

Leeghwaterstraat 44
2628 CA Delft
Postbus 6012
2600 JA Delft

www.tno.nl

T +31 88 866 22 00

TNO-rapport

TNO 2019 R10969

Meta-onderzoek voor coalitie gezonde binnenlucht

Datum	8 juli 2019
Auteur(s)	ir. P. Jacobs ir. W.A. Borsboom
Aantal pagina's	56 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	--
Opdrachtgever	Longfonds Mw C. Rouw
Projectnaam	
Projectnummer	060.39910

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2019 TNO

Samenvatting

Longfonds, Philips, Royal Haskoning DHV en ABN Amro, willen de komende jaren samen werken aan meer bewustzijn voor het belang van een goed binnenmilieu. Ze willen er aan bijdragen dat steeds meer Nederlanders bekend zijn met welke maatregelen zijzelf kunnen nemen en of hoe zij hun gedrag kunnen aanpassen om thuis, op school of het werk de binnenlucht gezonder te maken. In het kader hiervan is TNO gevraagd om een literatuuronderzoek uit te voeren naar de kwaliteit van de binnenlucht in Nederlandse woningen en welke korte- en langetermijneffecten deze heeft op onze gezondheid (slaap, ziekte, productiviteit) en mogelijke maatregelen ter verbetering. Voor dit literatuuronderzoek is van het leading peer reviewed Engelstalige tijdschrift Indoor Air van de afgelopen twee jaar vrijwel 100% van de relevante artikelen in beschouwing genomen. Van de digitaal beschikbare peer reviewed literatuur (vanaf 2000) hebben zijn de belangrijkste beschouwd. Daarnaast bestaan er ook talloze conferentiebijdragen en rapporten. Ook is er nog veel niet Engelse literatuur, met name Fins, Chinees en Deens. Deze zijn niet beschouwd.

Slaap en productiviteit

In bijna de helft van de Nederlandse woningen is in de hoofdslaapkamer gedurende gemiddeld 21 uur per week de CO₂ concentratie hoger dan 1200 ppm (Dongen en Vos, 2007). Volgens de Gezondheidsraad duidt dit op onvoldoende luchtverversing. Zelfs kunnen CO₂ concentraties 3500 ppm overschrijden zonder dat bewoners interventies plegen, bijvoorbeeld het openen van ramen. Uit exploratief onderzoek blijkt dat onvoldoende ventilatie van slaapkamers tot slaapverstoring (Mishra, 2017) kan leiden en tot 3% productiviteitsverlies op de volgende dag (Strom-Tejse, 2015). In Nederland is in de meeste nieuwbouwwoningen het ventilatiesysteem niet op orde (Boerstra, 2011). Het verbeteren van de ventilatie in met name de slaapkamers vergt in veel woningen installatietechnische aanpassingen die niet eenvoudig door de bewoner zelf zijn uit te voeren.

PM_{2.5} fijnstof

In gebouwen doet de gemiddelde Nederlander 90% van de blootstelling aan fijnstof op, waarvan 80% in woningen, met een piek rondom het koken (Kluizenaar, 2017). Volgens Morawska (2013) is 10 tot 30% van de ziektelast ten gevolge van fijnstof afkomstig van deeltjes die in het binnenmilieu zijn geproduceerd. Logue (2012) geeft aan dat PM_{2.5} het belangrijkste gezondheidsrisico ten gevolge van binnenmilieu factoren is. Binnenbronnen van PM_{2.5} worden geassocieerd met reductie van longfunctie van COPD patiënten (Chi, 2019). Uit de studie van TKI Be Aware (2019) is uit een steekproef in 101 Nederlandse woningen naar voren gekomen dat in minimaal 1 op de 6 woningen in de woonkamer/keuken de PM_{2.5} fijnstofconcentratie jaargemiddeld boven de WHO advieswaarde is. Deze concentratie wordt gemiddeld genomen voor de helft veroorzaakt door fijnstof uit de buitenlucht. De andere helft is afkomstig van binnenbronnen, in de onderzochte woningen voornamelijk door bakken en braden en stoken (kaarsen, openhaarden, kachels), omdat rokers in de studie waren uitgesloten. Door alleen al gebruik te maken van goede kookafzuiging kan de totale blootstelling aan fijnstof, dus inclusief gemiddeld verblijf buiten de woning, met circa 10 - 20% worden verlaagd. De combinatie van kookafzuiging en een zogenaamd F7 filter in de buitenluchtaanzuig van nieuwbouwwoningen met balansventilatie kan de jaargemiddelde blootstelling

op een eenvoudige manier halveren. In woningen met natuurlijke toevoer is dergelijke centrale filtering niet mogelijk en dan dient in elk woonvertrek een luchtreiniger te worden geplaatst.

Koken op gas

Koken op gas veroorzaakt naast ultrafijnstof ook stikstofdioxide (NO₂) emissies en is volgens de WHO (2010) geassocieerd met 20% meer luchtwegklachten bij kinderen. Laboratorium en ook veldmetingen met koken op gas laten sterk verhoogde NO₂ concentraties zien. Aangezien momenteel in Nederland 50% van de verkochte afzuigkappen als recirculatieafzuigkap wordt verkocht, waarvan het koolfilter binnen enkele weken gebruik minder dan 20% NO₂ afvangt, is koken op gas met name in luchtdichte woningen waar te weinig wordt geventileerd een punt van zorg. Uit het oogpunt van gezondheid wordt aanbevolen om in deze woningen elektrisch te gaan koken. En vanuit energetisch oogpunt wordt door MilieuCentraal (2019) aanbevolen inductief te gaan koken.

Vocht en schimmel

Tot 10% van de woningen heeft meer dan circa 0,8 m² schimmel in woonkamer en slaapkamer, afhankelijk van bouwjaar en eigendomssituatie (Dongen en Vos, 2007). In 41% is schimmel in de badkamer aanwezig (Ginkel en Hasselaar, 2005). Echter schimmel in de woonkamer en slaapkamer geven het meeste kans op gezondheidsrisico vanwege de langere verblijfstijd in deze vertrekken en waarschijnlijk omdat de badkamer vaak op onderdruk staat, waardoor er geen verspreiding plaatsvindt (Pekkanen, 2007). Uit het Europese onderzoek IAIAQ (2011) wordt aangegeven dat vocht en schimmel 11% van de binnenmilieu gerelateerde ziektelast veroorzaakt.

VOC en planten

Volgens Dongen en Vos (2007) treedt in 40% van de woningen overschrijdingen op van de Gezondheidsraad advieswaarde voor VOC met name door alcohol en d-limoneen ('luchtverfrisser'). Weekmakers uit PVC vloerbedekking zijn geassocieerd met de ontwikkeling van astma bij kinderen (Shu, 2014). In kantoren heeft 34% van de medewerkers last van droge ogen, mogelijke oorzaak is de nabijheid van een drukke weg (Kluzenaar, 2016). Planten in het binnenmilieu verhogen de algemene tevredenheid en geluk. Echter er is geen hard bewijs dat planten een effect hebben op de prestaties, productiviteit en algemene vermindering van het Sick Building Syndrome (Moya, 2019).

Lagere productiviteit door slechte luchtkwaliteit in kantoren

Europese studie OFFICAIR geeft aan dat 37% van de kantoormedewerkers klachten hebben over de luchtkwaliteit (Bluijssen, 2015). Voor kantoren wordt 1 - 3% prestatieverbetering bereikt per 10 liter/s per persoon toename van de ventilatie. Deze relatie is significant tot 15 liter/s per persoon (Seppanen, 2006). Aangezien de meeste Nederlandse kantoren zeker al vanaf 2000 met 14 liter/s per persoon worden voorzien is in de kantoorvertrekken de mogelijke productiviteitswinst beperkt. Naar verwachting is dit anders voor de vergaderruimten. In de literatuur is weinig informatie te vinden over de luchtkwaliteit in vergaderruimten. Echter uit eigen onderzoek blijkt dat in veel kantoren na oplevering extra vergaderruimtes worden toegevoegd en de ventilatie onvoldoende wordt verhoogd. Uit onderzoek blijkt dat bij een CO₂ niveau van 2500 ppm activiteiten "Initiatief" en "Basic strategy" naar een dysfunctioneel niveau zakken (Satish, 2012). Indien het installatietechnisch lastig is om het ventilatiedebiet te verhogen is het wellicht ook mogelijk om prestaties te verhogen door met een

stand-alone luchtreiniger CO₂ uit de lucht te absorberen. De effectiviteit hiervan dient nog te worden onderzocht. Naast ventilatie speelt temperatuur ook een belangrijke rol in kantoren, 31 % van de kantoormedewerkers vindt de temperatuur oncomfortabel (Bluijssen, 2015). Volgens Wargocki (2017) kan door gecombineerde effecten de productiviteit 5 tot 10% verminderen.

Ziekteverzuim en prestaties in scholen in relatie met ventilatie

Uit onderzoek blijkt dat in 80% van de Nederlandse scholen de ventilatie ondermaats is en 45% van de leerkrachten vindt het 's zomers te warm (Versteeg, 2007). Verhoging van de hoeveelheid ventilatie met 1 l/s per leerling verbetert de leerprestaties, waardoor het slagingspercentage met 3% stijgt (Haverinen, 2011). Lage ventilatie veroorzaakt een stijging van de CO₂ concentratie in de binnenlucht. Een verhoging van 1000 ppm CO₂ ten opzichte van de buitenlucht concentratie is geassocieerd met een ziekteverzuim verhoging van de leerlingen met 0,5 tot 0,9% (Shendell, 2004). Het is niet onderzocht of een dergelijke relatie tussen ventilatiedebiet en afwezigheid ook geldt voor de leerkrachten. Mocht dit zo zijn, dan zou verbetering van de ventilatie een bijdrage kunnen leveren aan het oplossen van het ziekteverzuim in het onderwijs. Dit dient nader te worden onderzocht. Naast ventilatie speelt oververhitting ook een belangrijke rol in scholen. Volgens Wargocki (2017) kan door gecombineerde effecten de leerprestatie met 30% verminderen.

Inhoudsopgave

	Samenvatting	2
1	Inleiding	6
2	Aanpak	7
3	Kwaliteit van de binnenlucht in Nederlandse woningen	8
3.1	PM _{2.5} fijnstof	8
3.2	CO ₂	17
3.3	Relatieve vochtigheid en schimmel	21
3.4	Formaldehyde/VOC/radon/CO/NO ₂	23
3.5	Ontbrekende binnenmilieudata Nederlandse woningen.....	27
4	Korte en lange termijn gezondheidseffecten.....	28
4.1	Ziekte	28
4.2	Slaapkwaliteit en productiviteit	32
4.3	Productiviteit in kantoren en scholen.....	35
4.4	Effect van binnenlucht kwaliteit op ziekteverlof	40
5	Effectieve maatregelen voor particulieren	41
6	Onderzoeksvragen maatregelen particulieren	45
7	Mind map binnenmilieu onderzoek scholen en kantoren	46
8	Literatuurlijst.....	49
9	Ondertekening	56

1 Inleiding

Longfonds, Philips, Royal Haskoning DHV en ABN Amro, willen de komende jaren samen werken aan meer bewustzijn voor het belang van een goed binnenmilieu. Ze willen er aan bijdragen dat steeds meer Nederlanders bekend zijn met welke maatregelen zijzelf kunnen nemen en of hoe zij hun gedrag kunnen aanpassen om thuis, op school of het werk de binnenlucht gezonder te maken. In de periode tot en met juni van dit jaar wil de coalitie een meta-onderzoek laten uitvoeren om de noodzaak van gezonde binnenlucht te onderbouwen en te verkennen welke maatregelen mogelijk zijn. De coalitie wordt hierbij ondersteund door bureau Common Eye.

Op 1 april 2019 is door het Longfonds en Common Eye de beoogde aanpak met TNO besproken en dit heeft conform de email van 3 april 2019 geresulteerd in de volgende kennisvragen:

De hoofdvragen zijn:

1. Wat is de kwaliteit van de binnenlucht in Nederlandse woningen?
2. Welke korte- en langetermijneffecten heeft dit op onze gezondheid (slaap, ziekte, productiviteit)?

Gerelateerde vragen zijn:

3. Wat zijn bekende effectieve maatregelen voor particulieren om de kwaliteit van binnenlucht te verbeteren?
 - Hoe groot is de handelingsbereidheid op deze maatregelen?
 - Wat is de kosten/baten analyse van deze maatregelen?
4. Wat zijn relevante vragen m.b.t. binnenlucht en particulieren waar nog geen (sluitende) antwoorden op geformuleerd zijn?
5. Kun je in een soort praatwolk/mindmap aangeven op welk niveau onderzoek is geweest/momenteel plaatsvindt op het gebied van bijvoorbeeld scholen en kantoren?

Wat betreft de gerelateerde vragen zijn indicaties welkom. Hiervoor hoeft geenszins een alomvattend beeld op getekend te worden, maar volstaat een schets te bieden die de coalitiepartners op weg helpt bij eventueel vervolgonderzoek.

Afbakening

Alhoewel bekend is dat temperatuur ook een groot effect heeft op prestaties en het welbevinden is dit onderzoek toegespitst op binnenluchtkwaliteit en is temperatuur dus beperkt meegenomen in het literatuuronderzoek.

2 Aanpak

De in de inleiding genoemde kennisvragen zijn als volgt beantwoord:

Ad 1. Kwaliteit van de binnenlucht in Nederlandse woningen

In de EU projecten ENVIE(2003-2008) en IAIAQ (2010 - 2011) zijn schattingen gemaakt van de ziektelast in EU-landen door verschillende agentia in het binnenmilieu. De kwaliteit van de binnenlucht in Nederlandse woningen zal aan de hand van deze agentia worden gekarakteriseerd:

1. PM_{2.5} Fijnstof
2. CO₂
3. Relatieve vochtigheid en schimmel
4. Formaldehyde/VOC/radon/CO/NO₂

De beantwoording van de eerste kennisvraag wordt afgesloten met een overzicht van welke data nog (grotendeels) onbekend zijn.

Ad 2. Welke korte en lange termijn effecten heeft dit op onze gezondheid

Het meta-onderzoek betreft een literatuuronderzoek. Er is gestart met een 10 tal reeds in bezit zijnde internationale studies naar het effect van slechte luchtkwaliteit in woningen op de mensen. Middels een literatuuronderzoek met als trefwoorden, Indoor air – sleep quality - health en productivity zijn recent verschenen artikelen opgevraagd. Voor het literatuuronderzoek is van het leading peer reviewed Engelstalige tijdschrift Indoor Air van de afgelopen twee jaar vrijwel 100% van de relevante artikelen in beschouwing genomen. Van de digitaal beschikbare peer reviewed literatuur (vanaf 2000) hebben we de belangrijkste beschouwd. Daarnaast bestaan er ook talloze conferentiebijdragen en rapporten. Ook is er nog veel niet Engelse literatuur, met name Fins, Chinees en Deens. Deze zijn niet in beschouwing genomen.

Ad. 3 Effectieve maatregelen voor particulieren om de binnenlucht te verbeteren

Gebruik makend van de inventarisatie van risico's en oorzaken uit onderdeel 1 en de effecten hiervan uit onderdeel 2 is een overzicht opgesteld van effectieve maatregelen op basis van literatuur en eigen meetdata

Ad. 4. Wat zijn relevante vragen m.b.t. binnenlucht en particulieren waar nog geen (sluitende) antwoorden op geformuleerd zijn?

Hiertoe is een lijst opgesteld van luchtkwaliteitsproblemen in woningen waarvoor nog geen effectieve en betaalbare oplossingen beschikbaar zijn. Denk hierbij aan houtrook.

Ad. 5 Praatwolk/mindmap op welk niveau onderzoek is geweest/momenteel plaatsvindt op het gebied van bijvoorbeeld scholen en kantoren?

Hiervoor is een schematisch overzicht opgesteld met recente en momenteel lopende onderzoeken wat betreft luchtkwaliteit in scholen en kantoren. Aan de hand van deze mindmap zullen ook de hiaten worden aangegeven.

3 Kwaliteit van de binnenlucht in Nederlandse woningen

3.1 PM_{2.5} fijnstof

3.1.1 Toetswaarden

In *Tabel 1* wordt een overzicht van advies- en grenswaarden voor PM_{2.5} en PM₁₀ gegeven. Tot PM₁₀ fijnstof worden in de lucht zwevende deeltjes kleiner dan 10 micrometer gerekend. PM_{2.5} is de fijnere fractie, de massa van de deeltjes kleiner dan 2,5 micrometer. Vanwege de geringere grootte dringen deze deeltjes dieper in de longen door en richten naar verwachting meer schade aan. Ook de samenstelling van PM_{2.5} is anders, relatief bevat het meer verbrandingsgerelateerde deeltjes. Alle in de tabel vermelde waarden gelden voor de buitenlucht. De WHO (2010) heeft aangegeven dat de PM₁₀ en PM_{2.5} advieswaarden van respectievelijk 20 en 10 µg/m³ jaargemiddeld ook van toepassing zijn op binnenruimtes. Daarnaast wordt ultrafijnstof (deeltjes kleiner dan 0,1 micrometer) onderscheiden. Hiervoor zijn echter geen advies- en grenswaarden vastgesteld. Ultrafijnstof wordt uitgedrukt in aantal deeltjes per cm³, omdat de massa zeer gering is en daarmee niet onderscheidend is.

Tabel 1 overzicht van advies- en grenswaarden voor PM_{2.5} en PM₁₀ (WHO, 2005)

	period	PM ₁₀ [µg/m ³]	PM _{2.5} [µg/m ³]
WHO	jaargemiddeld	20	10
	daggemiddeld	50	25
EU	jaargemiddeld	40	25
	daggemiddeld	50*	-
US	jaargemiddeld	50	15**
	daggemiddeld	150	35

*Max 35 dagen hoger dan 50 µg/m³

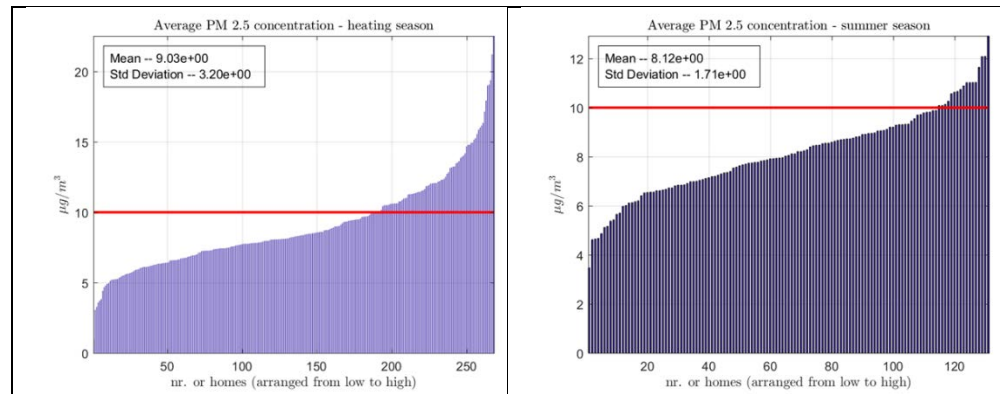
**3 jaars gemiddelde

3.1.2 Fijnstof concentraties in Nederlandse woningen

In het Inhome Air Quality project van het onderzoek consortium Longfonds, Eneco, Quby, Philips en Awaire is gedurende een jaar in ruim 700 woningen fijnstof gemeten. Een eerste exploratieve analyse van de meetdata over het stookseizoen september 2017 – maart 2018 is in opdracht van het Longfonds uitgevoerd (BBA Binnenmilieu, 2018). Een deel van de sensoren, die onrealistische waarden genereerden, zijn in deze data analyse niet meegenomen.

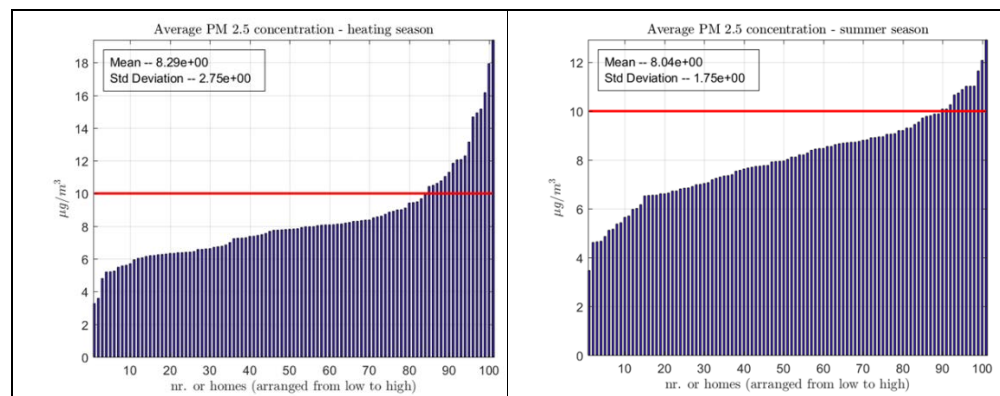
Vervolgens is door TNO in het TKI project Be Aware voor hetzelfde consortium de volledige dataset (september 2017 – augustus 2018) geanalyseerd. In deze analyse is nog scherper naar de datakwaliteit van de sensoren gekeken. Dit heeft

er toe geleid dat voor het winterseizoen (september 2017 – maart 2018) 285 woningen overblijven met betrouwbare meetdata en voor het zomerseizoen (april 2018 – augustus 2018) slechts 135 woningen. De resultaten worden getoond in Figuur 1, hieruit blijkt dat gemiddeld de binnenconcentraties in de winter hoger zijn dan in de zomer, mogelijk dooreen hogere buitenconcentratie in de winter, of door meer ventilatie in de zomer.



