

Auteurs

Piet Jacobs [1], Eliane Khoury [2], Marius Klerk [3], Michel Valkema [3]

1. TNO
2. VFA Solutions
3. LUCAM

Pilot ventilatiesysteem met indirecte adiabatistische koeling en hoog efficiënte fijnstoffiltering

Bestaande scholen hebben vaak last van onvoldoende ventilatie in de winter en te hoge temperaturen in de zomer. Daarnaast vereisen scholen in de buurt van een drukke weg hoogrendement (F9) filtering, wat traditioneel leidt tot hoge drukvallen en installatielawaai. Huidige ventilatiesystemen vereisen vaak dure inbedrijfstellingsmetingen en missen monitoringfaciliteiten tijdens de gebruiksfase.

Met de ontwikkeling van het SchoolVent systeem hebben we deze problemen op een energiezuinige manier opgelost. Kern van het systeem is een balansventilatiesysteem met warmteterugwinning. De warmtewisselaar wordt buiten het stookseizoen gebruikt voor indirecte adiabatistische koeling. Voor filtering is een hoog rendement elektrostatisch filtratiesysteem met een lage drukval opgeschaald tot 10.000 m³/uur. Met deze luchtstroom kunnen 5 klaslokalen worden geconditioneerd. De componenten zijn eerst getest en geoptimaliseerd in laboratoria van TNO. Daarna is er een pilot gestart op het Montessori Lyceum in Zeist. De belangrijkste resultaten van de monitoring in 2019/2020 zijn een warmteterugwinningsrendement tussen 60 en 75%. Ten aanzien van het binnenklimaat is klasse A van de PvE Frisse scholen behaald voor zomer- en wintertemperatuur en voor CO₂-concentratie. Met betrekking tot filtratie wordt, afhankelijk van het debiet, aan de specificaties van een E10 – E11 filter voldaan. In de geklimatiseerde klaslokalen leidde dit tot een 70 – 96% lagere PM_{2,5} concentratie in vergelijking met een referentielokaal. Het systeem is daarna verder geoptimaliseerd en in 2021 zijn nog eens 14 klaslokalen van de school voorzien van het SchoolVent systeem.

Nederland streeft naar een energieneutrale gebouwde omgeving in 2050. Ook bestaande scholen moeten hieraan bijdragen. Maatregelen moeten de volgende drie problemen aanpakken.

Het eerste probleem is dat de kwaliteit van de binnenlucht vaak niet goed is, omdat veel scholen nog steeds natuurlijk geventileerd worden. Tochtklachten komen vaak voor en door het sluiten van ramen om die tocht te verminderen, is er in de winter vaak sprake van onvoldoende ventilatie. Energiebesparing wordt bereikt door verbetering van de isolatie en luchtdichtheid, wat zonder toevoeging van effectieve ventilatie de luchtkwaliteit verder kan verslechteren [1]. Het toepassen van mechanische ventilatie in de winter verbetert de luchtkwaliteit, maar kan het energieverbruik voor ruimteverwarming verhogen.

Ten tweede wordt, vooral na verbetering van de isolatie, het risico op oververhitting groot door de hoge interne warmtebelasting. Eerder onderzoek [2] was gericht op de ontwikkeling van ventilatie/nachtkoeling. Tijdens pilots bleek echter dat bestaande scholen vaak niet over voldoende thermische massa beschikken. Verder stijgen door de klimaatverandering de buitentemperaturen voortdurend. Om oververhitting te verminderen is, naast passieve maatregelen zoals zonwering of groen rondom gebouwen, vaak koeling vereist. Mechanische koeling brengt extra investeringen en energieverbruik met zich mee.

Ten derde zijn veel scholen nabij drukke wegen gelegen en worden daardoor blootgesteld aan fijnstof. Dit kan worden opgelost door filtering van hoge kwaliteit toe te passen. Dit kan echter gepaard gaan met relatief hoge drukverliezen en dus verhoging van de ventilatorenergie.

Last but not least wordt er momenteel veel geld uitgegeven aan commissioning en monitoring tijdens de gebruiksfase om te verifiëren of het binnenklimaat voldoet aan de zogenaamde PvE frisse scholen programma-eisen [3]. In Nederland zijn

deze eisen opgesteld voor het binnenklimaat in scholen en bestaan uit drie klassen die vergelijkbaar zijn met het energielabelsysteem. De klasse C eisen zijn gebaseerd op de minimale wettelijke eisen, klasse B verwijst naar een goed binnenklimaat en klasse A een uitstekend klimaat. Zie tabel 1 voor een samenvatting. Aan alle vereisten moet gedurende 95% van de verblijftijd worden voldaan.

