekers ook informatie over het gemiddelde verschil in levensverwachting tussen groepen die te maken hebben met een verschillende blootstelling aan fijnstof. Daarbij zijn er dus geen aanwijsbare doden, maar is het eerder zo dat fijnstof ervoor zorgt dat iedereen een 'klein beetje ongezonder' wordt. Een schatting van aantallen doden geeft daarmee een verkeerd beeld van de werkelijkheid.[5]

Verloren levensjaren is dan ook de beste maatstaf, waarbij we nog aanvullende onderscheid kunnen maken tussen verlies in jaren (sterfte) en verlies in gezonde jaren (zie ook Figuur 1). Het RIVM geeft inzicht in het aantal verloren levensjaren door fijnstofblootstelling in Nederland tot 2011.[4] Wanneer we de gemiddelde stedelijke achtergrondconcentratie van fijnstof over de periode 1992 tot 2020 combineren met de gegevens van het RIVM is te zien dat de dalende trend doorzet tot ongeveer 2015 en vervolgens stagneert (zie Figuur 2).

Per jaar overlijden
7 mljn
mensen vroegtijdig aan het inademen vervuilde lucht
(WHO 2021)

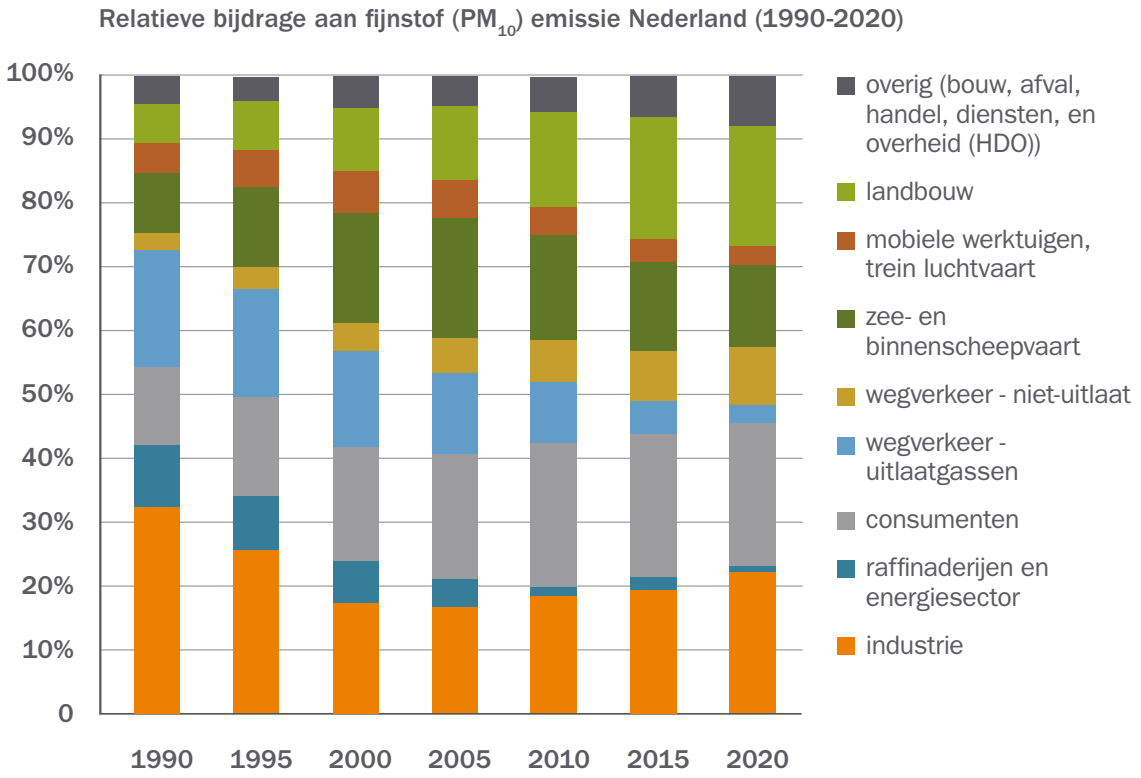
1.2 HOE ZAG HET FIJNSTOFBELEID ER TOT NU TOE UIT EN WAAROM?

Voor de Europese regulering van fijnstof op basis van massaconcentratie (µg/m^3) zijn een tweetal belangrijke redenen:

1. Het totaal aan massa fijnstof is relatief goed te meten door, volgens het juiste protocol, alle deeltjes op een filter te vangen en te wegen. Bij de vaststelling van de huidige fijnstofnorm heeft Europa er niet voor gekozen om onderscheid te maken in componenten of fracties. Toen de norm werd bepaald, was het een te grote uitdaging om verschillende fijnstof-fracties en/of -componenten op een goede en reproduceerbare manier te meten. Fijnstofdeeltjes kunnen veel verschillende chemische componenten bevatten en de afmeting van de deeltjes kan een factor duizend (!) verschillen. Verschillende meetmethoden en -strategieën kunnen hierdoor verschillende uitkomsten geven.
   Vanwege de praktische uitvoerbaarheid, lag daarom bij de totstandkoming van de Europese regelgeving de nadruk op harmonisatie van de meetstrategie in de verplichte monitoring, en dus niet op verdergaande specificatie en determinatie van de fijnstofmengsels. Door de keuze voor deze strategie is er momenteel nog weinig bekend over de gezondheidsaspecten van specifieke fijnstofdeeltjes.
   Wel heeft de Europese aanpak ervoor gezorgd dat er nu onderling vergelijkbare, langjarige tijdreeksen beschikbaar zijn, die de basis vormen voor een betrouwbare en robuuste beoordeling van gezondheidseffecten.

2. Epidemiologische studies (waarbij de frequentie van ziekten in menselijke populaties wordt bestudeerd) tonen een correlatie tussen massa fijnstof en gezondheidsschade aan. Dat gebeurde op basis van langjarige epidemiologische cohortstudies.[6–8] Alleen ontbrak en ontbreekt het aan voldoende (epidemiologische, toxische en gezondheidskundige) gegevens om met meer detail verschillende fijnstofmengsels te ordenen op schadelijkheid. Weliswaar zijn verbrandingsemissies zoals dieselroet[9] of bepaalde fracties, zoals ultrafijnstof (deeltjes kleiner dan 0,1 µm), extra verdacht,[10–12] maar er is niet genoeg bewijs voor een precieze differentiatie. Er zijn veel componenten en aspecten die bijdragen aan de gezondheidseffecten van fijnstof. Het gaat dus om een complex probleem.

Door de noodzaak en ambitie om aan de Europese normen te voldoen, is de uitstoot van fijnstof in Nederland in de loop van de tijd aanzienlijk verminderd. Sinds 1990 zijn de emissies van fijnstof met 65% gedaald: van 82 kton in 1990 en 54,5 kton in 2000 naar 29 kton in 2020. Door dit bronbeleid zijn in Nederland de Europese normen nagenoeg bereikt. En dat is een belangrijk succes. Ook is het relatieve belang van bronnen verschoven. Zo is in Figuur 3 te zien dat het belang van 'wegverkeer – uitlaatgassen' (lichtblauw) enorm gedaald is, terwijl de bijdragen van consumenten (grijs, vooral houtstook) en landbouw (groen) nu veel belangrijker zijn dan in 1990 of 2000. Omdat de chemische en fysische eigenschappen van fijnstof per bron verschillen, betekent dat ook dat de componenten in het fijnstofmengsel in de loop van de tijd zijn veranderd. En dat beïnvloedt het risicoprofiel.



Figuur 3 *Relatieve bronbijdragen aan (primaire) fijnstof emissie 1990-2020 (op basis van RIVM/TNO Emissieregistratie, voorlopige cijfers dec. 2021). Tijdstappen van 5 jaar 1990-2020.*

Het Schone Lucht Akkoord (SLA), dat de Rijksoverheid met een aantal gemeenten en provincies in januari 2020 afsloot, beoogt de gezondheidsschade door luchtverontreiniging van Nederlandse bronnen in 2030 te halveren t.o.v. 2016.
Een mooie ambitie, waar we nu wel een belangrijke kanttekening bij plaatsen.
De huidige focus op de totale massaconcentratie van fijnstof is op dit moment namelijk niet meer de beste manier om de gezondheidsschade ervan op een effectieve manier verder terug te dringen.

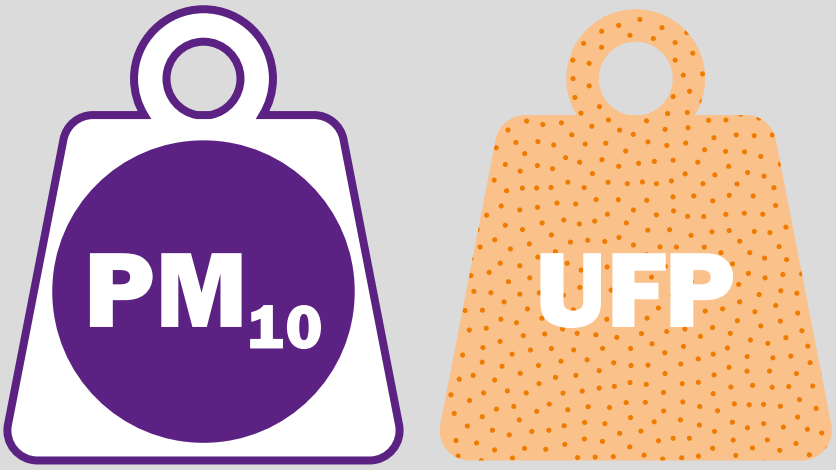
Sinds 1990 zijn de fijnstof emissies gedaald met
65%

2. WELKE FACTOREN BEÏNVLOEDEN DE SCHADELIJKHEID VAN FIJNSTOF OP DE GEZONDHEID?

Dat er een verband bestaat tussen blootstelling aan fijnstof en gezondheidsschade is al zeer overtuigend aangetoond in langjarige studies.[6–8] Deze studies vormen de basis voor de Europese en Nederlandse fijnstofnormen. Maar de exacte mechanismen die gezondheidsschade door fijnstof veroorzaken? Die zijn nog deels onbekend. Wel is zeker dat oxidatieve stress, die ontstaat doordat er teveel potentieel schadelijke, weefsel aantastende vrije moleculen (“radicalen”) in het lichaam komen, en ontstekingsreacties een belangrijke rol spelen.

