

Voor het verbeteren van de binnenluchtkwaliteit

Aerasense ultrafijnstof-monitor

Verontreiniging van de buitenlucht, en dan vooral de deeltjesvormige verontreiniging met fijnstof (FS), staat al jaren in de belangstelling vanwege de gezondheidsschadelijke effecten daarvan. De wet- en regelgeving hieromtrent beoogt de effecten van FS op de volksgezondheid te beperken door zowel de totale FS-emissie als de blootstelling aan FS te verminderen. Betrekkelijk weinig aandacht is er daarentegen voor de luchtverontreiniging binnenshuis ondanks dat iedereen meestal binnen zit. Is het binnen schoner dan buiten? In hoeverre hangt de binnenluchtverontreiniging samen met de buitenluchtverontreiniging, met ventilatie, en met onze bezigheden binnenshuis? Het beantwoorden van deze vragen vereist een meting van de luchtverontreiniging die inzicht geeft in het lokale blootstellingsrisico. In dit artikel wordt ingegaan op dergelijke metingen met de recent ontwikkelde Aerasense ultrafijnstof-monitor waarmee inzicht wordt verkregen in de relatieve schadelijkheid van de totale deeltjesvormige luchtverontreiniging. Kennis van de lokale luchtverontreiniging creëert het nodige bewustzijn over het bestaan van luchtverontreiniging en kan tevens worden gebruikt om ad hoc maatregelen te nemen die de verontreiniging binnenshuis verminderen. Daarmee kan ook een balans worden gevonden tussen enerzijds de mate van beheersing van de binnenluchtkwaliteit en anderzijds het daarvoor benodigde energiegebruik.

- door dr.ir J. Marra*

Het fijnstof (FS) probleem in de buitenlucht is een onderwerp van aanhoudende belangstelling [1]. Dit komt door de aandacht van de media, maar indirect ook door de steeds strengere regelgeving bedoeld om burgers te beschermen tegen blootstelling aan schadelijk FS. FS is een vorm van deeltjesvormige luchtverontreiniging waarin deeltjes met een doorsnee tot 10 µm gezondheidsschadelijke effecten kunnen veroorzaken omdat die in staat zijn tij-

dens het inademen van de verontreinigde lucht tot diep in de longen door te dringen en zich daar af te zetten. De chemische samenstelling van deze deeltjes is doorgaans onbekend omdat FS van verschillende bronnen afkomstig kan zijn. Algemeen wordt aangenomen dat verbrandingsprocessen, het autoverkeer, de landbouw en de industrie de meest schadelijke bijdrages geven aan de totale FS-concentratie. Ze dragen ook bij aan de bekende smogvorming in grote steden bij zon-



Dr.ir J. Marra

nig windstil weer. Studies hebben aangetoond dat gezondheidseffecten veroorzaakt door FS zich niet alleen langzamerhand ontwikkelen na langdurende blootstelling maar ook acuut kunnen optreden na kortdurende blootstelling [1-3]. Het gaat hierbij o.m. om het veroorzaken en/of verergeren van diverse ziektes aan de luchtwegen en om hart- en vaatziekten, het één en ander leidend tot een kans op vroegtijdige sterfte. Afgeschat is dat bij de huidige FS-concentraties in Nederland jaarlijks tot enkele tienduizenden mensen ongeveer tien jaar eerder overlijden [1].

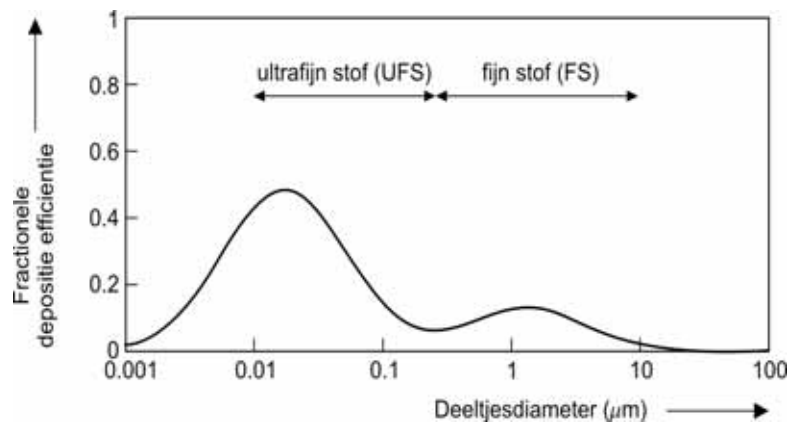
Om deze gezondheidsrisico's te beperken heeft de Europese Unie al jaren geleden luchtkwaliteitsnormen vastgesteld in de vorm van dag- en jaargemiddelde FS-massaconcentratie grenswaarden [4]. FS-massaconcentraties worden standaard gerapporteerd als PM₁₀ en/of PM_{2,5}-concentraties. PM₁₀ en PM_{2,5} staan voor de Engelse term "Particulate Matter" die gaat over de massaconcentratie van deeltjes kleiner dan 10 µm en 2,5 µm, respectievelijk. De PM_{2,5}-meting wordt de laatste jaren steeds vaker naast de PM₁₀-meting uitgevoerd omdat men ver-

* Philips Research, Eindhoven

moedt heeft dat deeltjes kleiner dan $2,5 \mu\text{m}$ relatief schadelijker zijn dan deeltjes in het $2,5 - 10 \mu\text{m}$ grootte-interval [1]. De jaargemiddelde FS-grenswaarde is vastgesteld op de norm $\text{PM}_{10} = 40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ onafhankelijk van de chemische samenstelling van het FS. Door allerlei maatregelen is de gemeten PM_{10} in Nederland in de afgelopen vijftien jaar met ongeveer 30 % afgenomen [5]. Desondanks wordt de EU norm nog lang niet overal en altijd gehaald, vooral niet in stedelijke gebieden en op of langs autosnelwegen. Om hierin verdere verbetering te brengen blijft de overheid d.m.v. subsidies investeren in het verder terugbrengen van de FS-emissie door het autoverkeer. Ongetwijfeld zal dit helpen de FS-concentratie in de buitenlucht in de nabije toekomst verder terug te dringen. Overigens is vastgesteld dat er geen grenswaarde $\text{PM}_{10} > 0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bestaat waaronder geen gezondheidsschadelijke effecten optreden. Een jaargemiddelde PM_{10} -concentratie juist onder de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (norm gehaald) heeft nagenoeg dezelfde schadelijkheid als een jaargemiddelde PM_{10} -concentratie juist boven de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (norm niet gehaald). Daarnaast kan men zich afvragen in welke mate de doorsnee mens in zijn dagelijkse leef- en werkomgeving in feite wordt blootgesteld aan FS, wat de schadelijke effecten daarvan zouden kunnen zijn, en wat daaraan verder nog zou kunnen worden gedaan.