	Klasse C	Klasse B	Klasse A
CO ₂	1200 ppm	950 ppm	800 ppm
Zomer temperatuur	< 27°C	< 26°C	< 25,5°C
Winter temperatuur	> 19°C	> 20°C	> 21°C
Filter kwaliteit	> F5	> F6	> F7

Tabel 1: Samenvatting Programma van Eisen (PvE) Frisse Scholen 2015, [3].

Het doel van dit onderzoek was om een schoolventilatie-systeem te ontwikkelen dat deze problemen aanpakt en oplost en om vervolgens dit systeem op pilotschaal te testen om te bepalen of het voldoet aan de klasse A specificaties van de PvE frisse scholen programma-eisen (PvE frisse scholen) voor CO₂, zomertemperatuur, wintertemperatuur en PM_{2,5}.

Conceptontwikkeling

Het concept richt zich zowel op renovatie van bestaande scholen met natuurlijke ventilatie als op nieuwe scholen. Kern van het systeem is een balansventilatiesysteem met warmteterugwinning. Deze warmtewisselaar kan ook gebruikt worden voor indirecte adiabatische koeling. Om de prestaties in het TNO-lab te kunnen optimaliseren is een testmodel gemaakt met een transparante perspex zijkap, zie foto 1. Door verbetering van het spuitpatroon is de effectieve koeling verhoogd naar 1284 W bij een luchtstroom van 670 m³/h. Een inlaattemperatuur van 25°C en 55% RV werd afgekoeld tot 19,7°C. Geschat wordt dat er ongeveer 4 kW koelvermogen nodig is. Dit vereist dan een luchtstroom van $4000/1284 \cdot 670 = 2087$ m³/h per klaslokaal.

Voor de filtering is door VFA een elektrostatisch filtratiesysteem met lage drukval opgeschaald tot 10.000 m³/uur, zie foto 2a. Met deze luchtstroom kunnen 5 klaslokalen geconditioneerd worden. Het ASPRA-filtratiesysteem wordt voornamelijk binnenshuis gebruikt en gevoed met recirculatielucht. In deze toepassing wordt het filtersysteem gebruikt in de buitenlucht, die bij mistige

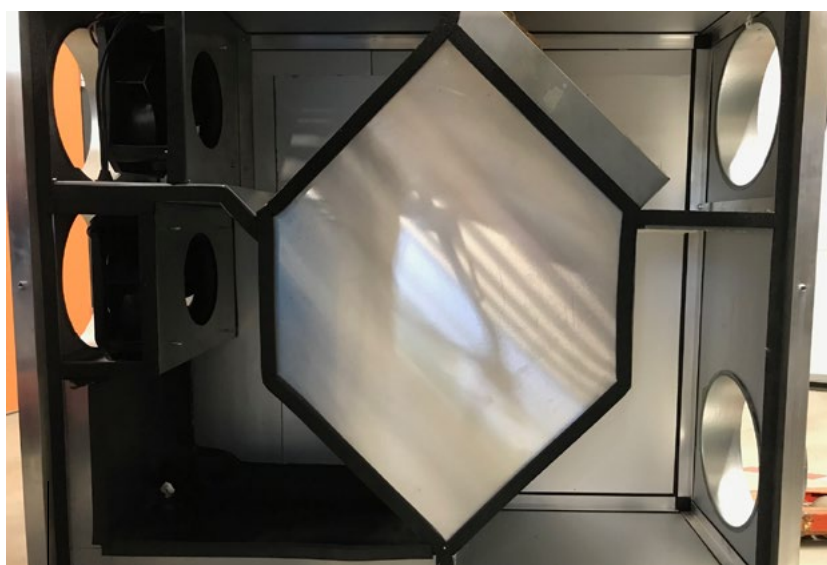


Foto 1: Doorsnede van lab schaal luchtbehandelingskast met indirecte adiabatische koeling. De sproei sectie zit rechts bovenop de aluminium platen warmtewisselaar.