Er zijn drie belangrijke biologische routes die de gezondheidseffecten door inademen van fijnstof kunnen verklaren:

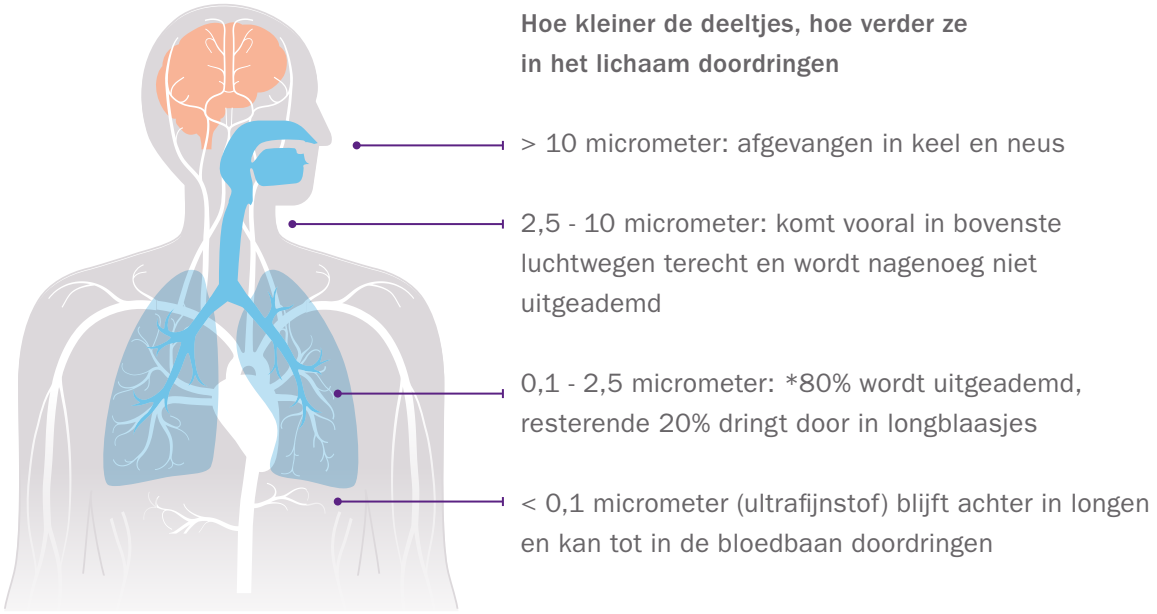
1. De deeltjes kunnen diep in de longblaasjes interacties met cellen aangaan, waarbij oxidatieve stress- en ontstekingsreacties ontstaan. Verspreiding van deze ontstekingsreacties kan uiteindelijk leiden tot het disfunctioneren van bloedvaten of verstoring van de bloedstolling.
2. De deeltjes kunnen reageren met zenuw receptoren in de longen, waardoor het (autonome) zenuwstelsel geactiveerd wordt. Dit kan leiden tot verhogingen van de bloeddruk en veranderingen in het hartritme.
3. De allerkleinste deeltjes kunnen door het membraan van een longblaasje direct in de bloedbaan worden opgenomen en zich door het lichaam verplaatsen. Ook zijn er aanwijzingen dat deze deeltjes via de reukzenuw van de neus direct naar de hersenen kunnen worden getransporteerd.



1 PM_{10} deeltje kan
evenveel wegen als
1 mln UFP deeltjes

Na inademing bepaalt de grootte van de deeltjes hoe diep deze in de longen doordringen, waarbij ultrafijnstof het diepst doordringt en in het bloed kan worden opgenomen (Figuur 4).[13] Daarnaast hebben deze kleinste deeltjes een groter reactief oppervlak waar potentieel toxische stoffen zich aan kunnen hechten (box 2).[14] De biologische schade welke door deeltjes veroorzaakt kan worden hangt meer samen met het totale oppervlakte van de deeltjes en het aantal deeltjes (Particle Number, P_N) dan met de totale massa.[11] Daarnaast zijn ook de chemische samenstelling, de reactiviteit, de vorm (bijvoorbeeld kristallijn of rigide vezels) en de oplosbaarheid van de deeltjes bepalend voor de schadelijkheid.[15]

Als TNO pleiten wij voor een praktische en reproduceerbare meting die, wanneer toegepast op verschillende fijnstofmengsels, een voorspellende waarde voor de gezondheidseffecten geeft. Deze voorspellende waarde kan bijvoorbeeld in de vorm van een index op een schaal van 1 tot 10 worden uitgedrukt. Een dergelijke aanpak met testmethodieken en index bestaat nog niet maar er zijn wel goede kandidaten. Hier komen we in hoofdstuk 5 op terug.



Figuur 4 *Hoe diep dringen verschillende deeltjes de luchtwegen binnen.*[13]

BOX 1 IS ZELFSTANDIG FIJNSTOFBELEID NOG NODIG IN DE TOEKOMST?

De energietransitie zal in de nabije toekomst grote invloed hebben op de luchtkwaliteit. De introductie van hernieuwbare energiebronnen, in combinatie met elektrificatie en groene waterstof, zal voor een drastische verlaging van de huidige emissies door verbranding van fossiele brandstoffen kunnen zorgen. Dus is zelfstandig fijnstofbeleid dan nog nodig?

Wij denken van wel. De twee belangrijkste bronnen voor fijnstof in Nederland, houtstook en landbouw (zie Figuur 3), worden nauwelijks beïnvloed door de energietransitie. Het gebruik van biobrandstoffen (hetzij als vervanging, hetzij als bijstook) is uit oogpunt van fijnstofproblematiek geen oplossing.[16–18] Daarnaast zijn er voor enkele sectoren nog geen alternatieven. Zo is elektrisch vliegen nog verre toekomst. En de elektrificatie van wegtransport is in die sector niet het einde van het fijnstofprobleem aangezien je bij elektrisch rijden nog steeds met fijnstofemissies te maken hebt door de slijtage van banden en remsystemen.[19] Volledige elektrificatie van wegverkeer is overigens ook nog ver weg: in 2019 werd 1 procent van de door personenauto's gereden kilometers afgelegd door volledig elektrische voertuigen. Naar verwachting is dat in 2030 opgelopen tot ruim 10 procent. Hoewel dat een aanzienlijke stijging is, is het verkeer in 2030 dus nog steeds overwegend niet-elektrisch.

Maar stel dat de transitie op een spectaculaire manier versnelt en het Nederlandse wegverkeer in 2030 wel volledig uitstootvrij zou zijn? Wat zou dat dan kunnen betekenen voor de luchtkwaliteit in steden? De GGD[20] heeft recent die vraag beantwoord. De belangrijkste winst zit hem dan in het volledig verdwijnen van de NO_2-uitlaatemissies. Maar qua afname van fijnstof (PM_{10} en $PM_{2,5}$) zou de winst zeer beperkt zijn. Het scherpst komt dit tot uiting bij de luchtkwaliteitprognoses op straatniveau: de grootste impact is op de NO_2 (-20 procent) en roetconcentraties (-9 procent), terwijl de impact op fijnstofconcentraties zeer klein is (-0.7 procent voor PM_{10} en -1.4 procent voor $PM_{2,5}$). Dergelijke bescheiden afnames zullen niet meetbaar zijn. Maar dat wil niet zeggen dat er dan, naast de gezondheidswinst door de afname van NO_2, geen andere gezondheidswinst geboekt zal worden. De samenstelling, en daarmee de reactiviteit, van het fijnstofmengsel in de stad en op straatniveau, zal in die situatie namelijk veranderen. **Dit betekent dat de op fijnstofmassa gebaseerde metingen (die momenteel de standaard zijn) weinig zeggen over de effecten op de gezondheid, in deze geschetste situatie.**

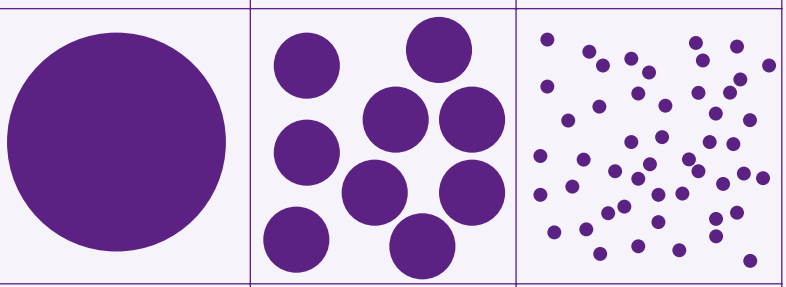
Tenslotte is er de mogelijkheid dat nieuwe technologieën nieuwe fijnstofbronnen veroorzaken en bestaat de mogelijkheid dat klimaatverandering bepaalde fijnstofbronnen versterkt. Bij toekomstig beleid is het dan ook belangrijk om rekening te houden met een complexe en snel veranderende fijnstofproblematiek, waarbij verschillende ontwikkelingen elkaar ook nog eens kunnen beïnvloeden. Dat betekent dan ook dat het beleid zich op meerdere problemen zal moeten richten. Om maar een voorbeeld te noemen: welke voor de gezondheid belangrijke fijnstofemissiereducties dragen ook bij aan het verminderen van de CO_2-emissie en/of het verminderen van de stikstofcrisis? Voor de hardnekkige milieudossiers zou het handig zijn om een matrix van maatregelen te maken. Zo'n integrale aanpak kan tot andere, betere keuzes leiden.

3. WAT IS FIJNSTOF EIGENLIJK?

Onder fijnstof verstaan we alle deeltjes in de lucht die kleiner zijn dan 10 micrometer (PM_{10}) (zie box 2). De Nederlandse regulering van fijnstof verloopt via de Europese luchtkwaliteitsnormen die zijn vastgelegd in de wet Milieubeheer. De Europese norm schrijft 40 microgram per kubieke meter lucht ($\mu g/m^3$) als maximaal toegestaan jaargemiddelde van PM_{10}-concentratie voor. Daarnaast is er een etmaalnorm van 50 $\mu g/m^3$ die maximaal 35 dagen per jaar overschreden mag worden.

