

Balansventilatie energiezuinig én gezond

Welke invloed hebben ventilatiesystemen en gebruikers op de fijnstofconcentratie in woningen en, in het bijzonder, wat is daarbij het effect van verbeterde filtering? Om deze vraag te beantwoorden zijn simulaties uitgevoerd met een ventilatiemodel waarbij het effect van type ventilatiesysteem, kookafzuiging, luchtdichtheid en het raamgebruik is meegenomen.

Luchtdichte woningen met balansventilatie bieden de mogelijkheid om de luchtkwaliteit voor bewoners in de woningen aanzienlijk te verbeteren. Die mogelijkheid wordt momenteel niet volledig benut. In de meeste systemen wordt gebruik gemaakt van standaard G3 filters, terwijl met F7 filters (ePM1 55%) een betere binnenluchtkwaliteit kan worden bereikt.

Zelfs met geopende slaapkamer ramen in de zomer en in voor- en najaar kan met F7 filters (ePM1 55%) in combinatie met kookafzuiging aan de WHO jaargemiddelde advieswaarde voor PM_{2,5} worden voldaan.

Bij woningrenovatie ligt de nadruk op energiebesparing om de klimaat- en energiedoelstellingen te kunnen realiseren. Energiebesparing, noodzakelijk om te voldoen aan de BENG-eisen, is meestal ook de reden om balansventilatie in nieuwbouwwoningen toe te passen. In andere sectoren, zoals kantoren en scholen nabij drukke wegen, wordt balansventilatie in combinatie met goede filters ook gebruikt om gebruikers tegen fijnstof uit de buitenlucht te beschermen [PvE Gezonde kantoren 2021; PvE frisse scholen, 2021]. Dat balansventilatie naast het voldoen aan energetische eisen ook kan worden ingezet om de luchtkwaliteit en daarmee de gezondheid van de bewoners te verbeteren, krijgt in woningen nog maar weinig aandacht.

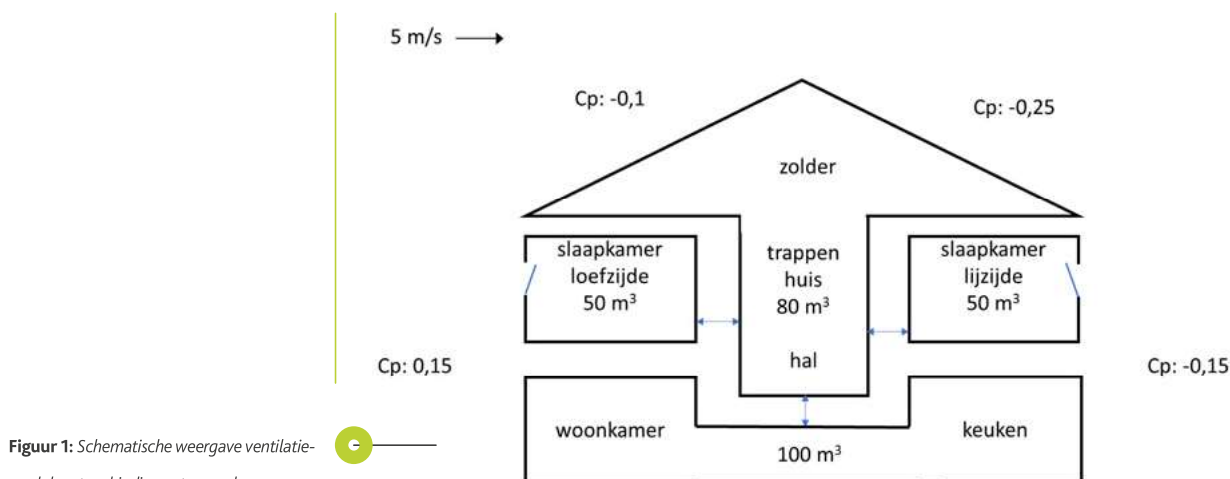
Highlights

- F7 (ePM1 55%) filters in balansventilatie verbeteren de binnenluchtkwaliteit in woningen.
- In combinatie met goede kookafzuiging is de WHO PM_{2,5} jaar advieswaarde haalbaar.
- De mate van luchtdichtheid heeft bij geopende ramen een beperkt effect.
- Koeling helpt om de luchtkwaliteit ten aanzien van fijnstof verder te verbeteren.