buitenomstandigheden vochtig kan zijn. De onderzoeksvraag was daarom: wat is de invloed van een hoge luchtvochtigheid op de vangefficiëntie van deeltjes kleiner dan 2,5 µm (PM_{2,5})? Om dit te testen is een testopstelling opgesteld in het TNO Indoor Air Quality laboratorium, zie foto 2b. De ASPRA buis is gevoed met droge lucht en met bijna tot 100% bevochtigde lucht. De grote houten kist rechts stroomafwaarts van het filter bevat een verwarming met mengventilator om de luchtvochtigheid te verlagen tot ongeveer 50%. Dit maakt PM_{2,5} meting met een Grimm 11-R mogelijk. De tests toonden een reductie van bijna 100% PM_{2,5} bij zowel lage als hoge luchtvochtigheid.



Foto 2a: Elektrostatische filtratie module voor een 10.000 m³/h luchtbehandelingskast. In de buizen worden de deeltjes elektrisch opgeladen. Vervolgens wordt dit fijnstof afgevangen door het F7 plaatfilter aan de rechterzijde wat als collector fungeert.

2b. Laboratorium opstelling gebaseerd op één ASPRA buis. De collector zit in de aluminium box.

Pilot test

Na de succesvolle laboratoriumtesten is een pilot gestart op het Montessori Lyceum in Zeist. Deze school ligt op nog geen 50 m afstand van de A28, een drukke snelweg. De meeste klaslokalen zijn natuurlijk geventileerd. Vóór de installatie van het SchoolVent-systeem en vóór COVID-19 had dit in januari 2019 geleid tot CO₂-piekconcentraties van bijna 4000 ppm in de winter. In de zomer zorgde hoge temperaturen ervoor dat de school doorgaans 3 dagen per jaar gesloten was. De SchoolVent Air Handling Unit is op het dak geplaatst en verbonden met 5 klaslokalen, zie foto 3. De geconditioneerde lucht wordt in de klaslokalen geblazen met een T-vormige luchtzakken (airsocks).

In principe werkt het systeem als een Variabel Air Volume (VAV) systeem. Op basis van zowel CO₂-concentratie als temperatuur in de klas wordt de hoeveelheid lucht per klaslokaal geregeld met kleppen. Om te voorkomen dat verwarming en koeling elkaar gaan tegenwerken, zijn de radiatorknoppen voorzien van servomotoren die eveneens via het SchoolVent-systeem worden aangestuurd. In de 5 proeflokalen (N2 - N6) en een extra referentieklas (N7) zonder het SchoolVent systeem is monitoring uitgevoerd.

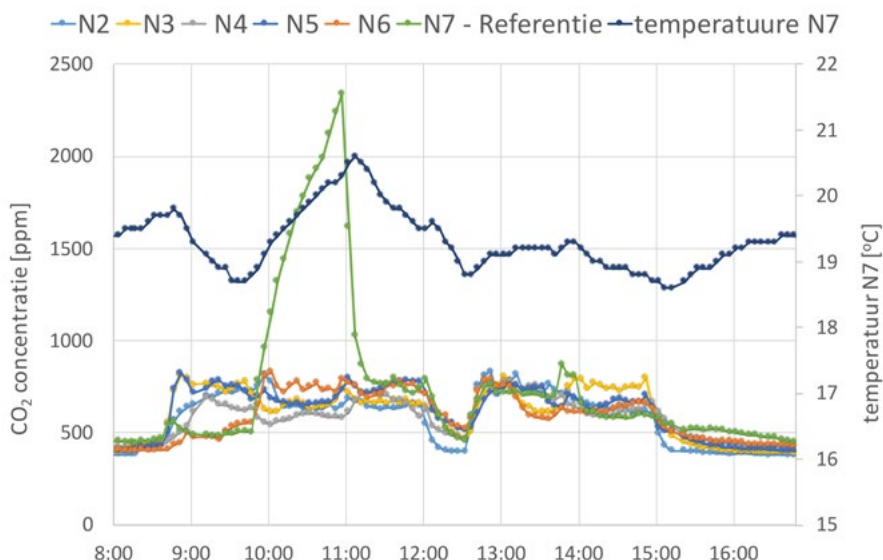
Monitoring resultaten voor CO₂, wintertemperatuur en warmteterugwin-efficiëntie.