Figuur 1 links stookseizoen en rechts zomerseizoen gemiddelde $PM_{2.5}$ fijnstof concentratie in Nederlandse woningen (*bron: Be Aware*). Ter indicatie is de WHO jaargemiddelde advieswaarde als een rode lijn aangegeven.

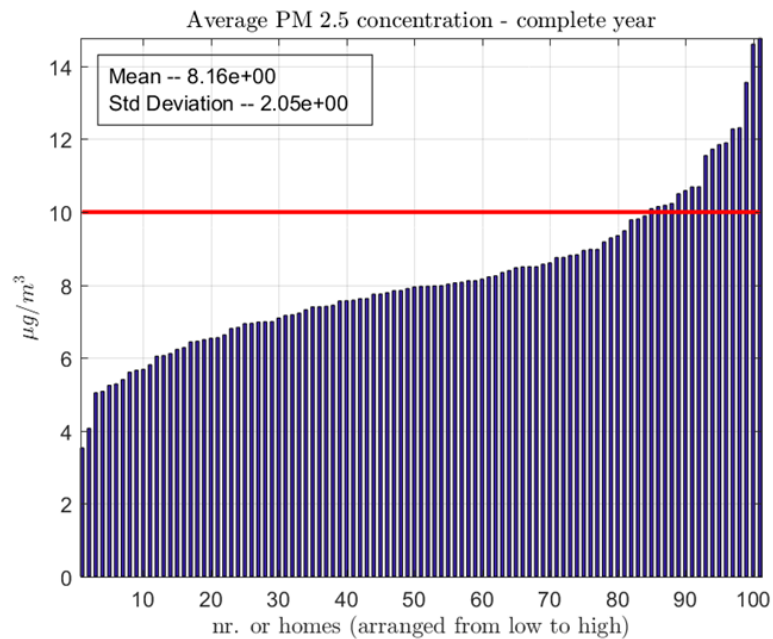
Er resteren 101 woningen die zowel in de zomer als in de winter aan de data kwaliteitseisen voldoen, zie Figuur 2. Hieruit blijkt dat de standaard deviatie in de winter groter is dan in de zomer en dat het gemiddelde vrijwel gelijk is.



Figuur 2 links stookseizoen en rechts zomerseizoen gemiddelde $PM_{2.5}$ fijnstof concentratie in **dezelfde** Nederlandse woningen (*bron: Be Aware*). Ter indicatie is de WHO jaargemiddelde advieswaarde als een rode lijn aangegeven.

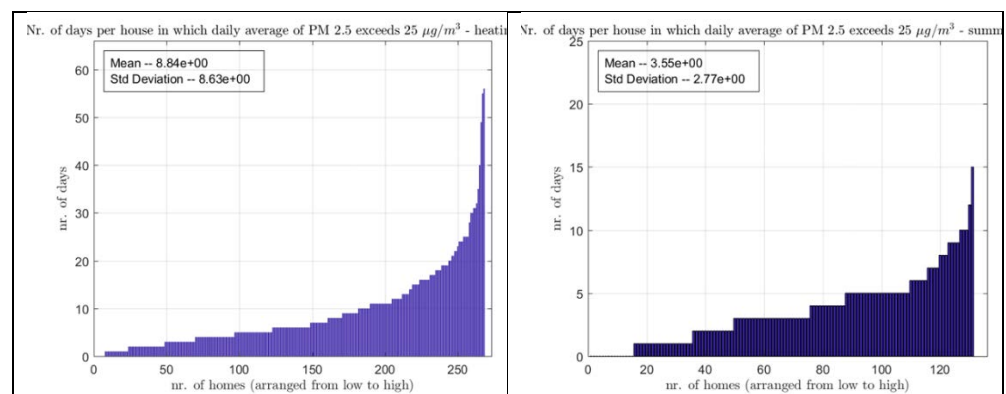
Deze 101 woningen kunnen worden getoetst aan de WHO jaar gemiddelde concentratie van $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, zie Figuur 3. Hieruit blijkt dat 17% van de woningen boven deze jaargemiddelde advieswaarde uitkomen. Dit is 1 op de 6 woningen. Waarschijnlijk ligt het percentage nog hoger omdat de gebruikte fijnstof sensor een onderschatting geeft bij fijnstof ten gevolge van koken van een factor 1,5 tot 5, zie paragraaf 3.1.5

Er is ook gekeken of er statistisch significante verschillen zijn tussen verschillende bouwjaren wat betreft gemiddelde $PM_{2.5}$ concentratie. Voor zowel de groep van 285, 135 en 101 woningen. Dit is niet het geval.



Figuur 3 **Jaargemiddelde** $PM_{2.5}$ fijnstof concentratie in 101 Nederlandse woningen (*bron: Be Aware*). De WHO jaargemiddelde advieswaarde is als een rode lijn aangegeven.

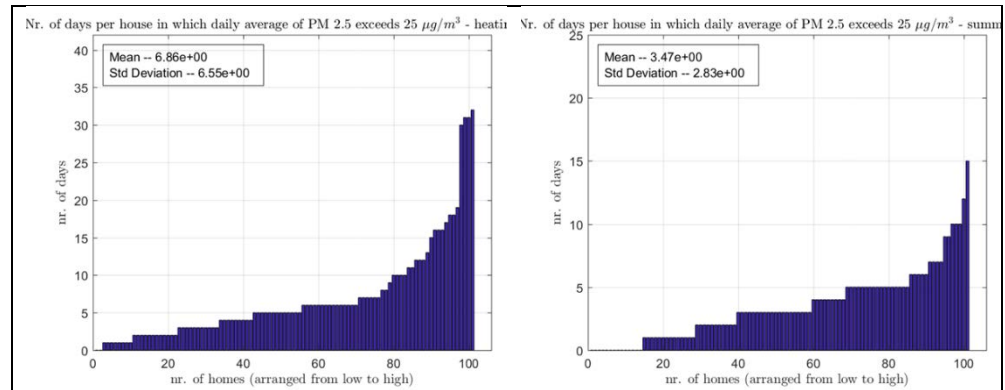
Een vergelijkbare analyse is uitgevoerd met betrekking tot de daggemiddelde fijnstof concentratie in de woningen voor de winter (285 woningen) en de zomer (135 woningen), zie Figuur 4. In deze figuren is verticaal het aantal dagen in het stookseizoen dat de WHO daggemiddelde advieswaarde van $25 \mu g/m^3$ wordt overschreden uitgezet. In bijna alle woningen wordt de daggemiddelde advieswaarde een of meerdere keren overschreden.



Figuur 4 links stookseizoen en rechts zomerseizoen **daggemiddelde** $PM_{2.5}$ fijnstof concentratie in Nederlandse woningen (*bron: Be Aware*).

In Figuur 5 wordt dit wederom getoond, nu echter voor de 101 woningen die zowel in de zomer als in de winter aan de data kwaliteitseisen voldoen. In de winter is het aantal dagen dat de daggemiddelde advieswaarde wordt overschreden duidelijk

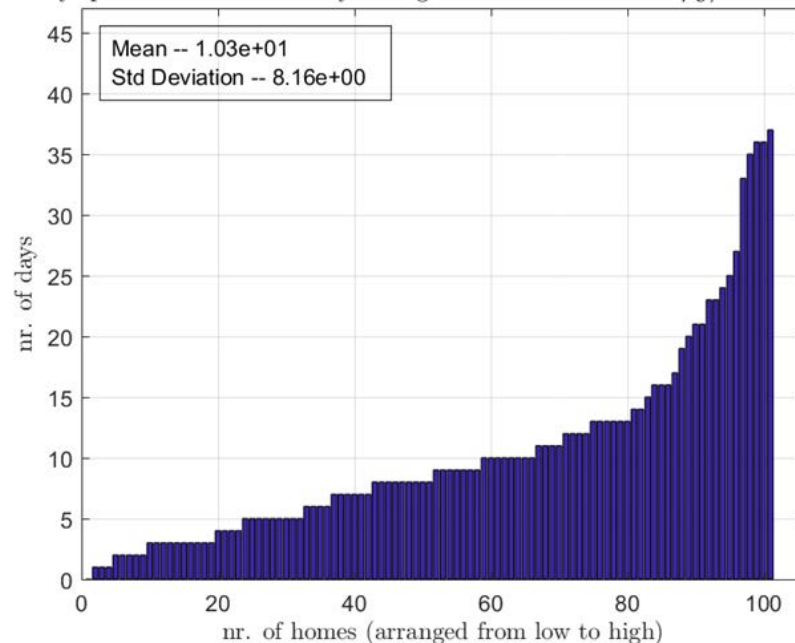
hoger dan in de zomer. Dit is waarschijnlijk een gevolg van het feit dat in de winter meetperiode de buitenconcentratie gedurende langere periodes sterk was verhoogd wat resulteerde in een gemiddelde buitenconcentratie van $11,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ten opzichte van $10,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in de zomer meetperiode. Daarnaast kan ook een hogere ventilatie hierin bijdragen.



Figuur 5 links stookseizoen en rechts zomerseizoen **daggemiddelde** $\text{PM}_{2.5}$ fijnstof concentratie in **dezelfde** Nederlandse woningen (bron: Be Aware).

Deze 101 woningen kunnen ook op jaarbasis worden getoetst aan de WHO daggemiddelde concentratie van $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, zie Figuur 6. Hieruit blijkt dat gemiddeld 10 dagen per jaar de binnenconcentratie $\text{PM}_{2.5}$ hoger is dan de daggemiddelde WHO advieswaarde. Echter, bijna 5% van de woningen heeft per jaar meer dan 30 dagen per jaar boven deze daggemiddelde advieswaarde.

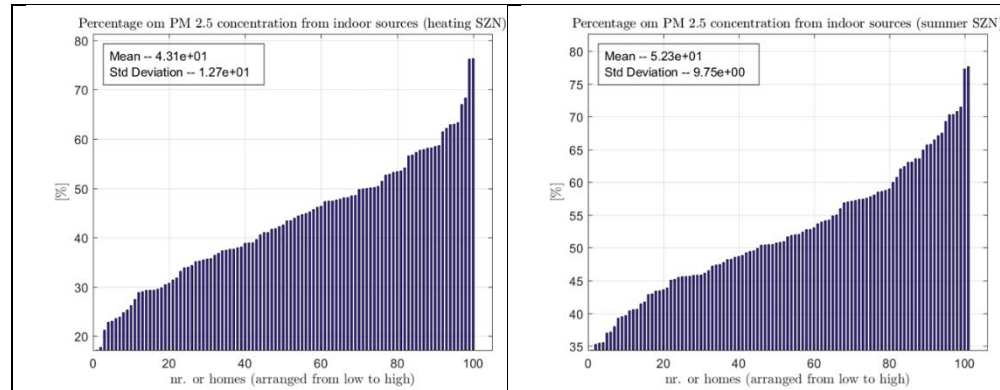
Nr. of days per house in which daily average of $\text{PM}_{2.5}$ exceeds $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ - complete y



Figuur 6 aantal dagen per jaar dat de **daggemiddelde** $\text{PM}_{2.5}$ fijnstof concentratie in 101 Nederlandse woningen wordt overschreden (bron: Be Aware).

3.1.3 Herkomst van fijnstof

In combinatie met de buitenluchtwwaarden en een speciaal algoritme (Chan, 2018) is achterhaald dat circa 50% van het fijnstof afkomstig is van binnenbronnen en de andere 50% door infiltratie van buitenlucht, zie Figuur 7. De hogere waarde in de zomer kan worden verklaard omdat dan de $PM_{2,5}$ buitenconcentratie 16% lager is dan in de winter. Hierdoor zal het aandeel fijnstof wat van binnen afkomstig toenemen.



Figuur 7 herkomst van $PM_{2,5}$ fijnstof, percentage wat in het winter- en zomerseizoen afkomstig is van binnenbronnen (bron: Be Aware).

Er is wel een forse spreiding van 18 tot 78% zichtbaar. Een dergelijke spreiding is ook door Chan (2018) gevonden tijdens metingen in 18 appartementen gedurende 14 dagen. Bij Chan varieerde de bijdrage van binnenbronnen van 15 tot 85%. Dit wil dus zeggen dat in een aantal woningen 85% van het $PM_{2,5}$ binnen is gegenereerd. In het Be Aware onderzoek is er in de avonduren tussen 21 en 24 uur een duidelijk verschil in emissies waarneembaar tussen mensen die aangaven wel en geen kaarsen te stoken. Opvallend is dat in woningen waarvan de bewoners aangeven dat ze kachel of open haard stoken de gemiddelde $PM_{2,5}$ concentratie in het stookseizoen ($8,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) lager is dan in woningen waarin niet wordt gestookt ($9,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Mogelijk wordt dit veroorzaakt doordat in deze woningen extra ventilatie optreedt door de afvoer van rookgassen in de schoorsteen.

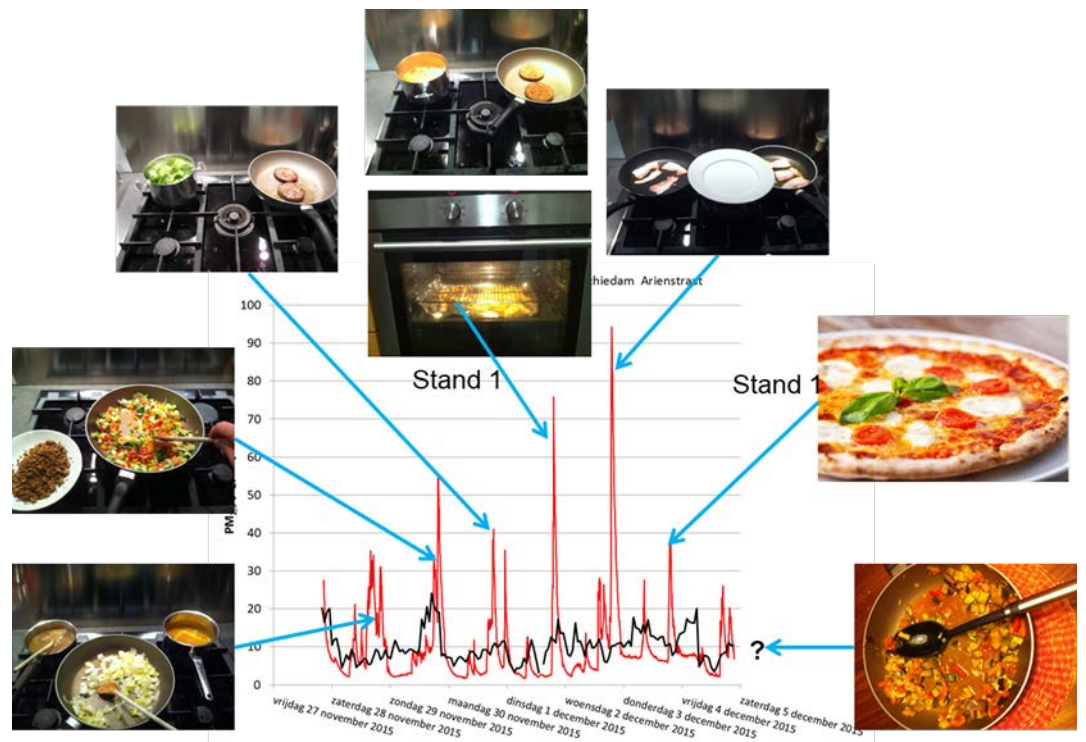
3.1.4 Nederlandse veldstudies

De $PM_{2,5}$ fractie van fijnstof in het binnenmilieu van Nederlandse woningen is tot nu toe beperkt onderzocht. Jacobs (2016) heeft in een verkennende studie in 9 woningen gedurende een week met optische deeltjestellers gemeten. Uit deze metingen bleek dat een groot deel van het fijnstof gerelateerd is aan kookactiviteiten. De deelnemers in het onderzoek waren geïnstrueerd om foto's te maken van de kookplaat met hun smartphone tijdens het koken. Dit maakte het mogelijk om de met de deeltjestellers gevonden momenten met verhoogde fijnstofconcentratie, 'fijnstof pieken', op basis van het tijdstip te koppelen met koken, zie Figuur 8.

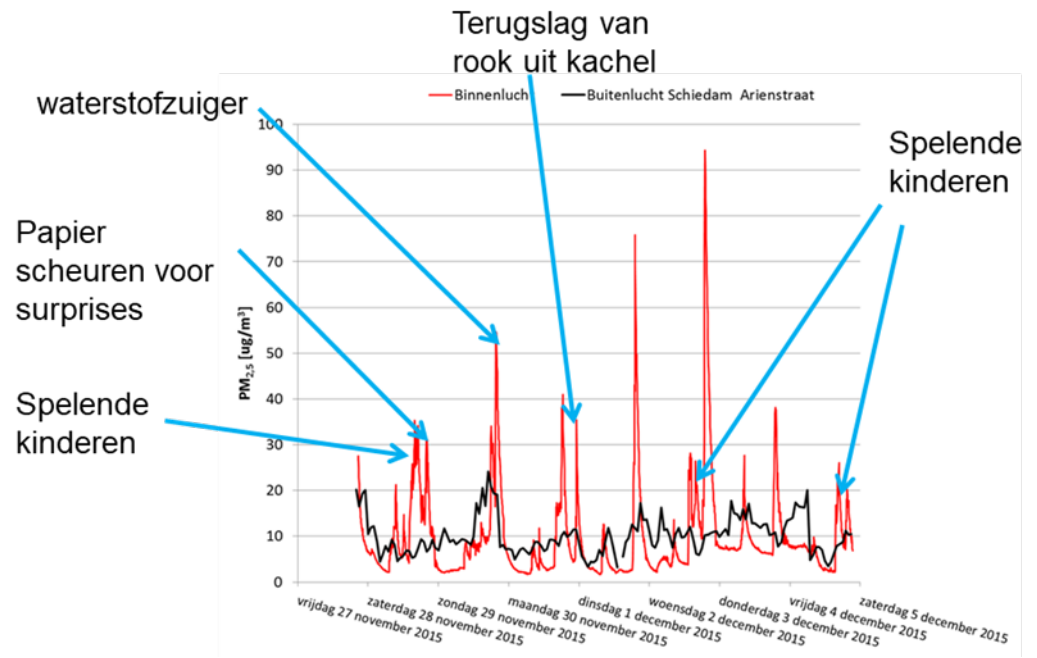
Daarnaast waren ook andere niet aan koken gerelateerde onbekende pieken te zien. Na afloop van de metingen is in samenspraak met de deelnemers de herkomst van vrijwel alle pieken achterhaald, zie Figuur 9. De maximum concentraties ten aanzien van de verschillende bronnen staan vermeld in Tabel 2.

Tabel 2 maximum concentraties PM_{2,5} fijnstof in 9 Nederlandse woningen (Jacobs, 2017)

Koken	2000 µg/m ³
Haarlak	140 µg/m ³
Deodorant spray	350 µg/m ³
Vuurwerk in de buitenlucht	75 µg/m ³
Kaarsen	40 µg/m ³
Spelende kinderen	35 µg/m ³
Terugslag van rook uit een kachel	35 µg/m ³
Vuurkorf in de achtertuin	50 µg/m ³



Figuur 8 PM_{2,5} fijnstof meting (rode lijn) in woning Delft 1 met duiding van fijnstof pieken ten gevolge van koken. Zwarte lijn buitenlucht concentratie (Jacobs, 2016).



Figuur 9 PM_{2.5} fijnstof meting (rode lijn) in woning Delft 1 met duiding van fijnstof pieken ten gevolge van andere activiteiten. Zwarte lijn buitenlucht concentratie (Jacobs, 2016).

In Tabel 3 zijn voor de 9 woningen de woningkenmerken en de verhoging van de fijnstof concentratie tussen 18.00 en 23.00 uur in de woonkamer vermeld. Uit de gegevens blijkt dat met een goede afzuigkap nauwelijks verhoging plaatsvindt. Bij motorloze afzuigkappen en bij recirculatie afzuigkappen treedt wel een duidelijke verhoging op. Later laboratorium onderzoek (Jacobs, 2017b) bevestigde dat recirculatieafzuigkappen, denk daarbij ook aan eilandkappen en downdraft, slechts 30% van het fijnstof afvangen.

Tabel 3 woningkenmerken en fijnstof verhoging in 9 Nederlandse woningen (Jacobs, 2016).

Table 1. experimental conditions and characteristics								
Measurement	Cooker	Hood type	Capacity [m ³ /hour]	Vent. system	Ventilation [m ³ /hour]	Volume living room/kitchen [m ³]	# persons	Dwelling type
Ettenleer	Gas	motorised	700 ¹	C	700 + 75 ¹	240	4	detached
Delft 2	Gas	motorised	166/212/238	C	166 + 13	120	2	row
Leiden	Induction	recirculation	500 ¹	D	> 100	350	4	row
Amsterdam 2	Induction	recirculation	400 ¹	D	60	110	2	apartment
Bilthoven	Gas	motorless	155	D	155 + 21	85	2	apartment
Delft 1	gas	motorless	123	D	123	128	4	row
Voorschoten	gas	motorless	35 ¹	C	35 + 15 ¹	125	4	row
Den Haag	induction	motorless	38	C	69	120	4	semidetached
Amsterdam 1	gas	no hood-	-	A	40 ¹	15	2	apartment
Ettenleer	gas	motorised ²	-	C	75	240	4	detached

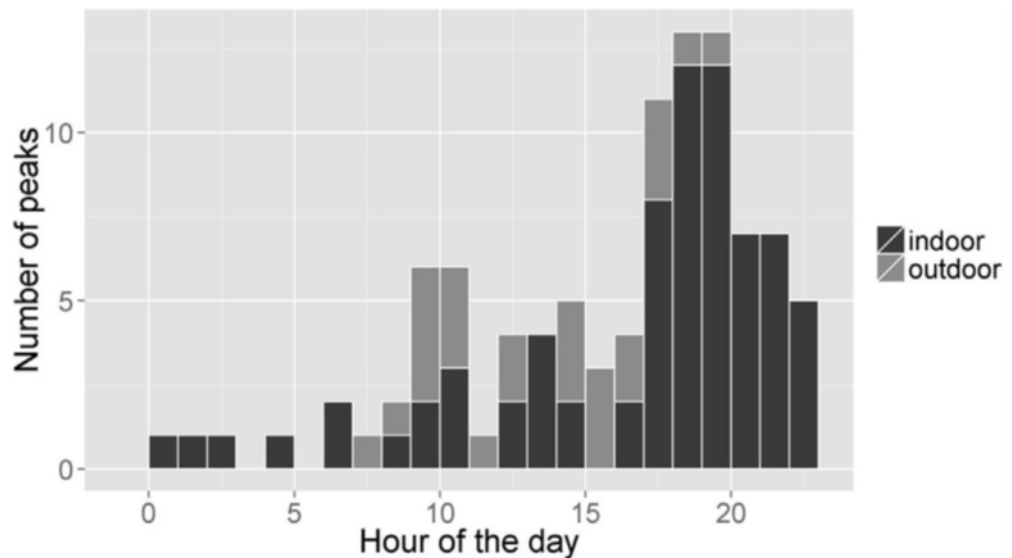
¹Estimated from supplier information.