Er is in het geheel weinig aandacht voor de luchtkwaliteit in woningen, ondanks dat naar schatting 98% van de woningen niet aan de advieswaarde voor PM_{2,5} van de WHO uit 2021 voldoet. In een grootschalig en langdurig monitoringsonderzoek (TKI Be Aware) is vastgesteld dat 15 van de 100 onderzochte woningen niet voldeden aan de 'oude' WHO PM_{2,5} advieswaarde van 10 µg/m³ jaargemiddeld. De jaargemiddelde concentratie in de keuken/woonkamer bedroeg gemiddeld genomen 8,2 µg/m³. In september 2021 is deze advieswaarde door de WHO bijgesteld naar 5 µg/m³ jaargemiddeld. Gebruikmakend van deze nieuwe advieswaarde voldeed 98% van de onderzochte woningen niet meer [TVVL 2021].

Op basis van het Be Aware monitoringsonderzoek zijn in 2020 simulaties uitgevoerd met het gebouwmodel TRNSYS gekoppeld met het ventilatierekenmodel TRNFlow (COMIS). Bij het uitvoeren van deze simulaties zijn destijds twee belangrijke vereenvoudigingen gemaakt. Ten eerste is gebruikgemaakt van een ventilatiemodel waarin alleen de woonkamer/keuken is beschouwd. Daarnaast was verondersteld dat de ramen gesloten waren. Buiten het stookseizoen is dit zeker geen goede aanname.

De onderzoeksvraag in dit artikel is daarom: Welke invloed hebben ventilatiesystemen en gebruikers op de fijnstofconcentratie in woningen en, in het bijzonder, wat is daarbij het effect van



Figuur 1: Schematische weergave ventilatiemodel met verbindingen tussen de zones.

verbeterde filtering? Om deze vraag te beantwoorden zijn simulaties uitgevoerd met een ventilatiemodel waarbij het effect van type ventilatiesysteem, kookafzuiging, luchtdichtheid en het raamgebruik is meegenomen.

Dit artikel zoomt in op fijnstof, daarnaast zijn voor een gezond binnenmilieu in woningen nog een groot aantal zaken van belang. Een handzaam overzicht met drie kwaliteitsklassen inclusief toelichting is in 2022 tot stand gekomen met het Programma van Eisen Gezonde woningen.

Simulaties meerzone ventilatiemodel inclusief raamgebruik

Met een meerzone-ventilatiemodel zijn berekeningen uitgevoerd om de jaargemiddelde fijnstofconcentratie in een eengezinswoning te bepalen. Het model bestaat uit 4 zones, zie figuur 1. De zones zijn allemaal met het trappenhuis verbonden via een spleet van 120 cm² onder de binnendeuren. Om te voorkomen dat bij hogere windsnelheden bij geopende ramen dwars door het huis van gevel tot gevel tocht optreedt is aangenomen dat de binnendeuren gesloten zijn.

Het ventilatiemodel berekent de luchtstromen tussen de zones op basis van windeffecten, thermische effecten en het type ventilatiesysteem. Voor de wind is een constante lichtsnelheid

aangenomen van 5 m/s loodrecht op de gevel. Deze snelheid is de gemiddelde windsnelheid in Nederland. Er zijn twee luchtdichtheden aangenomen, 20 en 80 dm³/s bij 10 Pa. De luchtlekken door naden en kieren zijn conform de BKN methodiek gelijkwaardigheid (2018) over de woningschil verdeeld en zijn met name op de zolder aanwezig. Ook de winddrukcoëfficiënten voor gevel en dakvlak zijn conform deze methodiek aangenomen. Thermische effecten zijn afhankelijk van het seizoen gemodelleerd. De hiervoor gehanteerde daggemiddelde binnen- en buitentemperaturen zijn in tabel 1 weergegeven.