Figuur 1 laat zien dat voor een typische schooldag alle klaslokalen die zijn uitgerust met het SchoolVent systeem voldoen aan de klasse A-vereiste van maximaal 800 ppm CO₂. In het referentielokaal N7 stijgt de CO₂ concentratie

Foto 3: SchoolVent luchtbehandelingskast met geïsoleerde lichtkanalen.



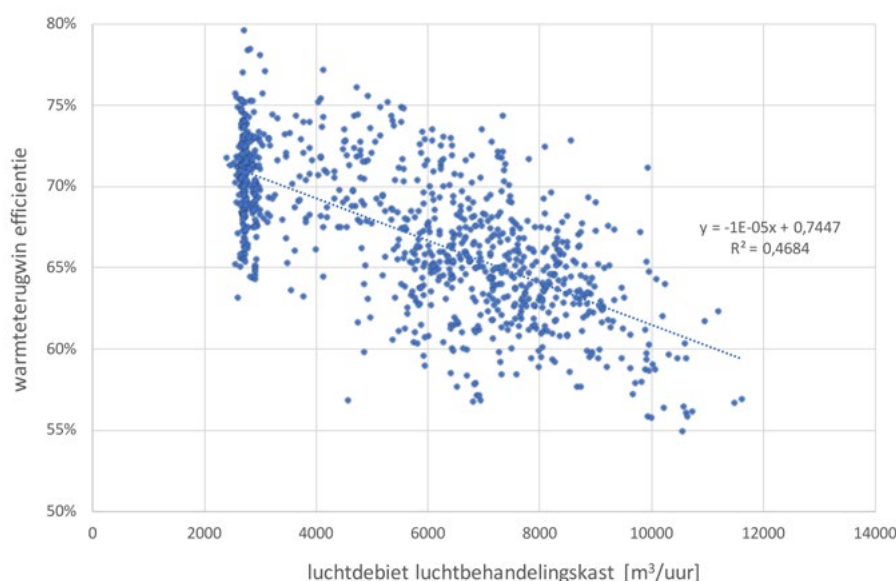
om 8:45 uur tot ongeveer 500 ppm en blijft constant tot 9:45 uur. Gedurende deze tijd daalt de temperatuur van 19,8 naar 18,7°C. Hoogstwaarschijnlijk werd ventilatie gerealiseerd door open ramen en om 9:45 uur werden de ramen gesloten omdat de temperatuur in de klas te laag werd. Dit resulteert in een temperatuurstijging tot 20,6°C. Dit gaat echter ten koste van een hoge CO₂ concentratie van 2339 ppm. Dit voorbeeld toont het dilemma tussen thermisch comfort en binnenluchtkwaliteit in natuurlijk geventileerde klaslokalen. Het thermisch comfort in de referentieklas voldoet niet aan de klasse C-eis.



Figuur 1: CO₂ concentratie op 3 december 2020 in klaslokaal N2 – N6 met het SchoolVent systeem en het referentie lokaal N7 waarvan ook de binnentemperatuur is getoond (rechter as).



Het SchoolVent-systeem is uitgerust met een platenwarmtewisselaar. Figuur 2 laat zien dat het warmteterugwinningsrendement tussen 60 en 75% ligt en negatief correleert met het debiet. Deze fluctuatie in het debiet wordt veroorzaakt door de CO₂ regeling op basis van de bezetting van de 5 klaslokalen. Naast energiereductie verbetert de warmteterugwinning ook het comfort. Bij 75% wordt de buitenlucht voorverwarmd tot 17°C. Deze temperatuur kan tochtvrij worden ingeblazen met de airsocks.