²During half the week the motorised hood was intentionally not used.

Measurement	Cooker	Hood type	Capacity [m ³ /hour]	Air exchange rate ¹ [ACH]	Max. PM due to cooking [ug/m ³]	PM increase 18.00 – 23.00 hour [ug/m ³]
Ettenleur	gas	motorised	700 ⁴	3.2	16 - 25 ²	0
Delft 2	gas	motorised	166/212/238	1.5	10 - 25 ²	0.5
Leiden	induction	recirculation	500 ⁴	0.3	70 - 110 ²	8
Amsterdam 2	induction	recirculation	400 ⁴	0.5	57	0 - 8
Bilthoven	gas	motorless	155	2.1	174	3
Delft 1	gas	motorless	123	1.0	40 - 94 ²	10
Voorschoten	gas	motorless	35 ⁴	0.4	242 - 1919 ²	16
Den Haag	induction	motorless	38	0.3	20	- ³
Amsterdam 1	gas	no hood	-	2.7	651	5
Ettenleur	gas	no hood	-	0.3	121 - 350 ²	44

¹Air exchange rate with hood in operation. ²Pancakes with bacon. ³Ambient too high. ⁴Supplier information.

In een ander recent Nederlands onderzoek (Kluzenaar, 2017) droegen twaalf Eindhovenaren gedurende vijf dagen zowel binnen- als buitenshuis een rugzakje met draagbare GPS en fijnstof sensoren. In deze proef, van onder andere TNO waarbij ultrafijnstof werd gemeten, werden veel pieken in huis rondom etenstijd geregistreerd: ontbijt, lunch en vooral avondeten, zie Figuur 10. Ultrafijnstof wordt gedefinieerd als deeltjes in de lucht die kleiner zijn dan 0,1 µm. Aangezien de massa van deze deeltjes beperkt is wordt het uitgedrukt in het aantal deeltjes per kubieke centimeter.



Figuur 10 verdeling van de ultrafijnstof pieken over de dag (bron: Kluzenaar et al., 2017).

3.1.5 Meetnauwkeurigheid

Indien PM_{2.5} in de buitenlucht wordt gemeten om te verifiëren of aan de wettelijke normen wordt voldaan, dan wordt gedurende 24 uur lucht door een filter gezogen en wordt het filter bij aanvang en na 24 uur gewogen om de massatoename te bepalen. Afhankelijk of PM_{2.5} of PM₁₀ wordt gemeten wordt een speciale cycloon voorgeschakeld die deeltjes groter dan respectievelijk 2,5 of 10 µm afscheidt. De hiervoor aangehaalde studies zijn allemaal gebaseerd op fijnstof metingen met optische deeltjestellers. Deze apparaten meten niet rechtstreeks de massa maar tellen deeltjes in verschillende deeltjesgrootte categorieën. Met behulp van een aangenomen dichtheid en vormfactor wordt vervolgens een schatting van de massa

gemaakt. Veelal zijn de sensoren gekalibreerd op basis van fijnstof in de buitenlucht.

In de wetenschappelijke wereld wordt steeds meer aandacht besteed aan low-cost sensoren. Niet alleen voor buitenlucht (Castell 2017) maar ook om in de binnenlucht te meten (Singer, 2018). Het onderzoek van Singer vergeleek 7 fijnstof sensoren voor consumenten (< 300 euro) en twee research instrumenten (3000 – 6000 euro) met filterwegingen, de wettelijke bepalingmethode voor PM_{2,5}. Hiertoe werden een aantal events gesimuleerd die typisch zijn voor woningen zoals koken, branden van kaarsen en roken. Conclusie was dat vier van de consumenten sensoren in staat waren om binnen een factor twee de concentraties te schatten. De vier consumenten sensoren waren wat betreft prestatie vergelijkbaar met de twee research grade instrumenten. Research instrumenten echter beschermen de optische sensor componenten met behulp van een luchtscherm van gefilterde lucht rondom de te samplen luchtstroom. De consumenten sensoren hebben deze bescherming niet, hierdoor zou de gevoeligheid na verloop van tijd kunnen degraderen. Dit is nog niet onderzocht, het is dus nog onduidelijk wat de lange termijn prestatie van de consumenten sensoren is.

Alle 7 fijnstof sensoren voor consumenten en ook de twee research instrumenten gaven bij emissies van deeltjes kleiner dan 0.3 µm diameter (ultrafijnstof) substantieel te weinig aan, of misten bepaalde emissies zelfs volledig, zoals ultrafijnstof dat vrijkomt bij verbranding van gas op een gasfornuis of gasoven met een piek in de deeltjesgrootte verdeling bij 100 - 139 nm. De PM_{2,5} concentraties ten gevolge gasverbranding zijn typisch een factor 10 lager dan ten gevolge van het bakken en braden van voedsel in olie, branden van kaarsen of sigaretten. Naar verwachting zal het niet detecteren van de ultrafijnstof pieken dan ook geen grote afwijking veroorzaken wat betreft de meting van PM_{2,5} concentraties. Dit neemt niet weg dat ultrafijnstof gezondheidseffecten kan opleveren. Koken op gas veroorzaakt naast ultrafijnstof ook stikstofdioxide (NO₂) emissie wat volgens de WHO (2010) is geassocieerd met een verhoging van de kans op luchtwegklachten bij kinderen met 20%.

Twee recente Nederlandse peer reviewed onderzoeken van TNO bevestigen dat optische deeltjes tellers in geval van koken als fijnstof bron de concentratie PM_{2,5} onderschatten. O'Leary (2019) rapporteert op basis van laboratorium onderzoek dat, afhankelijk van het type maaltijd, de mate van onderschatting tussen een factor 1,5 en 5 bedraagt. Franken (2019) rapporteert metingen in 6 Nederlandse woningen waarbij zowel met een deeltjesteller als gravimetrisch is gemeten gedurende 5 dagen. Gemiddeld blijkt de deeltjesteller de massa met 40% (een factor 1,67) te onderschatten. Echter er was ook een woning waarbij de OPC (deeltjesteller) een onderschatting met een factor 2,2 aangaf. Dit kan worden verklaard door aan te nemen dat in deze woning het aantal kookemissies relatief hoog is.

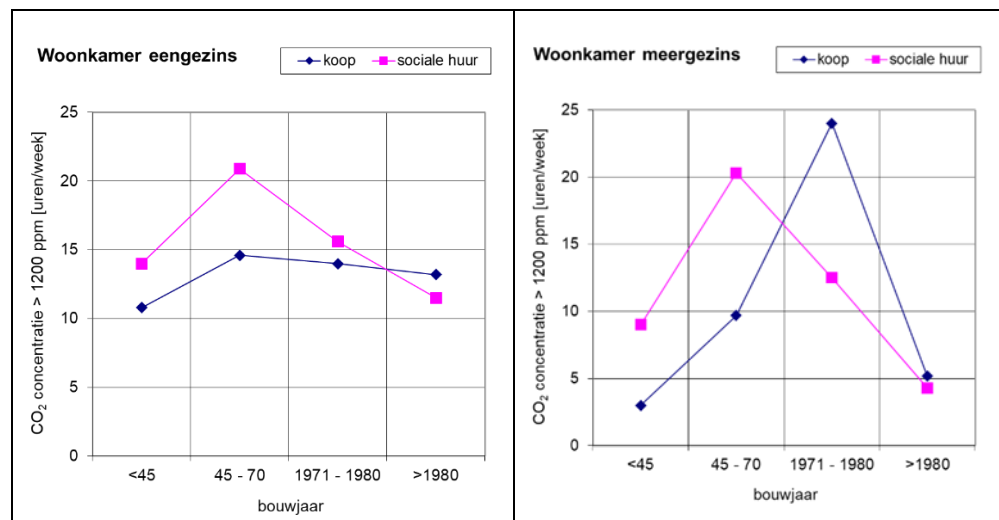
3.2 CO₂

3.2.1 Toetswaarden

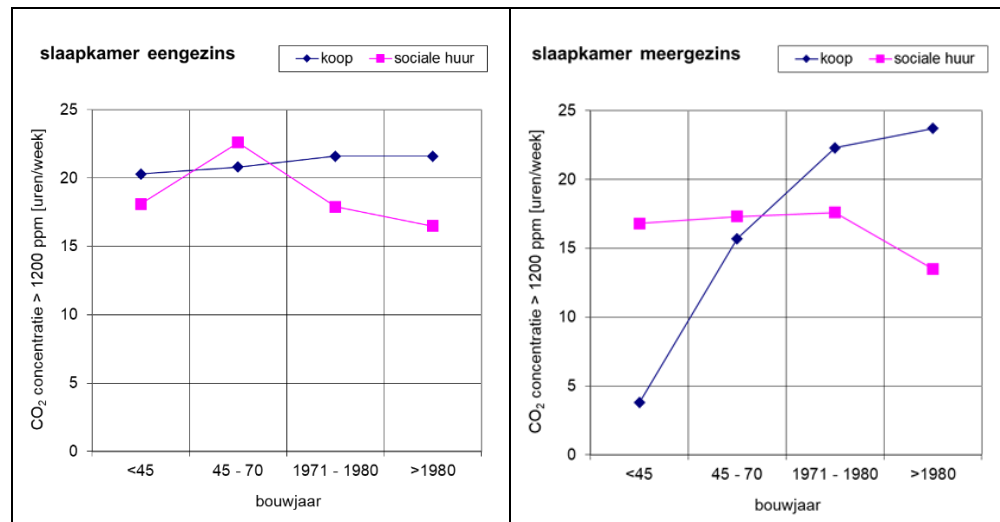
Kooldioxide (CO₂) wordt als marker gebruikt voor de luchtkwaliteit ten gevolge van door de mens geproduceerde verontreinigingen. Overeenkomstig een advies van de gezondheidsraad uit 1984 wordt in Nederland een CO₂ concentratie van 1200 ppm beschouwd als bovengrens. Deze grenswaarde is vervolgens gehanteerd als grondslag voor de ventilatie eisen in het Bouwbesluit. Hogere concentraties duiden op onvoldoende luchtverversing. In 2010 heeft de Gezondheidsraad nieuwe literatuur in beschouwing genomen, maar zag geen reden om af te wijken van de CO₂ grenswaarde van 1200 ppm, ook niet voor onderwijsruimten. In het advies uit 2010 wordt aangegeven dat CO₂ slechts beperkt bruikbaar is als maat voor de binnenluchtkwaliteit, maar wel een goede indicator voor luchtverversing is. Echter CO₂ zelf heeft ook effect op de productiviteit, zie paragraaf 4.3.

3.2.2 CO₂ concentraties in Nederlandse woningen

In het stookseizoen van 2004/2005 is in 1240 Nederlandse woningen CO₂ gemeten (Dongen en Vos, 2007). Uit het onderzoek blijkt dat in circa 60% van de woonkamers voor kortere of langere tijd de CO₂-concentratie hoger is dan 1200 ppm. In de woonkamers waar deze overschrijding plaatsvindt, is dit gemiddeld ruim 14 uur per week het geval (= 17% van de aanwezige tijd bij een aangenomen aanwezigheid van 7 x 12 = 84 uur). In 46% van de Nederlandse woningen is in de hoofdslaapkamer de CO₂ concentratie voor kortere of langere tijd hoger dan 1200 ppm. In de slaapkamers waar deze overschrijding plaatsvindt is dit gemiddeld 21 uur per week het geval, dat is 37% van de daar aanwezige tijd bij een aangenomen aanwezigheid van circa 7 x 8 = 56 uur. In Figuur 11 en Figuur 12 zijn de overschrijdingen gedifferentieerd naar bouwjaar, een- en meergezinswoningen en koop- en huurwoningen. De piek in de woonkameroverschrijding over de bouwjaar is mogelijk te verklaren door verbetering van de luchtdichtheid en vervolgens door invoering van mechanische ventilatiesystemen. Bij meergezinswoningen is er een opvallend verschil zichtbaar tussen koop- en sociale huurwoningen.

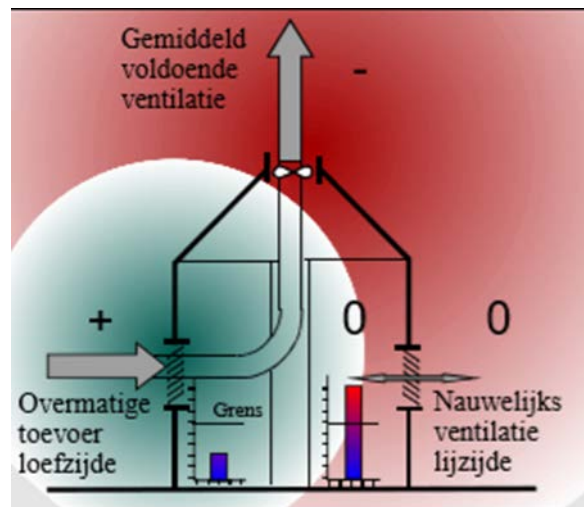


Figuur 11 Aantal uren per week waarbij de CO₂ concentratie boven 1200 ppm was in de woonkamer (bron: bewerking van Dongen en Vos, Jacobs, 2009).



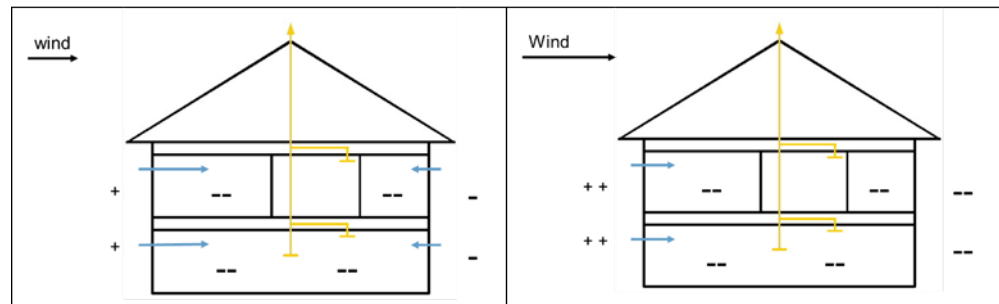
Figuur 12 Aantal uren per week waarbij de CO₂ concentratie boven 1200 ppm was in de slaapkamer (bron: bewerking van Dongen en Vos, 2007, Jacobs, 2009).

Deze overschrijdingen in de slaapkamer zijn voor een groot deel te verklaren door het zogenaamde loef- lijzijde probleem, zie Figuur 13.



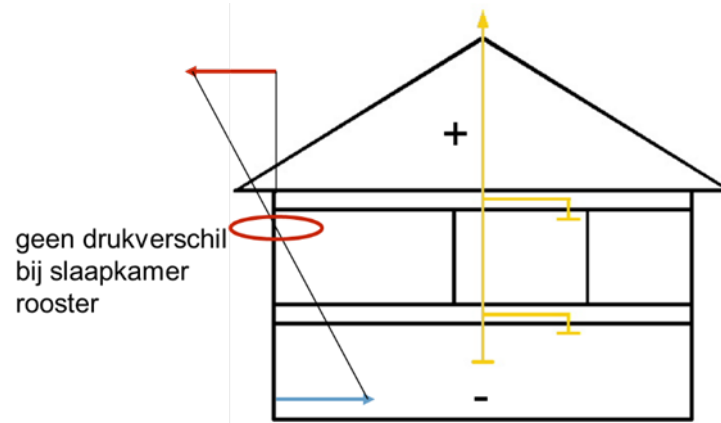
Figuur 13 ongelijkmatige luchtverdeling door loef- lijzijde probleem (bron: Jacobs, 2009).

De ventilatie in een ruimte komt tot stand ten gevolge van de onderdruk of overdruk ten opzichte van buiten en andere ruimtes in de woning. Bij zowel systeem A (natuurlijke ventilatie) als systeem C (mechanische afvoer) spelen hierbij natuurlijke krachten zoals wind en thermiek een belangrijke rol. In Figuur 14 wordt geïllustreerd dat bij toenemende windsnelheid de lijzijde slaapkamer niet meer wordt geventileerd.



Figuur 14 dwarsdoorsnede eengezinswoning met mechanische afvoer (systeem C) met winddrukken op de gevel, onderdruk in de verschillende vertrekken en de resulterende ventilatiestromen. Links bij beperkte windsnelheid wordt in alle vertrekken lucht toegevoerd. Rechts met hogere windsnelheid wordt in de lijszijde slaapkamer geen lucht meer toegevoerd.

Figuur 15 laat zien dat in het stookseizoen de thermisch drijvende kracht leidt tot verhoogde instroom op de beneden verdieping en uitstroom op de zolder. Ter plaatse van het ventilatierooster in de slaapkamers is het drukverschil ten gevolge van thermiek nihil.



Figuur 15 dwarsdoorsnede eengezinswoning met mechanische afvoer (systeem C), effect van thermiek op drukniveau in de woning ten opzichte van buiten.

In een luchtdichte woning kan het probleem van systeem C van onvoldoende geventileerde lijszijde slaapkamers worden beperkt door toepassing van zelfregelende roosters. Dit zijn roosters die de volumestroom trachten constant te houden onafhankelijk van het drukverschil erover. Zelfregelende roosters compenseren de variatie in de natuurlijke drijvende kracht (variërend drukverschil over roosters). Ze houden de luchtstroom constant door de doorlaat aan te passen aan het momentane drukverschil. Het is een misverstand dat deze roosters vooral bedoeld zouden zijn om hoge drukpieken bij harde wind te smoren. De belangrijkste functie is om al bij lage drukverschillen de toevoer aan loefzijde te smoren, zodat de lucht (langer) aan lijszijde kan blijven toestromen (de Gids et al, 2012). Bij sommige fabrikanten begint de zelfregelende werking van het rooster pas vanaf een drukverschil van circa 5 Pa. Dit helpt wel om tocht deels te voorkomen, maar voorkomt niet dat aan de lijszijde de luchtkwaliteit minder wordt. Er zijn echter ook zelfregelende roosters die de stroom constant houden bij de ontwerpdruk van 1 Pa.

Vanuit energetisch oogpunt wordt in steeds meer woningen CO₂ gemeten en wordt in nieuwbouw- en renovatiewoningen veelal automatisch de ventilatie op basis van de gemeten CO₂ concentratie aangestuurd. In het TKI project Monicair (2014) is een aantal verschillende type ventilatiesystemen onderzocht. In dit onderzoek wordt geconcludeerd dat bewoners weliswaar een bepaalde gewoonte of vast patroon inzake de bediening van ventilatiecomponenten (gebruik ventilatieroosters, afzuigkap en standenschakelaar) hebben, maar geen reactief ventilatiegedrag vertonen. In verblijfsruimtes kunnen CO₂-concentraties oplopen tot boven de 3500 ppm zonder dat de bewoner hierop reageert en actie onderneemt door bijvoorbeeld de mechanische ventilatie-unit in een hogere stand te zetten. Dit is met name relevant aangezien in Nederland in de meeste nieuwbouwwoningen het ventilatiesysteem niet op orde is (Van Dijken, Boerstra, 2011).

Recent (Mishra, 2017) zijn er steeds meer aanwijzingen dat CO₂ naast indicator voor geuroverlast ook geassocieerd is met slaapkwaliteit. Mishra (2017) concludeert dat lagere CO₂ concentraties samengaan met “better sleep depth, sleep efficiency, and a lesser number of awakenings”.