Turbulente uitwisseling door open ramen

Veel bewoners van nieuwbouw woningen ervaren, zelfs in het stookseizoen, de temperatuur van de slaapkamers als te hoog en openen de ramen om te koelen [Jacobs, 2012]. Hierbij kan zogenaamde turbulente uitwisseling ontstaan, waarbij gelijktijdig warme lucht aan de bovenzijde naar buiten stroomt en koude lucht aan de onderzijde naar binnen stroomt. Deze turbulente uitwisseling kan worden berekend uit het temperatuurverschil tussen binnen en buiten, het open oppervlak en de hoogte waarover de uitwisseling optreedt [AIVC, 1988]. Hier is voor elke slaapkamer een kiepraam gesimuleerd wat in de kiepstand aan de bovenzijde 10 cm is geopend. De hoogte van het raam bedraagt 1,3 m en de breedte 0,57 m.

	Buitemtemperatuur	Woonkamer temperatuur	Slaapkamer temperatuur
Winter	6	20	18
Voor- en najaar	14	20	20
Zomer	20	20	20

Tabel 1: Per seizoen gesimuleerde binnen- en buitentemperaturen.

Het raamgebruik over de seizoenen is als volgt vereenvoudigd: in de winter zijn alle ramen dicht verondersteld, in het voor- en najaar staan de slaapkamerramen tijdens slapen op kiepstand en in de zomer staan deze ramen gedurende de gehele dag op kiepstand.

Fijnstofbronnen en depositie

De jaargemiddelde $PM_{2,5}$ fijnstofconcentratie in de buitenlucht in stedelijke gebieden is volgens RIVM data [2022] de afgelopen jaren afgenomen door schonere technieken en COVID-19 lockdown maatregelen naar circa $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (range 7-11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). In deze simulatiestudie is een gemiddelde buitenconcentratie van $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aangehouden om de resultaten te kunnen vergelijken met de buitencondities tijdens de TKI Be Aware meetstudie die van september 2017 tot en met september 2018 is uitgevoerd.

In de woning is de $PM_{2,5}$ fijnstofemissie ten gevolge van koken gesimuleerd volgens het 50 percentiel emissiepatroon uit TKI Be Aware. Dit emissiepatroon omvat emissies ten gevolge van de bereiding van het ontbijt, lunch en avondeten. Een deel van het fijnstof in het binnenmilieu slaat neer op oppervlakken, dit wordt depositie genoemd. Voor de simulatiestudie is aangehouden dat het effect van deze depositie gelijk staat aan een extra ventilatiestroom met schone lucht van $40 \text{ m}^3/\text{uur}$ in een ruimte van 100 m^3 [TKI Be Aware, 2020].

Kookafzuiging

Er zijn simulaties met en zonder kookafzuiging uitgevoerd. Voor de afvangst van in de kookdampen aanwezige $PM_{2,5}$ is bij ingeschakelde afzuigkap (100% afzuigcapaciteit) een vangstefficiëntie van 95% aangehouden. Dit is een typische waarde voor een schouw afzuigkap bij $300 \text{ m}^3/\text{uur}$. De grootte van deze afzuigstroom is vergelijkbaar met de maximale afzuigstroom van een ventilatie unit voor een eengezinswoning.

Ventilatiesysteem en filtering

In de woning zijn twee ventilatiesystemen gesimuleerd. Een systeem C ventilatiesysteem, dat bestaat uit toevoerroosters in de gevel in iedere verblijfsruimte en een mechanische afvoer in keuken, badkamer en toilet. Een balansventilatiesysteem (systeem D) met mechanische toevoer in iedere verblijfsruimte en mechanische afvoer in keuken, badkamer en toilet. De nominale ventilatiecapaciteiten zijn conform het Bouwbesluit. Situaties met laagstand (30% van de nominale ventilatiecapaciteit) en middenstand (70% van de nominale ventilatiecapaciteit) bij aanwezigheid zijn gesimuleerd. Bij