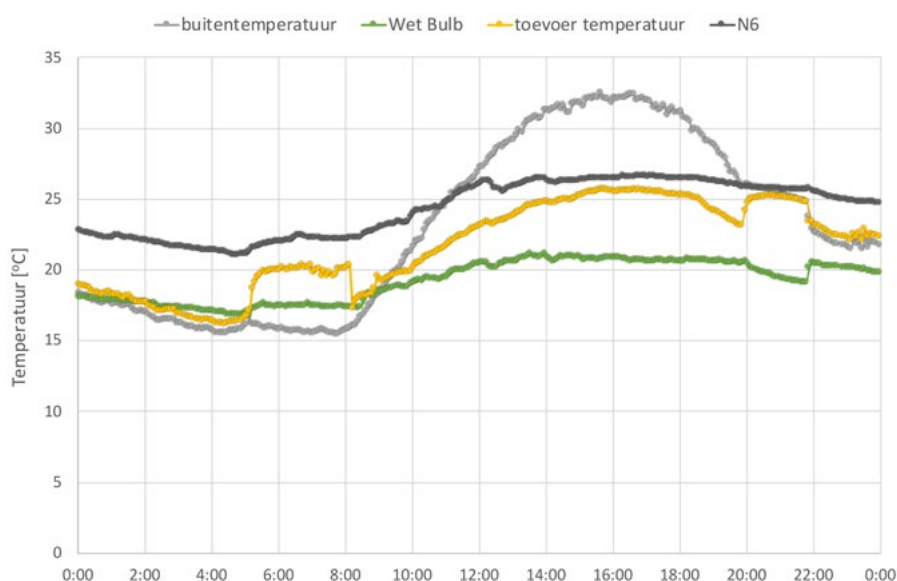
Figuur 2: Warmteterugwin efficiëntie tussen 8.30 – 15.00 uur in week 49 – 51 2020.

Monitoring resultaten zomertemperatuur

Figuur 3 toont het effect van de indirecte adiabatisehe koeling op de aanvoer en kamertemperatuur van klas N6 op een warme dag. Rond 14:00 uur is de aanvoertemperatuur ongeveer 6,5 K lager dan de buitentemperatuur. De luchtstroom richting klas N6 bedraagt dan 2000 m³/h. Hierdoor ontstaat een koelvermogen van 4,4 kW en blijft de binnentemperatuur op klasse A niveau.

Monitoring resultaten PM_{2,5}

Het rendement van het ASPRA filtersysteem in de Air Handling Unit (LBK) is bepaald met twee Grimm deeltjestellers (model 11-R en 1.109). De ene werd in de buitenlucht geplaatst en de andere in de LBK stroomafwaarts van het filtergedeelte. Figuur 4 laat zien dat het debiet een licht negatieve invloed heeft op het afvangrendement. Bij een debiet van 3000 m³/h bedraagt het minimum rendement 92% en bij 5500 m³/h zakt dit naar 82%. Bij 3000 m³/h wordt voldaan aan de EN1822 eisen van een E10 filter (>85%) en bijna van een E11 filter (>95%). Met betrekking tot PM_{2,5} wordt bij dit debiet 94,5% reductie bereikt.



Figuur 3: Buiten, natte bol, toevoer- en binnen-temperatuur in klaslokaal N6 op 15 September 2020.

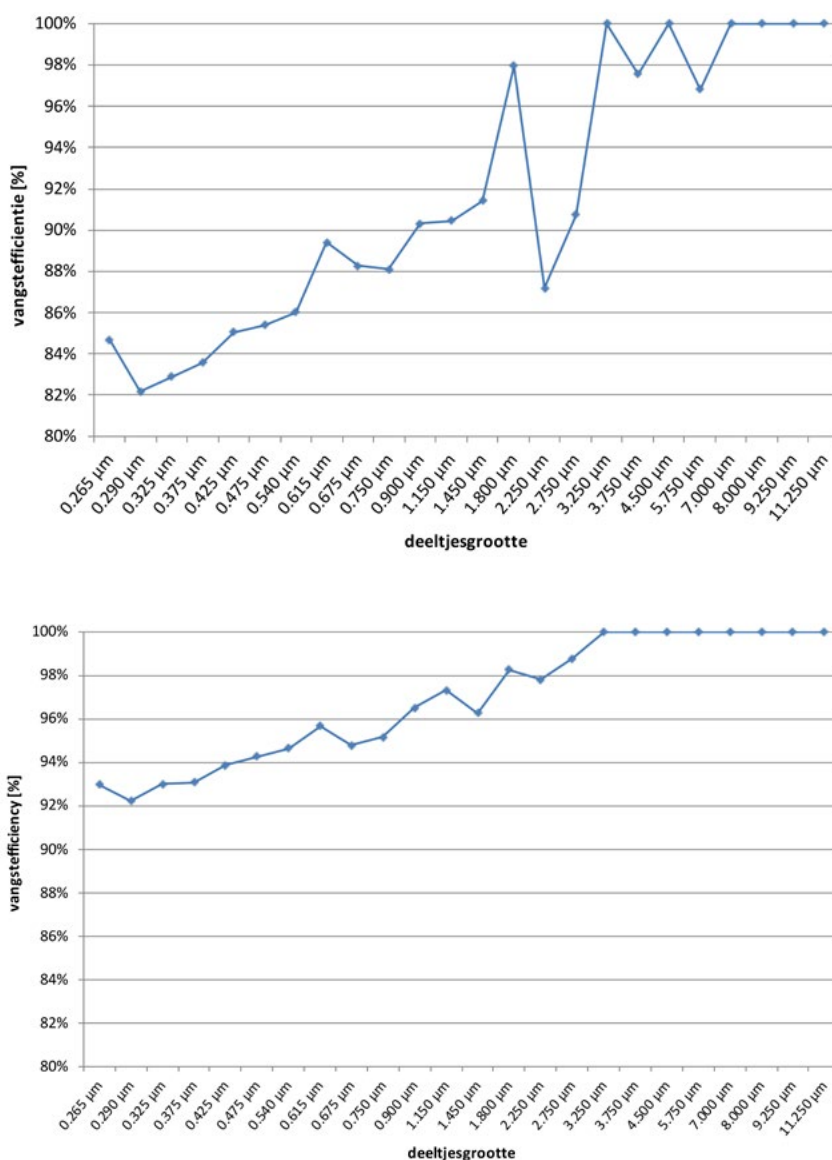
Een voorbeeld van het effect van het filtersysteem op het fijnstof in de klaslokalen is weergegeven in figuur 5. In klas N6 wordt om 5.45 uur gefilterde verse lucht ingeblazen. Hierdoor wordt de $PM_{2,5}$ concentratie verlaagd. In referentielokaal N7 gaan rond 8.30 uur de ramen open. Hierdoor stijgt de $PM_{2,5}$ concentratie binnenshuis naar de buitenconcentratie zoals gemeten door twee nabijgelegen nationale meetstations voor de buitenluchtkwaliteit.