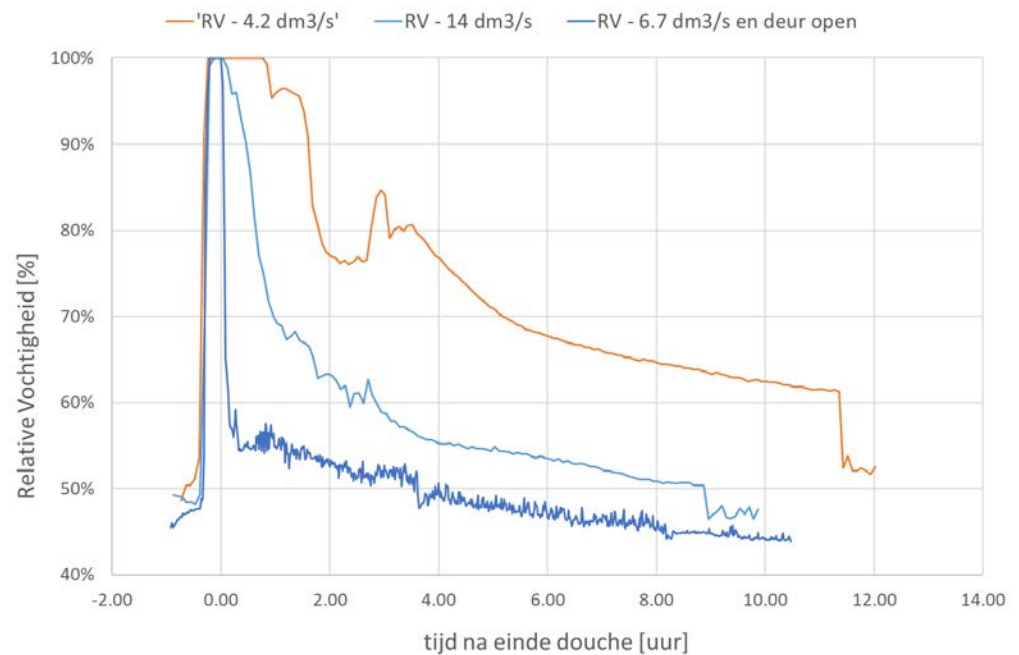
3.3 Relatieve vochtigheid en schimmel

3.3.1 Toets waarden

Er bestaan geen wettelijke eisen ten aanzien van relatieve vochtigheid in woningen. Wel zijn de ventilatie eisen in het Bouwbesluit zo opgezet dat schimmelgroei ten gevolge van vochtophoping in de badkamer en keuken wordt voorkomen, zie NEN 1087 (1975). In het handboek Vocht en Ventilatie (2000) wordt vermeld dat in het algemeen schimmels niet groeien indien de relatieve vochtigheid beneden 80% is. Adan (1994) heeft afgeleid dat indien meer dan 50% van de tijd aan dit criterium wordt voldaan, de groei niet wordt bevorderd (Time Of Wetness TOW < 0,5). Lastig punt ten aanzien van sensoren is dat de relatieve vochtigheid in de grenslaag langs de wand, het microklimaat waar schimmelvorming plaatsvindt, per plaats kan verschillen en ook niet overeen hoeft te komen met de door een luchtsensor gemeten relatieve vochtigheid van de lucht in de desbetreffende ruimte. Dit geldt met name voor voegen tussen tegels, maar ook voor het plafond wat vaak het langst nat blijft. Ook indien thermische bruggen aanwezig zijn, bijvoorbeeld door een slecht geïsoleerde buitenmuur, kan de lokale relatieve vochtigheid sterk afwijken van de luchtvochtigheid van de ruimtelucht. Het bouw materiaal heeft een sterke invloed en zelfs bij vergelijkbare materialen zijn verschillen in schimmelwerende werking geconstateerd (Johansson, 2012). Ook temperatuur heeft invloed op de schimmelgroei (Hasselaar 2018).

3.3.2 Schimmelgroei in badkamer

Naast de ondergrond bepalen ventilatie en vochtproductie het risico op schimmelgroei. De luchttemperatuur is eveneens van belang, maar dan via invloed op het vochtgehalte van de lucht. Volgens Adan [1994] ontkiemt en groeit schimmel op gipsplaat (en naar men mag verwachten ook bij veel andere afwerkmaterialen, behalve tegels) bij een "time of wetness" van 50% en RV > 80%, ofwel: als op een oppervlak meer dan de helft van de tijd een hoge luchtvochtigheid optreedt, dan is schimmelgroei voorspelbaar. Bijna altijd zijn er schimmelsporen en is er voldoende voedingsbodem. De veronderstelling die Hasselaar (2018) verder maakt is dat in de badkamer 80% RV in het microklimaat aan koude oppervlakken optreedt zodra de luchtvochtigheid boven 65% stijgt. Op basis van een rekenmodel laat Hasselaar zien dat afhankelijk van het ventilatiedebiet en type ventilatiesysteem het tussen 1,3 en 10,7 uur duurt voordat de luchtvochtigheid van de lucht in de badkamer onder deze grens van 65% komt. Dit rekenmodel wordt bevestigd door validatie metingen in een inpandige badkamer, zie Figuur 16.



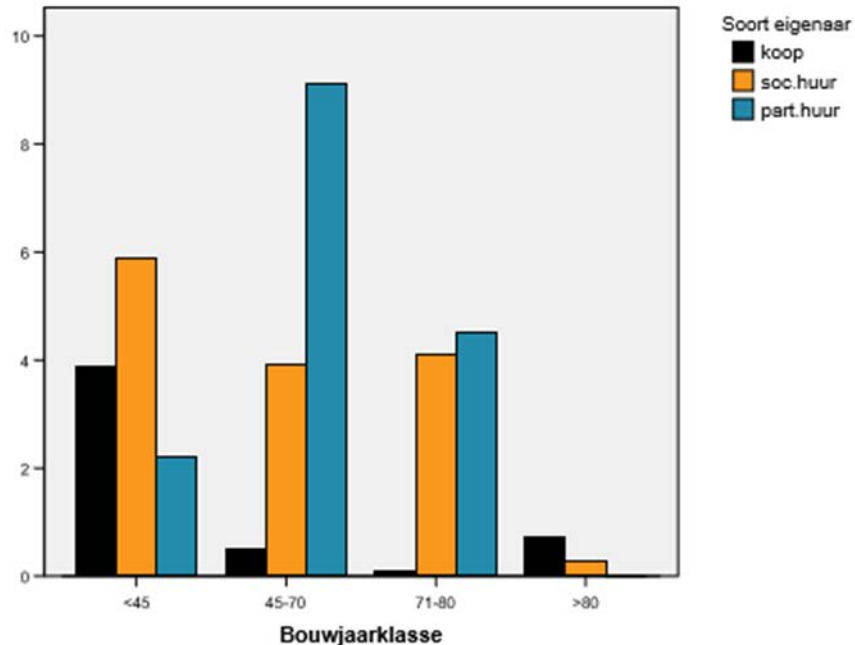
Figuur 16 verloop van de relatieve vochtigheid in een inpanidige badkamer na 20 minuten douchen bij verschillende ventilatiecondities [Hasselaar, 2018].

In Monicair (2014) wordt 70% als criterium gehanteerd. Uit de metingen in 62 woningen blijkt dat overschrijding van 70% RV voornamelijk in de badkamer voor te komen en dan slechts gemiddeld een half uur tot twee uren per dag in het stookseizoen. Uitzondering hierop vormde een woning met natuurlijke afvoer in de badkamer waarbij de RV gemiddeld ruim 7 uur per dag boven 70% was.

3.3.3 Inventarisatie vochtproblematiek

RIVM (2011) heeft een studie uitgevoerd naar de relatie tussen binnenmilieu, energiebesparing en gezondheid. Uit berekeningen door RIVM volgde dat er per jaar door blootstelling aan factoren in het binnenmilieu 1500 gezonde levensjaren per miljoen inwoners verloren gaan. Vocht is volgens deze RIVM studie na radon en passief roken de grootste oorzaak van dit gezondheidsverlies. In de studie "Energiebesparing bij renovatie: risico of kans?" (2011) is een inventarisatie gemaakt van de bij de GGD Rotterdam gemelde binnenmilieu klachten. Hieruit bleek dat 35% van de klachten schimmel- en vochtklachten betreft. Onderzoek van Ginkel en Hasselaar (2005) in 186 Nederlandse woningen liet zien dat in 41% van de woningen schimmel aanwezig was in de badkamer. De kans op schimmel correleerde sterk met het aantal douches per week en de leeftijd van de ventilatieunit. Indien meer dan 14 douches per week werden genomen dan nam het schimmel risico sterk toe. Dit was ook het geval indien de leeftijd van de ventilatorbox hoger was dan 6 jaar. Beide variabelen leiden er toe dat tussen twee douchebeurten de badkamer onvoldoende opdroogt, waardoor schimmel ontstaat. Dongen en de Vos (2007) hebben door middel van inspecteurs de aanwezigheid van vocht- en schimmelplekken in 1077 woningen vastgesteld in de woonkamer en in de slaapkamers. Een groot deel van de vastgestelde schimmel is veroorzaakt door een onvoldoende thermische kwaliteit van de gebouwschil. Hoewel dit onderzoek 14 jaar geleden is uitgevoerd, zijn de cijfers gelet op de beperkte hoeveelheid gerenoveerde woningen nog steeds relevant. Uit Figuur 17 volgt dat in

koopwoningen na 1945 en in alle woningen van na 1980 de schimmelproblematiek zeer beperkt is in vergelijking met de overige woningen. Notabene, 2% van het wand- en plafondoppervlak van een kamer van 9 m² komt neer op een schimmelplek van 0,8 x 0,8 m.



Figuur 17 Percentage woningen met schimmel op tenminste 2% van de wanden en de plafonds naar het oordeel van de opnemer (bron: Dongen en Vos, 2007).

3.4 Formaldehyde/VOC/radon/CO/NO₂

3.4.1 Formaldehyde

RIVM (2016) heeft een overzicht opgesteld van regelgeving betreffende stoffen in het binnenmilieu in Nederland en andere EU landen. Conclusie is dat er wel regelgeving is voor de aanwezigheid van stoffen in materialen, of voor het vrijkomen van stoffen uit materialen, maar er is geen specifieke regelgeving voor concentraties van stoffen in de binnenlucht. Een uitzondering hierop betreft formaldehyde, hiervoor is in Nederland in het Bouwbesluit een wettelijke waarde vastgesteld van 120 µg/m³. De WHO (2010) hanteert 100 µg/m³ als grens voor het 30 minuten gemiddelde om klachten te voorkomen.

In het stookseizoen van 2004/2005 is in 358 Nederlandse woningen gedurende een week formaldehyde gemeten in keukens en in een selectie van andere ruimtes, met plaatmateriaal zoals spaanplaat of multiplex (Dongen en Vos, 2007). De gevonden weekgemiddelde formaldehyde concentraties zijn in de keukens doorgaans iets hoger dan in de overige ruimtes: respectievelijk gemiddeld 12,9 en 12,2 µg/m³. Ook indien de spreiding wordt meegenomen bleven alle gemeten waarden onder de grenswaarde.

3.4.2 VOC

De monsterneming van vluchtige organische stoffen vond in 400 woningen plaats (Dongen en Vos, 2007). De gevonden mediane weekgemiddelde totaal VOC concentratie is $135 \mu\text{g}/\text{m}^3$. De door de gezondheidsraad (2000) geadviseerde concentratie van $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ wordt in bijna 40% van de woningen overschreden. Van de individuele vluchtige organische stoffen zijn de hoogst gemeten concentraties die van ethanol (alcohol), d-limoneen (geurstof in 'luchtverfrissers') en toluene (verf en tabaksrook).

Vlamvertragers en weekmakers zijn semi-vluchtige stoffen die kunnen vrijkomen uit verschillende materialen naar de lucht of in huisstof terecht komen. Afhankelijk van de precieze vorm van de stof is blootstelling via inname van huisstof een belangrijke blootstellingsroute. Van weekmakers die uitdampen uit PVC (polyvinyl chloride) -oppervlakten zijn er aanwijzingen dat ze bijdragen aan een verhoogd risico op astma en allergieën. Het is echter niet bekend of de blootstelling via de lucht of via het huisstof loopt (RIVM 2018). Uit Zweeds onderzoek van Bornehag (2004) blijkt duidelijk een verband tussen ftalaten die als weekmakers in PVC vloerbedekking worden gebruikt en de ontwikkeling van astma bij kinderen. Uit een later onderzoek van Shu (2014) van deze groep Zweedse kinderen blijkt dat er indicaties zijn dat blootstelling tijdens de zwangerschap door PVC vloerbedekking in de slaapkamer van de ouders een kritische periode kan zijn bij de ontwikkeling van astma bij kinderen. In Japan is door Araki (2014) een significant verband gelegd tussen de aanwezigheid van vlamvertragers in huisstof en het voorkomen astma.

3.4.3 Radon

In vrijwel alle Nederlandse woningen is de concentratie van zowel radon als thoron laag. Dat blijkt uit onderzoek naar radon en thoron dat het RIVM (2015) in ruim 2500 woningen in Nederland (bouwjaar 1930 en later) heeft uitgevoerd. Het is wereldwijd voor het eerst dat op deze schaal onderzoek is gedaan naar thoron in woningen. Radon en thoron zijn radioactieve edelgassen die van nature ontstaan in de bodem en in daarvan gemaakte bouwmaterialen. Vandaar uit kunnen ze in de woning terechtkomen. De radioactieve stoffen die ontstaan als radon en thoron vervallen, dragen bij aan het risico op longkanker. Van nature veranderen radon en thoron in radioactieve stoffen die zich aan zwevende stofdeeltjes in huis hechten. Na inademen blijven ze achter in de longen en geven daar straling af. Die straling draagt bij aan het risico op longkanker. Hoewel de hier gemeten concentraties radon en thoron in woningen internationaal gezien laag zijn, leidt het toch nog tot zo'n vierhonderd gevallen van longkanker per jaar in Nederland. Het betreft vooral rokers. Dat komt doordat het gezondheidsrisico van radon en thoron voor rokers gemiddeld 25 keer zo groot is als voor nooitrokers. De nieuwe schatting van het aantal gevallen van longkanker per jaar door radon en thoron valt iets lager uit dan de vorige schatting uit 2000. Ook hebben we nu een beter beeld van de bijdrage door radon (ongeveer 70 procent) en door thoron (ongeveer 30 procent).

3.4.4 CO

Volgens de Onderzoeksraad voor Veiligheid (2015) lopen in 90% van de woningen waar zich gasverbrandingsinstallaties bevinden de bewoners het risico ziek te worden of zelfs te overlijden als gevolg van blootstelling aan koolmonoxide. Volgens VeiligheidNL (2014) overlijdt in Nederland elk jaar naar schatting een tiental personen door een koolmonoxide (CO) vergiftiging. Koolmonoxidevergiftiging leidt tot bijna tweehonderd ziekenhuisopnamen en enkele honderden behandelingen op een Spoedeisende Hulpafdeling. De aantallen variëren echter

sterk per jaar. CO-vergiftiging komt in alle leeftijdsgroepen voor en vindt meestal in een woonhuis plaats. Vaak is er sprake van een defect in (de afvoer van) verwarmings- of warmwaterapparatuur. Nederland bezet ten opzichte van de omliggende landen waar veel op gas wordt gestookt een plek in de achterhoede, als het gaat om een stelsel dat de kwaliteit van installateurs en de veiligheid van verbrandingsinstallaties moet waarborgen, zie Figuur 18. Hiervoor is onlangs een wet aangenomen voor verplichte certificering cv bedrijven.

Aspect	Verplichte registratie	Keuring installaties	Installateurs	Toezicht
Nederland	Geen	Alleen > 100 kW	Erkenning niet verplicht	Geen
Duitsland	Ongevallen en gebreken	Oplevering, revisie, vervanging	Erkenning verplicht	Netbeheerder/schoorsteenveger
België	Ongevallen	Periodiek onderhoud	Erkenning voor gasaansluiting	Netbeheerder
Groot-Brittannië	Ongevallen en gebreken	Jaarlijkse keuring en onderhoud verplicht in huurwoningen	Erkenning verplicht	HSE, Gas Safe Register
Denemarken	Onbekend	Verplicht onderhoud per 1-2 jaar	Erkenning verplicht	Netbeheerder

Figuur 18 Het Nederlandse stelsel voor de veiligheid in vergelijking met ons omliggende land (bron: Onderzoeksraad voor Veiligheid, 2015).

3.4.5 NO₂

In de buitenlucht bedraagt de grenswaarde voor Stikstofdioxide (NO₂) 40 µg/m³. Daarnaast geldt een uurgemiddelde buitenluchtwaarde van 200 µg/m³ die maximaal 18 uur per jaar mag worden overschreden. Voor de industrie geldt als 15 minuten gemiddelde MAC waarde 1000 µg/m³.

Stikstofdioxide is door Dongen en Vos (2007) zowel in de woonkamer (gemiddeld 22 µg/m³) als in de keuken (gemiddeld 18 µg/m³) gemeten. Het ontstaat bij verbranding. Belangrijke bronnen voor deze component zijn koken op gas en buitenlucht (verkeer en industrie). In de woonkamer zijn er qua bouwjaar geen grote concentratieverschillen geconstateerd, echter wel wat betreft eigenaar. De concentraties zijn bij particuliere woningen lager dan bij huurwoningen, met name in de woningen voor 1945. In de keukens zijn hogere concentraties gemeten in de huurwoningen van voor 1970. Dit duidt op een relatie met de leeftijd en staat van onderhoud van de eigen verbrandingstoestellen.

In vergelijking met andere onderzoeken zijn in het onderzoek van Dongen en Vos overigens relatief lage NO₂-concentraties gevonden. De reden hiervoor is onbekend. Zo heeft Brunekreef (1986) in 15 woningen gemiddeld 74 µg/m³ in de keukens gemeten en 33 µg/m³ in de woonkamers. Volgens Brunekreef was de aanwezigheid van een (afvoerloze) keukengeiser een belangrijke oorzaak van de hoge concentraties in de keukens.

Onder andere vanwege de lage concentraties in het onderzoek van Dongen en Vos is in 2008/2009 in 60 Groningse woningen opnieuw NO₂ gemeten (Hall, 2009). In alle keukens met afvoerloze geisers werd de gezondheidkundige advieswaarde van 40 µg/m³ overschreden, zowel bij 2 woningen in de zomermetingen als bij 4 woningen in de wintermetingen. Er was één woning met een weekgemiddelde NO₂-

concentratie in de woonkamer van $40,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Deze hoge concentratie werd veroorzaakt omdat 6 à 7 dagen in de week zonder afzuigkap gedurende 75 minuten per dag werd gekookt. In de keuken stonden een raam en de buitendeur open tijdens het koken, ook stond de deur naar de woonkamer open, en de woonkamer werd verder niet geventileerd.

3.5 Ontbrekende binnenmilieudata Nederlandse woningen

PM_{2.5} fijnstof

Met betrekking tot PM_{2.5} fijnstof in het binnenmilieu van Nederlandse woningen bestaat de noodzaak tot aanvullende metingen op het Inhome Air Quality onderzoek uit 2017 - 2018 waarbij gelijktijdig fijnstof met een deeltjesteller en gravimetrisch worden gemeten. Dit geeft inzicht in hoeverre de optische deeltjestellers de PM_{2.5} onderschatten. Hiermee kan een betere inschatting worden gemaakt van het aantal woningen dat de WHO advieswaarde overschrijdt. Ook is aan te bevelen om gelijktijdig nader onderzoek te doen naar de herkomst van de fijnstofbronnen door het bijhouden van dagboekjes. Met deze informatie kan gericht worden ingezet op interventies.

CO₂

Actie 29, het laatste grootschalige onderzoek waarbij aselect CO₂ in Nederlandse woningen is gemeten, dateert uit 2004 – 2005. Hierin is vastgesteld dat in 46% van de Nederlandse woningen in de hoofdslaapkamer de CO₂ concentratie voor kortere of langere tijd hoger is dan 1200 ppm. In de slaapkamers waar deze overschrijding plaatsvindt is dit gemiddeld 21 uur per week het geval, dat is 37% van de daar aanwezige tijd. Het is onduidelijk in hoeverre dit is verbeterd in de huidige woningvoorraad. De luchtkwaliteit in de slaapkamer is van belang aangezien verkennende onderzoeken aangeven dat deze mogelijk een effect heeft op de slaapkwaliteit en daarmee op de productiviteit op de volgende dag, zie paragraaf 4.2.

NO₂

Stikstofdioxide concentraties zijn sinds 2009 niet meer in Nederlandse woningen onderzocht. NO₂ bronnen in de woning zijn geconcentreerd in de keuken en bestaan uit (afvoerloze) geisers en koken op gas. Afvoerloze geisers zijn de afgelopen jaren zoveel mogelijk vervangen door elektrische geisers. Ook gaan steeds meer mensen elektrisch koken. Echter, aangezien er een trend is naar open keukens is de verwachting dat verontreinigingen zich verspreiden naar de woonkamer. Ten gevolge van energetische maatregelen neemt de luchtdichtheid van de woningen toe, waardoor NO₂ langer zou kunnen blijven hangen. Door beide effecten zou de blootstelling aan NO₂ kunnen toenemen.

Weekmakers en vlamvertragers in huisstof

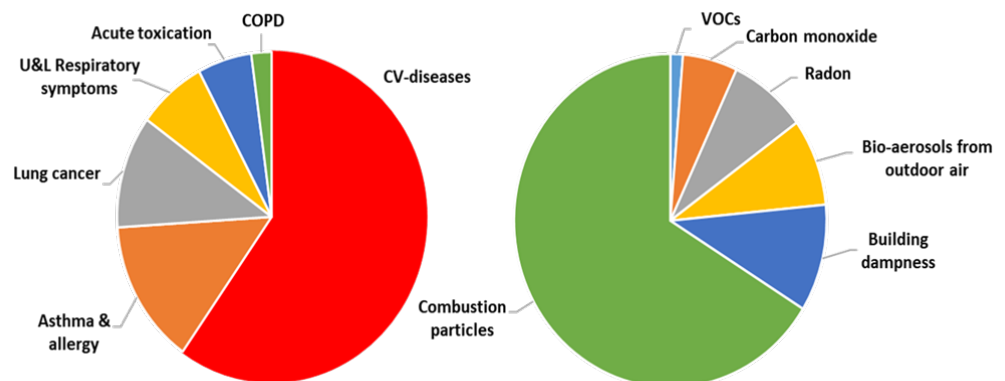
Uit onder andere Zweeds en Japans onderzoek blijkt dat er een associatie is tussen weekmakers en vlamvertragers in huisstof en de prevalentie van astma bij kinderen. In welke mate deze stoffen in Nederlandse woningen voorkomen is onbekend.