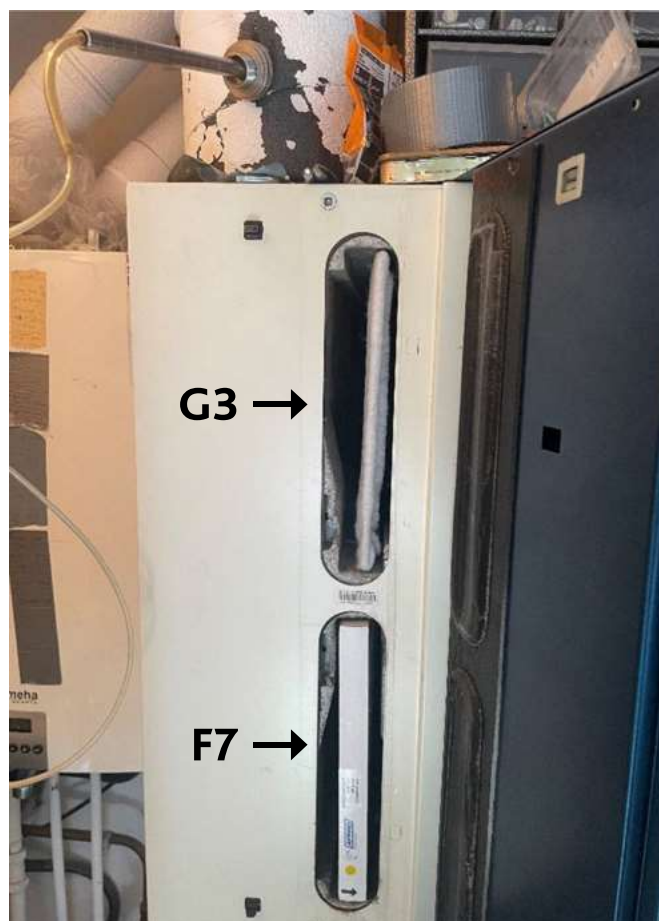
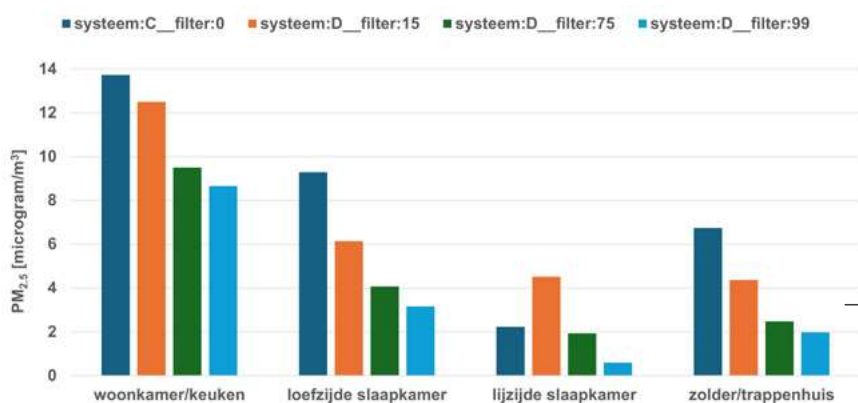


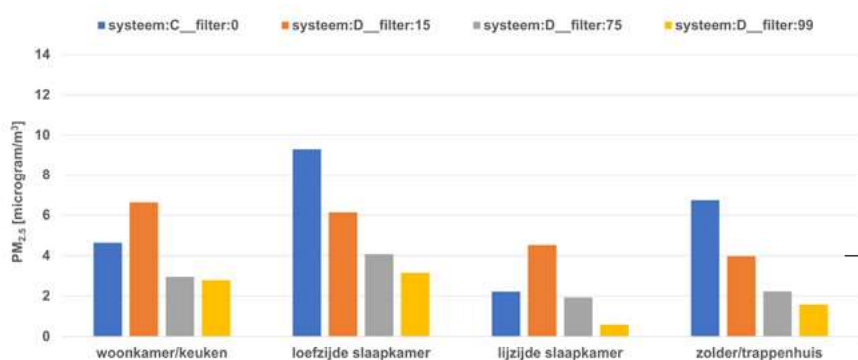
Foto 1: Energiezuinig en gezond, in de balansventilatie unit is in de luchtaanzuiging een F7 (ePM1 55%) fijnstof filter geplaatst in plaats van het standaard G3 grove filter, een dergelijk filter zit overigens nog wel in de afvoer.

afwezigheid is aangenomen dat het systeem altijd in laagstand staat. Aangenomen is dat de ventilatieroosters in de woonkamer gesloten zijn en dat deze in de slaapkamer continu geopend zijn. Dit is een veel voorkomende praktijk situatie die ontstaat na het ervaren van tocht in de winter en het vergeten te openen van de roosters in het voorjaar. Bij het systeem C is verondersteld dat bij de roosters alleen zeer grove delen zoals insecten worden afgevangen en dat er geen afvangst van $PM_{2,5}$ plaatsvindt.