BOX 2: FIJNSTOF, FIJNSTOF FRACTIES, DEELTJESAANTALLEN EN DEELTJESOPPERVLAKTE

Fijnstof, in het Engels Particulate Matter (PM), is gedefinieerd als alle deeltjes in de atmosfeer met een aerodynamische diameter ≤ 10 µm (PM_{10}). Daarnaast is er nog onderscheid tussen de fijne fractie met een diameter ≤ 2,5 µm ($PM_{2,5}$) en ultrafijnstof met een diameter ≤ 0,1 µm (UFP). Alle UFP en ook de $PM_{2,5}$ fractie maakt dus deel uit van de PM_{10} fractie. Ultrafijnstofdeeltjes hebben nauwelijks massa en dragen daardoor nauwelijks bij aan de PM_{10} massa. Metingen van PM_{10} zijn dan ook niet representatief voor UFP.[15] UFP wordt doorgaans uitgedrukt in deeltjes aantallen (PN of PNC; particle number concentration) per volume lucht, omdat dit veel representatiever is voor UFP dan massa.[14]

	10 µm (grof)	2,5 µm (fijn)	0,1 µm (UFP)
			
Massa	1	1	1
Deeltjesaantal	1	64	1.000.000
Deeltjesoppervlakte	1	4	100

Verhouding tussen massa, deeltjesaantal en deeltjesoppervlakte voor PM_{10}, $PM_{2,5}$ en UFP.[14]

De jaargemiddelde EU-limietwaarde voor PM_{10} ($PM_{2,5}$) is 40 (25) $\mu g/m^3$, voor UFP zijn er (nog) geen wettelijke grenswaarden. Onder deze PM_{10} en $PM_{2,5}$ normen treden nog steeds ernstige gezondheidseffecten op. De nieuwe WHO-aanbeveling is respectievelijk 15 (5) $\mu g/m^3$.[1] Voor fijnstofeffecten na inhalatie wordt ook vaak deeltjesoppervlakte als blootstellingsmaat voorgesteld.[11] Ook hiervoor is fijnstof (PM_{10}) geen representatieve maat. Het totale reactieve oppervlak per massa is namelijk groter als deeltjes kleiner zijn. Met de huidige PM_{10}-metingen (waarbij belangrijke zaken zoals de oppervlakte niet worden gemonitord) is het onmogelijk om tot een effectief (lokaal) beleid te komen en in beeld te brengen in hoeverre dat beleid daadwerkelijk bijdraagt aan het terugdringen van door fijnstof veroorzaakte gezondheidsschade.

3.1 WAT ZIT ER IN FIJNSTOF EN WAAR KOMT HET VANDAAN?

Er zijn twee soorten fijnstof:
- Primair fijnstof ontstaat door directe emissie van deeltjes in de lucht. Bijvoorbeeld uit schoorstenen en uitlaten of bouw- en sloopstof (Figuur 3).
- Secundair fijnstof ontstaat door chemische reacties van gassen in de atmosfeer. Zoals ammoniak (uit de landbouw), stikstofoxiden die leiden tot ammonium-nitraatdeeltjes. Secundair fijnstof bevindt zich vooral in de $PM_{2,5}$-fractie (zie box 2).

Fijnstofdeeltjes kunnen enorm van elkaar verschillen qua afmeting, reactiviteit, samenstelling en gedrag in het lichaam. Om te kunnen bepalen in hoeverre blootstelling aan fijnstof tot een gezondheidseffect en verlies van (gezonde) levensjaren leidt, moet dus eerst duidelijk zijn om wat voor soort fijnstofdeeltje het precies gaat. Op basis daarvan wordt het mogelijk om verschillende aanpakken te ontwikkelen die ook echt aansluiten bij de type deeltjes die in een specifieke situatie de boosdoener zijn.

In het huidige fijnstofbeleid telt enkel de fijnstofmassa en is er geen onderscheid naar deeltjes van categorieën zoals hieronder:

ULTRAFIJNSTOF (UFP)

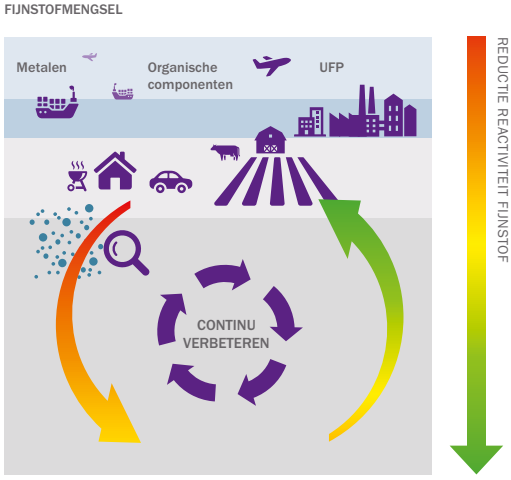
Er komt steeds meer bewijs dat UFP (zie Box 2 en Figuur 4) een belangrijke rol speelt in de gezondheidseffecten van fijnstof.[10,11,14,21] Daarbij is het niet zo dat alle studies een significant verschil tussen gezondheidseffecten van UFP en fijnstof (PM_{10}) onderschrijven.[22] Maar onderzoek laat wel zien dat kortdurende blootstelling aan UFP rondom luchthavens al dusdanige gezondheidseffecten geeft, dat het onderzoek naar de potentiele gezondheidseffecten van langdurige blootstelling aan UFP noodzakelijk wordt geacht.[23] Ook de Gezondheidsraad wees onlangs in een speciaal advies op het effect van ultrafijnstof op de gezondheid.[24]

METALEN

De aanwezigheid van metalen in fijnstof is een punt van zorg. Hun karakteristieke eigenschappen leiden tot verhoogde reactiviteit van de fijnstofdeeltjes en daarmee tot een verhoogd risico op gezondheidseffecten.[25,26] Metalen kunnen ook voorkomen in de UFP-fractie,[15,27] dus in het ultrafijnstofdeeltje, en bij inademing in de bloedbaan terechtkomen. De belangrijkste bronnen van metalen in fijnstof? Dat zijn slijtage-emissies uit het wegverkeer[28,29] en industriële emissies.[30]

ORGANISCHE COMPONENTEN

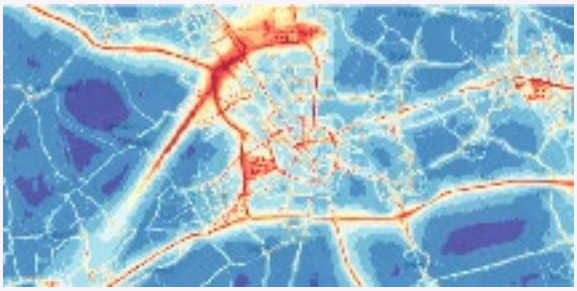
En dan is er nog een derde categorie van zorgwekkende fijnstofcomponenten: organische componenten, zoals polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK), die met name vrijkomen bij onvolledige verbranding. Het belangrijkste toxicologische effect van sommige PAK is dat ze kankerverwekkend zijn. Kankerverwekkende PAK zitten in dieseluitlaatgassen[31,32] en komen vrij bij verbranding van onder andere sigaretten en hout.[33,34] Deze organische componenten hechten zich aan fijnstofdeeltjes en kunnen vervolgens via inademing in het lichaam komen.



BOX 3 LOKALE LUCHTKWALITEIT EN DE HERKOMST- EN BRONTOEDELING VAN FIJNSTOF



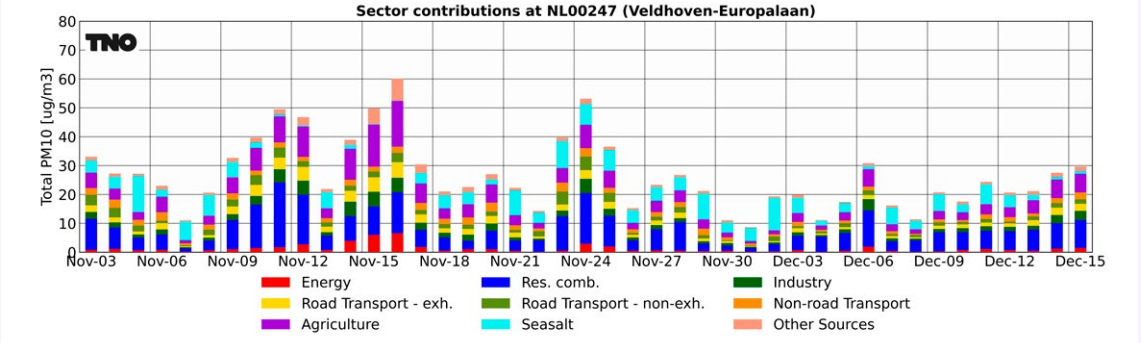
Gemeentes zijn belangrijke stakeholders. Op de foto (vlnr) zijn Rik Thijs (wethouder gemeente Eindhoven) en Fred Hartendorf (TNO) te zien terwijl ze bij een dashboard met lokale luchtkwaliteit in gesprek zijn over de resultaten van het luchtmeetnet Noord Brabant. Wethouder Thijs: *"We leggen met het Regionaal Meetnet een unieke basis voor onderzoek naar en innovatie in onze directe leefomgeving. Met als doel natuurlijk het verbeteren van onze luchtkwaliteit en daarmee onze gezondheid".*



De locatie is belangrijk want er zijn scherpe gradienten in de gezondheidsrisicos, zoals te zien hiernaast.[35] Samenstelling en daarmee gezondheidrelevantie varieert echter van dag tot dag.

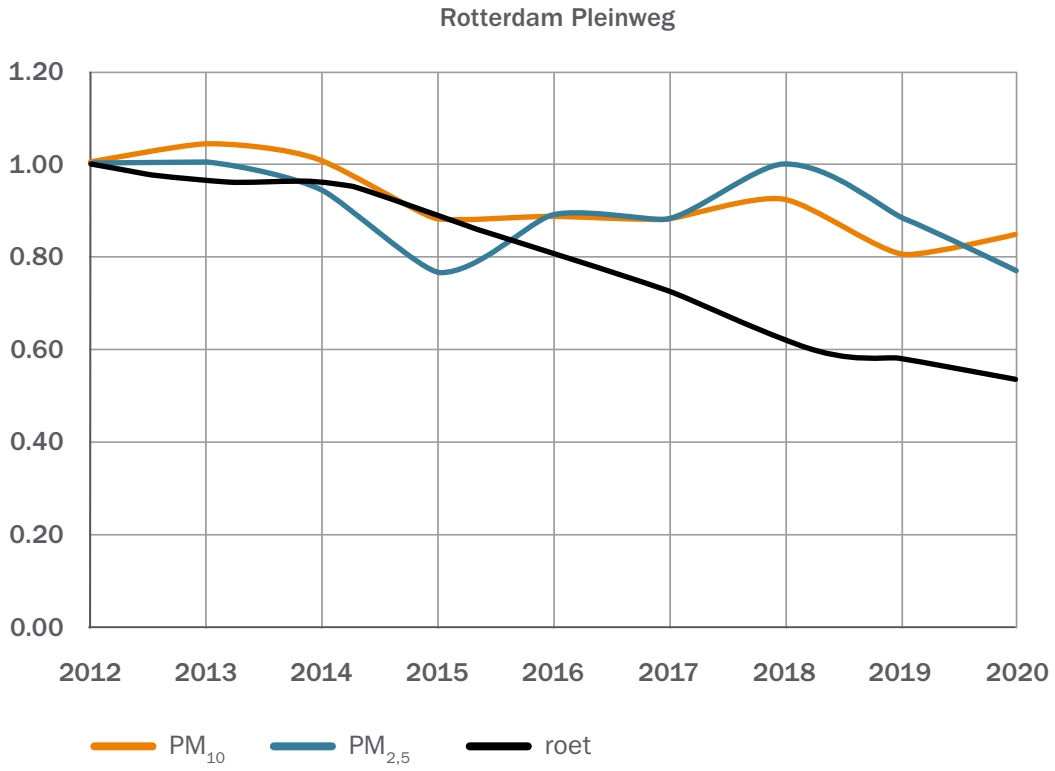
Met de **TNO Operational Pollution Apportionment Service** (TOPAS) kan TNO voor verschillende steden een eerste inzicht geven over actuele fijnstofconentraties en welke bronnen daar precies aan bijdragen. Een prototype is momenteel in bedrijf en haalt dagelijks de gemeten fijnstofwaarden op en voegt daar vervolgens op basis van TNO-kennis (modellen en emissies) de bronherkenning aan toe. Hieronder is voor de locatie Veldhoven gedurende november/december 2021 te zien dat er aanzienlijke verschillen zijn in de herkomst, en dus ook de reactiviteit, van het fijnstofmengsel. Op basis van de gemeten lokale mix en in combinatie met gegevens over gezondheidsgerelateerde effecten, kan hier een indicator aan toegevoegd worden die een inschatting geeft van de (relatieve) gezondheidsrelevantie van dit fijnstofmengsel.