4 Korte en lange termijn gezondheidseffecten

4.1 Ziekte

4.1.1 Prioritering contaminanten

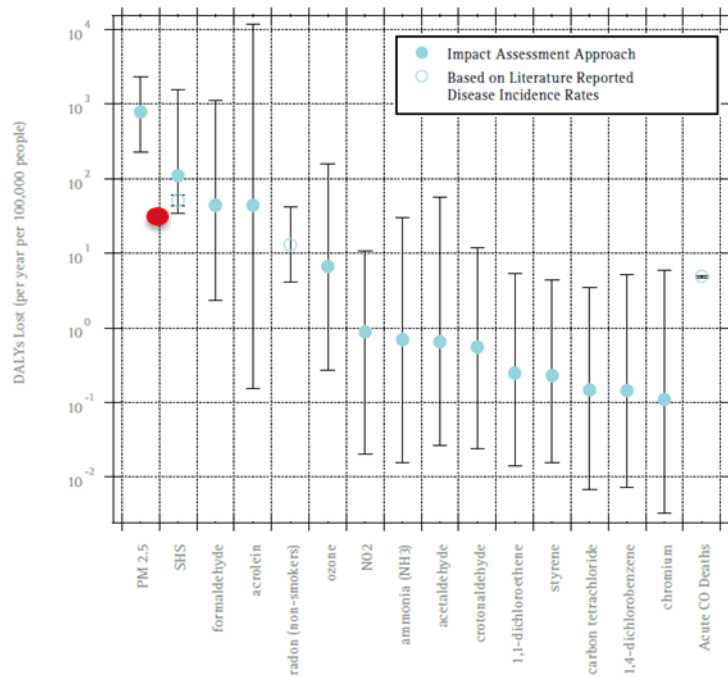
In de Europese projecten ENVIE (2003-2008) en IAIAQ (2010 – 2011) zijn schattingen gemaakt van de ziektelast veroorzaakt door verschillende verontreinigingen in het binnenmilieu, zie Figuur 19. De belangrijkste ziekten zijn hart- en vaatziekten (Cardio Vasculair CV) die worden veroorzaakt door fijnstof wat ontstaat bij verbranding in de binnen- en buitenlucht. Deze verbrandingsdeeltjes veroorzaken ook COPD en longkanker. IAIAQ concludeert dat 2/3 van de ziektelast gerelateerd met agentia in het binnenmilieu wordt veroorzaakt door fijnstof, wat het best wordt gerepresenteerd door PM_{2,5}. Vocht en schimmel (Building dampness) veroorzaakt 11% van de ziektelast.



Figuur 19 Links binnenmilieu gerelateerde ziekten (CV = Cardio Vasculair) en rechts belangrijkste agentia in 26 Europese Unie landen, de totale ziektelast in deze landen wordt geschat op 2,2 miljoen DALY (IAIAQ, 2011).

RIVM (Schram-Bijkerk, 2012) heeft ook een schatting gemaakt van de ziektelast in Nederland ten gevolge van binnenlucht. Zij identificeerden tabaksrook als belangrijkste oorzaak voor de ziektelast. Zij kwamen op een lagere schatting (7000 – 52000 DALY) voor de ziektelast dan de ENVIE schatting voor Nederland (73000 DALY). Als mogelijke oorzaak voor het verschil gaven zij aan dat de berekeningsmethode verschilde en dat minder agentia dan in ENVIE waren meegenomen. Een soortgelijke analyse voor de situatie in de VS is uitgevoerd door Logue (2012), zie Figuur 20. Hieruit volgde dat PM_{2,5} de grootste impact heeft op de gezondheid gevolgd door acroleïne en formaldehyde. In de analyse van Logue is gezondheidsschade van schimmel niet meegenomen omdat dit een indirect effect is van vocht. Ter indicatie is met het rode punt de ziektelast ten gevolge van blootstelling aan vocht en schimmel toegevoegd.

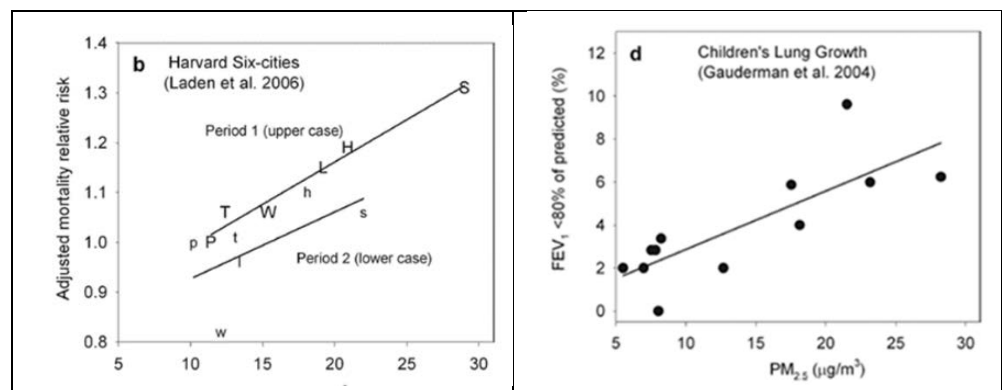
Op basis van voorgaande prioritering wordt in de volgende paragrafen nader ingegaan op het effect van de fijnstof concentratie op de acute en lange termijn gezondheidsschade.



Figuur 20 schatting van ziektelast uitgedrukt in DALY's ten gevolge van blootstelling aan binnenluchtverontreinigingen in US woningen (Logue, 2012). Het rode punt is de ziektelast ten gevolge van blootstelling aan vocht en schimmel.

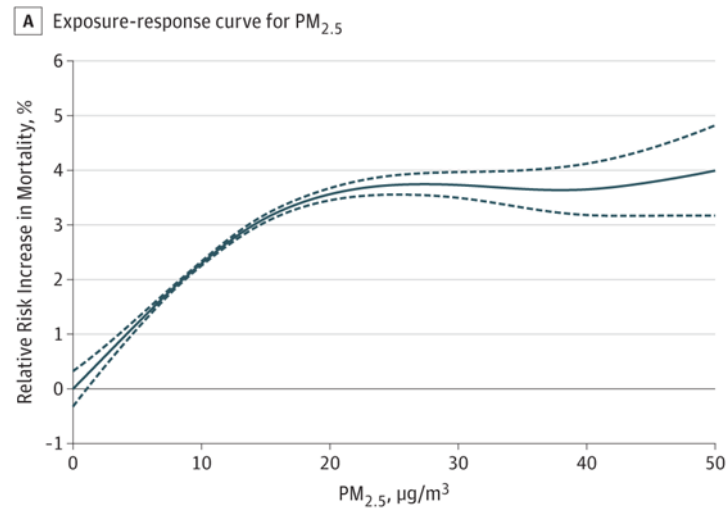
4.1.2 PM_{2.5} fijnstof

Figuur 21 laat zien dat er een lineair verband bestaat tussen de concentratie PM_{2.5} in de buitenlucht en de sterfte en dat dit effect al ruim onder de jaargemiddelde EU grenswaarde van 25 µg/m³ optreedt. De rechter figuur laat zien dat er ook op kortere termijn effecten optreden bij de longontwikkeling bij kinderen tussen 10 en 18 jaar.



Figuur 21 Links: effect van PM_{2.5} op mortaliteit (Laden et al., 2006), rechts: effect van PM_{2.5} op longcapaciteit bij 18 jarigen uitgedrukt in Forced Expiration Volume (FEV) (Gauderman et al., 2004).

Uit een studie tussen 2000 en 2012 waarbij de relatie is gelegd tussen het overlijden van meer dan 22 miljoen Amerikaanse 65-plussers met de luchtkwaliteit op de dag van het overlijden en de dag ervoor blijkt dat ook op de korte termijn gezondheids- effecten optreden ten gevolge van verhoogde PM_{2.5} concentraties, zie *Figuur 22*.



Figuur 22 blootstelling aan PM_{2.5} veroorzaakt additionele sterfte op de volgende dag, zonder dat er sprake is van een drempelwaarde (Qian et al., 2017).

De WHO (2010) heeft aangegeven dat de PM₁₀ en PM_{2.5} advieswaarden van respectievelijk 20 en 10 µg/m³ jaargemiddeld ook van toepassing zijn op binnenruimtes, zie blz 4 Introduction: *“The steering group assisting WHO in designing the indoor air quality guidelines concluded that there is no convincing evidence of a difference in the hazardous nature of particulate matter from indoor sources as compared with those from outdoors and that the indoor levels of PM₁₀ and PM_{2.5}, in the presence of indoor sources of PM, are usually higher than the outdoor PM levels. Therefore, the air quality guidelines for particulate matter recommended by the 2005 global update are also applicable to indoor spaces and a new review of the evidence is not necessary at present.”*

Morawska (2013) schat dat 10 tot 30% van de ziektelast ten gevolge van fijnstof afkomstig is van deeltjes die in het binnenmilieu worden geproduceerd. Binnenmilieu is hiermee een dominante factor wat betreft gezondheid. Echter vanwege uitdagingen om epidemiologisch onderzoek te verrichten in het binnenmilieu is de rol van in het binnenmilieu geproduceerde deeltjes volgens Morawska nog niet volledig erkend.

Chi (2018) heeft gezondheidseffecten van PM_{2.5} afkomstig van buitenlucht en van binnenbronnen op COPD patiënten en hun gezonde partners met elkaar vergeleken en geconcludeerd dat deze verschillend zijn. Gedurende het stookseizoen is blootstelling aan binnen gegenereerd fijnstof geassocieerd met een reductie van de longfunctie bij de COPD patiënten en bij de gezonde partners was fijnstof van buiten geassocieerd met een stijging van de bloeddruk. Buiten het stookseizoen was blootstelling aan fijnstof van buiten bij de gezonde partners geassocieerd met een reductie van de longfunctie.

Uit onder andere Noors (Gao, 2016) onderzoek blijkt dat er tijdens het aansteken en het bijvullen van de houtkachel emissies kunnen optreden. Uit veldonderzoek door Siponen (2019) in Finse woningen werd geconcludeerd dat relatief kortstondig kachel stoken en kaarsen branden de dagelijkse blootstelling van de bewoners significant verhoogde aan potentieel gevaarlijk door verbranding ontstaan roet.

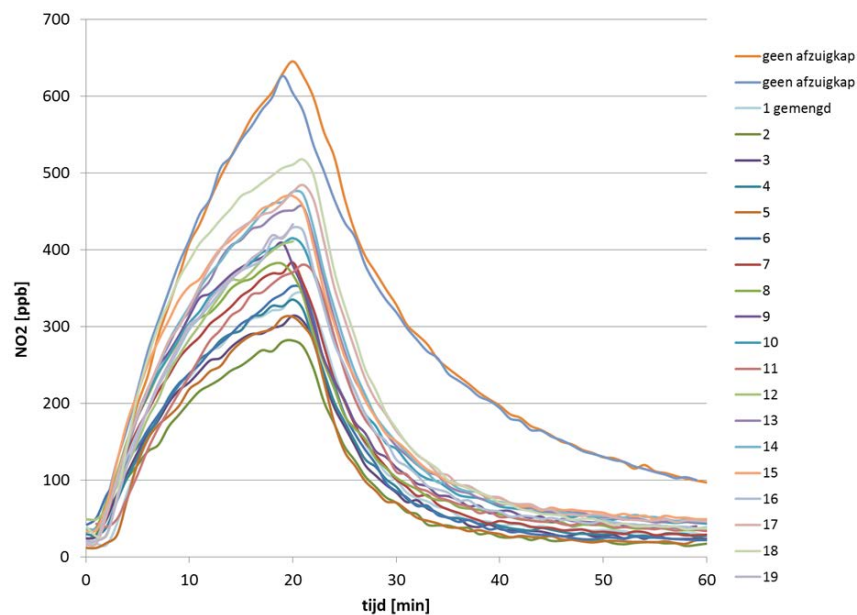
4.1.3 *Vocht en schimmel*

Pekkanen (2007) heeft de vochtschade in woningen met kinderen met en zonder astma door inspecteurs onderzocht. Hieruit bleek dat in woningen waar vochtschade en zichtbare schimmel in de vertrekken waar de kinderen veel tijd doorbrachten zoals de woonkamer, keuken, en met name in de eigen slaapkamer er een verhoogd risico op astma is geconstateerd. Vochtschade en schimmel in andere ruimtes zoals de kelder, zolder of de badkamer verhoogde het risico op astma niet. Mogelijk zijn de condities in de badkamer anders en zorgt dit voor andere groei en emissie condities. Ook staat de badkamer meestal onder een negatieve druk, waardoor wellicht verspreiding naar de rest van de woning wordt voorkomen. Ook het verblijf in de badkamer is veel korter dan in de slaapkamer en woonkamer.

De WHO (2011) schat dat vocht en schimmel samen 90 DALY's per 100.000 kinderen per jaar veroorzaken door de ontwikkeling van astma. Zichtbare vocht en schimmelplekken nemen af in de Nederlandse woningen, zie paragraaf 3.3. Dit is ook in Frankrijk het geval. Echter in Frankrijk (Derbez, 2018) is ook gerapporteerd dat in zeer energie efficiënte renovatie en nieuwbouw woningen (NZEB) meer verborgen schimmel (47%) voorkomt dan in bestaande woning voorraad (37%). Dit zal nader op een grotere schaal worden onderzocht in de Franse derde nationale database analyse.

4.1.4 *Koken op gas*

Koken op gas veroorzaakt naast ultrafijnstof ook stikstofdioxide (NO₂) emissies en is volgens de WHO (2010) geassocieerd met een verhoging van de kans op luchtwegklachten bij kinderen met 20%. Afvoerloze gasverbranding wordt in AIVC Technical Note 68 Residential Ventilation and Health (2016) als een belangrijke bron van contaminanten genoemd: NO₂, CO, acroleïne en ultrafijnstof. Dennekamp (2001) concludeert op basis van laboratorium experimenten dat zonder afzuiging en bij matige ventilatie door koken op gas kortstondig dermate hoge NO₂ concentraties (1000 ppb = 2000 µg/m³) kunnen worden bereikt dat nadelige gezondheidseffecten te verwachten zijn. Tijdens recente laboratorium metingen (Jacobs, 2017b) bij koken op gas in combinatie met een recirculatiekap met een zogenaamd ionisatiefilter is een piek concentratie van 1155 µg/m³ vastgesteld. Ook is in dit onderzoek vastgesteld dat een nieuw koolfilter circa 60% van het NO₂ verwijderd en dat dit binnen enkele weken gebruik naar 20% zakt. Ook de PM_{2.5} afvangst van een dergelijk koolfilter is beperkt tot circa 30%. Aangezien momenteel in Nederland 50% van de verkochte afzuigkappen als recirculatieafzuigkap wordt verkocht is dit met name bij koken op gas een punt van zorg.



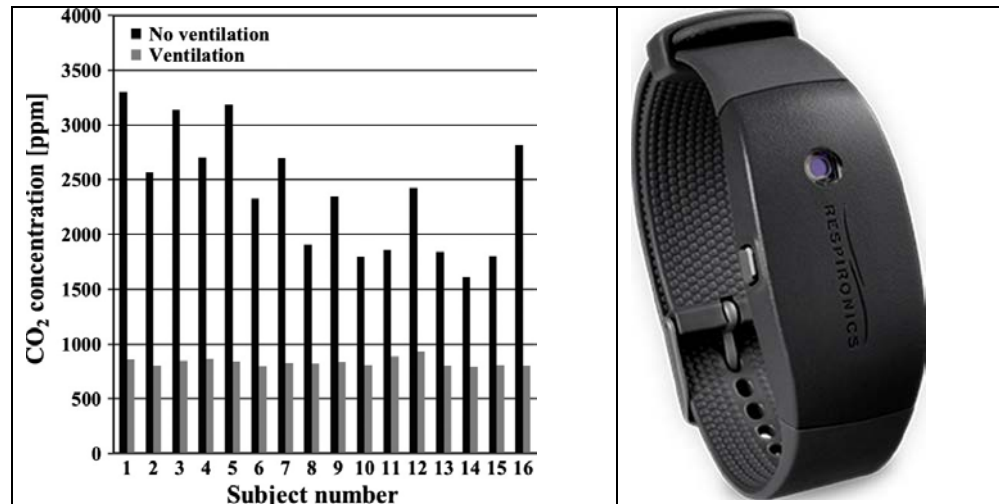
Figuur 23 NO₂ concentratie (1 ppb = 2 µg/m³) in proefkamer bij simuleren van 19 dagen koken op gas met gebruik van een recirculatiekap. Ter referentie zijn twee metingen zonder afzuigkap uitgevoerd (Jacobs, 2017d).

In de US heeft Mullen (2016) in 352 woningen CO, NO₂, formaldehyde en acetaldehyde gemeten. NO₂ en CO waren duidelijk verhoogd in woningen waar op gas werd gekookt ten opzichte van woningen waar elektrisch werd gekookt. Paulin (2014) heeft een interventiestudie uitgevoerd in Baltimore City. Vervanging van het gasfornuis door een elektrisch fornuis resulteerde in een 51% lagere NO₂ concentratie in de keuken. Plaatsing van een luchtreiniger met een HEPA en een koolfilter resulteerde in een afname van 27%, wat na drie maanden was gezakt naar 20%. De derde interventie was het plaatsen van een afzuigkap. Dit had echter geen significante verandering tot gevolg. De reden hiervoor is onduidelijk, mogelijk werden de afzuigkappen niet gebruikt of hadden ze te weinig capaciteit. Logue (2014) heeft een simulatiestudie uitgevoerd naar blootstelling aan NO₂ en CO in Californische woningen. Zij concludeerde dat indien wordt gekookt zonder afzuigkap, dat in 55 - 70% van de Californische woningen de NAAQS 1-uurs acute standaard van 188 µg/m³ wordt overschreden tijdens een typische week in de winter. Door gebruik van afzuigkappen die 55% van de emissies invangen, werd het overschrijdings- percentage teruggebracht tot 18 - 30% van de woningen.

4.2 Slaapkwaliteit en productiviteit

Op de campus van de Technische Universiteit Denemarken (DTU) is in eenpersoons slaapkamers een exploratief onderzoek uitgevoerd naar het effect van slaapkamer condities op slaapkwaliteit en productiviteit: "The effects of bedroom air quality on sleep and next-day performance (Strom-Tejsen et al, 2015)". In een pilot was eerst bij 14 personen het effect van open ramen bestudeerd, vervolgens is een CO₂ gestuurd ventilatiesysteem geïnstalleerd en is bij 16 personen de CO₂ concentratie en de slaapkwaliteit gemeten met in- en uitgeschakeld ventilatiesysteem zonder dat de deelnemers wisten aan welke toestand ze werden

blootgesteld (blind). De slaapkwaliteit was beoordeeld op basis van objectieve meetdata van een Philips bewegingssensor zie Figuur 24 en zelf gerapporteerde slaapkwaliteit. Daarnaast werden bij ontwaken een aantal test uitgevoerd, waaronder een grammaticale redeneertest.

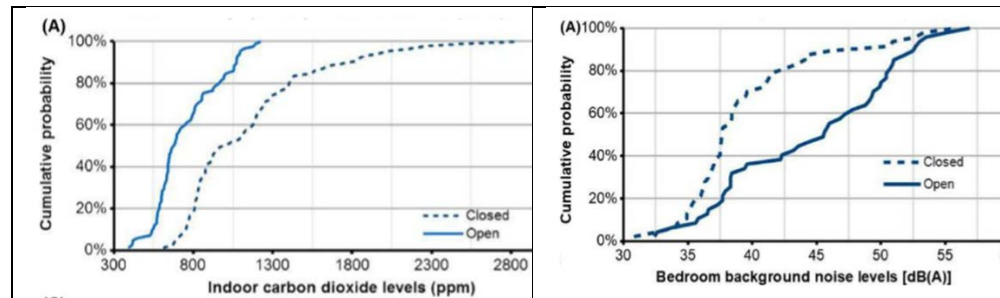


Figuur 24 Links gemiddelde CO₂ concentratie gedurende 4 nachten met en zonder CO₂ gestuurde ventilatie, rechts Philips Actiwatch 2 die tijdens het slapen gedragen werd.

Met ventilatie ingeschakeld was de slaap efficiëntie, het percentage van de tijd in bed dat slapend werd doorgebracht, significant hoger ($P < 0,0494$). In het pilot experiment met open of gesloten ramen vielen de testpersonen eerder in slaap met raam open ($P < 0,0480$). Er was een niet significante tendens voor slaap efficiëntie ($P < 0.0736$) met open ramen. Mogelijk wordt dit veroorzaakt doordat er met open ramen een hogere kans is op buitengeluid, die de slaap kan verstoren. De pilot en de meting afzonderlijk gaven geen significant effect wat betreft de grammaticale redeneertest. Combinatie van beide metingen levert volgens de onderzoekers wel een significant effect op van ongeveer 3% prestatieverbetering op de volgende dag.

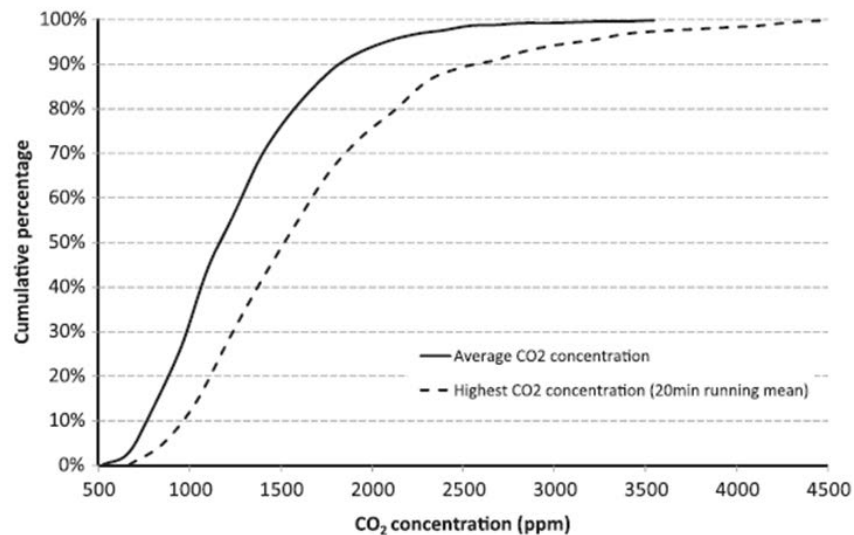
Mishra (2018) heeft in Eindhoven een soortgelijk onderzoek uitgevoerd naar het effect van open of gesloten ramen en open of gesloten slaapkamerdeur op slaapkwaliteit bij 17 proefpersonen. Met open ramen/deuren was de CO₂ concentratie significant verlaagd, zie Figuur 25, en is een significant ($P < 0,003$) diepere/betere slaap geconstateerd op basis van een Sensewear armband. Ook de zelf gerapporteerde diepte van de slaap was significant beter bij open ramen. De slaapduur was niet significant langer. Mogelijk speelt hierbij een rol dat door het open raam / deur het geluidsniveau in de slaapkamer ook significant hoger was, zie Figuur 25 rechts. Ook kan het feit dat de testen niet blind zijn uitgevoerd ook effect hebben gehad op de zelf gerapporteerde resultaten.