Het balansventilatiesysteem is standaard uitgerust met G3 filters. Voor een balansventilatie unit uitgerust met een dergelijk grof filter wordt op basis van nog lopende praktijkduurmetingen een $PM_{2,5}$ afvangstefficiëntie van 15% verwacht. Uitgerust met een F7 filter (ePM1 55%), zie foto 1, neemt de afvangstefficiëntie van de balansventilatie unit toe naar circa 75%. In de simulaties zijn deze twee waarden gebruikt. Daarnaast zijn ook simulaties uitgevoerd met een $PM_{2,5}$ afvangstpercentage van 99%. Deze prestatie kan worden behaald bij toepassing van een elektrostatisch filter dat stroomafwaarts van de balansventilatie unit wordt geplaatst (Khoury et al. 2017).



Figuur 2: Effect van filter efficiëntie op de $PM_{2.5}$ concentratie per verblijfsruimte tijdens aanwezigheid, $qv_{10}=80 \text{ dm}^3/\text{s}$, ramen dicht, ventilatie in laagstand, zonder kookafzuiging.



Figuur 3: Effect van filter efficiëntie op de $PM_{2.5}$ concentratie per verblijfsruimte tijdens aanwezigheid, $qv_{10}=80 \text{ dm}^3/\text{s}$, ramen dicht, ventilatie in laagstand, met kookafzuiging.

Fijnstofconcentratie en blootstelling

Met het COMIS ventilatiemodel zijn de concentraties in de verschillende ruimtes in huis in de tijd berekend. Vervolgens is de concentratie bij aanwezigheid in de verschillende verblijfsruimtes bepaald. Hiertoe is het volgende verblijf aangenomen: 9 uur per dag in de slaapkamer, door de week 5 uur in woonkamer/keuken en in het weekend 10 uur per dag in woonkamer/keuken. Op basis van deze tijden is de gemiddelde blootstelling aan fijnstof in de woning bepaald.

Simulatiere resultaten

Effect van filtering en kookafzuiging op concentraties bij gesloten ramen

Figuur 2 en figuur 3 laten het effect zien van verschillende typen filters op de jaargemiddelde fijnstofconcentratie tijdens aanwezigheid, respectievelijk zonder en met kookafzuiging. Hierbij zijn de ramen in de slaapkamers gesloten.

Zonder gebruik te maken van kookafzuiging, zie figuur 2, treden de hoogste fijnstofconcentraties op in de woonkamer/keuken. De gesimuleerde concentraties komen goed overeen met de gemeten concentraties in het Be Aware onderzoek tijdens aanwezigheid. Figuur 2 geeft aan dat betere filtering van de ventilatielucht slechts een

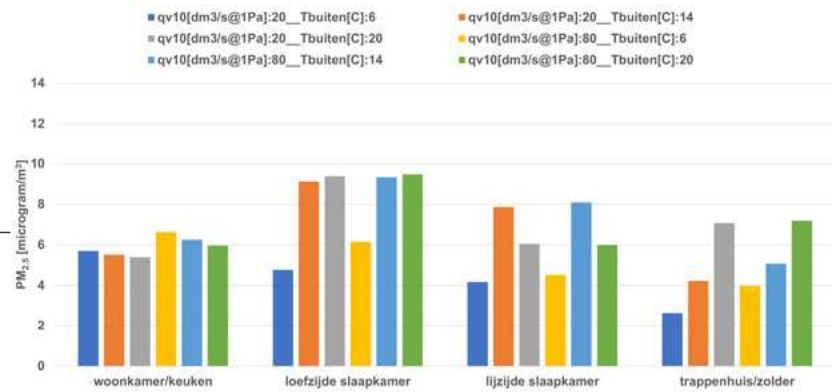
beperkte concentratieverlaging in de woonkamer/keuken oplevert. In de slaapkamer aan de loefzijde treden met name bij systeem C relatief hoge concentraties op, omdat daar veel ongefilterde buitenlucht door het rooster en de naden en kieren naar binnen stroomt. In de lijzijde kamer scoort systeem C qua fijnstof beter dan systeem D met een standaard filter (15% afvangstefficiëntie), omdat via de roosters exfiltratie en daardoor toevoer via de binnendeur optreedt vanuit het relatief schone trappenhuis (als gevolg van depositie in de woning).