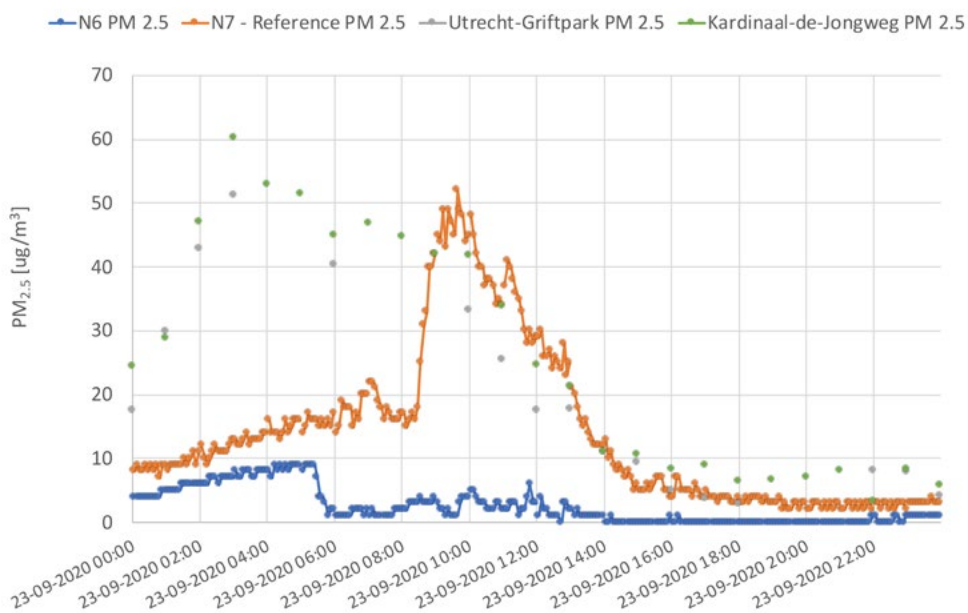
Tabel 2 vergelijkt de daggemiddelde $PM_{2,5}$ concentraties in klas N6 met de referentieklass N7 in week 49 – 51 van 2020. In klas N6 is de $PM_{2,5}$ concentratie 70 tot 96% lager dan in N7. De daggemiddelde concentratie in N7 is vergelijkbaar met de twee nabijgelegen meetstations voor de buitenluchtkwaliteit.