Niet alle onderzoeken rapporteren een positief effect van een open slaapkamer raam. Laverge (2011, 2012) heeft eerst 6 en later 22 Belgische studenten gevraagd om te slapen bij open en gesloten slaapkamer raam, dus bij hoge ventilatie en lage ventilatie. Met open ramen was de slaap efficiëntie lager dan met ramen dicht, dit was een onverwacht resultaat maar niet significant. Mogelijk door dit negatieve resultaat zijn deze onderzoeken als conferentie proceeding gepubliceerd en niet als een peer reviewed artikel.



Figuur 25 links, cumulatieve waarschijnlijkheid plot van CO₂ concentratie in slaapkamer en rechts, verschil in achtergrond geluid in open / gesloten conditie (Mishra, 2018).

Ook in andere Europese landen is de ventilatie in de slaapkamer onvoldoende. Beko (2010) heeft in 500 Deense slaapkamers van kinderen tussen 1 en 5 jaar oud de CO₂ concentratie gemeten, zie Figuur 26. In slechts 32% van de slaapkamers bleef de gemiddelde concentratie onder 1000 ppm.



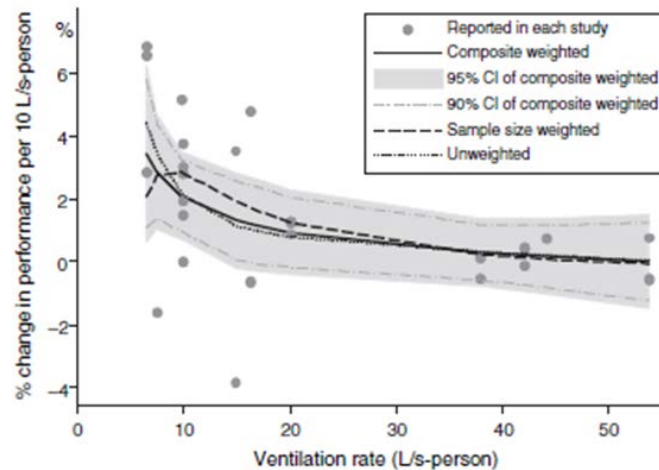
Figuur 26 Cumulatief percentage distributie van de gemiddelde CO₂ concentratie tussen 21.00 en 7.00 uur in 500 Deense kinderkamers. De stippellijn geeft het 20 minuten gemiddelde weer van de hoogste concentratie (Beko, 2010)

Conclusie en advies slaapkwaliteit en productiviteit

De conclusie van Strom-Tejsen in een exploratief onderzoek wat betreft een mogelijke 3% prestatieverbetering op de volgende dag is met name een interessante bevinding aangezien op basis van de gepresenteerde monitoringsresultaten in paragraaf 3.2 miljoenen Nederlandse slaapkamers matig geventileerd zijn en er dus een enorm verbeter potentieel is. Aanbevolen wordt om aanvullende studies uit te voeren met een grotere steekproef in combinatie met een effectieve interventie om de ventilatie in de slaapkamer te verbeteren, zonder dat daarbij het geluidsniveau toeneemt en waardoor "blind" testen mogelijk zijn.

4.3 Productiviteit in kantoren en scholen

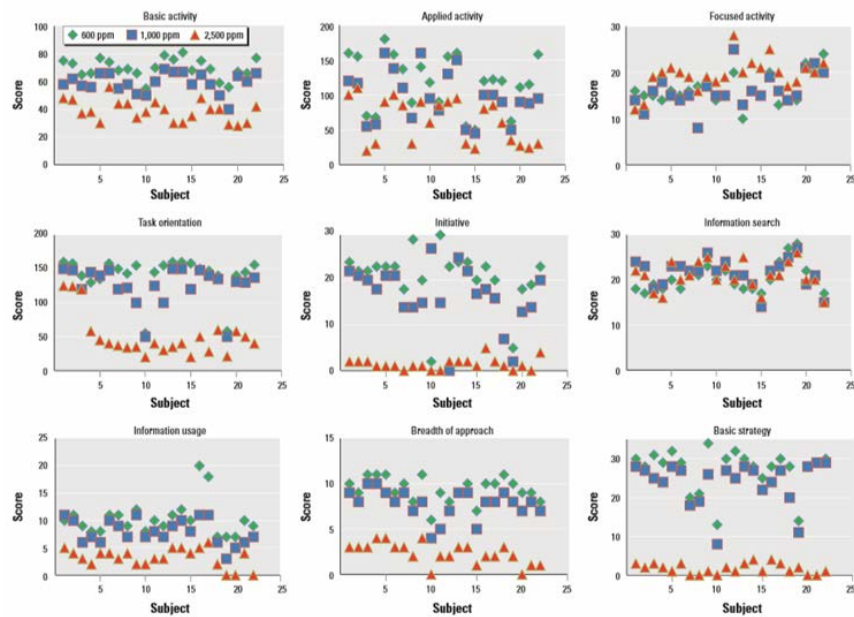
Het effect van binnenlucht op prestaties is met name in kantoren en scholen onderzocht. Seppanen (2007) heeft een aantal onderzoeken gegroepeerd, zie Figuur 27.



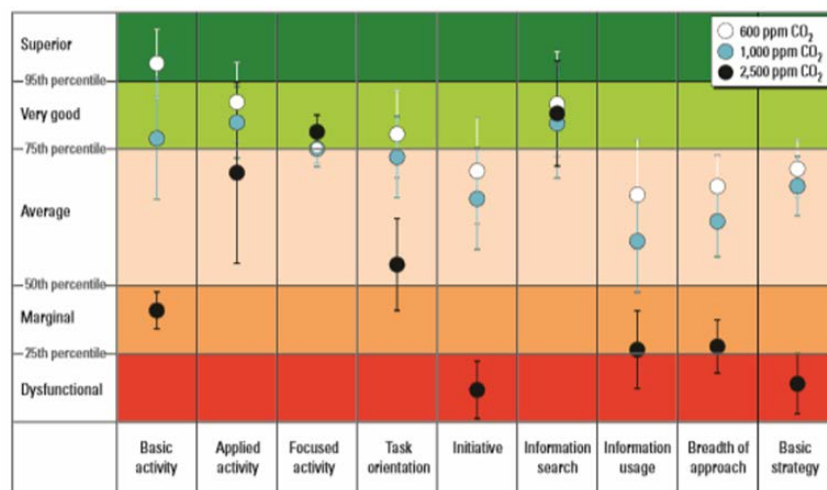
Figuur 27 effect van het ventilatiedebiet op de relatieve prestatie in kantoren (Seppanen, 2006).

Typisch wordt 1 – 3% prestatieverbetering bereikt per 10 l/s per persoon toename. Deze relatie is significant (95% betrouwbaarheid) tot 15 l/s per persoon. Seppanen constateert dat deze relatie daarboven een grote mate van onzekerheid heeft. Uit figuur 27 blijkt dat er ook in een aantal onderzoeken een negatief effect optreedt. Echter gebruik van deze relatie in het ontwerp is volgens Seppanen toch aan te bevelen. In bestekken voor kantoorgebouwen staat zeker al vanaf 2000 vermeld dat er 50 m³/uur per persoon in de kantoren en vergaderruimten dient te worden toegevoerd. Het recent verschenen Programma van Eisen gezonde kantoren (2018) gaat uit van een CO₂ verhoging van maximaal 400 ppm ten opzichte van buiten. Dit wordt bij normaal kantoorwerk bereikt met 60 m³/uur verse lucht toevoer. In de meeste Nederlandse kantoren is de ventilatie ontworpen op een minimaal ventilatiedebiet van 50 m³/uur per persoon (13,9 l/s persoon). Bij bezetting volgens ontwerp zal dus slechts beperkt een prestatiewinst te behalen zijn. Deze bezetting volgens ontwerp geldt echter niet voor veel vergaderruimtes die na oplevering zijn toegevoegd. In de literatuur zijn merkwaardig genoeg geen data vindbaar over de ventilatie en luchtkwaliteit in vergaderzalen. Wel is er informatie over de zelf gerapporteerde productiviteit. Uit onderzoek in OFFICAIR door Bluijssen (2015) volgt dat 29% van de kantoormedewerkers verwacht dat het klimaat van hun directe kantooromgeving effect heeft op de productiviteit en slechts 17% wat betreft de overige ruimtes waaronder vergaderzalen. Uit eigen onderzoek blijkt dat in veel kantoren de ventilatie in deze vergaderruimtes niet of onvoldoende aangepast is waardoor de ventilatie nog steeds op de typische kantoorruimte, waarbij elke medewerker 7 m² tot zijn beschikking heeft, is gebaseerd. In de US wordt door ASHRAE 62.1 (2013) een debiet van 8,5 dm³/s voor kantoren voorgeschreven. Opvallend is dat voor “conference/meeting rooms” slechts 3,1 dm³/s wordt voorgeschreven. Volgens Persily (2017) treden bij toepassing van deze debieten CO₂ verhogingen ten opzichte van de buitenconcentratie op van 568 en 1557 ppm in respectievelijk de kantoorruimte en de vergaderruimte. Satish (2012) heeft in een

proefkamer bij 22 proefpersonen het effect van CO₂ dosering op de prestatie wat betreft het nemen van beslissingen onderzocht. De feitelijke onderzoeksvraag was of CO₂ een marker is of dat het op zichzelf ook effecten heeft. Figuur 28 laat zien dat bij alle activiteiten grote verschillen optreden tussen 600 ppm en 2500 ppm, behalve bij “Focussed activity” en “Information search”. De onderzoeksmethode is toegepast bij meer dan 20.000 Amerikaanse volwassenen, hierdoor is het mogelijk om de resultaten te vergelijken, zie Figuur 29. Bij 2500 ppm zakten “Initiatief” en “Basic strategy” zelfs tot een Dysfunctional niveau. Bij 1000 ppm is er ten opzichte van 600 ppm een beperkte afname te zien. Indien het installatietechnisch lastig is om het ventilatiedebiet in een vergaderruimte te verhogen is het wellicht ook mogelijk om prestaties te verhogen door met een stand-alone luchtreiniger CO₂ te uit de lucht te absorberen.

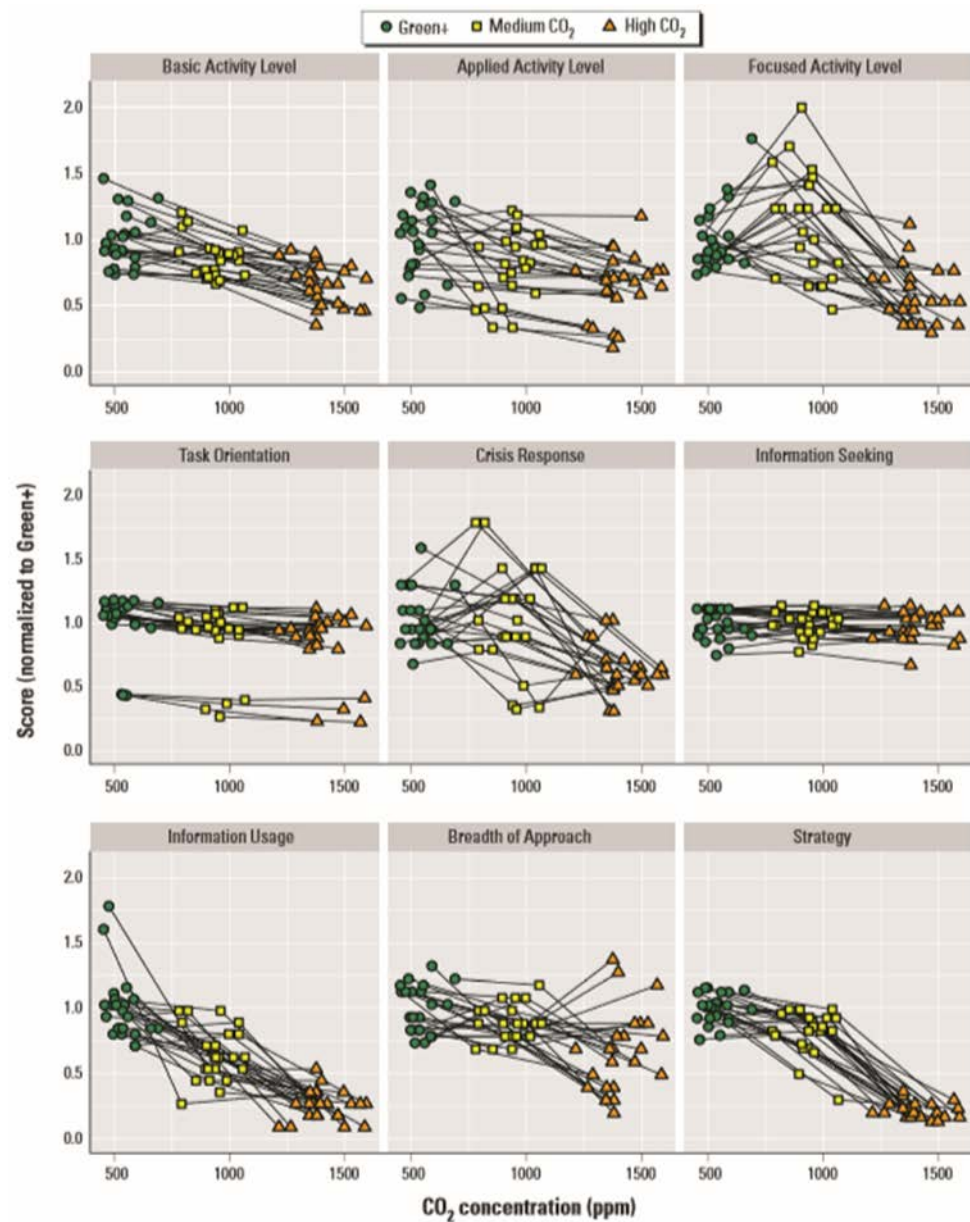


Figuur 28 effect van CO₂ op kantoor werkzaamheden bij 22 proefpersonen (Satish, 2012).



Figuur 29 effect van CO₂ op diverse kantoor werkzaamheden, de foutenbalken geven de spreiding bij 1 standaardafwijking weer (Satish, 2012).

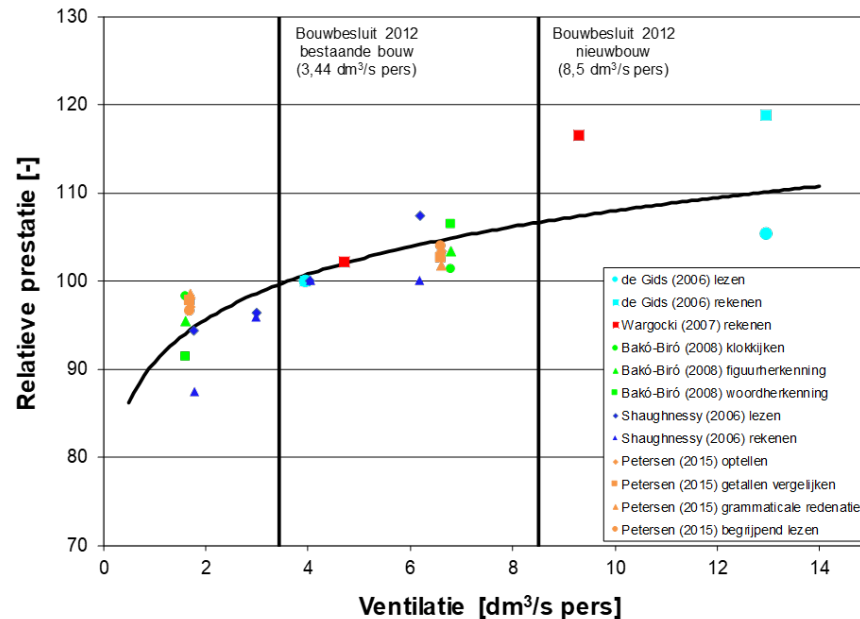
De resultaten uit het proefkameronderzoek zijn door Allen in samenwerking met onder andere Satish (2016) getest in een kantooromgeving. Naast CO₂ dosering en variatie van het ventilatiedebiet is hierbij ook het effect van Vluchtige Organische Koolwaterstoffen (VOC) onderzocht door VOC's te doseren. Aanname is hierbij dat in Green Buildings door zorgvuldige keuze van de inrichtingsmaterialen lagere concentraties VOC optreden. Figuur 30 laat zien dat hogere CO₂ concentraties geassocieerd zijn met lagere prestaties. Uitzonderingen zijn wederom "Information seeking" en "Task orientation". Gemiddeld genomen waren de cognitieve scores 61% hoger in de Green Building situatie (zonder VOC dosering) en 101% in de Green Buildings situatie waarbij ook het ventilatiedebiet van 34 m³/uur was verhoogd tot 68 m³/uur.



Figuur 30 effect van CO₂ op diverse kantoor werkzaamheden (Allen, 2016)

Saari (2006) heeft voor een case study onderzocht hoe een bestaand kantoorpand het best kon worden gerenoveerd. Met name bij arbeid met een hoge toegevoegde waarde blijken een goede ventilatie en temperatuurbeheersing kosteneffectief te zijn omdat hierdoor de productiviteit en het ziekteverzuim afnemen.

Naar het effect van ventilatie op leerprestaties in scholen zijn diverse onderzoeken uitgevoerd, Figuur 31 geeft hiervan een overzicht. Hierin zien we dat leerprestaties sterk afnemen wanneer het ventilatiedebiet lager is dan 4 dm³/s per persoon. Boven 10 dm³/s lijkt de toename in leerprestaties af te vlakken.



Figuur 31 overzicht van studies naar het effect van ventilatie op leerprestaties (Dijken, 2016).

Perceived control

In het EU onderzoek OFFICAIR (Bluijssen, 2015) is in 167 kantoren het verband onderzocht tussen de eigenschappen van de kantoren en de zelf gerapporteerde gezondheid en comfort. Een toename van 'perceived control' over het binnenklimaat was positief geassocieerd met de 'perceived indoor air quality'. Zo zorgt het ontbreken van te openen ramen voor meer ontevreden medewerkers. Specifiek voor Nederlandse kantoren heeft Boerstra (2016) onder andere het effect van te openen ramen onderzocht. Kantoormedewerkers die de mogelijkheid hebben om ramen te openen of de mogelijkheid om met een thermostaat de temperatuur in te stellen zijn significant meer tevreden over de perceived control als kantoormedewerkers die deze mogelijkheden niet hebben. Ook toont Boerstra een significante en positieve relatie tussen perceived control en de comfort perceptie, de algemene tevredenheid met het binnenmilieu en de zelf-aangegeven productiviteit. "High control" respondenten schatten zichzelf 4,5% productiever in als "low control" respondenten.

Opmerkelijk echter was dat in een laboratorium experiment juist een verbetering van de zelf ingeschatte productiviteit van 4,2% ten gevolge van een situatie met minder perceived control is vastgesteld. Ook de middels objectieve testen vastgestelde prestatie voor optellen en vermenigvuldigen was respectievelijk 10,4 en 8,4% hoger in de situatie met minder perceived control. Boerstra verklaart dit met de "cognitive load" theorie: het werkgeheugen van het menselijke brein heeft een beperkte capaciteit en kan overbelast raken indien het met teveel (complexe) taken wordt belast.

Als praktische aanbevelingen geeft Boerstra:

- Vermijdt 'dummy' thermostaten, ontwerp op een thermostaatsnelheid > 2 K/uur;
- Pas micro-klimatisering toe in kantoortuinen, zoals bijvoorbeeld in Figuur 32.



Figuur 32 lokale klimatisering op de werkplek: verwarmbaar bureaublad, instelbare verkoeling door luchtinblazen, lokale verlichting (bron: www.ahrend.com/nl/innovationlab/comfortwerkplek/).

4.4 Effect van binnenlucht kwaliteit op ziekteverlof

Shendell (2004) heeft ziekteverlof van basis- en middelbare school leerlingen in de staten Washington en Idaho gecorreleerd aan de CO₂ concentratie, een maat voor voor het ventilatiedebiet per leerling. Meer dan de helft van de scholen had een CO₂ concentratie verhoging van meer dan 1000 ppm boven de buitenlucht concentratie. Een dergelijke concentratieverhoging was geassocieerd met een verlaging van 0,5 tot 0,9% van de jaarlijks gemiddelde dagelijkse aanwezigheid. Dit verklaart 10 tot 20% van de totale afwezigheid van de leerlingen. Als verklaring geeft Shendell dat door verlaging van de ventilatie overdraagbare luchtwegaandoeningen toenemen, waarschijnlijk door verhoging van de concentratie van in de lucht zwevende infectieuze deeltjes die tijdens hoesten of niezen worden geproduceerd. Deze associatie tussen ventilatiedebiet en afwezigheid van leerlingen is in 2013 ook door Mendell gevonden voor basisscholen in Californië. Het is niet duidelijk of een dergelijke relatie tussen ventilatiedebiet en afwezigheid ook geldt voor de leerkrachten. Maar mocht dit zo zijn dan zou verbetering van de ventilatie een bijdrage kunnen leveren aan het oplossen van het lerarentekort.