Met kookafzuiging, zie figuur 3, blijven de fijnstofconcentraties in de slaapkamer ongewijzigd. Wel nemen de concentraties in de woonkamer/keuken sterk af. Opvallend om daar te zien is dat er bijna geen concentratieverschil is tussen het F7 filter met 75% afvangstefficiëntie en een filter met 99% afvangstefficiëntie. Dit wordt veroorzaakt doordat de ventilatie, behalve tijdens het koken, gedurende de rest van de dag in laagstand staat en de bijdrage van infiltratie dan relatief groot is. Bij ventilatie in de middenstand (figuur niet getoond) blijft de concentratie in de woonkamer met het standaard G3 filter (15% afvangstefficiëntie) vrijwel hetzelfde, maar neemt het met een filter met 99% afvangstefficiëntie af tot $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

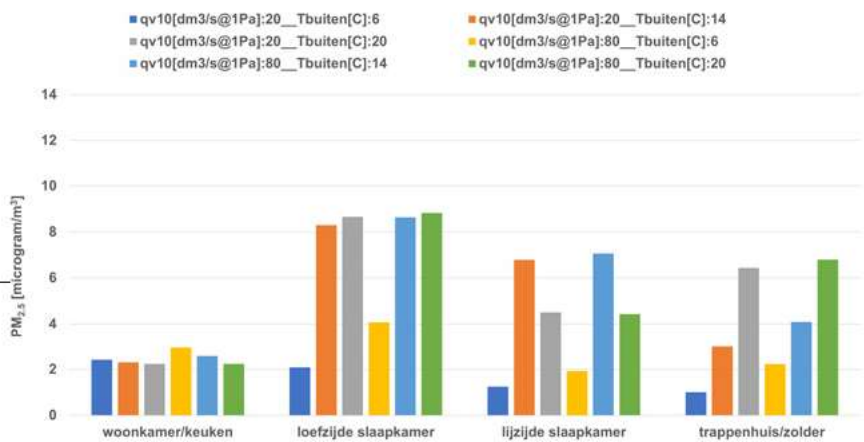
Effect van luchtdichtheid en raamgebruik bij twee filterklassen

In figuur 4 en 5 is de fijnstofconcentratie aangegeven voor de verschillende ruimtes bij verschillende aannames voor luchtdichtheid en buitentemperatuur voor respectievelijk 15% en 75% filterefficiëntie. Een

Figuur 4: *Systeem D met 15% filter efficiëntie, effect van luchtdichtheid (qv10) en buitentemperatuur op de PM_{2,5} concentratie bij aanwezigheid per verblijfsruimte, ventilatie in laagstand, met kookafzuiging, ramen afhankelijk van de temperatuur open of dicht.*



Figuur 5: *Systeem D met 75% filter efficiëntie, effect van luchtdichtheid (qv10) en buitentemperatuur op de PM_{2,5} concentratie bij aanwezigheid per verblijfsruimte, ventilatie in laagstand, met kookafzuiging, ramen afhankelijk van de temperatuur open of dicht.*



beperkte invloed van de luchtdichtheid (qv10 waarde) is zichtbaar in de winter (Tbuiten[C]:6) als de ramen gesloten zijn. In het voor- en najaar (Tbuiten[C]:14) en de zomer (Tbuiten[C]:20) is met name het openen van ramen bepalend voor de blootstelling aan fijnstof in de slaapkamers. De filterklasse heeft het grootste effect in de woonkamer. In de slaapkamer is een effect zichtbaar in de winter en is het effect beperkt gedurende de rest van het jaar als gevolg van het aangenomen raamgebruik.