LUCHTKWALITEIT EN LUCHTVERONTREINIGING BINNENSHUIS

De meeste mensen verblijven tenminste 80 % van hun tijd binnenshuis, zij het thuis, op hun werkplek, of in de auto. De kwaliteit van de binnenlucht is daarom op zich belangrijker voor de gezondheid en het welbevinden van mensen dan die van de buitenlucht [6]. De binnenluchtkwaliteit hangt o.m. af van de luchtverontreiniging, niet in de laatste plaats van de FS-concentratie binnenshuis [7]. Een voor de mens optimale binnenluchtkwaliteit wordt alleen bereikt wanneer de gewenste niveaus voor de temperatuur (T), relatieve luchtvochtigheid (RH) en CO_2 -concentratie aanwezig zijn en wanneer de luchtverontreiniging is geminimaliseerd. Een optimaal binnenklimaat waarborgt de behaaglijk-



Fracionele depositie-efficiëntie van geïnhaleerde deeltjes als functie van hun diameter in de long-alveoli volgens het standaard model van de International Commission on Radiological Protection (ICRP) [11].

- FIGUUR 1 -

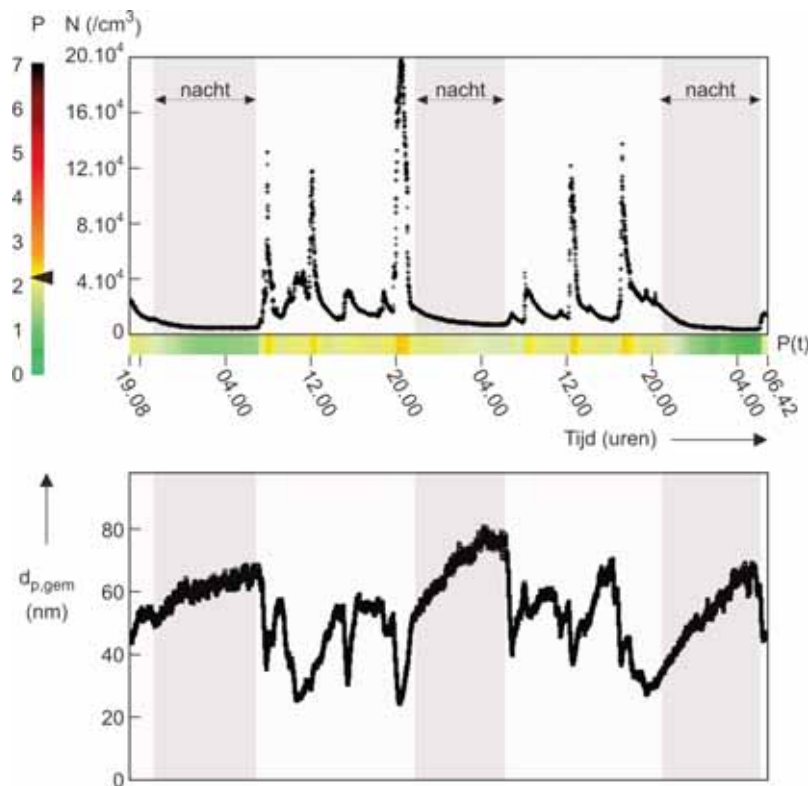
heid, gezondheid en alertheid van mensen. Recent onderzoek op de werkplek heeft aangetoond dat dit gunstig is voor de productiviteit van de werknemers, zowel door een lager ziekteverzuim alsook doordat mensen zich beter kunnen concentreren op hun taken [8]. Daarnaast blijken de leerprestaties van kinderen af te hangen van de luchtkwaliteit in het klaslokaal [9]. Tenslotte is aangetoond dat er een verband bestaat tussen de mate van fysieke onafhankelijkheid van mensen met longaandoeningen en de kwaliteit van de lucht in hun directe leefomgeving [10]. Een optimaal binnenklimaat met schone lucht is daarom zeker ook vanuit economische overwegingen van belang. Met dit laatste gegeven is het vervolgens bevreemdend dat er eigenlijk maar weinig aandacht van beleidsmakers is voor de luchtverontreiniging binnenshuis. Deze wordt maar voor een deel veroorzaakt door bronnen in de buitenomgeving (autoverkeer, industrie, landbouw etc.). Andere bronnen zijn in de binnenomgeving zelf te vinden door de daar aanwezige mensen, hun activiteiten, en door afgifte van verontreinigingen door o.m. de aanwezige bouwmaterialen, meubels en vloerbedekkingen. Het gaat daarbij om de emissie van zowel deeltjes als gassen. De deeltjesvormige luchtverontreiniging in de vorm van fijnstof en ultrafijnstof is doorgaans de meest schadelijke component.

FIJNSTOF EN ULTRA FIJNSTOF

De relatieve schadelijkheid van de deeltjesvormige luchtverontreiniging heeft enerzijds te maken met de che-