Milton (2000) heeft in 40 Amerikaanse gebouwen de ventilatie gerelateerd aan het ziekte verzuim. Onder kantoormedewerkers bedroeg het relatieve risico op kortdurend ziekteverzuim 1,53 bij lagere ventilatie (43 m³/uur) ten opzichte van hogere ventilatie (86 m³/uur).

Rackes (2018) heeft een simulatiestudie uitgevoerd met zes variabelen die samenhangen met het ventilatiedebiet: 1) arbeidsproductiviteit, 2) ziekteverzuim, 3) PM_{2.5}, 4) Ozon uit buitenlucht, 5) elektriciteitsverbruik en 6) gasverbruik. Bij het elektriciteitsverbruik werden niet alleen de productiekosten maar ook de maatschappelijke kosten ten gevolge van bijvoorbeeld blootstelling aan fijnstof uitgestoten door een kolen gestookte centrale en ook de broeikasgas effecten van deze uitstoot. De ventilatie-strategie aanbevolen op basis van deze simulaties was altijd degene die het hoogste ventilatiedebiet leverde, groter dan 45 dm³/s per persoon (162 m³/uur) ongeacht het gebouw, de tijd van het jaar of enige andere voorwaarde. Alleen bij het combineren van zeer lage parameter inschattingen voor IAQ winstgevende effecten met zeer hoge parameter inschattingen voor de negatieve gezondheids- en energie effecten wordt een ventilatiedebiet van 13 dm³/s per persoon (47 m³/uur) aanbevolen.

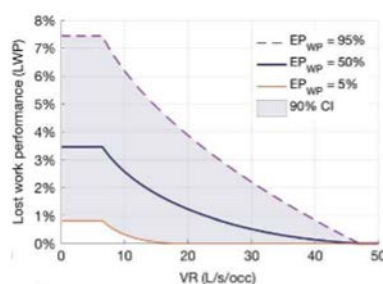


FIGURE 2 Lost work performance as a function of total ventilation rate (VR), at the 95th, 50th, and 5th estimate percentiles (EP) spanning the 90% confidence interval (CI)

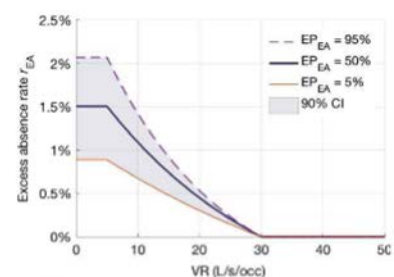
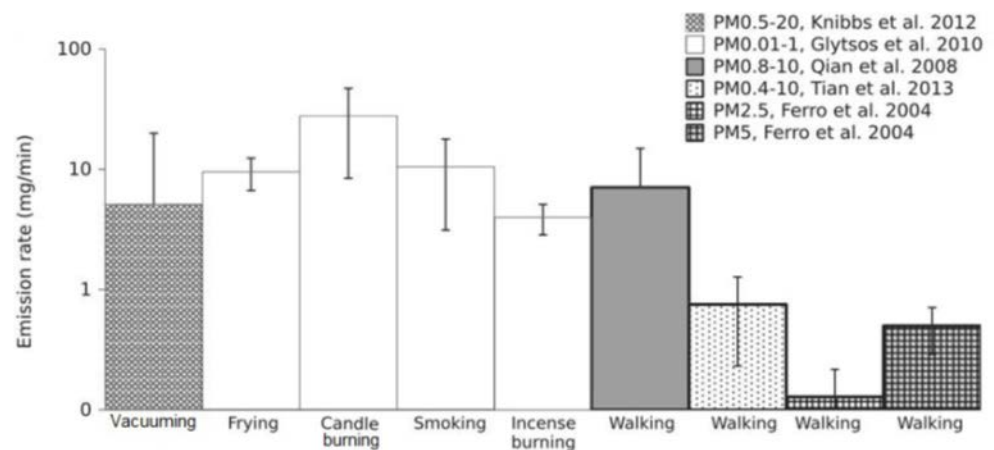


FIGURE 3 Excess absence rate r_{EA} as a function of total ventilation rate (VR), at the 95th, 50th, and 5th estimate percentiles (EP) spanning the 90% confidence interval (CI)

Figuur 33 aannamen van Rackes (2018) wat betreft verloren arbeidsproductiviteit (Figure 2), en extra ziekteverzuim (Figure 3) als functie van het ventilatiedebiet.

5 Effectieve maatregelen voor particulieren

Figuur 34 geeft een logaritmische weergave van een aantal bronsterkten van Particulate Matter (PM) in woningen. Naast verbrandingsprocessen (roken, koken en stoken) kan resuspensie in de vorm van stofzuigen, lopen of spelende kinderen een belangrijke bron van fijnstof in woningen vormen. Let op dat de emissies in verschillende eenheden zijn gegeven. Resuspensie door lopen levert met name fijnstof in de grove fractie groter dan $2,5 \mu\text{m}$ op. Deze fractie komt minder ver in de longen en slaat door uitzakking ook sneller neer dan de $\text{PM}_{2.5}$ fractie.



Figuur 34 overzicht van bronsterkte van enkele bronnen van fijnstof (PM), NB naast $\text{PM}_{2.5}$ zijn ook andere deeltjesfracties weergegeven (Butler et al, 2016)

Voor de indeling van de maatregelen in Tabel 4 is de arbeidshygiënische prioritering toegepast: als eerste stap worden bronnen weggenomen, als dat niet mogelijk is wordt in de tweede stap compartimentering en bronafzuiging toegepast, en dan pas wordt als derde stap de verontreiniging met ventilatie verdund. Interessant is dat bijna alle maatregelen in Tabel 4 een lage complexiteit hebben, met andere woorden ze kunnen door de bewoner zelf tegen relatief geringe kosten worden uitgevoerd. Het is bijvoorbeeld eenvoudig om zelf sluitende ventielen in de afvoer te plaatsen, met geringe kosten. Hierdoor worden bij inschakeling van de kookafzuiging andere afvoerpunten gesloten. In de literatuur is alleen de kosteneffectiviteit bij filtering vermeld. Plaatsing of verbetering van luchtfilters in het ventilatiesysteem of plaatsing van stand-alone luchtreinigers hebben beide een kosten effectiviteit van meer dan een factor 10 (Fisk, 2017). Dat wil zeggen dat de gezondheidswinst uitgedrukt in euro's een factor tien zo groot is als de kosten van de maatregel.

In het TKI project Be Aware is een schatting gemaakt wat het effect is van effectieve kookafzuiging en filtering van de ventilatielucht in een luchtdichte woning op de totale blootstelling gedurende een week, zie Tabel 5. Hiervoor is aangenomen dat een persoon zich gemiddeld 63 uur in de slaapkamer bevindt, 45 uur in de woonkamer/keuken, 40 uur op het werk en 20 uur in het verkeer of de buitenlucht. Voor de blootstelling op het werk is een gemiddelde $\text{PM}_{2.5}$ concentratie van 25% van de buitenconcentratie met een minimum van $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aangenomen.

Tabel 4 maatregelen om luchtkwaliteit in woningen te verbeteren met inschatting van effectiviteit en complexiteit om de maatregel zelf te implementeren (*kosten effectiviteit).

Contaminant	Type	Maatregel	Effect	complexiteit	Literatuur ref.
PM _{2.5} door roken	Bron	Stoppen met binnen roken	100%	Laag	
NO ₂ koken op gas	Bron	Inductief koken	100%	Middel	MilieuCentraal 2019
PM _{2.5} door kaarsen	Bron	Elektrische waxine lichtjes en kaarsen	100%	Laag	
PM _{2.5} , roet	Bron	Geen openhaard of kachel meer stoken	100%	Laag	
Ftalaten	Bron	PVC vloerbedekking uit slaapkamer verwijderen	?	Middel	Shu 2014
PM _{2.5} bij bakken en braden	Bronafz.	Afzuigkap met 95 dm ³ /s en bakken op voorste pitten	75%	Middel	Singer 2012
		Goede afzuigkap 83 dm ³ /s bij bereiden 4 typische NL maaltijden	> 93%	Middel	O'Leary 2019
		Afzuigkap 83 dm ³ /s die voorste pitten niet bereikt (slechte afz.kap)	70%	Middel	VentKook, 2018
		Goede motorloze afzuigkap op afzuigventiel met 75 m ³ /uur	50%	Laag	
		Idem, in combinatie met zelfsluitende ventielen (afzuigdebiet 130 m ³ /uur)	70%	Laag	
Slechte motorloze afzuigkap op afzuigventiel met 75 m ³ /uur	25%	Laag			
NO ₂ koken op gas	Bronafz.	Afzuigkap met afvoer naar buiten installeren en gebruiken	67%	Middel	Logue 2014
PM _{2.5} bij bakken	Comp+filter	Recirculatie afzuigkap	< 30%	Laag	Jacobs, 2017b
PM _{2.5}	Comp+filter	HEPA filters in ademzone van astmatici tijdens slapen	99%	Laag	Fisk 2013
PM _{2.5}	Filtering	Verbeteren filterkwaliteit in US woning ventilatiesysteem	> 10*	Laag	Fisk 2017
		Plaatsen stand alone HEPA filters	> 10*	Laag	
PM _{2.5}	Filtering	Verhogen filterkwaliteit ventilatietoever (reductie% t.o.v. buiten)	> 97%	Laag	Singer 2017
PM _{2.5}	Filtering	Plaatsen decentrale filterunits in 8 interventie studies	40 – 60%	Laag	Day 2018
PM _{2.5}	Filtering	Ionisatie recirculatie filter op basis van ozon productie	negatief	Laag	Waring 2008
PM _{2.5}	Filtering	HEPA filter op stofzuiger	99%	Laag	Lioy 1999
VOC	Biofiltering	Potplanten	nihil	Laag	Moya 2019
CO ₂	Ventilatie	Verbeteren luchtkwaliteit in slaapkamer door beter roostergebruik		Laag	
		Idem door plaatsen zelfregelende roosters		Middel	
		Idem door installatie van mechanische toe- of afvoer		Hoog	

Dit is een typische reductie in een kantoorgebouw waarin conventionele luchtfilters (F7) in de luchtbehandeling worden toegepast (Jacobs, 2015). In Tabel 5 is duidelijk het effect van de buitenlucht concentratie te zien. Gedurende een week met een buitenluchtconcentratie van $11,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, dit is voor Nederland momenteel de jaargemiddelde buitenluchtconcentratie, kan kookafzuiging voor een reductie van 11 – 22% van de totale blootstelling zorgdragen. In combinatie met een F7 filter in de ventilatietoevoerlucht (aanne 75% rendement op $\text{PM}_{2,5}$, filterkosten per jaar ca. 25 euro) neemt de week gemiddelde blootstelling af naar $3,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Deze relatief hoge reductie van 52% kan worden bereikt omdat dan niet alleen in de keuken/woonkamer een lagere concentratie wordt bereikt maar ook in de slaapkamer waar relatief veel tijd wordt doorgebracht.

Tabel 5 samenvatting van weekgemiddelde blootstelling bij drie buitenlucht concentraties voor verschillende ventilatiesystemen (C = natuurlijke toevoer en mechanische afvoer, D = gebalanceerde ventilatie) in een woning met een $q_{v,10}$ van $20 \text{ dm}^3/\text{s}$ (Bron: TKI Be Aware)

Buitenluchtconcentratie [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	1		11,5		22	
	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	reductie	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	reductie	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	reductie
C, geen kookafzuiging	2,0		6,2		10,5	
C, met kookafzuiging	0,7	66%	4,9	22%	9,1	13%
D, geen kookafzuiging	1,8		6,7		12,1	
D, met kookafzuiging	0,7	59%	6,0	11%	11,2	8%
Idem + filtering	0,5	73%	3,3	52%	6,0	50%

Effect van planten

Volgens het RIVM (2011) kan vegetatie de luchtkwaliteit in een stad niet significant verbeteren en kan die zelfs verslechteren. Door de aanwezigheid van vegetatie in of langs straten met verkeer neemt de windsnelheid in die straat namelijk af. Als gevolg hiervan gaan de concentraties van alle stoffen die door het verkeer worden uitgestoten omhoog. De aanwezigheid van vegetatie in een groot gebied kan wel de achtergrondconcentraties van stikstofdioxide en fijn stof positief beïnvloeden, maar het effect is zeer beperkt – in de orde van een half procent tot mogelijk enkele procenten bij grootschalige extra inzet van vegetatie. De onzekerheid hierover in verschillende studies is volgens RIVM aanzienlijk.

In het peer reviewed blad Indoor Air worden met de trefwoorden “air cleaning plants” geen artikelen gevonden. Wel zijn artikelen over zogenaamde “green wall” systemen vindbaar. Dit zijn feitelijk systemen gebaseerd op biofiltratie waarbij lucht actief door aarde of ander groeimedia wordt gezogen. De afbraak vindt dan met name plaats door in de bodem aanwezige micro-organismen. Mikkonen (2018) laat in Fins labonderzoek zien dat voor 7 vluchtige organische stoffen deze biofiltratie op sub-ppm niveau functioneert. Pettit (2017) laat in een Australische laboratorium studie zien dat dergelijke actieve botanische biofilters of “green walls” ook een positief effect hebben op fijnstof verwijdering. De gerapporteerde single pass efficiëntie voor de $\text{PM}_{0,3-0,5}$ fractie bedroeg tussen 10 en 45% bij een drukval van circa 25 Pa.

In de Healthy Buildings conferentie is door Girman (2009) een kritische review gemaakt van het effect van planten op VOC concentraties in woningen en kantoren.

Zijn conclusie is dat planten zeer beperkte of zelfs helemaal geen effect hebben op VOC concentraties in gebouwen.

Moya (2019) werkzaam bij de TUD in de groep van Bluijssen heeft een literatuur review uitgevoerd naar het effect van groene systemen in het binnenmilieu. Zij concludeert dat vegetatie een positief effect heeft op mensen in kantoren. Het verhoogt de algemene tevredenheid en geluk. Echter er is geen hard bewijs dat planten een effect hebben op de prestaties, productiviteit en algemene vermindering van het Sick Building Syndrome. Planten verhogen het comfort alsmede de perceptie van de kwaliteit van hun omgeving, inclusief thermisch comfort en akoestiek. Tenslotte, in onderzoek naar actieve groene systemen, dus in combinatie met ventilatoren, worden significant hogere luchtzuiveringssnelheden gevonden dan met passieve systemen (potplanten). Als aandachtspunt voor de zomer maanden wordt genoemd dat om schimmelgroei te voorkomen het van belang is om de relatieve vochtigheid onder 70% te houden.

6 Onderzoeksvragen maatregelen particulieren

Uit voorgaand hoofdstuk volgt dat de meeste binnenluchtproblemen relatief eenvoudig door de bewoner kunnen worden gereduceerd tegen relatief geringe kosten. Voor een aantal problemen geldt dit niet. Hieronder volgt een lijst met luchtkwaliteitsproblemen in woningen waarvoor nog geen effectieve en betaalbare oplossing voor beschikbaar zijn.

Is het verstandig om een filterunit te kopen met ionisatie?

Deze vraag is niet alleen van toepassing op draagbare luchtreinigers, maar ook op ionisatiefilters die voor plaatsing in recirculatieafzuigkappen worden verkocht. Het is voor particulieren niet duidelijk wat hiervan het gezondheidseffect is. Op de units zitten vaak aanbeveling labels zoals ECARF of van de British Allergy Foundation. Echter in de wetenschappelijke literatuur wordt het veelal afgeraden.

Hoe zorg ik ervoor dat mijn recirculatie afzuigkap fijnstof afvangt?

Huidige recirculatiekappen vangen minder dan 30% van het tijdens het koken gegenereerde PM_{2.5} fijnstof af. In 2019 komt ATAG met een speciaal fijnstof filter op de markt wat geschikt is voor recirculatiekappen. Dit filter is in samenwerking met TNO ontwikkeld.

Hoe kan ik overlast van houtrook het best bestrijden?

Voor moderne luchtdichte woningen met balansventilatie is het mogelijk om de lucht centraal te filteren (Khoury, 2017). Echter in woningen met natuurlijke toevoer is centrale filtering niet mogelijk en dan dient in elk vertrek een luchtreiniger te worden geplaatst wat een relatief dure oplossing is.

Hoe effectief schimmel in woonkamer en slaapkamer te bestrijden?

In een groot deel van de oudere Nederlandse woningen met name in de sociale en particuliere huur komen schimmelplekken op de muren voor. Overschilderen helpt niet, meestal komt de schimmel weer terug. Hoe kan hier effectief mee worden omgegaan?

Hoe kan ik effectief, geluidsarm en energiezuinig mijn slaapkamer ventileren?

Voor het merendeel speelt dit probleem in slaapkamers in bestaande woningen waar sprake is van natuurlijke toevoer. Echter het betreft ook een groot deel van de moderne eengezinswoningen met mechanische toevoer, bijvoorbeeld waar de zolder vaak als een onbenoemde ruimte wordt opgeleverd zonder ventilatievoorzieningen. Hoe kan daar later op een eenvoudige manier ventilatie worden aangebracht?

Heeft een luchtreiniger een positief effect op astma van mijn kind?

Alhoewel er diverse onderzoeken zijn uitgevoerd die aangeven dat luchtreiniging fijnstof uit de lucht filtert en ook een significant effect heeft op biomarkers is het overtuigende bewijs dat het preventief werkt tegen astma of astma reduceert nog steeds niet geleverd.

7 Mind map binnenmilieu onderzoek scholen en kantoren

In de volgende figuren is een mind map / praatwolk gemaakt waar achtereenvolgens de verontreiniging, de blootstelling in Nederland, het effect, de mogelijke maatregelen en de onderzoeksbehoefte zijn beschreven.

Hierbij zijn de belangrijkste verontreinigingen als uitgangspunt genomen, dat zijn vocht/schimmel, PM_{2.5}, ventilatievoud/CO₂ en VOC. Hierbij zijn zowel woningen, kantoren als scholen beschouwd.