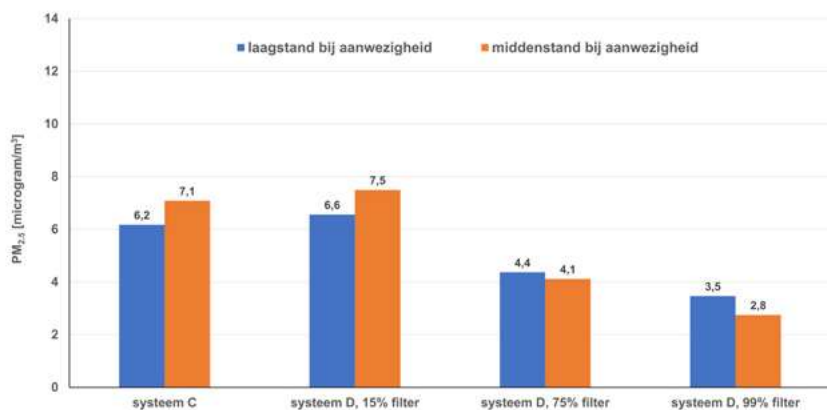
Opvallend is om te zien dat bij de zijde slaapkamer in de zomer de fijnstof concentratie afneemt ten opzichte van het voor- en najaar. Dit komt omdat bij de simulaties in de zomer is aangenomen dat de binnentemperatuur gelijk is aan de buitentemperatuur en dat daardoor geen turbulente uitwisseling optreedt over de geopende ramen. Turbulente uitwisseling is het verschijnsel waarbij aan de bovenzijde van het raam warme binnenlucht naar buiten stroomt en aan de onderzijde eenzelfde hoeveelheid koude buitenlucht naar binnen stroomt. Door de hogere fijnstofconcentratie buiten in vergelijking tot binnen, resulteert turbulente uitwisseling in een extra fijnstofbelasting voor de slaapkamers. Opgemerkt wordt dat in werkelijkheid ook in de zomer temperatuurverschillen te verwachten zijn en er dus ook turbulente uitwisseling zal plaatsvinden (weliswaar in minder mate dan in voor- en najaar). Om dit effect nader te

bestuderen zullen in een later stadium simulaties met bijvoorbeeld uurlijkse waarden worden uitgevoerd.

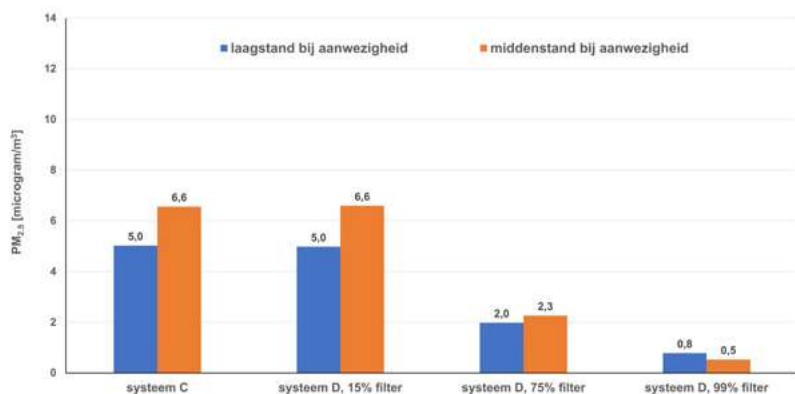
Blootstelling

De gemiddelde jaarlijkse fijnstofblootstelling in de woning is bepaald door middeling van de fijnstofconcentraties bij aanwezigheid in de verschillende vertrekken gedurende de vier seizoenen. Uit Figuur 6 volgt dat zowel in een woning uitgerust met systeem C als systeem D met een standaard filter (15% afvangstefficiëntie) de blootstelling hoger is dan de WHO jaargemiddelde PM_{2,5} advieswaarde van 5 µg/m³. Verhoging van het ventilatie-debiet bij aanwezigheid naar middenstand levert voor deze situatie zelfs nog een verhoging op van de blootstelling. Dit omdat bij vergroting van de hoeveelheid ventilatie relatief gezien het effect van depositie afneemt.

Vervanging van het G3 toevoerfilter bij systeem D door een F7 fijnstoffilter leidt tot een blootstelling onder de WHO advieswaarde. Plaatsing van een elektrostatisch filter met 99% afvangstrendement levert maar een beperkte verlaging op van de blootstelling, omdat gedurende een deel van het jaar de slaapkamerramen open staan. Figuur 7 laat de potentie zien van filtering in combinatie met mechanische koeling (slaapkamer ramen worden niet meer



Figuur 6: Blootstelling $PM_{2,5}$ fijnstof voor verschillende ventilatiesystemen en filterefficiënties. Slaapkamerramen in voor- en najaar en zomer op kiepstand, luchtdichtheid $qv_{10}=20 \text{ dm}^3/\text{s}$ en met kookafzuiging.