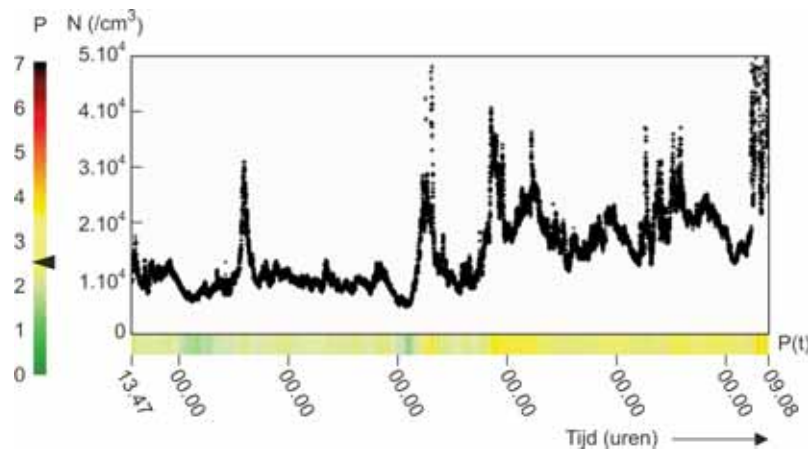
mische samenstelling van de deeltjes, anderzijds met hun afmetingen en depositiegedrag in de longen wanneer ze worden ingeademd [1]. Het gaat daarbij vooral om de depositie in de diepgelegen alveoli (de microscopische longblaasjes) waar de CO_2 en O_2 uitwisseling met het bloed plaatsvindt [11]. Door hun functie is het zelfreinigende vermogen van de alveoli veel kleiner dan die van de andere delen van de longen. De verblijftijd van verontreinigingen in alveoli kan weken zo niet maanden duren waardoor er plaatselijk ontstekingsreacties kunnen ontstaan. Draadvormige asbest deeltjes in de alveoli veroorzaken uiteindelijk longkanker omdat die helemaal niet meer verwijderbaar zijn. Van deeltjes kleiner dan $0,1 \mu\text{m}$ (nanodeeltjes) is bovendien bekend dat ze via de alveoli in de bloedbaan terecht kunnen komen en zich op die manier door het hele lichaam verspreiden [12]. Bovendien kunnen ze allerlei organen en daarin ook individuele cellen en cellkernen binnendringen. Wat de effecten van deze nanodeeltjes uiteindelijk zijn is nog niet duidelijk vastgesteld maar slechts weinigen geloven dat dit onschadelijk is. De mogelijke effecten van vooral geïnhaleerde nanodeeltjes op de gezondheid staan momenteel volop in de belangstelling van toxicologen en epidemiologen, ook vanwege de opkomende nanotechnologie en de mogelijke gezondheidsrisico's die daarmee kunnen samenhangen.

Figuur 1 geeft de fracionele deeltjesdepositie als functie van de deeltjesdiameter in de alveoli [11]. We zien dat alleen deeltjes kleiner dan $10 \mu\text{m}$ (FS) zich in de alveoli kunnen afzetten en



Gemeten N en $d_{p, gem}$ in een slecht geventileerde woonkamer tussen vrijdagavond 20-06-2008 en maandagochtend 23-06-2008.

- FIGUUR 2 -



Gemeten N in een natuurlijk geventileerde kamer tussen vrijdag 28-03-2008 en donderdag 03-04-2008.

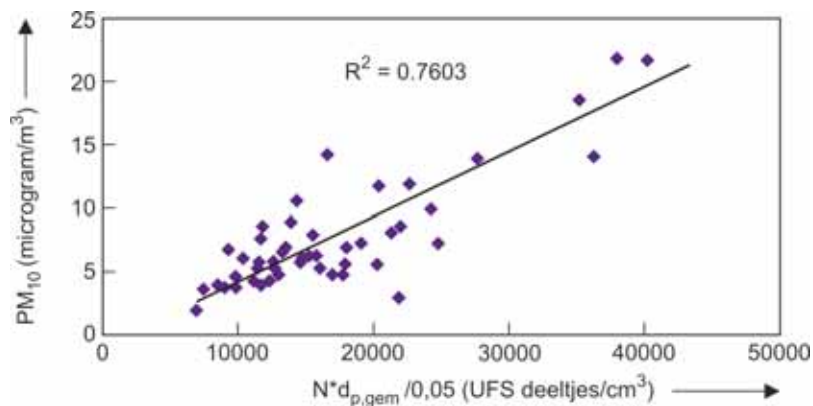
- FIGUUR 3 -

dit is indertijd de reden geweest de PM_{10} luchtkwaliteitsnorm op te hangen aan de (massa)concentratie van deeltjes kleiner dan $10 \mu m$. Deeltjes kleiner dan $0,3 \mu m$ (300 nm) dragen hier vanwege hun kleine massa meestal nauwelijks aan bij en zijn dus "onzichtbaar" voor een PM_{10} -meting. Toch geeft figuur 1 duidelijk aan dat in de alveoli de depositie-efficiëntie van $0,01 - 0,3 \mu m$ deeltjes (ultra fijnstof, UFS) groter is dan die in het $0,3 - 10 \mu m$ grootte-interval. Daar komt nog bij dat terwijl de massaconcentra-

tie effectief wordt bepaald door de $0,3 - 10 \mu m$ FS-deeltjes, de deeltjes aantalconcentratie in onze "normale" omgevingslucht voornamelijk wordt bepaald door de $0,01 - 0,3 \mu m$ UFS-deeltjes. Hieronder vallen ook de nanodeeltjes. Naast FS worden grote aantallen UFS-deeltjes geproduceerd door het autoverkeer, het roken van tabak, verbrandings- en verhitingsprocessen, en bv. het koken en bakken van voedsel. Omdat dergelijke processen ook schadelijke gassen (NO_x , CO ,

SO_2 , allerlei organische koolwaterstoffen) produceren is de aanwezigheid van een hoge UFS-concentratie indicatief voor de aanwezigheid van een hoge concentratie gasvormige luchtverontreiniging. Dit pleit ervoor bij het beoordelen van de ernst van de luchtverontreiniging niet alleen naar de PM_{10} -waarde te kijken maar ook naar de UFS-concentratie. De laatste stelling wordt ondersteund door het recente inzicht dat UFS-deeltjes, vanwege hun kleine afmeting, andere toxicologische eigenschappen hebben dan de grotere FS-deeltjes [12]. De deeltjesvormige luchtverontreiniging binnenshuis en buitenshuis is altijd aanwezig als een mengsel van FS en UFS, waarbij de verhouding tussen die twee kan variëren als functie van tijd en plaats. Omdat ze deels dezelfde bronnen hebben duidt een verhoogde UFS-concentratie vaak wel op een parallelle verhoging van zowel de FS-concentratie als de gasvormige luchtverontreiniging.

Dat de PM_{10} en $PM_{2,5}$ -massaconcentraties van FS zijn gecorreleerd aan gezondheidsschadelijke effecten is inmiddels algemeen aanvaard [1]. Minder helder is het hoe dit zit wat betreft UFS. Ook is op voorhand niet duidelijk welke UFS-concentratie maatstaf het beste kan worden gehanteerd wat betreft het blootstellingsrisico aan UFS. Zijn de schadelijke effecten van UFS gecorreleerd met de UFS-aantalconcentratie N , de UFS-oppervlakteconcentratie S of met de UFS-massaconcentratie $PM_{0,3}$ (even vooropgesteld dat de chemische samenstelling van het UFS een constant gegeven is)? Bij een constante UFS-deeltjesgrootteverdeling maakt dit allemaal niet uit want dan zijn alle genoemde concentraties toch evenredig aan elkaar. In de praktijk blijkt de UFS-deeltjesgrootteverdeling behoorlijk te kunnen variëren in de tijd. Daarom wordt veelal aanbevolen de verschillende UFS-concentraties N , S , en $PM_{0,3}$ tegelijkertijd te bepalen alsook de volledige UFS-deeltjesgrootteverdeling, zodat zoveel mogelijk gegevens worden verzameld. Het nadeel van deze werkwijze is dat hiervoor complexe en dure meetapparatuur noodzakelijk is die niet overal inzetbaar is. Uit pragmatische overwegingen wordt vaak volstaan met alleen een meting van N . Deze bevat echter geen infor-



Correlatie tussen de gemeten PM₁₀ en de gemeten UFS-concentratie in een natuurlijk geventileerde kamer.