Meer informatie: https://topas.tno.nl/



4. WAT IS NODIG VOOR VERDERE GEZONDHEIDSWINST?

Dankzij een gericht beleid om de Europese luchtkwaliteitsnormen te halen, hebben we in Nederland aanzienlijke gezondheidwinst behaald. Alleen lijkt dit sinds 2015 te stagneren (Figuur 2) omdat de (stedelijke) fijnstofconcentratie niet verder afneemt (Figuur 5).[36] En hoewel we als Nederland de Europese normen netjes hebben gehaald, liggen de recent verder aangescherpte WHO-normen voor fijnstof[1] voorlopig niet binnen bereik.



Figuur 5 *Indexgrafiek (2012 = 1) voor fijnstof (PM_{10}), de fijne fractie ($PM_{2,5}$) en roet op de Pleinweg, Rotterdam.[37] Te zien is dat, net als in Figuur 2, de fijnstofconcentratie (PM_{10} en $PM_{2,5}$) sinds 2015 nauwelijks afneemt maar dat er wel een doorzettende daling is in de roetconcentratie.*

En hier komen we tot de kern van het probleem. Want stel dat we ons in Nederland nu volledig gaan richten op het halen van de WHO-normen? Dat zou dan betekenen dat we stug doorgaan met het sturen op een verdere en ongetwijfeld zeer moeizame fijnstofmassareductie, waarbij we blijven uitgaan van de aanname dat alle deeltjes even schadelijk zijn. Als TNO lijkt ons dat geen goed idee.
Nu er steeds meer bekend wordt over hoe verschillende soorten fijnstofdeeltjes tot verschillende gezondheidseffecten leiden, zien we heel duidelijk de tekortkomingen van de huidige, op de massa van fijnstof gerichte aanpak.
Het roer moet om!

Aangezien de meest verdachte componenten zich vaak in kleinere fijnstofdeeltjes bevinden of van één specifieke bron komen, die dan ook een relatief kleine bijdrage aan de totale massa leveren, garandeert een halvering van de massaconcentratie van fijnstof niet dat de gezondheidseffecten navenant gedaald zijn of zullen dalen. Door op een andere manier naar fijnstofconcentraties te kijken, kunnen we tot nieuwe inzichten komen.

Als de massabasis niet langer de enige indicator is, kunnen er belangrijke ontwikkelingen in beeld komen die voorheen verborgen bleven.
Zo zou het realiseren van een aanzienlijke roetreductie zeer gezondheidsrelevant kunnen zijn, maar niet noodzakelijkerwijs tot een significante afname van de fijnstofconcentraties leiden (zie Figuur 5 voor een voorbeeld hiervan[37]).
Het omgekeerde zou ook kunnen gebeuren: een afname of stabilisatie van fijnstof (PM_{10}), maar een toename van de UFP-concentraties. **Kortom: als we niet de goede maatstaf monitoren, is het ook niet mogelijk om echt te weten waar we staan en of het de goede kant op gaat.**

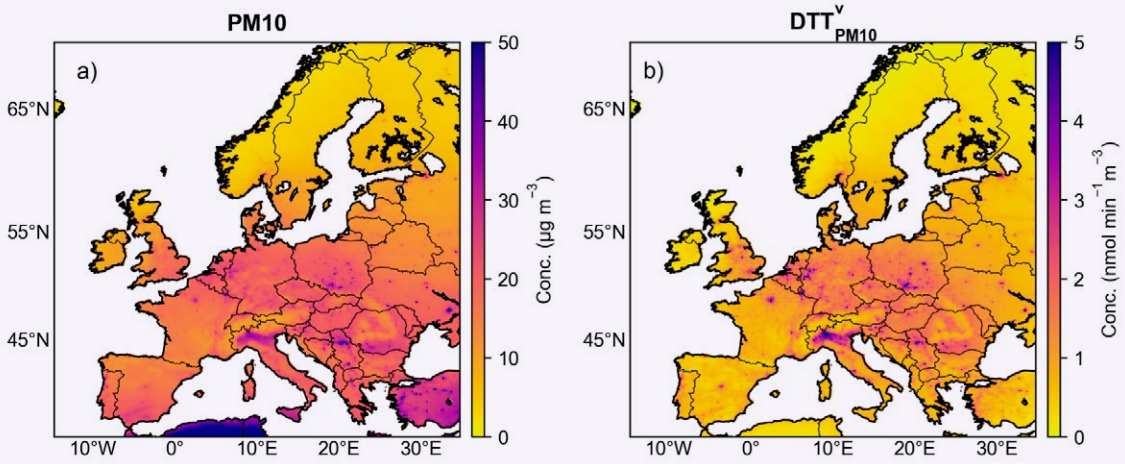
A WAT MOET ER DAN WEL BEPAALD WORDEN?

Voor verdere gezondheidswinst is het noodzakelijk om een bronbeleid te ontwikkelen dat per situatie verschilt en afhangt van de reactiviteit van het ter plekke aanwezig fijnstof. Om dit mogelijk te maken, moeten we in Nederland eerst in staat zijn om de reactiviteit van fijnstof te meten en te checken in hoeverre er een correlatie is met gezondheidseffecten. We moeten de bronbijdragen dus ontrafelen. Welke deeltjes dragen het meest bij aan de totale reactiviteit van het fijnstofmengsel? In box 4 is te zien hoe we dat in beeld kunnen krijgen. En op basis van die inzichten kunnen we vervolgens in Nederland gerichte maatregelen ontwikkelen om de reactiviteit van fijnstof te verminderen, waarbij die maatregelen dus niet altijd tot een massareductie hoeven te leiden.

Extra aandachtspunt hierbij is het beperken van de ultrafijnstofblootstelling. Want zoals gezegd, is de allerkleinste fijnstoffractie, ultrafijnstof, in staat om diep door te dringen in de longen en opgenomen te worden in het lichaam, waardoor het risico op schadelijke interactie met het lichaam het grootst is. Bovendien hebben deze deeltjes relatief gezien het grootste reactieve oppervlak.

BOX 4 EEN MAATSTAF VOOR DE REACTIVEIT VAN FIJNSTOFMENGSELS

De nadelige gezondheidseffecten van fijnstof worden onder andere veroorzaakt door de reactiviteit van het fijnstof: als menselijke cellen in contact komen met fijnstof kunnen zogenaamde reactieve zuurstofcomponenten (reactive oxygen species, ROS) gevormd worden. Dit leidt tot oxidatieve stress. Aan de ene kant kan dit komen door componenten die in en op het fijnstof zelf aanwezig zijn, zoals metalen. Aan de andere kant kunnen cellen door het fijnstof zelf aangezet worden tot het vormen van deze ROS. De mate waarin fijnstof zelf ROS kan genereren, kan worden uitgedrukt als het oxidatief potentieel (OP).
Er zijn verschillende OP-testen die verschillende ROS kunnen aantonen.
De dithiothreitol (DTT) assay is op dit moment de meest gebruikte test voor OP, omdat deze gevoelig is voor verbrandingsproducten en daarbij ook nog eens relatief goedkoop en goed reproduceerbaar is.



Concentraties van fijnstof (links) en oxidatief potentieel (OP) productiesnelheid (rechts) op basis van DTT assay over Europa voor 2011. Er zijn duidelijke verschillen in gradiënten te zien met OP geconcentreerder in drukke urbane gebieden.[38] Dit suggereert dat bronnen die fijnstofmassa (PM_{10}) domineren niet of slechts deels bronnen zijn die DTT domineren.

B EN WAT ZIJN DAARBIJ DE BELANGRIJKSTE AANDACHTSPUNTEN?

Iets nauwkeurig meten is één ding. Maar daar vervolgens ook de juiste conclusies aan verbinden, is weer een heel ander verhaal. En als het om fijnstofmetingen gaat, spelen er op dat vlak vooral de volgende twee belangrijke aandachtspunten:

1. FIJNSTOFEMISSIES LEIDEN NIET ALTIJD DIRECT EN TER PLEKKE TOT BLOOTSTELLING AAN DIE EMISSIES

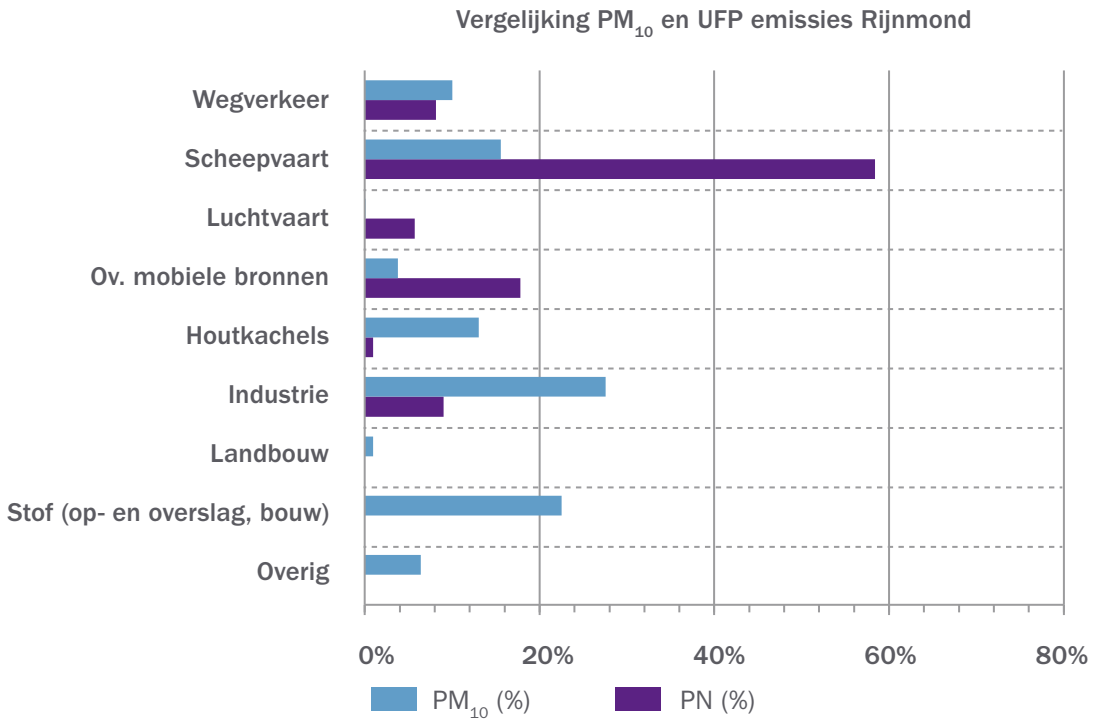
Waar en wanneer vindt de emissie plaats? En waar worden mensen aan die emissies blootgesteld? Om dat goed in beeld te krijgen, is er lokale hoge resolutie modellering nodig. Daarmee is het mogelijk om zowel een meetstrategie te ontwikkelen (waar te meten) als ook de fijnstofblootstelling voor de mens beter in kaart te brengen. De tools zijn er. En door de resultaten van de metingen te valideren en de inzichten die dat oplevert weer mee te nemen, ontstaat er een continu correctiemechanisme dat ervoor zorgt dat het model een steeds nauwkeuriger beeld van de werkelijkheid geeft. Op basis van dat model wordt

dan ook steeds duidelijker hoeveel mensen daadwerkelijk aan bepaalde bronnen worden blootgesteld. En dat maakt het weer mogelijk om op basis van die informatie te bepalen welke gerichte maatregelen er op een specifieke plek moeten worden genomen en hoeveel prioriteit dat heeft.

2. DE BELANGRIJKSTE FIJNSTOFBRONNEN VALLEN (VAAK) NIET SAMEN MET DE HOTSPOTS VOOR UFP-EMISSIES

Emissies van UFP verschillen lokaal sterk. Voor een stad als Eindhoven zal het bijvoorbeeld weer heel anders zijn dan voor de Rijnmond. Als we in Nederland het lokale verschil concreet in beeld brengen, kunnen we de verwachte hotspots identificeren, verifiëren en doelgericht aanpakken.

TNO werkt in 2022 aan een eerste inventarisatie van de UFP-emissies in de Rijnmond. Dat gebeurt in opdracht van DCMR Milieudienst Rijnmond en de gemeente Rotterdam. Scheepvaart en mobiele werktuigen spelen in die omgeving een dominante rol bij UFP-emissies. Andere bronnen, zoals op- en overslag, dragen juist weer meer bij aan fijnstof (Figuur 6). Hoewel er nog nauwelijks (langdurige) metingen zijn van de hoeveelheden UFP lijkt het beeld in grote lijn in overeenstemming met de (beperkte) metingen die DCMR heeft. En deze eerste inventarisatie kan al een bijdrage leveren aan lokale modellering.



Figuur 6 *Relatieve bronbijdrages in 2019 volgens de voorlopige TNO-inventarisatie van UFP-emissie in de Rijnmond-regio (paars) vergeleken met de fijnstof-emissies (PM_{10})[30] voor hetzelfde domein (blauwe en paarse balkjes tellen ieder op tot 100%).*[39]

5. EEN OP GEZONDHEIDSWINST GERICHT FIJNSTOFBELEID (IN VIJF STAPPEN)

Hoe gaan we dit alles uitvoeren? Om te beginnen moeten we in Nederland de reactiviteit van fijnstofdeeltjes beter in kaart brengen. Hiervoor moeten we een meetinfrastructuur opbouwen voor het meten van UFP en de chemische samenstelling van fijnstof of een directe meting van de reactiviteit (zoals oxidatief potentieel). Daarbij moeten we lokaal naar de samenstelling van fijnstof kijken en niet blind afgaan op locaties waar in het verleden veel fijnstof gemeten is.

Gelukkig is er al veel mogelijk en bekend en zijn er middelen en technieken beschikbaar om fijnstof in de toekomst lokaler en specifieker te monitoren. Dit biedt handelingsperspectief. Door snel te beginnen met implementatie van deze nieuwe fijnstofaanpak en de cyclus van proberen-leren-verbeteren continu en vlot te doorlopen, kunnen we binnen een termijn van enkele jaren grote stappen maken. Een invulling van deze cyclus schetsen we hieronder op basis van vijf stappen.



STAP 1: BRONGERICHT EN ITERATIEF DE FIJNSTOFSAMENSTELLING BEPALEN

Wat is de grootteverdeling en chemische samenstelling van het fijnstof? En in hoeverre is daaruit af te leiden uit welke bron het fijnstof afkomstig is en wat de effecten ervan op de gezondheid kunnen zijn? Op basis van de huidige kennis van fijnstofbronnen (uit literatuur en door inventarisaties) is het mogelijk om een (eerste) inschatting te maken en te bepalen welke componenten waar gemeten moeten worden. Het gaat hierbij om *fingerprinting:* het herkennen van bronbijdragen op basis van de chemische samenstelling. Overal alles meten is niet realistisch.
Deze werkwijze zorgt dan ook voor een beperking van de kosten.
Bij de verdeling van meetinstrumenten kan grofweg de volgende indeling aangehouden worden:

Fysische eigenschappen (aantal en deeltjesgrootte) specifiek monitoren bij:

– Belangrijke bronnen van ultrafijnstof: vliegvelden, transport (weg- en scheepvaart), raffinaderijen.

Chemische eigenschappen specifiek monitoren bij:

– Belangrijke bronnen van metalen: wegverkeer (remslijtage), havens, industrie (zoals ijzer en staal).
– Belangrijke bronnen van organische componenten: houtstook, verbrandingsmotoren, industrie.
– Belangrijke bronnen van (organisch) secondair fijnstof: landbouw (NH_3), transport en industrie (NO_x en SO_2); industrie, petrochemie en houtstook.

Vervolgens is het zaak om een aantal representatieve locaties te selecteren en daar gedurende enkele maanden de samenstelling van het fijnstof in de lucht nauwkeurig te bepalen. Kijk daarbij met name naar de variatie in de samenstelling van de bron(nen). Combineer bij de analyse van deze data de geschatte vingerafdrukken van bronnen in de omgeving en de gemeten samenstelling (fysisch en chemisch, inclusief reactiviteit) met elkaar. Dat is namelijk belangrijke informatie voor het ontwerpen van een monitoringsopzet die het mogelijk maakt om over langere tijd de variatie in fijnstofsamenstelling op representatieve locaties vast te stellen.

STAP 2: BRONGERICHTE EN SPECIFIEKE MONITORINGSSTRATEGIE INRICHTEN

In de huidige fijnstofmetingen wordt geen rekening gehouden met de samenstelling en gerelateerde gezondheidseffecten. Zoals eerder toegelicht, kunnen we nieuwe gezondheidsgerichte fijnstofmaatregelen niet meer baseren op alleen massabepalingen van PM_{10}. Andere eigenschappen van fijnstof (zoals UFP, reactiviteit) moeten hiervoor goed in beeld gebracht worden. En hiervoor raden we een brongerichte, specifieke meetstrategie aan met een passend modelinstrumentarium. Dit laatste maakt verspreiding en de bijdrages van primair en secundair fijnstof inzichtelijk en is bovendien geschikt om doelgericht beleid te ontwikkelen. Met behulp van deze strategie kunnen we de impact van het gekozen beleid vervolgens weer zichtbaar en meetbaar maken.
De daarbij verkregen nieuwe datasets zijn ook belangrijk voor de internationale onderzoeksgemeenschap en voor het informeren van burgers. Belangrijk dus om de data ook goed te ontsluiten en aan het publiek beschikbaar te stellen.

De nieuwe strategie is gestoeld op drie belangrijke onderdelen:

A. Instrumentarium

Als de Nederlandse overheden en onderzoeksinstituten de handen ineenslaan, kan binnen een termijn van twee jaar een brongerichte meetinfrastructuur voor de doelcomponenten worden opgebouwd, die aansluit bij bestaande infrastructuur (fijnstofmetingen zijn er al, maar het gaat hier om de mogelijkheid om via metingen de samenstelling van fijnstof verder te specificeren). Er moet dan wel goed uitgezocht worden welke instrumenten het beste waar ingezet kunnen worden en voor welke componenten. Een aanvulling op het huidige al geïmplementeerde instrumentarium is cruciaal voor een goede kwantificering van bronbijdragen, inclusief het aandeel van secundair fijnstof door lokale bronnen (verkeer, houtstook).

B. Locaties

De belangrijkste doelstelling daarbij? Fijnstof op een dusdanig manier karakteriseren dat het direct tot waardevolle bijdragen aan gezondheid- en blootstellingstudies leidt. Het is cruciaal om in Nederland in ieder geval één, maar liever nog twee stedelijke top monitoring stations te realiseren. De minder uitgebreide metingen van andere locaties kunnen vervolgens gelinkt worden aan de metingen op deze stations.

Ook essentieel is de inzet van sensornetwerken. Die moeten in en om steden en in de buurt van belangrijke fijnstofbronnen komen. Welke sensoren dat moeten zijn en waar die precies moeten komen? Daar moet een inventarisatie voor gemaakt worden. Het gaat daarbij om het meten van deeltjesaantallen en gezondheidsrelevante parameters met bijvoorbeeld mid-cost sensoren. Zeker in het begin van deze ontwikkeling is kwaliteit belangrijker dan kwantiteit.

C. Vergelijkbare metriek

Net als in het huidige beleid is het essentieel dat we op de verschillende locaties een vergelijkbare metriek aanhouden. Dat zorgt ervoor dat we in een later stadium de gezondheidsimpact op verschillende locaties met elkaar kunnen vergelijken, ook internationaal. We zullen gestandaardiseerde meetnormen moeten kiezen. De informatie daarvoor kunnen we deels uit buitenlandse literatuur halen, maar we zullen daarbij ook specifiek naar de Nederlandse situatie moeten kijken.

STAP 3: IN KAART BRENGEN VAN LUCHTKWALITEIT IN RUIMTE EN TIJD

Naast een nieuwe meetinfrastructuur voor de nieuwe fijnstofcomponenten, zullen de nieuwe eigenschappen van fijnstof en de verspreiding van fijnstof met deze eigenschappen, toegevoegd moeten worden aan de verspreidingsmodellen. Hiermee kunnen we uiteindelijk de lokale luchtkwaliteit goede toevoeging in kaart brengen en koppelen aan de bijbehorende bronnen.