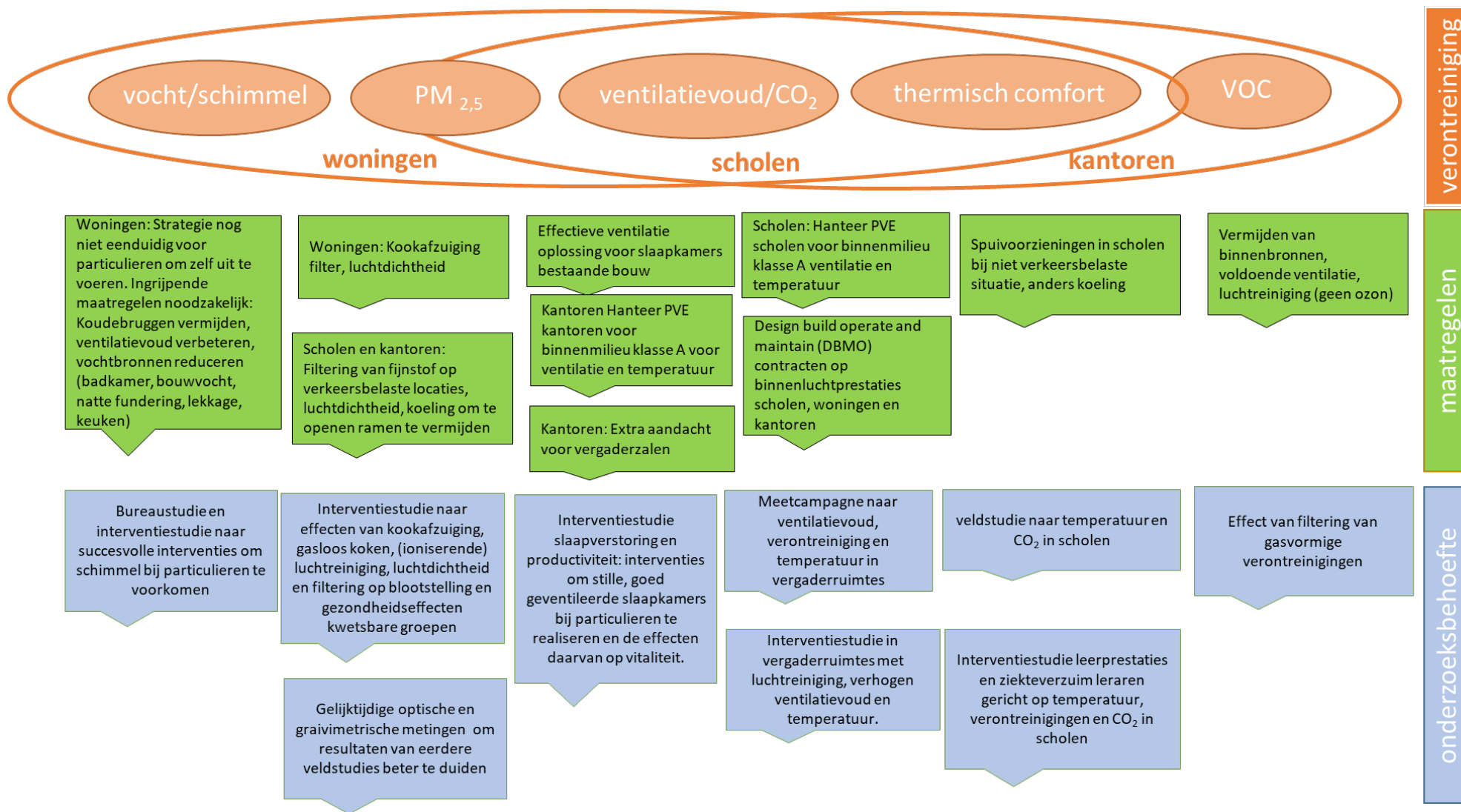


woningen	scholen	kantoren
<p>Tot 10% van de woningen meer dan circa 0,8 m² schimmel in woonkamer en slaapkamer, afhankelijk van bouwjaar en eigendom situatie Dongen en Vos (2007)</p> <p>41% schimmel in badkamer Ginkel en Hasselaar (2005)</p> <p>Vocht en schimmel in woonkamer en slaapkamer is gezondheidsrisico Pekkanen (2007)</p> <p>Vocht en schimmel, 11% van de ziektelast gerelateerd aan binnenmilieu IAIAQ (2011)</p>	<p>90% blootstelling fijnstof in gebouwen, 80% in woningen, piek rondom koken Kluizenaar (2017)</p> <p>Roken, koken, stoken. 50% fijnstof door binnen bronnen, minimaal 1 op de 7 woningen overschrijding WHO jaar gemiddelde advieswaarde, bijna alle woningen overschrijding daggemiddelde WHO advieswaarde BeAware (pending)</p> <p>10 tot 30% van de ziektelast ten gevolge van fijnstof in binnenmilieu geproduceerd. Morawska (2013)</p> <p>PM_{2,5} belangrijkste gezondheidsrisico voor binnenlucht Logue (2012)</p> <p>20% meer luchtwegklachten kinderen koken op gas WHO (2010)</p> <p>PM_{2,5} binnenbronnen geassocieerd met reductie longfunctie COPD patiënten Chi (2019)</p>	<p>90% nieuwbouw woningen ventilatie niet op orde Boerstra (2011)</p> <p>46% slaapkamers CO₂ boven 1200 ppm, gem. 21 uur per week overschrijding Dongen en Vos (2007)</p> <p>Zelfs geen interventie bij CO₂ boven 3500 ppm door bewoner Monicair (2014)</p> <p>Lagere CO₂ concentraties, beter slapen en minder wakker worden Mishra (2017)</p> <p>Onvoldoende ventilatie slaapkamers, slaapverstoring en tot 3% productiviteitsverlies volgende dag Strom-Tejsen, 2015</p> <p>Bij 2500 ppm kantoren initiatief en strategie naar disfunctioneel niveau Satish (2012)</p>
	<p>Veel klachten over onvoldoende ventilatie in vergaderruimte TNO experts</p> <p>37% van de kantoor medewerkers hebben klachten over luchtkwaliteit Bluyssen (2015)</p> <p>71% mechanisch geventileerde scholen boven de 1200 ppm CO₂ Dijken (2019)</p>	<p>45% van de leerkrachten vindt het zomers vaak te warm Versteeg (2007)</p> <p>31% van kantoor medewerkers vindt temperatuur oncomfortabel Bluyssen (2015)</p> <p>5-10% minder productiviteit volwassenen en 30% bij kinderen door thermisch comfort en binnenlucht Wargocki (2017)</p>
		<p>overschrijden VOC advies waarde gezondheidsraad in 40% woningen, alcohol en d-limoneen (luchtverfrisser) Dongen en Vos (2007)</p> <p>weekmakers uit PVC vloerbedekking zijn geassocieerd aan ontwikkeling Astma bij kinderen Shu (2014) Araki (2014)</p> <p>34% kantoor medewerkers last van droge ogen mogelijke oorzaak nabijheid drukke weg Kluizenaar (2016)</p>

verontreiniging

Blootstelling NL

Effect



8 Literatuurlijst

Adan, O., On the fungal defacement of interior finishes. Ph.D. Thesis, TU Eindhoven, 1994.

Allen J. G., MacNaughton P., Satish U., Santanam S., Vallarino J., Spengler J.D., Associations of Cognitive Function Scores with Carbon Dioxide, Ventilation, and Volatile Organic Compound Exposures in Office Workers: A Controlled Exposure Study of Green and Conventional Office Environments, *Environmental Health Perspectives*, Volume 124, number 6, 2016.

Araki A., Saito I., Kanazawa A., Morimoto K., Nakayama K., Shibata E., Tanaka M., Takigawa T., Yoshimura T., Chikara H., Saijo Y., Kishi R., Phosphorus flame retardants in indoor dust and their relation to asthma and allergies of inhabitants, *Indoor Air* 24:3–15, 2014.

ASHRAE 62.1-2013 Ventilation for acceptable indoor air quality.

BBA Binnenmilieu, Exploratieve analyse meetdata Inhome Air Quality, Oktober 2018.

Be Aware, TKI project, eindrapportage wordt eind 2019 uitgebracht.

Bekö G., Lund T., Nors F., Toftum J., Clausen G., Ventilation rates in the bed rooms of 500 Danish children, *Building and Environment*, 45: 2289 – 2295, 2010.

Bluyssen P. M., Roda C., Mandin C., Fossati S., Carrer P., Kluizenaar Y., Mihucz V.G., Oliveira Fernandes E., Bartzis J., Self-reported health and comfort in 'modern' office buildings: first results from the European OFFICAIR study, *Indoor Air*, 2015

Boerstra A.C., van Dijken F., Onderzoek naar de kwaliteit van ventilatiesystemen in nieuwbouw eengezinswoningen, 2011.

Boerstra A.C., Personal Control over Indoor Climate in Offices, proefschrift, TUE, 2016.

Bornehag C.G., Sundell J., Weschler C.J., Sigsgaard T., Lundgren B., Hasselgren M., Hagerhed-Engman L., The Association between Asthma and Allergic Symptoms in Children and Phthalates in House Dust: A Nested Case–Control Study, *Environmental Health Perspectives*, 112: 1393 – 1397, 2004.

Borsboom W., et al. 2016. Technical Note AIVC 68 Residential Ventilation and Health (<https://www.aivc.org/resource/tn-68-residential-ventilation-and-health>)

Brauner et al., Indoor particles affect vascular function in the aged, *American Journal of Respiratory and critical care medicine*, vol. 177, 2008.

Broderick A, Byrne M., Armstrong S., Sheahan J., Coggins A.M., A pre and post evaluation of indoor air quality, ventilation, and thermal comfort in retrofitted co-operative social housing, *Building and Environment* 122, 126-133, 2017.

Brunekreef B., Boleij J.S.M., Hoek F., Lebret E., Noy D., Variation of indoor nitrogen dioxide over a one year period, *Environment international*, vol 12, p. 279 – 282, 1986.

Butler, National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine 2016. *Health Risks of Indoor Exposure to Particulate Matter: Workshop Summary*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/23531>.

Castell N., et al., Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates?, *Environment International*, 99, 293-3002, 2017.

Chan W.R., et al., Quantifying fine particle emission events from time-resolved measurements: method description and application to 18 California low-income apartments, *Indoor Air*, 28: 89–101, 2018.

Chi R., Chen C., Li H., Pan L., Zhao B., Deng F., Guo X, Different health effects of indoor - and outdoor - originated PM2.5 on cardiopulmonary function in COPD patients and healthy elderly adults, *Indoor Air*, 29: 192 – 201, 2019.

Day D.B., Xiang J. Mo J. Clyde M.A., Weschler C.J., Li F., Gong J., Chung M., Zhang Y., Zhang J., Combined use of an electrostatic precipitator and a high efficiency particulate air filter in building ventilation systems: effects on cardiorespiratory health indicators in healthy adults, *Indoor Air*, 28: 360 – 372, 2018.

Derbez m, et al., Indoor air quality in energy-efficient dwellings: Levels and sources of pollutants, *Indoor Air*, September 2017.

Dennekamp M., Howarth S., Dick C.A.J., Cherrie J.W., Donaldsen K, Seaton A., Ultrafine particles and nitrogen oxides generated by gas and electric cooking, *Occup Environ Med*, 58: 511 – 516, 2001

Dijken F., De Rotterdamse Frisse scholen aanpak, Presentatie op ISIAQ.nl symposium, 4 april 2019. <https://www.isiaq.nl/kennisbank>

Dongen J., Vos H., Gezondheidsaspecten van woningen in Nederland, TNO rapport 2007-D-R0188/A, 2007.

Fisk W.J., Health benefits of particle filtration, *Indoor Air* 23: 357 – 368, 2013.

Fisk W.J., Chan W.R., Effectiveness and cost of reducing particle-related mortality with particle filtration, *Indoor Air*, 2017.

Gao G., Georges L., Skreiberg Ø., Seljeskog M., Experimental study of indoor air quality in two types of Norwegian houses heated by wood stove, *Indoor Air conferentie*, 2016.

- Gauderman W.J. et al., The Effect of Air Pollution on Lung Development from 10 to 18 Years of Age, *The New England Journal of Medicine*, 2004.
- Gezondheidsraad, Binnenluchtkwaliteit in basisscholen en de waarde van kooldioxide als indicator voor luchtkwaliteit, 2010.
- Gezondheidsraad, Vluchtige organische stoffen uit bouwmaterialen in verblijfsruimten, 2010.
<https://www.gezondheidsraad.nl/documenten/adviezen/2000/05/23/vluchtige-organische-stoffen-uit-bouwmaterialen-in-verblijfsruimten>
- GGD Rotterdam, Energiebesparing bij renovatie: risico of kans?, juni 2011.
<https://docplayer.nl/47354521-Energiebesparing-bij-renovatie-risico-of-kans.html>
- Gids W.F., Jacobs P., de Jong P., Phaff J.C., Effecten en gevolgen van ventilatie, EOS-LT DP 2015 WP1.2, 2012.
- Ginkel J., Hasselaar E., Housing characteristics predicting mould growth in bathrooms, *Proceedings Indoor Air 2005*
- Girman J., Phillips T., Levin H., Critical Review: How Well Do House Plants Perform as Indoor Air Cleaners?, *Proceedings of Healthy Buildings*, paper 667, 2009.
- GIW, Installatie eisen nieuwbouw eengezinswoningen en appartementen, 2007.
Hall E.F., Dusseldorp A., Aries M.B.C, Knoll B., Verbindingen in lucht en huisstof van woningen, RIVM rapport 609021087/2009.
- Handboek Vocht en Ventilatie. Basis voor ontwerp, uitvoering en beheer. Rotterdam: ISSO/SBR, 2000.
- Hasselaar E., Schimmelrisico's voorspellen in badkamers, *TVVL magazine*, december 2018.
- Haverinen-Shaughnessy U., Moschandreas D.J., Shaughnessy R.J., Association between substandard classroom ventilation rates and students academic achievement, *Indoor Air*, 21: 121 – 131, 2011
- IAIAQ- Jantunen M., Oliveira Fernandes E., Carrer P., Kephelopoulos S., Promoting actions for healthy indoor air (IAIAQ). European Commission Directorate General for Health and Consumers. Luxembourg, 2011.
- Jacobs P. et al. Verkenning innovatie kwaliteitsbevorderende maatregelen binnenmilieu, TNO rapport 034-DTM-2009-02895B/JSP/tlsx.
- Jacobs P., Borsboom W, Effect of building and installation design on PM_{2.5}, AIVC conferentie, 2015
- Jacobs P., PM_{2.5} meetprotocol voor kantoren, *TVVL magazine*, 4, 2015.
Jacobs P., Borsboom W., Kemp R., PM_{2.5} in Dutch Dwellings due to Cooking, AIVC conference Alexandria, 2016.

Jacobs P., Fijnstof bronnen in en rondom woningen, TVVL magazine, 06, 2017a.

Jacobs P., Cornelissen E., Efficiency of recirculation hoods with regard to PM_{2.5} and NO₂, Healthy Buildings 2017, Lublin, Polen, 2017b.

Jacobs P., W. Kornaat, W. Borsboom, Fijnstof bij koken, het effect van kookafzuiging op fijnstofconcentraties in woningen, *Bouwfysica*, 1, 2017c

Jacobs P., Karakterisering en Energie Efficiënte reductie van Kookemissies, 2017d
<https://projecten.topsectorenergie.nl/storage/app/uploads/public/5c0/e71/00d/5c0e7100d6c77748308805.pdf>

Johansson P., Ekstrand-Tobin, A., Svensson T., Bok G., Laboratory study to determine the critical moisture level for mould growth on building materials, *International Biodeterioration & Biodegradation*, 73: 23 – 32, 2012.

Khoury E, Wijsman S., Vons V., Houtrookoverlast tegengaan in woningen, TVVL magazine 6, 2017.

Kluizenaar Y, et al., Personal exposure to UFP in different micro-environments and time of Day, *Building and Environment*, 122, 237 – 246, 2017.

Laden F., Schwartz, J., Speizer F.E., Dockery D.W., Reduction in fine particulate air pollution and mortality extended follow-up of the Harvard six cities study, *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, Vol. 173, No. 6, 2006.

Laverge J, Janssens A. Analysis of the influence of ventilation rate on sleep pattern. *Indoor Air 2011 conferentie, ISIAQ*, 2011.

Laverge J. Novoselac A., Corsi R., Janssens A. "Experimental Assessment of Ventilation in the Bedroom: Physiological Response to Ventilation and Impact of Position on Rebreathing." In 5th International Building Physics Conference, Proceedings, 973–980. Kyoto, Japan: 5th IBPC Organizing Committee, 2012.

Lioy P.J., Wainman T., Junfeng J.Z., Goldsmith S., Typical Household Vacuum Cleaners: The Collection Efficiency and Emissions Characteristics for Fine Particles, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 1999.

Logue J.M., et al., A method to estimate the chronic health impact of air pollutants in US residences, *Environmental health perspectives*, volume 120, nr. 2, februari 2012.

Logue, J., Klepeis, N., Lobscheid, A., & Singer, B.. Pollutant exposures from natural gas cooking burners; a simulation-based assessment for southern California. *Environment Health Perspectives*, 122: 43-50, 2014.

MacNeill et al., Quantifying the contribution of ambient and indoor generated fine particles to indoor air in residential environments, *Indoor Air* 2014.

Mendell M.J., Eliseeva E. A., Davies M. M., Spears M., Lobscheid A., Fisk W. J., Apte M. G., Association of classroom ventilation with reduced illness absence: a prospective study in California elementary schools, *Indoor Air*; 23: 515 – 528, 2013.

Mikkonen A., Li T., Vesala M., Saarenheimo J., Ahonen V., Kärenlampi S., Blande J.D., Tirola M., Tervahauta A., Biofiltration of airborne VOCs with green wall systems-Microbial and chemical dynamics, *Indoor Air*, 28: 697 – 707, 2018.

MilieuCentraal, 2019: <https://www.milieucentraal.nl/energie-besparen/apparaten-en-verlichting/huishoudelijke-apparaten/inductie-kookplaat/>

Milton D.K, Glencross P.M., Walters M.D., Risk of Sick Leave Associated with Outdoor Air SupplyRate, Humidification, and Occupant Complaints, *Indoor Air*, 10; 212-221, 2000.

Mishra A.K., et al., Window/door opening-mediated bedroom ventilation and its impact on sleep quality on healthy, young adults, *Indoor Air*, 1-13, 2017.

Monicair, Holsteijn R.C.A., Li W.L., Eindrapport 1a, December 2014.

Morawska L, Afshari A., Bae G.N., Buonanno G, Chao C. Y. H., Hanninen O., Hofmann W., Isaxon C., Jayaratne E. R., Pasanen P., Salthammer T., Waring M., Wierzbicka A., *Indoor aerosols: from personal exposure to risk assessment*, *Indoor Air*, 23: 462 – 487, 2013.

Moya T.A., Dobbelsteen A., Ottele M., Bluysen P.M., A review of green systems within the indoor environment, *Indoor and Built Environment*, 28: 298 – 309, 2019.

Mullen N.A., Li J., Russel M.L., Spears M., Less B.D., Singer B.C., Results of the California Healthy Homes Indoor Air Quality Study of 2011 – 2013: impact of natural gas appliances on air pollutant concentrations, *Indoor Air*, 26: 231 – 245, 2016.

NEN 1087, Ventilatie van woongebouwen. Eisen. Delft: NNI, 1975.

O'leary C., Kluizenaar Y., Jacobs P., Borsboom W., Hall I., Jones BG., Investigating measurements of fine particle (PM_{2.5}) emissions from the cooking of meals and mitigating exposure using a cooker hood, *Indoor Air*, februari 2019.

Onderzoeksraad voor Veiligheid, Koolmonoxide onderschat en onbegrepen gevaar, 2015: <https://www.onderzoeksraad.nl/nl/page/3458/koolmonoxide>

Ott W.R., Steinemann AC, Wallace LA. *Exposure Analysis: Mathematical Modeling of Indoor Air Quality*. Boca Raton, London: CRC Press; 2006:533.

Persily A., Jonge L., Carbon dioxide generation rates for building occupants, *Indoor Air*, 27: 868–879, 2017.

Pettit T., Irga P.J., Abdo P., Torpy F.R., Do the plants in functional green walls contribute to their ability to filter particulate matter?, *Building and Environment*, 125: 299 – 307, 2017.

Programma van Eisen Gezonde Kantoren 2018, Platform Gezond Binnenklimaat <https://tvvlconnect.nl/thema/energietransitie/documenten/277-rapport-pve-gezonde-kantoren>

Qian D., Lingzhen D., Wang Y., Zanobetti A., Choirat C., Schwartz J.D., Dominici, F., Association of Short-term Exposure to Air Pollution With Mortality in Older Adults, *JAMA*, Vol. 318, No. 24, 2017.

Rackes A., Ben-David T., Waring M.S., Outcome based ventilation: A framework for assessing performance, health, and energy impacts to inform office building ventilation decisions, *Indoor Air*: 28: 585–603, 2018.

Reinders J., Exploring the relation between particulate matter inside city offices and the surrounding environments – a case study, Master Thesis TU Eindhoven, april 2018.

RIVM briefrapport 609330004/2010, Ionisatoren en gezondheid,
<https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/609330004.pdf>

RIVM, Gezondheid, binnenmilieu en energiebesparing, 2011
<http://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/609300029.pdf>

RIVM, radon en thoron in Nederlandse woningen vanaf 1930, 2015.
<https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2015-0087.pdf>

RIVM, Regelgeving stoffen in het binnenmilieu, 2016,
<https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2016-0112.pdf>

RIVM, Vluchtige Organische Stoffen (VOS), 2018
<https://www.rivm.nl/binnenmilieu/vluchtige-organische-stoffen-vos>

Satish U, Mendell M.J., Shekhar K., Hotchi T., Sullivan D., Streufert S., Fisk W., Is CO₂ an Indoor Pollutant? Direct Effects of Low-to-Moderate CO₂ Concentrations on Human Decision-Making Performance, *Environmental Health Perspectives*, Volume 120, nr. 12, 2012.

Schram-Bijkerk D, van Kempen E.E.M.M., Knol A.B., The burden of disease related to indoor air in the Netherlands: do different methods lead to different results?, *Occup Environ Med* 70:126-132, 2013.

Seppanen O., Fisk W.J., Lei Q.H., Ventilation and performance in office work, *Indoor Air*, 2006.

Shendell D.G., Prill R., Fisk W. J., Apte M. G., Blake D., Faulkner D., Associations between classroom CO₂ concentrations and student attendance in Washington and Idaho, *Indoor Air*, 14: 333 – 341, 2004.

Shu H., Jonsson B.A., Larsson M., Nanberg E., Bornehag C.G., PVC flooring at home and development of asthma among young children in Sweden, a 10-year follow-up, *Indoor Air*, 24: 227 – 235, 2014

Singer B.C., Delp W.W., Price P.N., Apte M.G., Performance of installed cooking exhaust devices, *Indoor Air*, 22: 224 – 234, 2012.

Singer B. C., Delp W. W., Black D. R. Walker I. S., Measured performance of filtration and ventilation systems for fine and ultrafine particles and ozone in an unoccupied modern California house, *Indoor Air*, 27: 780 – 790, 2017.

Singer B.C., Delp W.W., Response of consumer and research grade indoor air quality monitors to residential sources of fine particles, *Indoor Air*, 1 – 16, 2018.

Siponen T., Yli-Tuomi T., Tilittanen P., Taimisto P., Pekkanen J., Salonen R.O., Lanki T., Wood stove use and other determinants of personal and indoor exposures to particulate air pollution and ozone among elderly persons in a Northern Suburb, *Indoor Air*, 1- 10, 2019.

Strom-Tejsen P., Zukowska D, Wargocki P. Wijn D.P., The effects of bedroom air quality on sleep and next-day performance, *Indoor Air*, 2015.

VeiligheidNL, Koolmonoxidevergiftiging Ongevalscijfers, oktober 2014.

VentKook, Jacobs P., TNO 2018 R11055 Openbaar eindrapport TKI Urban Energy VentKook - Ventilatiesysteem met goede kookafzuiging, 2018.

Versteeg H., Onderzoek naar de kwaliteit van het binnenmilieu in basisscholen. Ministerie van VROM, Den Haag, 2007.

VLA methodiek gelijkwaardigheid voor energiebesparende ventilatieoplossingen in woningen, versie: 1.3, juli 2018.

Waring M.S., Siegel J.A., Corsi R.L., Ultrafine particle removal and generation by portable air cleaners, Atmospheric environment, 2008.

WHO, Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide, global update 2005.

WHO Guidelines for indoor air quality, Selected pollutants, 2010, p. 4 & 247.

WHO, Environmental burden of disease associated with inadequate housing, 2011.

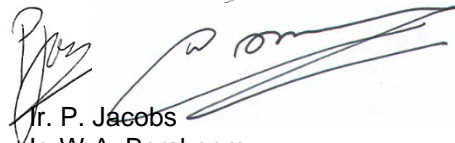
9 Ondertekening

Delft, 8 juli 2019



Ir. A.C. Westerlaken
Research Manager

TNO



Ir. P. Jacobs
Ir. W.A. Borsboom
Auteurs