- FIGUUR 4 -

matie over de grootte van de UFS-deeltjes. Recentelijk zijn aanwijzingen gevonden dat het bij de schadelijkheid van ingeademd UFS in het bijzonder gaat om de UFS-oppervlakteconcentratie S_{dep} die in de alveoli wordt afgezet [13]. Deze S_{dep} is via de UFS-depositiecurve in figuur 1 gerelateerd aan de UFS-oppervlakteconcentratie S in de lucht. Met een berekening kan vervolgens worden aangetoond dat de relatieve schadelijkheid van de UFS-concentratie ongeveer lineair relateert aan N en $d_{p,gem}$ volgens

$$S_{dep} \propto Nd_{p,gem} \quad (1)$$

waarin het product $Nd_{p,gem}$ gelijk is aan de UFS-lengteconcentratie L (in m/m^3). Uiteraard zullen hier van geval tot geval nuanceringen op kunnen worden aangebracht, maar vanuit een pragmatische invalshoek lijkt het verdedigbaar dat de relatieve schadelijkheid van UFS kan correleren met de UFS-lengteconcentratie L .

BEHEERSING VAN DE FIJNSTOF EN ULTRA FIJNSTOF-CONCENTRATIES

Het is bekend dat ventilatie onmisbaar is voor het verkrijgen van een optimale binnenluchtkwaliteit waaronder begrepen een minimale binnenluchtverontreiniging [6]. Ventilatie verhindert het oplopen van de CO_2 -concentratie en verdrijft de luchtverontreiniging en het vocht afkomstig van de aanwezige mensen en hun activiteiten. Zowel natuurlijke ventilatie als mechanische ventilatie kan worden toegepast. Maar ventilatie haalt ook verontreinigingen van buiten naar binnen, wat vooral in stedelijke gebieden met een hoge luchtverontreiniging ongewenst is.

Daarnaast brengt ventilatie een over-middelmatig flink energiegebruik met zich mee wanneer de gewenste binnentemperatuur nogal verschilt van de buitentemperatuur. Met het stijgen van de energieprijzen is de neiging ontstaan ventilatieniveaus te minimaliseren. Helaas gaat dit altijd ten koste van de binnenluchtkwaliteit. Een pragmatische oplossing hiervoor is vraaggestuurde ventilatie. Die bestaat al in vergaderruimtes en sommige openbare gebouwen waar CO_2 -sensoren en/of bewegingssensoren de aanwezigheid van mensen registreren samen met hun effect op de luchtkwaliteit via de gemeten CO_2 -concentratie. Vraaggestuurde ventilatie op basis van de gemeten ultra fijnstof-concentratie binnenshuis en buitenshuis wordt nog nergens toegepast, omdat geschikte apparatuur hiervoor niet voorhanden is. FS-meetapparatuur bestaat weliswaar al lang maar werkt op basis van optische deeltjesdetectie wat tot op heden zowel te duur alsook te onderhoudsgevoelig is voor praktische toepassing in de ventilatie-industrie. In de volgende sectie wordt nader ingegaan op de alternatieve UFS-meettechnologie, die recentelijk door de Aerasense groep binnen Philips Research is ontwikkeld en die juist voor het meten van de ultrafijne deeltjesvormige luchtverontreiniging uitstekend kan worden ingezet. Vaak blijkt de gemeten hoogte van de UFS-concentratie een goede indicator te zijn voor de relatieve hoogte van de FS-concentratie waardoor een UFS-monitor indirect ook de ernst van de FS-luchtverontreiniging zichtbaar maakt. In hoeverre deze laatste correlatie algemeen geldig is dient nog nader te worden onderzocht maar mag

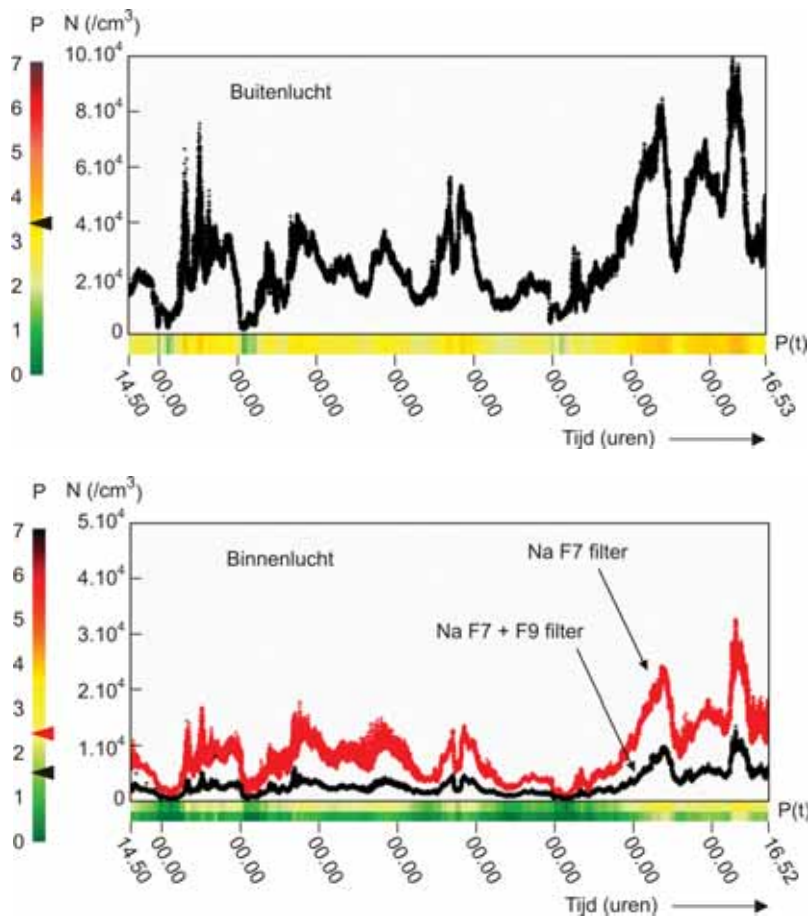
wel op voorhand worden verwacht, omdat FS-deeltjes vaak dezelfde bronnen hebben als UFS-deeltjes.