We gaan nog wat meer de diepte in: als we hoge-resolutie-verspreidingsmodellen voor fijnstof gaan toepassen (zowel in ruimte als tijd) maakt dat de ruimtelijke (waar) en temporele (wanneer) blootstelling inzichtelijk (zie ook box 3). Aan de hand van de brongerichte metingen moeten de modellen vervolgens gevalideerd worden voor de verschillende componenten. Door die validatie zullen de onzekerheden in samenstelling en herkomst van fijnstof in de modellen steeds kleiner worden. En zo ontstaat er dus een steeds beter beeld van de ruimtelijke verdeling van bepaalde componenten. Op basis van dit beeld wordt het ook mogelijk om meer gerichte vragen te beantwoorden over de lokale herkomst van fijnstof.

Naast ruimtelijke en temporele variatie in luchtkwaliteit, is ook de aanwezigheid en beweging van de populatie in een gebied van belang. Want een gezondheidsimpact vindt uiteraard alleen plaats als mensen ook daadwerkelijk aan fijnstof worden blootgesteld. Door populatiedynamica aan luchtkwaliteitsdata te koppelen, kunnen we ook dat aspect meewegen. Dat vervolgens combineren met de kwantificering van bronbijdrages geeft weer een volgende verdiepingsslag: een indicatie van de bijdrage van een bron aan de fijnstofblootstelling van een bepaalde populatie in een bepaald gebied in een bepaalde periode van tijd. We hebben de situatie dan al dusdanig goed in beeld dat het niet heel ingewikkeld meer is om tot een passend handelingsperspectief te komen.

STAP 4: LOKAAL EEN GEZONDHEIDSRELEVANTE INDICATOR VOOR FIJNSTOFMENGSELS BEPALEN

Idealiter zouden we de impact van elk specifiek fijnstofmengsel van elke bron op de gezondheid willen bepalen. Maar dat is niet realistisch. Bovendien verandert het fijnstofmengsel voortdurend in de tijd waardoor we continu achter de feiten aan zouden lopen.

Op basis van de brongerichte, lokale metingen in stap 1 en 2, de invoering van deze waarden in de modellen en de kennis van de gezondheidsimpact van de stoffen, kunnen we een parameter definiëren: de gezondheidsrelevante indicator. Die indicator kent een waarde toe aan de verwachte lokale gezondheidsimpact van het fijnstofmengsel in de lucht. En daarmee kan die gezondheidsrelevante indicator een concreet handvat vormen voor het maken van beleid.

Het oxidatief potentieel is een goede waarde om mee te beginnen. Die waarde kunnen we direct meten (weliswaar nu nog met een vrij complexe methode) of op basis van kennis van de samenstelling modelleren. Door meer metingen te doen en deze te modelleren, kunnen we de betrouwbaarheid van de waarde van de gezondheidsrelevante indicator vervolgens snel verbeteren.

De potentiële gezondheidsimpact van plekken met een gelijke concentratie aan fijnstof kan aanzienlijk verschillen. Dat heeft alles te maken met de herkomst van de fijnstofdeeltjes. Intuïtief voelen we dat aan, maar we willen natuurlijk wel tot een plausibele en meetbare maatstaf komen voor de fijnstoftoxiciteit. En dat kan via een meting of modellering van het oxidatief potentieel. Daarmee kunnen concentratiekaarten omgezet worden naar gezondheidsrelevantiekaarten.
Meer toxicologisch onderzoek is nodig om het oxidatief potentieel goed te kunnen inzetten. Ondertussen is er een stap die we nu al kunnen zetten. We kunnen namelijk beginnen met de monitoring van oxidatief potentieel op enkele goed gekozen locaties, om een basisdataset in Nederland te verzamelen en de voortgang te monitoren. De aanpak om de lokale gezondheidsbelasting terug te brengen is hieraan gerelateerd, het oxidatief potentieel zal veel meer nadruk op de urbane omgeving leggen (box 4).[38]

STAP 5: LOKAAL FIJNSTOFBELEID VOOR GEZONDHEIDSWINST OPZETTEN

We willen als maatschappij, beleidsmaker en burger dat de juiste maatregelen doorgevoerd worden en op de juiste locatie, zodat we samen de maximale gezondheidswinst kunnen behalen. Om dat goed te kunnen doen, moeten we weten waar de gezondheidsrelevante indicator zorgelijk is. Daarbij moeten we in staat zijn om, met behulp van *fingerprinting* en het modelinstrumentarium, te bepalen welke bronnen aan die ongewenste situatie bijdragen. Vervolgens is het zaak om er met passende maatregelen voor te zorgen dat de situatie verbetert en beheersbaar wordt.

Nederlands onderzoek heeft eerder laten zien dat het monitoren van een specifieke fijnstofcomponent (roet) een betere indicator is om aan fijnstof gerelateerd gezondheidsrisico's in de binnenstad te evalueren dan wanneer dit gebeurt aan de hand van fijnstofmassa.[9] We zien dat monitoring van fijnstofmassa de afname van een gezondheidsrelevante component niet vat (Figuur 5) en niet gevoelig genoeg is om de impact van een belangrijke maatregel als uitstootvrij verkeer te meten (box 2).[20] Er ligt dus een uitdaging om ervoor te zorgen dat metingen van alternatieve maatstaven zoals UFP en reactiviteit gangbaar en reproduceerbaar worden en ze vervolgens breed uit te rollen en te integreren met de reguliere monitoring.

En wat we kunnen doen om normstelling, monitoring en handhaving hanteerbaar en haalbaar te maken? Om te beginnen zouden we een fasering kunnen instellen voor de normstelling. Bijvoorbeeld door eerst UFP-bepaling in te regelen. Daarvoor zijn al continu metende instrumenten beschikbaar en is het instellen van een norm laagdrempeliger. Vervolgens is het zaak om het beleid op reactiviteit te richten. Parallel aan de UFP-monitoring kan dan de monitoring en normering voor reactiviteit verder uitgewerkt en uitgebouwd worden, zodat in een vervolgfase de normstelling ook direct met dit onderdeel kan worden aangevuld.

Zodra de monitoring op orde is en de waarnemingen publiek beschikbaar zijn, kan (nog) gericht(er) op emissiereductie gestuurd worden. Althans, als daar de juiste afspraken voor gemaakt zijn, bijvoorbeeld in een convenant of de omgevingswet. Hierbij zijn de volgende elementen zeer belangrijk:

a) Er moet een (lokaal) implementatieplan komen, bij voorkeur op initiatief van (lokaal) bevoegd gezag. Elementen van dit plan kunnen zijn:
   - de optimale meetstrategie
   - kosteninschatting
   - korte en lange termijn doelen
   - toetsing van draagvlak bij stakeholders
   - rol van burgerparticipatie
   - ontsluiting van de informatie

b) Lokale overheden hebben handvatten voor beleid nodig. Het ontwikkelen van een goede toolbox met maatregelopties en verwachte impact op UFP en reactiviteit is noodzakelijk. Zo ook een verkenning van de mogelijkheden voor een effectieve handhaving (hoe en wanneer). Lokale overheden kunnen hiervoor gebruikmaken van de diensten van bestaande kennishouders (onder andere RIVM, GGD, TNO) en spelen een sleutelrol bij het in kaart brengen van lokale vervuilers, bij implementatie van lokale meetoplossingen en bij het doorvoeren van brongerichte maatregelen voor bronnen in hun regio.

c) Zijn lokale fijnstofbronnen direct of indirect in handen van bedrijven? Dan worden die geacht om:
   - mee te werken bij het onderzoeken van fijnstofconcentraties
   - oorzaken aan te wijzen van de (relatief) hoge concentraties van fijnstof en/of bepaalde componenten daarin
   - oplossingsrichtingen te zoeken voor specifieke fijnstofemissies, waar nodig met ondersteunende maatregelen

5.1 EEN OPROEP TOT SAMENWERKING

Om een nieuw fijnstofbeleid succesvol in te voeren, zullen de volgende partijen en stakeholders zich moeten verenigen:

- Ministeries (IenW, EZK): voor landelijk kader, faciliteren, implementatie van meet- en modelinstrumentarium, aanvullende stimulansen en/of synergie met dossiers zoals de energietransitie en het stikstofbeleid.
- Gemeenten, provincies en omgevingsdiensten: voor lokaal beleid en implementatie van landelijk beleid, verantwoording naar bewoners en het betrekken van inwoners, haalbaarheid en handhaving.
- RIVM en GGD: voor monitoren gezondheidswinst op weg naar de 2030-doelstelling
- Kennisinstellingen (onder andere TNO, RIVM en universiteiten): voor inhoudelijke onderbouwing, advies over oplossingsrichtingen en implementatie.
- Industriële stakeholders (onder andere havenbedrijven, luchthavens, industrie, energiesector, kachelbranche): innovatie en implementatie samen met eerdergenoemde partijen.
- NGO’s (onder andere Longfonds, Urgenda, Milieudefensie): agenderen en belangenbehartiging.

5.2 EEN CYCLISCHE AANPAK

Het is mogelijk om de vijf stappen deels parallel in gang te zetten. In bepaalde gevallen kan dat het proces versnellen. Want soms heb je voor een stap informatie over bijvoorbeeld fijnstofeigenschappen of specifieke maatregelen voor emissiebronnen nodig die pas in een latere stap aan bod komen. En de inzichten die een latere stap oplevert, kan ook van belang zijn voor een eerdere stap. Een cyclische aanpak (of iteratief proces) lijkt ons dus een goede manier om sneller tot een passend fijnstofbeleid en een goede monitoring daarvan te komen, en daarna ook continu verbeteringen door te kunnen voeren.



BOX 5: WELKE CONCRETE MAATREGELEN KUNNEN WE NU AL NEMEN?

Het hier voorgestelde 5-stappenplan is niet morgen al gereed. Maar er zijn ook acties die we al wel morgen kunnen nemen en die belangrijke informatie geven en cruciaal zijn voor de ontwikkeling van deze aanpak:

Wat doen we morgen:

a) Inrichten van minimaal twee monitoring sites in het landelijk meetnet, die in staat zijn om deeltjes op filters te bemonsteren voor verdere analyse. Naast gedetailleerde fysisch-chemische samenstelling van het fijnstof op de twee monitoring sites moet ook het oxidatief potentieel worden gemeten.
b) Nieuwe gestandaardiseerde toxiciteitsmetingen aan verschillende bronnen om de effecten van fijnstof te identificeren.
c) Correlaties opbouwen tussen fysische-chemische karakteristieken van verschillende bronemissies en gezondheidseffecten (toxicologie en epidemiologie).
d) Ontwikkeling van oxidatief potentieel-metingen en identificatie van gezondheidsrelevante componenten zoals metalen en organische fracties als mogelijke gezondheidsrelevante indicator.