Discussie

Door installatie van het SchoolVent systeem is het binnenklimaat verbeterd. In de gerenoveerde klaslokalen is de luchtkwaliteit en vooral het thermisch comfort in de winter en zomer verbeterd tot klasse A. De pilot is uitgevoerd met een combinatie van een insectenwerend gaas als voorfilter en ASPRA elektrostatisch filter met een F7 plaat statisch filter als deeltjes collector. De drukval over deze filtercombinatie bedraagt 150 – 180 Pa bij 10.000 m³/h. Door het voorfilter te optimaliseren en een platenfilter met diepere zakken te selecteren, verwachten we dat de drukval kan worden verlaagd tot 70 – 100 Pa.

Figuur 4: Afvangst percentage per deeltjesgrootte, debiet a. 3000 m³/h, b. 5.500 m³/h.





Figuur 5: $PM_{2.5}$ fijnstof in lokaal N6 en referentie lokaal N7 op 23 september 2020.

Ter referentie: de drukval van een typisch E10/E11-filter bij deze luchtstroom is ongeveer 300 Pa, wat leidt tot veel hogere ventilatorenergie en geluid.

De studenten en docenten hebben positieve feedback gegeven op het systeem. De automatische temperatuur- en CO_2 regeling werd gewaardeerd. Wanneer de temperatuur in de zomer stijgt, is het pilotsysteem erg prettig omdat de temperatuur een paar graden kan worden gekoeld. Ook de verbetering van het thermisch comfort tijdens de winter was belangrijk aangezien de monitoringsperiode werd uitgevoerd tijdens de COVID-19-periode waarbij de ramen in de andere klaslokalen werden geopend voor voldoende ventilatie, wat veel tocht- en thermisch comfortklachten veroorzaakte. Sommige leraren rapporteerden ook gezondheidsverbeteringen in de proeflokalen. Dit kan worden veroorzaakt door de hogere ventilatie en de veel lagere PM-concentratie.

De positieve feedback heeft geleid tot de installatie van het systeem in nog eens 14 klaslokalen in 2021 op het Montessori Lyceum. Meer informatie, waaronder een filmpje van het systeem is vermeld op www.schoolvent.nl

Verantwoording

Het project is uitgevoerd met de Topsector Energiesubsidie van het Ministerie van Economische Zaken. Daarnaast heeft de Provincie Utrecht een bijdrage geleverd door te assisteren bij het vinden van de pilotlocatie en heeft zij financieel bijgedragen aan de installatiekosten.

		fijnstof [$\mu g/m^3$]		reductie	fijnstof buiten	Kardinaal
		N6	N7	[%]	Griftpark	de jong weg
week 49	ma 30 nov.	9,8	44,9	78,1%	45,3	50,3
	di 1 dec.	1,3	6,0	77,6%	6,2	6,8
	wo 2 dec.	3,3	18,9	82,6%	12,8	16,0
	do 3 dec.	2,0	10,9	81,3%	13,4	16,7
	vrij 4 dec.	0,1	1,3	96,0%	0,6	6,1
week 50	ma 7 dec.	1,7	8,0	78,2%	16,0	21,6
	di 8 dec.	2,6	11,4	76,9%	18,2	21,9
	wo 9 dec.	4,8	22,1	78,3%	22,2	28,5
	do 10 dec.	3,7	12,4	70,6%	15,2	19,9
	vrij 11 dec.	2,9	9,7	70,4%	13,2	17,2
week 51	ma 14 dec.	2,1	8,9	76,1%	16,0	21,6
	di 15 dec.	2,5	11,3	77,5%	17,5	21,7
	wo 16 dec.	4,8	22,7	79,0%	21,8	26,9
	do 17 dec.	3,7	12,7	70,5%	15,4	20,6
	vrij 18 dec.	2,8	9,5	71,0%	12,7	16,1

Tabel 2: Daggemiddelde $PM_{2.5}$ tijdens lesuren (8.30 – 15.00 uur) in klaslokaal N6, N7 en twee buitenlucht luchtkwaliteit meetstations.

Referenties

- Aine B, Byrne M, Armstrong S, Sheahan J and, 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, Volume 122, September 2017, Pages 126-133
- Jacobs P, van Oeffelen E C M and Knoll B, 2008, Diffuse ceiling ventilation, a new concept for healthy and productive classrooms, Proceedings of Indoor Air 2008 conference.
- PvE frisse scholen: <https://www.rvo.nl/onderwerpen/duurzaam-ondernemen/gebouwen/verduurzaming-utiliteitsbouw/maatschappelijk-vastgoed/onderwijs-po-en-vo>