Idealiter zou vraaggestuurde (mechanische) ventilatie voor het optimaliseren van de binnenluchtkwaliteit moeten gebeuren op basis van informatie verkregen m.b.v. gecombineerde T, RH, CO_2 en UFS-sensoren/monitoren. Deze dienen de lokale eigenschappen van de binnenlucht te registreren om ze zo nodig te kunnen laten aanpassen via terugkoppeling aan de besturing van een luchtbehandelingssysteem. De systeeminstellingen betreffende het lokale luchtdebiet, de mate van luchtrecirculatie, filtratie, verwarming, koeling, en evt. warmteterugwinning kunnen dan automatisch en naar behoefte lokaal worden aangepast. Dit zou op een zodanige manier moeten gebeuren dat een optimale balans wordt gevonden tussen enerzijds een voldoende mate van de gewenste luchtbehandeling en anderzijds het hieraan gekoppelde energiegebruik. Een vooraf vastgesteld energiebudget kan als randvoorwaarde in een dergelijk beslisproces worden ingebracht. Luchtfiltratie zal een wezenlijk onderdeel van het luchtbehandelingsproces moeten zijn om luchtverontreinigingen te kunnen verwijderen wanneer dit niet door ventilatie mogelijk is. Actieve terugkoppeling van de signalen van één of meer luchtsensoren aan een luchtbehandelingssysteem geeft daarmee een nuttige "slimheid" aan dit systeem.

Indien alleen natuurlijke ventilatie kan worden toegepast kan het nog steeds nuttig zijn geïnformeerd te zijn over de mate van binnenluchtverontreiniging d.m.v. een UFS-monitor. Hiermee kan worden gewaarschuwd wanneer het gewenst is bij een hoge binnenluchtverontreiniging extra te ventileren. Uiteraard kan dan de luchtverontreiniging binnenshuis nooit lager worden dan buitenshuis.

DE AERASENSE UFS-MONITOR

Recentelijk heeft de Aerasense groep [14] binnen Philips Research te Eindhoven een UFS-monitor ontwikkeld die, veel beter dan een FS-monitor, geschikt is voor integratie in een vraaggestuurd ventilatiesysteem. Het ventilatiesysteem kan daarmee worden aangestuurd, mede op basis van de



Gemeten N in de inkomende buitenlucht (boven) en meteen na filtratie door een F7 filter en een gecombineerd F7 + F9 filter (beneden) tussen donderdag 31-01-2008 en vrijdag 08-02-2008.

- FIGUUR 5 -

gemeten UFS-concentratie binnenshuis en evt. buitenshuis. Het meetprincipe van de Aerasense UFS-monitor is nader uitgelegd in referentie [15]. Kort samengevat berust deze op het eerst elektrisch opladen van alle deeltjes in de lucht waarna vervolgens de totale lading op alle deeltjes wordt gemeten als een stroom I met een gevoelige stroommeter. Door de stroommeting uit te voeren onder verschillende omstandigheden worden twee meetsignalen I_1 en I_2 gegenereerd waaruit zowel N, de totale deeltjes aantalconcentratie, als $d_{p, gem}$, de gemiddelde deeltjesdiameter, apart kunnen worden afgeleid. Met kennis van N en $d_{p, gem}$ wordt de UFS-luchtverontreiniging goed gekarakteriseerd. Anderzijds kan, door voor een eenvoudiger uitvoering van de monitor te kiezen, ook worden volstaan met een meting van alleen I_1 waaruit meteen het product $Nd_{p, gem}$ blijkt te kunnen worden afgeleid. Hiermee wordt de UFS-luchtverontreiniging op zich minder goed gekarakteriseerd maar $Nd_{p, gem}$ is juist wel weer de relevante

parameter wanneer het gaat om het relatieve blootstellingsrisico aan UFS (zie vergelijking (1)). Het gaat bij deze metingen vooral om UFS in het bereik van 0,01 – 0,3 μm deeltjesgrootte. In feite worden ook deeltjes groter dan 0,3 μm gemeten maar in de praktijk blijkt hun aantalconcentratie verwaarloosbaar te zijn t.o.v. de aantalconcentratie van deeltjes kleiner dan 0,3 μm . Let wel dat dit precies andersom ligt wanneer het gaat om de deeltjes massaconcentratie.

De meetgevoeligheid van de Aerasense monitor ligt op ± 750 deeltjes/ cm^3 . Ter vergelijking:- hoog in de Zwitserse Alpen ligt de UFS-concentratie op ongeveer 500 deeltjes/ cm^3 terwijl in Nederland de UFS concentratie in een stadsomgeving vaker boven de 10.000 deeltjes/ cm^3 ligt dan daaronder (als criterium voor redelijk schone lucht). De meetgevoeligheid van de UFS-monitor is dus voldoende om schone lucht gemakkelijk te kunnen onderscheiden van verontreinigde lucht. Kalibratie en verificatie van de UFS-

monitor is mogelijk met een Scanning Mobility Particle Sizing (SMPS) systeem (van bv. Grimm GmbH, Ainring, Duitsland) dat in staat is de verdeling van een deeltjesconcentratie te bepalen als functie van de deeltjesdiameter binnen het domein van 0,05 - 0,35 μm deeltjesgrootte. Uit deze verdeling kunnen de waarden voor N en $d_{p, gem}$ apart worden bepaald, zodat de tegelijkertijd gemeten signalen I_1 en I_2 meteen kunnen worden gecalibreerd in termen van N en $d_{p, gem}$, respectievelijk.