Figuur 7: Blootstelling $PM_{2,5}$ fijnstof voor verschillende ventilatiesystemen en filterefficiënties. Slaapkamerramen gesloten (mechanische koeling), luchtdichtheid $qv_{10}=20 \text{ dm}^3/\text{s}$ en met kookafzuiging.

geopend). Hierdoor wordt de blootstelling bij een F7 filter meer dan gehalveerd. En met een elektrostatisch filter kan de blootstelling in de woning zelfs tot onder $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ worden verlaagd.

Conclusies en aanbevelingen

Deze simulatiestudie laat zien dat goede kookafzuiging in combinatie met betere filtering van de ventilatielucht in de mechanische toevoer de blootstelling aan fijnstof in woningen aanzienlijk kan verlagen, zelfs wanneer er gedurende een groot deel van het jaar in de slaapkamers ramen geopend zijn. Dit komt met name door de veel lagere blootstelling in de woonkamer.

De simulatieresultaten voor woningen met toevoer via roosters en voor woningen met balansventilatie met standaard filters komen overeen met praktijkmetingen uitgevoerd in TKI Be Aware en voldoen niet aan de 2021 WHO advieswaarde. Bij balansventilatie met F7

fijnstof filters (ePM1 55%) wordt wel voldaan aan de nieuwe WHO advieswaarde. Omdat in de simulaties is aangenomen dat gedurende een deel van het jaar de ramen open staan om te koelen heeft toepassing van nog betere filters maar een beperkt effect. In woningen met actieve koeling heeft het wel duidelijk meerwaarde om betere filters dan F7 kwaliteit toe te passen, omdat dan ramen gesloten kunnen blijven.

Deze studie betreft een simulatiestudie met naast voorgaande vereenvoudiging een groot aantal andere aannames. Om de resultaten te valideren zijn praktijkmetingen gewenst. Hiervoor zijn in 2024 gedetailleerde metingen gepland in woningen, waarin fijnstof wordt gemeten in meerdere zones en informatie wordt verzameld over onder andere openstaande ramen, ventilatiegebieden en meteodata. Daarnaast zal in woningen met balansventilatie het effect van een betere filtering worden gemeten om het hier beschreven model te valideren.

Referenties

1. AIVC, Inhabitant Behaviour with Respect to Ventilation – a Summary Report of IEA Annex VIII, Technical Note AIVC 23, Air Infiltration and Ventilation Centre, March 1988.
2. Binnenklimaattechniek, PVE Gezonde kantoren 2021 (<https://www.binnenklimaattechniek.nl/document/pve-gezonde-kantoren-2021/>)
3. Binnenklimaattechniek, PVE Gezonde woningen 2022 (https://www.binnenklimaattechniek.nl/wp-content/uploads/2022/07/Digitaal_PVE-Gezonde-Woningen_BinnenklimaatTechniek25.pdf)
4. Interview, Bijna geen enkele woning voldoet aan nieuwe WHO fijnstofnorm, TVVL magazine 06, december 2021
5. Jacobs P., Ventilatie in nieuwbouwwoningen met balansventilatie, TVVL magazine, december 2012.

6. Khoury E., Wijsman S, Vons V., Houtrookoverlast tegengaan in woningen, TVVL magazine 2017.
7. Openbaar eindrapport TKI Be Aware - Bewustwording van binnenluchtkwaliteit in woningen: bronnen en effectieve energie efficiënte interventie strategieën, TNO rapport 2020 R10627, april 2020.
8. RIVM, Compendium voor de leefomgeving, Fijnere fractie van fijn stof ($PM_{2,5}$) in lucht, 2009-2022 | Compendium voor de Leefomgeving (clo.nl), bezocht op 6/12/2023.
9. Programma van Eisen Frisse scholen 2021 (<https://www.arbocatalogus-vo.nl/media/1149/programma-van-eisen-frisse-scholen-2021.pdf>)
10. VLA methodiek gelijkwaardigheid voor energiebesparende ventilatieoplossingen in woningen, versie 1.3, 2018