Wat doen we na morgen

e) Op basis van de correlaties tussen fysisch-chemische en reactiviteit karakteristieken van fijnstofmengsels, en de toxische effecten en mogelijk geïdentificeerde gezondheidseffecten, zal op de langere termijn een goede keuze gemaakt kunnen worden voor een representatieve gezondheidsrelevante indicator voor fijnstofmengsels.

6. BATEN (EN KOSTEN) VAN EEN NIEUW FIJNSTOFBELEID

We hebben het in dit paper over het structureel bepalen van de volledige fysisch-chemische samenstelling van fijnstof in de lucht. En dat is niet alleen complex, maar ook kostbaar. En dat geldt eveneens voor mogelijke maatregelen. We kunnen er niet omheen: als we in Nederland daadwerkelijk het aantal verloren levensjaren door fijnstof willen terugdringen, zal daar ook financiering voor moeten worden vrijgemaakt. Maar daar staat wel wat tegenover. Een andere fijnstofaanpak leidt tot een vermindering van zowel de directe zorgkosten als de sociale kosten. Het bespaart de maatschappij dus geld, terwijl de kwaliteit van leven ook nog eens flink verbetert. Daarnaast kan de door ons aanbevolen nieuwe fijnstofaanpak bijdragen aan een vermindering van de (gezondheids)ongelijkheid in Nederland. Mensen in kwetsbare wijken worden namelijk meer aan fijnstof blootgesteld, bijvoorbeeld omdat hun huizen dichter bij drukke wegen of industriegebieden staan.

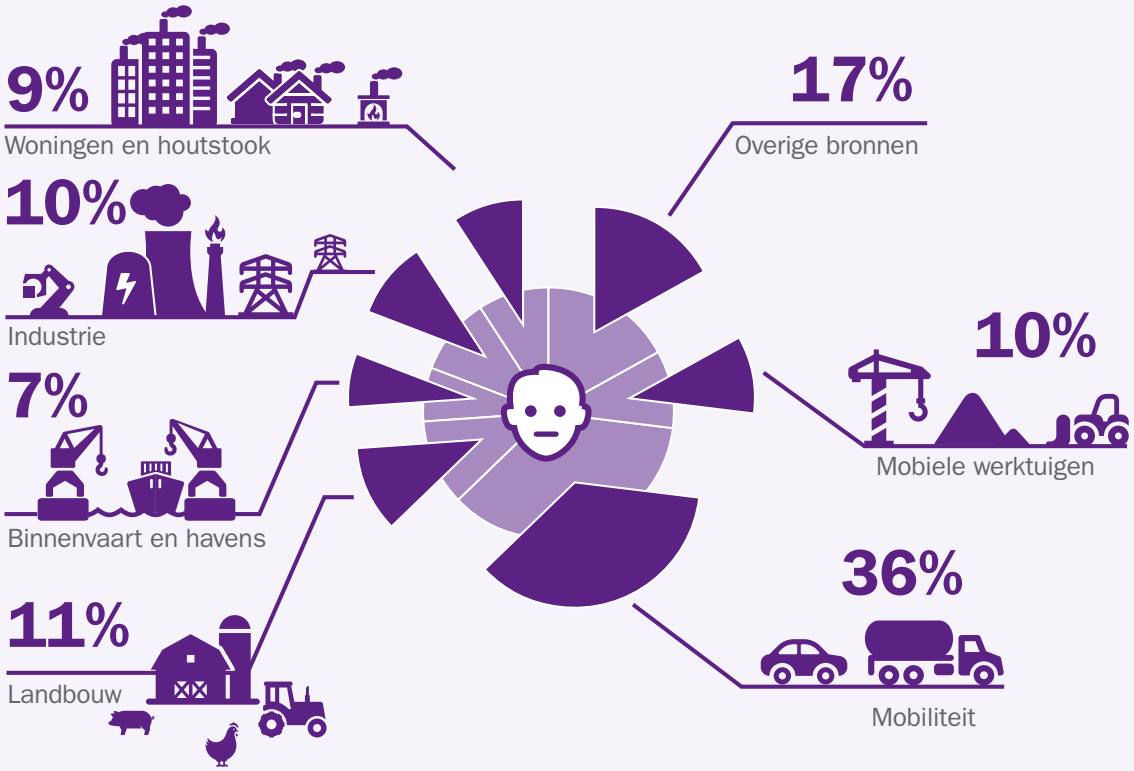
Per inwoner gemeten kost luchtvervuiling de Europese stadsbewoner gemiddeld zo'n € 1.250 aan welzijn per jaar. En dat is een rechtstreeks gevolg van direct en indirect gezondheidsverlies door slechte luchtkwaliteit.[40,41] Ook niet-stedelijke inwoners worden aan fijnstof blootgesteld, en deze problematiek hoeft voor landelijke gebieden dus niet noodzakelijk heel anders te zijn dan voor steden. Wel kunnen de bronbijdragen verschillen en zijn er geen aparte cijfers voor sociale kosten. In het genoemde Europese onderzoek met 432 steden liggen Nederlandse steden dicht bij het gemiddelde. Ter indicatie, voor een stad als Eindhoven zijn de sociale kosten van luchtverontreiniging € 1.276 per inwoner, met 236.000 inwoners komt dat neer op ongeveer € 300 miljoen per jaar. Deze kosten zijn voor 80-85 procent het gevolg van blootstelling aan fijnstof. Uitgaande van 17 miljoen Nederlanders (75% stedelijk) is dat indicatief € 10 – 15 miljard. Dit zijn zeer hoge kosten en de directe zorgkosten (ongeveer een half miljard euro voor heel Nederland[2]) zijn hier slechts een beperkt onderdeel van.

Momenteel is het Nederlandse beleid gericht op generiek, landelijk beleid voor sectoren en is kosteneffectiviteit gebaseerd op de effecten voor de gemiddelde blootstelling van de Nederlandse bevolking over een heel jaar. Maar bij een goede kosten-batenanalyse hoort ook aandacht voor het effect van individuele fijnstofmaatregelen, de lokale fijnstofsamenstelling en de ruimtelijke verdeling van bronbijdragen op specifieke locaties. Door het op die manier aan te pakken, ontstaat er een beleid dat zich meer op de lokale gezondheidswinst van individuen richt. En dat is precies wat we willen!

Met de milieuzones in steden zijn er in het verleden stappen gezet in de richting van een lokaler, doelgerichter beleid. De Rijksoverheid heeft in 2020 met een groot aantal gemeenten en provincies het Schone Lucht Akkoord (SLA) gesloten (Box 6). De doelstelling daarvan is om de (lokale) luchtvervuiling verder te verminderen en zo in 2030 een gezondheidswinst van minimaal 50 procent te behalen (ten opzichte van 2016). Nederland heeft dus al de nodige ervaring om dit maatschappelijke probleem lokaal op te pakken. Als TNO juichen we dat toe en roepen we alle betrokken partijen op om die lokale aanpak nog veel verder uit te breiden.

BOX 6: HET SCHONE LUCHT AKKOORD

Het doel van het Schone Lucht Akkoord is om de luchtkwaliteit in Nederland permanent te verbeteren. Het is een akkoord tussen Rijk, provincies en een groot aantal gemeenten met als doelstelling een gezondheidswinst van minimaal 50 procent in 2030 ten opzichte van 2016. ‘Dat betekent dat mensen langer, gezonder en met meer kwaliteit leven', aldus staatssecretaris Stientje van Veldhoven. Zij heeft namens het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat op 13 januari 2020 als eerste haar handtekening onder het akkoord geplaatst. Inmiddels hebben alle 12 provincies en al bijna 90 gemeenten het akkoord getekend. Meer informatie is beschikbaar via www.schoneluchtakkoord.nl



De infographic toont de gezondheidsbijdrage per sector/thema zoals die is opgenomen in de toelichting bij het Schone Lucht Akkoord, januari 2020.[42]

7. CONCLUSIE

Het huidige beleid voor fijnstof heeft zich de laatste twintig jaar volledig gericht op het halen van Europese normen. Dat is succesvol geweest, maar heeft het probleem van vroegtijdige sterfte en verloren levensjaren door blootstelling aan fijnstof nog niet opgelost. En zolang de focus hetzelfde blijft, gaat het geplande aanvullende beleid het probleem ook niet oplossen. Gezien de belangrijke rol van luchtkwaliteit bij het verlies aan levensjaren in Nederland en de hoge sociale kosten is het essentieel om tot een nieuw fijnstofbeleid te komen, met daarin extra focus op gezondheidswinst. Het recente Schone Lucht Akkoord (SLA)[42] en de adviezen van de Gezondheidsraad[24,43] benadrukken dit. Ondersteuning van zulk beleid vergt een focus op andere parameters dan uitsluitend fijnstofmassa.

Het realiseren van gezondheidswinst is belangrijker dan sturing op de afname van een relatief eenvoudig te monitoren parameter, zoals de fijnstofmassa. We hebben de fractie UFP in fijnstof en de reactiviteit van het fijnstofmengsel als belangrijkste te monitoren parameters geïdentificeerd en laten zien dat de kennis er is om op een nieuwe, gezondheidsrelevantere strategie in te zetten. Hierbij moeten van begin af aan de juiste parameters gemonitord worden. Ook hebben we de implementatiestappen geschetst waarmee in twee jaar tijd de beleidsondersteuning op andere maatstaven naast fijnstofmassa gerealiseerd kan worden. Belangrijke actoren en stakeholders moeten zich nog wel verenigen om zo'n beleid succesvol te maken. En dat is volledig in lijn met wat het Schone Lucht Akkoord beoogt.

Voor doelgerichte effectieve sturing, transparantie, draagvlak en inzicht moeten we in Nederland een gezondheidsrelevante indicator voor fijnstof ontwikkelen. Hierbij beginnen we niet blanco. Er is al veel in Nederland en daarbuiten wat zich hiervoor leent, maar het is wel duidelijk dat er een concrete sprong voorwaarts én een langetermijnvisie nodig zijn. Een andere succesfactor is het kritisch volgen en evalueren van de doelstellingen in een cyclische ontwikkeling. Is de gezondheidsrelevante indicator realistisch? Is hij begrijpelijk voor de burger en andere stakeholders? En is die indicator eenduidig genoeg zodat we er in Nederland daadwerkelijk op kunnen sturen? Door constant kritische vragen te stellen en verbeteringen door te voeren, kan het beleid continu aangescherpt worden.