METINGEN MET DE AERASENSE UFS MONITOR

Enkele illustratieve metingen van binnenlucht met de Aerasense monitor in aanwezigheid van natuurlijke ventilatie of mechanische ventilatie staan weergegeven in de figuren 2-5. In deze figuren is N en soms ook $d_{p, gem}$ uitgezet als functie van de tijd. De aan de linkerkant van de verticale as geplaatste kleurenbalk geeft de luchtverontreinigingsindex P weer, zowel via een getal dat varieert tussen 0 en 7 alsook via een kleur variërend tussen diep groen ($P \rightarrow 0$) en diep rood ($P \rightarrow 7$). De kleur is rechtstreeks gekoppeld aan de numerieke waarde van P. De index P geeft de relatieve ernst van de luchtverontreiniging weer en is bepaald uit de gemeten waarden voor N en $d_{p, gem}$ volgens:

$$P = 2 \log \frac{(Nd_{p, gem})}{(Nd_{p, gem})_{ref}} \quad \text{voor } (Nd_{p, gem}) \geq (Nd_{p, gem})_{ref} \quad (2)$$

$$P = 0 \quad \text{voor } (Nd_{p, gem}) < (Nd_{p, gem})_{ref}$$

waarin N is uitgedrukt in deeltjes/ cm^3 , $d_{p, gem}$ in " μm ", en waarin $(Nd_{p, gem})_{ref}$ een grenswaarde lengteconcentratie voostelt waaronder de UFS-luchtverontreiniging nagenoeg onschadelijk is voor de gezondheid. Voor omgevingslucht is enigszins arbitrair gekozen dat $(Nd_{p, gem})_{ref} = 50$ (deeltjes/ cm^3), μm , zoals bijvoorbeeld bestaat in een nagenoeg geheel "schone" lucht waarin $N = 1.000$ deeltjes/ cm^3 en $d_{p, gem} = 0,05$ μm . Het product $Nd_{p, gem}$ is eerder in vergelijking (1) genoemd als een bepalende factor voor de relatieve schadelijkheid van de UFS-concentratie. De numerieke waarde van P op het moment van meting wordt aangegeven met een zwart pijltje langs de P-as. Het verloop P(t) in de tijd is weerge-

geven met een tijdsafhankelijke kleur in de horizontale kleurenbalk onder de horizontale tijd-as.

In zeer schone lucht met $N < 1.000$ deeltjes/cm³ bij $d_{p, \text{gem}} = 0,05 \mu\text{m}$ is dus $P = 0$. In redelijk schone lucht is $0 \leq P \leq 2$ (overwegend groene kleur) en is $1.000 \leq N \leq 10.000$ deeltjes/cm³ bij $d_{p, \text{gem}} = 0,05 \mu\text{m}$. In zeer verontreinigde lucht is $4 \leq P \leq 6$ (overwegend rode kleur) en is $100.000 \leq N \leq 1.000.000$ deeltjes/cm³ bij $d_{p, \text{gem}} = 0,05 \mu\text{m}$. De diameter $d_{p, \text{gem}} = 0,05 \mu\text{m}$ blijkt een redelijk gemiddelde waarde te zijn in de ons omringende UFS-luchtverontreiniging waarin de waarden van $d_{p, \text{gem}}$ doorgaans binnen het bereik $0,02 - 0,1 \mu\text{m}$ vallen.

Figuur 2 geeft het verloop van N en $d_{p, \text{gem}}$ in de woonkamer van de auteur in Eindhoven over een aaneengesloten weekendperiode van 2 dagen en 3 nachten. Geforceerde natuurlijke ventilatie door het openen van een raam werd alleen overdag tijdelijk toegepast nadat een flinke UFS-emissie binnenshuis was waargenomen. Op alle andere tijdstippen was alleen sprake van een geringe mate van passieve natuurlijke ventilatie. Er was nagenoeg geen langrijdend autoverkeer in de directe nabijheid van het huis. Figuur 2 laat zien dat er alleen overdag sprake is van UFS-emissies binnenshuis. Deze werden veroorzaakt door diverse bezigheden, met name verwarmen, bakken en braden op een gasvuur, stofzuigen, en het gebruik van een stoomstrijkijzer. De $d_{p, \text{gem}}$ van pas gevormde UFS-deeltjes ligt aanvankelijk steeds rond de 20 nm ($0,02 \mu\text{m}$) maar neemt daarna langzaam toe, waarschijnlijk door onderlinge aggregatie van UFS-deeltjes. Geforceerde natuurlijke ventilatie is overigens een prima middel om snel van hoge UFS-concentraties af te komen. Tijdens de nacht is een gestage verlaging van de UFS-aantalconcentratie te zien tegelijkertijd met een langzame verhoging van $d_{p, \text{gem}}$ tot 80 nm ($0,08 \mu\text{m}$). Ook dit zal weer samenhangen met UFS-aggregatie. Wanneer 's ochtends het huis wordt gelucht met "frisse" buitenlucht kan dit binnenshuis zelfs een verhoging van de UFS-concentratie en de P -index tot gevolg hebben, doordat de UFS-concentratie buiten hoger is dan binnen. Het zal desondanks duidelijk zijn dat dit luchten toch de binnen-

luchtkwaliteit kan verbeteren doordat binnenshuis de wellicht opgebouwde concentraties van CO₂ en andere gasvormige verontreinigingen hiermee wel worden verwijderd. Uit de metingen wordt duidelijk dat een hoge UFS-concentratie binnenshuis altijd een goede reden is voor ventilatie. Daarnaast hoeft een zeer lage UFS-concentratie op zich geen reden te zijn om niet in een tenminste geringe mate te ventileren wanneer alleen passieve ventilatie aanwezig is.

Figuur 3 geeft gedurende een week het verloop van N in een natuurlijk-geventileerde kamer op de High Tech Campus, Eindhoven, waarvan een raam steeds half openstond. In de kamer zelf waren geen UFS-bronnen aanwezig. In de eerste dagen van de meting was er, vanwege het weekend, nauwelijks verkeer op de HTC en de meting van N geeft de achtergrond UFS-concentratie in de buitenlucht. Na het weekend wordt de achtergrond UFS-concentratie enigszins hoger en worden ook incidentele pieken in N gemeten. Deze pieken zijn afkomstig van sporadisch langrijdende auto's waarvan de uitlaatgassen via het open raam rechtstreeks de kamer binnenvaaien. In dit geval brengt ventilatie dus tijdelijk hoge concentraties UFS van buiten naar binnen. De luchtverontreiniging binnenshuis is hier vrijwel gelijk aan de luchtverontreiniging buitenshuis en kan dus ook nooit lager worden.

In figuur 4 is de gemeten PM₁₀ massa-concentratie uitgezet tegen de gemeten UFS aantalconcentratie

$$\frac{Nd_{p, \text{gem}}}{0,05}$$

(hier genormeerd op $d_{p, \text{gem}} = 0,05 \mu\text{m}$). Metingen zijn gedaan in dezelfde geventileerde kamer als waarin de resultaten van figuur 3 zijn verkregen. Ieder meetpunt is verkregen na middeling over een 12 uur durende meetperiode. Een vergelijkbare grafiek ontstaat wanneer de gemeten PM₁₀ massa-concentratie wordt uitgezet tegen de gemeten UFS-aantalconcentratie N . Let wel dat het hier om uitgemiddelde metingen van de deeltjesverontreiniging in de buitenlucht gaat die zijn verkregen buiten de directe nabijheid van verontreinigingsbronnen: ten tijde van de metingen was er nau-

welijks autoverkeer in de buurt. Uit figuur 4 wordt duidelijk dat er dan, met de nodige spreiding, inderdaad een correlatie bestaat tussen de PM₁₀ massa-concentratie en de UFS-concentratie ondanks dat de beide concentraties betrekking hebben op verschillende soorten deeltjes. Dit resultaat kan onder de juiste omstandigheden bruikbaar zijn om in de buitenlucht de PM₁₀ voor het FS af te schatten uit de UFS-aantalconcentratie gemeten met de Aerasense monitor. Het precieze verband tussen de gemiddelde PM₁₀-concentratie en de gemiddelde UFS-concentratie zou overigens nog wel eens van plaats tot plaats kunnen verschillen. Aanvullende metingen zijn noodzakelijk om dit verder uit te zoeken. Wel is vastgesteld dat wanneer specifieke deeltjesbronnen dichtbij aanwezig zijn, er vrijwel geen correlatie meer bestaat tussen de UFS-aantalconcentratie en de PM10-massa-concentratie.

Figuur 5 geeft gedurende meer dan een week de gemeten UFS-aantalconcentraties N in een grote mechanische luchtbehandelingskast op de 8^{ste} verdieping van een researchgebouw op de High Tech Campus, Eindhoven. De UFS-concentratie is gemeten in de aangezogen buitenlucht voor filtratie, in de lucht na filtratie door een F7 deeltjesfilter, en in de lucht na filtratie door zowel een F7 als een F9 deeltjesfilter. De F7+F9 gefilterde lucht wordt gebruikt als ventilatielucht voor het gebouw. De deeltjesfilters zijn bedoeld om de FS en UFS-concentraties in de ventilatielucht te verlagen en ook om de luchtkanalen in het gebouw zo schoon mogelijk te houden. Figuur 5 laat zien dat binnen een periode van een week er grote verschillen in de UFS-concentratie buitenshuis kunnen optreden. In de eerste vier dagen was er sprake van regenachtig winderig weer, met daardoor soms zeer lage UFS-concentraties. Tijdens de laatste drie dagen werd het warm en zonnig met maar weinig wind. Dit had tot gevolg dat er buiten een aanzienlijke stijging van de UFS-concentratie optrad, uiteindelijk leidend tot smogvorming. Overigens toont figuur 5 dat het F7 filter en het F9 filter beiden een UFS-filtratie-effectiviteit hebben van 60 – 80 % zodat in totaal zo'n 90 % van het UFS uit de ventilatielucht wordt gehaald. Dit komt ook tot

uiting in het groene verloop van de berekende index P(t) bij de dubbel gefilterde ventilatielucht terwijl de index P(t) van de niet-gefilterde lucht vaak geel tot soms geel-rood is gekleurd.


Het mag hierbij worden vermeld dat het ziekteverzuim bij Philips Research Eindhoven al jaren niet boven de 2 % uitkomt, wat deels met de goede kwaliteit van de ventilatielucht kan samenhangen. De binnenluchtverontreiniging is hier altijd beduidend lager dan de buitenluchtverontreiniging. Figuur 5 laat zien dat het filtratievermogen van de diverse deeltjesfilters met een UFS-sensor prima kunnen worden gecontroleerd op hun effectiviteit voor UFS. Daarbij dient tevens te worden bedacht dat ieder mechanisch filter een minimum filtratie-effectiviteit heeft voor deeltjes met een diameter in het 0,1-0,3 µm grootte-interval [16] waar ook de grens ligt tussen UFS-deeltjes aan de ene kant en FS-deeltjes aan de andere kant (zie figuur 1). Wanneer een filter dus effectief is voor UFS kan worden aangenomen dat de effectiviteit voor FS ook in orde zal zijn. Wanneer een filter slechts matig werkt voor UFS is het overigens nog wel mogelijk dat de effectiviteit van dit filter voor veel grotere deeltjes zoals pollen (> 10 µm diameter) nog steeds goed is. Als vuistregel kan worden gesteld dat een adequaat ventilatiefilter minstens 50 – 70 % van het UFS uit de lucht zou moeten kunnen verwijderen. Of dit zo is kan met een UFS-meting meteen worden vastgesteld, niet alleen bij nieuwe filters maar ook bij oude al deels vervuilde filters

SAMENVATTING EN CONCLUSIES

Voor een goede gezondheid van de mens en zijn behaaglijkheid binnenshuis is het van belang dat hij zich bevindt in een omgeving met een optimale luchtkwaliteit. Daarvoor is o.m. vereist dat de binnenluchtverontreiniging minimaal is. FS en UFS zijn belangrijke componenten van de binnenluchtverontreiniging en hebben hun vaak gemeenschappelijke bronnen zowel binnenshuis als buitenshuis. Vooral mensen met luchtwegaandoeningen, longziektes, en/of een verminderde weerstand tegen infecties kun-