Naast de implementatie van de ideeën en instrumenten vereist deze omslag ook flinke onderzoeks- en ontwikkelingsinspanningen. En daarbij moeten we de mogelijkheid voor een goede inpassing in het beleid, met name het SLA, heel goed in de gaten houden. Een ambitieuze ontwikkeling met zoveel verschillende facetten, vraagt niet alleen om een breed draagvlak en meer creativiteit, maar ook om genoeg financiële middelen. De overheid kan een belangrijke aanzet geven. Maar de doelen zijn alleen haalbaar als we in Nederland ook een economische waardeketen creëren met onder andere kansen voor technologieontwikkeling, sensorontwikkelaars, serviceproviders en investeerders in duurzame ontwikkelingen.

8. VOORUITBLIK

In de toekomst is lucht nog schoner en gezonder. We lopen door onze steden en door het gerichte bronbeleid op de ongezonde fractie van fijnstof is de lucht die we daar inademen ook daadwerkelijk schoon. Die lucht voldoet aan de nieuwe normen voor UFP en reactiviteit. In de stad en de omliggende omgeving staat leefbaarheid voorop. Dit sluit naadloos aan bij het actieplan van de Europese Commissie *'Towards a Zero Pollution for Air, Water and Soil'* dat één van de hoofdoelen van de Europese Green Deal is. We moeten daar *nu* aan beginnen om over drie tot vijf jaar de gewenste resultaten te boeken en met praktijkvoorbeelden de effectiviteit van de nieuwe focus in het fijnstofbeleid aan te tonen.

Hierbij dus een dringende oproep aan alle partijen om qua fijnstofaanpak gezamenlijk het aantoonbare verschil te maken zodat Nederland er in 2030 nog beter en gezonder voor staat.

9. REFERENTIES

1. WHO. New WHO Global Air Quality Guidelines aim to save millions of lives from air pollution. https://www.who.int/news/item/22-09-2021-new-who-global-air-quality-guidelines-aim-to-save-millions-of-lives-from-air-pollution.
2. RIVM. Synthese Volksgezondheid Toekomst Verkenning (VTV) 2018. https://www.vtv2018.nl/leefstijl-en-omgeving (2018).
3. Wielders, L. M. L. & Dönszelmann, C. E. P. *Relatie luchtkwaliteit en het Energie- en Klimaatprogramma Apeldoorn.* https://ce.nl/publicaties/effect-op-de-luchtkwaliteit-van-de-maatregelen-uit-het-energie-en-klimaatprogramma-apeldoorn/ CE Delft (2008).
4. RIVM. Dossier 'Fijn stof', hoofdstuk 4 'Effecten'. https://www.rivm.nl/dossier-fijn-stof (2013).
5. Knol, A. B., van Velze, K., Fischer, P., Kunseler, E. & van Bree, L. Interpretatie van vroegtijdige sterfte door luchtverontreiniging. *Milieu Dossier 15*, 20–22 (2009).
6. Dockery, D. W. *et al.* An Association between Air Pollution and Mortality in Six U.S. Cities. *N. Eng. J. Med. 329*, 1753–1759 (1993).
7. WHO. *WHO Air Quality Guidelines. Global Update 2005: Particulate Matter, Ozone, Nitrogen dioxide and Sulfur dioxide.* https://apps.who.int/iris/handle/10665/107823 (2006).
8. Beelen, R. *et al.* Effects of long-term exposure to air pollution on natural-cause mortality: an analysis of 22 European cohorts within the multicentre ESCAPE project. *Lancet 383,* 785–795 (2014).
9. Janssen, N. A. H. *et al.* Black carbon as an additional indicator of the adverse health effects of airborne particles compared with PM_{10} and PM2.5. *Environ. Health Perspect. 119*, 1691–1699 (2011).
10. Oberdörster, G. *et al.* Extrapulmonary translocation of ultrafine carbon particles following whole-body inhalation exposure of rats. *J. Toxicol. Environ. Heal. - Part A 65,* 1531–1543 (2002).
11. Oberdörster, G., Oberdörster, E. & Oberdörster, J. Nanotoxicology: An emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. *Environ. Health Perspect. 113,* 823–839 (2005).
12. Cassee, F. R. *et al. Ambient ultrafine particles: evidence for policy makers [White paper].* https://efca.net/files/WHITE PAPER-UFP evidence for policy makers (25 OCT).pdf, EFCA (2019).
13. Gezondheidsraad. *Gezondheidseffecten luchtverontreiniging. Achtergronddocument bij: Gezondheidswinst door schonere lucht.* (2018).
14. Kwon, H. S., Ryu, M. H. & Carlsten, C. Ultrafine particles: unique physicochemical properties relevant to health and disease. *Exp. Mol. Med. 52,* 318–328 (2020).
15. Schraufnagel, D. E. The health effects of ultrafine particles. *Experimental and Molecular Medicine* vol. 52 311–317 (2020).
16. Dias, D., Antunes, A. P. & Tchepel, O. Modelling of Emissions and Energy Use from Biofuel Fuelled Vehicles at Urban Scale. *Sustain. 2019, 11,* 2902 (2019).
17. Obeid, F. *et al.* Engine performance and emissions from fuels containing nitrogen and sulphur. *Energy Convers. Manag. X 14,* 100179 (2022).
18. Longfonds. Eerste stappen richting afbouw van houtstook in biomassacentrales. https://www.longfonds.nl/nieuws/eerste-stappen-richting-afbouw-van-houtstook-biomassacentrales.

19. Beddows, D. C. S. & Harrison, R. M. PM_{10} and PM2.5 emission factors for non-exhaust particles from road vehicles: Dependence upon vehicle mass and implications for battery electric vehicles. *Atmos. Environ. 244,* 117886 (2021).
20. van Moorselaar, I. S. van der Z. & Denissen, S. *Uitstootvrije mobiliteit, Resterende milieubelasting luchtkwaliteit & geluid, Rapport Academische werkplaats, Gezonde Leefomgeving.* GGD Amsterdam (2022).
21. Heusinkveld, H. J. *et al.* Neurodegenerative and neurological disorders by small inhaled particles. *Neurotoxicology 56,* 94–106 (2016).
22. Ohlwein, S., Kappeler, R., Kutlar Joss, M., Künzli, N. & Hoffmann, B. Health effects of ultrafine particles: a systematic literature review update of epidemiological evidence. *Int. J. Public Heal. 2019 644 64,* 547–559 (2019).
23. Lammers, A. *et al.* Effects of short-term exposures to ultrafine particles near an airport in healthy subjects. *Environ. Int. 141,* 105779 (2020).
24. Gezondheidsraad. Risico's van ultrafijnstof in de buitenlucht. https://www.gezondheidsraad.nl/documenten/adviezen/2021/09/15/risicos-van-ultrafijnstof-in-de-buitenlucht.
25. Riediker, M. Cardiovascular effects of fine particulate matter components in highway patrol officers. *Inhalation Toxicology 19,* 99–105 (2007).
26. Maher, B. A., González-Maciel, A., Reynoso-Robles, R., Torres-Jardón, R. & Calderón-Garcidueñas, L. Iron-rich air pollution nanoparticles: An unrecognised environmental risk factor for myocardial mitochondrial dysfunction and cardiac oxidative stress. *Environ. Res. 188,* 109816 (2020).
27. Gonet, T. *et al.* Size-resolved, quantitative evaluation of the magnetic mineralogy of airborne brake-wear particulate emissions. *Environ. Pollut. 288,* 117808 (2021).
28. Denier van der Gon, H. A. C. *et al.* The Policy Relevance of Wear Emissions from Road Transport, Now and in the Future - An International Workshop Report and Consensus Statement. *J. Air Waste Manag. Assoc. 63,* 136–149 (2013).
29. Ingo, G. M. *et al.* The vehicle braking systems as main source of inhalable airborne magnetite particles in trafficked areas. *Environ. Int. 158,* 106991 (2022).
30. Emissieregistratie. http://www.emissieregistratie.nl (2022).
31. IARC. Diesel Engine Exhaust Carcinogenic. https://www.iarc.who.int/news-events/iarc-diesel-engine-exhaust-carcinogenic.
32. Silverman, D. T. *et al.* The Diesel Exhaust in Miners Study: A Nested Case–Control Study of Lung Cancer and Diesel Exhaust. *JNCI J. Natl. Cancer Inst. 104,* 855–868 (2012).
33. Perera, F. Carcinogenicity of airborne fine particulate benzo(a)pyrene: an appraisal of the evidence and the need for control. *Environ. Health Perspect. Vol. 42,* 163–185 (1981).
34. Jakovljević, I. *et al.* Pollution Sources and Carcinogenic Risk of PAHs in PM1 Particle Fraction in an Urban Area. *Int. J. Environ. Res. Public Heal. 2020, Vol. 17, Page 9587 17,* 9587 (2020).
35. RIVM. Milieugezondheidsrisico's. https://www.rivm.nl/milieugezondheidsrisico-s.
36. Luchtmeetnet.nl. https://www.luchtmeetnet.nl/.
37. van Breugel, P. & Özdemir, E. *Lucht in cijfers 2020 - Luchtkwaliteit in Rijnmond.* https://www.dcmr.nl/sites/default/files/2021-06/Lucht in cijfers - 2020.pdf, DCMR (2020).
38. Daellenbach, K. R. *et al.* Sources of particulate-matter air pollution and its oxidative potential in Europe. *Nature 587,* 414–419 (2020).
39. TNO. *Manuscript in preparation.* (2022).

40. de Bruyn, S. & de Vries, J. *Health costs of air pollution in European cities and the linkage with transport.* https://cedelft.eu/publications/health-costs-of-air-pollution-in-european-cities-and-the-linkage-with-transport/ CE Delft (2020).
41. de Vries, J. & de Bruyn, S. *Toelichting sociale kosten luchtkwaliteit Eindhoven.* https://raadsinformatie.eindhoven.nl/user/bestuursdocument/env=help/action=showannex/gdb=2081/Bijlage_2_-_CE_Delft_200436_Toelichting_sociale_kosten_luchtkwaliteit_Eindhoven.pdf CE Delft (2021).
42. Schone lucht akkoord. https://www.schoneluchtakkoord.nl/.
43. Gezondheidsraad. Gezondheidswinst door schonere lucht. https://www.gezondheidsraad.nl/documenten/adviezen/2018/01/23/gezondheidswinst-door-schonere-lucht.
44. European Commission. Zero pollution action plan. https://ec.europa.eu/environment/strategy/zero-pollution-action-plan_en.

CONTACT

Wilt u hierover meer weten neem contact met me op:
Fred Hartendorf
fred.hartendorf@tno.nl

22-12510 juni 2022

TNO innovation for life

TNO.NL/Fijnstof