nen erg gevoelig zijn voor luchtverontreiniging. Mits schone buitenlucht voorhanden is kan FS en UFS worden verwijderd uit de binnenlucht door natuurlijke ventilatie of mechanische ventilatie. In aanwezigheid van verontreinigde buitenlucht zal alleen een mechanisch ventilatiesysteem voorzien van een of meer deeltjesfilters in staat zijn de binnenlucht schoner te maken dan de buitenlucht. Omdat ventilatie dikwijls de noodzaak van verwarming/koeling en bevochtiging/ontvochtiging van de ventilatielucht met zich meebrengt is het van belang ook het hiervoor benodigde energiegebruik te controleren en liefst te minimaliseren. Dit kan door de ventilatie vraagegestuurd te laten plaatsvinden op basis van de meetgegevens van diverse luchtsensoren. Relevante meetbare binnenklimaatparameters hiervoor zijn de temperatuur, de CO₂-concentratie, de RH, de VOC (vluchtige organische koolwaterstoffen) concentratie waaronder ook bv. formaldehyde valt, de UFS-concentratie, en de FS-concentratie. Sensoren voor de temperatuur, CO₂, en RH zijn commercieel voorhanden en kunnen zonder meer worden toegepast. Daarentegen blijken bestaande VOC-sensoren nog steeds te ongevoelig te zijn voor betrouwbaar gebruik binnenshuis. FS-monitoren bestaan allang, maar blijken niet praktisch inzetbaar te zijn voor de regeling van ventilatiesystemen. De in dit artikel besproken Aerasense UFS-monitor is echter een prima alternatief omdat hiermee een UFS-gerelateerd meetsignaal wordt verkregen dat, wat tenminste de ventilatielucht van buiten betreft, redelijk parallel kan lopen met de relatieve hoogte van de FS-concentratie. Daarnaast is het UFS-meetsignaal ook meteen bruikbaar om inzicht te krijgen in de relatieve schadelijkheid van het aanwezige UFS zelf. Veel UFS-bronnen bevinden zich immers binnenshuis. De UFS-monitor kan daarmee complementair aan de andere luchtsensoren worden gebruikt om de ventilatie tevens te sturen op de gemeenten binnenluchtverontreiniging en eventueel op het verschil tussen de luchtverontreiniging binnenshuis en buitenshuis. Gebruik van UFS-monitoren binnenshuis zal ongetwijfeld bijdragen aan een verbeterd bewustzijn voor luchtverontreiniging en is ook nuttig om de kwaliteit van eventueel aanwezige luchtfilters of luchtreinigers

te controleren. Het uiteindelijke doel blijft steeds het krijgen en houden van schone lucht binnenshuis.

Een verbeterde beheersing van de FS- en UFS-concentratie binnenshuis door een UFS monitor-gestuurde luchtbehandelings- en ventilatiestrategie, waarin energiegebruik en een eventueel energiebudget als randvoorwaarden worden meegenomen, kan helpen de tegenwoordige FS-problematiek van de buitenlucht in een nieuw perspectief te plaatsen waardoor versoepeling van nu bestaande wet- en regelgeving kan worden overwogen. Het gaat uiteindelijk om de totale blootstelling van de mens aan FS en UFS-luchtverontreiniging. Wanneer die binnenshuis aantoonbaar flink lager kan worden gemaakt dan buitenshuis vervalt de noodzaak voor het weigeren van bouwvergunningen op locaties met een (te) hoge FS-concentratie in de buitenlucht. Het zal duidelijk zijn dat hier belangrijke economische voordelen aan zijn verbonden. Ook bij renovatieprojecten kan het zeker de moeite waard zijn het luchtbehandelingssysteem zodanig aan te passen dat die in staat is een vraagegestuurde beheersing van de luchtverontreiniging binnenshuis te realiseren. 

REFERENTIES

1. MNP, 2005. *Fijnstof nader bekeken – de stand van zaken in het dossier fijnstof*. Rapport 500037008. Milieu en Natuur Planbureau, Bilthoven, 2005.
2. Brunekreef, B. en Holgate, S.T. 2002. *Air pollution and health*. The Lancet, Vol 360, pp. 1233 – 1242, 2002.
3. WHO, 2000. *Quantification of the health effects of exposure to air pollution*. Bilthoven, 2000. Zie ook de overige artikelen op www.euro.who.int/air/activities/20050223_5.
4. EU, 1999. *Richtlijnen 1999/30/EG*. Publicatieblad van de Europese Gemeenschappen No. L 163/41.
5. MNP, 2005. *Milieubalans 2005*. Milieu en Natuurplanbureau. Bilthoven, 2005.
6. Seppänen, O. 2003. *Healthy Buildings: - from science to practice*. Pro-

- ceedings of the Healthy Buildings conference; Singapore, 2003.
7. Jantunen, M.J. 2007. *Effect of outdoor air generated pollutants on indoor air quality and health*. Proceedings Clima 2007, Wellbeing Indoors. Helsinki, 2007.
 8. Wargocki, P. et al 2006. *Indoor climate and productivity in offices:- how to integrate productivity in life cycle analysis of building services*. REHVA Guidebook No. 6. Federation of European Heating and Air Conditioning Associations. Brussel, 2006.
 9. Fisk, W. en Seppänen, O. 2007. *Providing better indoor environmental quality brings economic benefits*. Proceedings Clima 2007, Wellbeing Indoors. Helsinki, 2007.
 10. Snijders, M.C.L. 2001. *Indoor air quality and physical independence*. Proefschrift, Technische Universiteit Eindhoven, 2001.
 11. Hinds, W.C. 1999. *Aerosol Technology:- Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*; 2e druk, John Wiley & Sons, Inc. 1999.
 12. Maynard, A.D. en Pui, D.Y.H. (Eds.) 2007. *Nanoparticles and Occupational Health*. Reprint uit Journal of Nanoparticle Research Vol. 9, No. 1, 2007, Springer, Dordrecht.
 13. Wilson, W.E. et al 2007. *Use of the electrical aerosol detector as an indicator of the surface area of fine particles deposited in the lung*. Journal of the Air and Waste Management Assoc. Vol. 57, pp. 211 – 220.
 14. Zie de website www.aerasense.com
 15. Marra, J. 2008. *Ultrafine particle sensors for indoor air pollution monitoring and control*. Paper 285. Proceedings 11th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Copenhagen, 2008.
 16. Brown, R.C. 1993. *Air Filtration*, Pergamon Press.







www.remon.com

Remon Aardwarmte

Voorsprong door techniek

Als boorbedrijf met meer dan 30 jaar ervaring kennen wij het boorvak als geen ander. Dit brengt ons ertoe om slimme innovaties te doen waarmee u heel veel geld kunt besparen.

Zo boren wij standaard tussen de 150 en 350 meter diep om met één boring en één enkele lus uw huis te verwarmen. 12 kW uit één lus? Weinig ruimte? Vooraf een geologische analyse? Het kan bij Remon, dankzij de voorsprong door techniek.

Bel vandaag nog. We staan u graag te woord!

Marum 0594 64 80 80	Dalfsen 0529 43 50 40	Ospel 077 466 00 45
------------------------	--------------------------	------------------------



Compleet in luchtbehandeling

HR-WTW

Ecovent III en Ecovent SU

800-15000 m³/h



Thomas Edisonweg 37, 5151 DH Drunen
 tel. 0031-(0)416 - 38 72 50, fax 0031-(0)416 - 38 72 51
www.bo-air.nl, e-mail: info@bo-air.nl