

Leeghwaterstraat 44  
2628 CA Delft  
Postbus 6012  
2600 JA Delft

[www.tno.nl](http://www.tno.nl)

T +31 88 866 22 00

## TNO-rapport

**TNO 2021 R10798**

# Openbaar eindrapport - Schoolventilatie met energiezuinige koeling en lage druk filtering (SchoolVent)

Datum	10 mei 2021
Auteur(s)	ir. P. Jacobs dr. R.E.J. Kemp ir. F.G.H. Koene
Aantal pagina's	60 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	2
Opdrachtgever	TKI Urban Energy
Projectnaam	SchoolVent
Projectnummer	060.28131

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.

© 2021 TNO

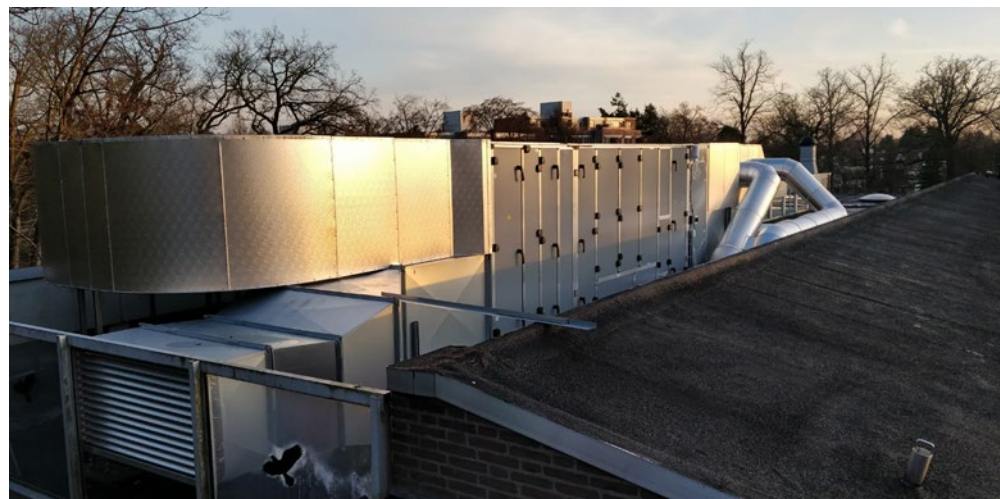
## Samenvatting

### Aanleiding

Nederland streeft naar een energieneutrale gebouwde omgeving in 2050. Ook scholen moeten hieraan bijdragen. Bij de huidige energetische renovatie van scholen treedt echter een probleem op: toename van oververhitting. Dit vraagt om de ontwikkeling van energiezuinige koeltechnieken die bij renovatie toepasbaar zijn en niet of nauwelijks tot meer kosten leiden ten opzichte van een standaard ventilatiesysteem. Naast koeling is filtering van de lucht met name van belang voor scholen, bijvoorbeeld nabij drukke wegen, zogenaamde gevoelige bestemmingen. Conventionele filters hebben een hoge luchtweerstand en consumeren hierdoor veel energie en veroorzaken veel geluid. Derde verbeterpunt in scholen is dat momenteel veel geld wordt besteed aan opleveringsmetingen en monitoring van luchtbehandelingssystemen. Dit gaat ten koste van het investeringsbudget.

### SchoolVent concept

Het SchoolVent concept is door Lucam, VFA Solutions en TNO succesvol ontwikkeld tot een energiezuinig ventilatiesysteem toepasbaar bij renovatie van scholen om aan voorgaande verbeterpunten te beantwoorden. De componenten zijn eerst in het TNO laboratorium in Delft beproefd. Daarna is het volledige systeem in een pilot, bestaande uit 5 lokalen van een middelbare school, beproefd en vergeleken met de Ausgangssituatie en met een referentielokaal. Deze pilot is na bemiddeling en financiële ondersteuning vanuit de "Uitvoeringsagenda gezonde lucht regio Utrecht 2018 – 2023" van de Provincie Utrecht uitgevoerd op het Jordan Montessori Lyceum Utrecht in Zeist. Vergeleken met de Ausgangssituatie en het referentielokaal is het binnenklimaat sterk verbeterd. De leerkrachten en leerlingen zijn zeer tevreden met het binnenklimaat. In de volgende paragrafen worden de belangrijkste resultaten behandeld.



Figuur 1 SchoolVent luchtbehandelingskast.

### Filtering

Het VFA ASPRA elektrostatische filter is opgeschaald van 2.000 naar 10.000 m<sup>3</sup>/uur en is ingebouwd in de filtersectie van de luchtbehandelingskast, zie Figuur 1. Het filterrendement voldoet bij een bijna 80% lagere drukval aan de specificaties

van een E10 filter. Bij een laag debiet (3.000 m<sup>3</sup>/uur) wordt zelfs bijna aan de specificaties voor E11 filter voldaan. Fijnstof (PM<sub>2.5</sub>) wordt voor 90 – 95% verwijderd uit de toevoerlucht. In de geklimatiseerde lokalen zorgt dit voor een 70 tot 96% lagere PM<sub>2.5</sub> concentratie vergeleken met het referentielokaal.

### **CO<sub>2</sub>**

De CO<sub>2</sub>-concentratie in een ruimte is een maat voor de hoeveelheid ventilatie per persoon. Hoe hoger de CO<sub>2</sub>-concentratie, des te lager de ventilatie. Zowel in de geklimatiseerde lokalen als in het referentielokaal wordt in het stookseizoen voldaan aan Frisse Scholen klasse A. Met name in het referentielokaal is dit een gevolg van extra ventilatie door de geopende ramen vanwege COVID-19. Dit gaat wel ten koste van de binnentemperatuur. Op enkele dagen bleken de ramen gesloten, mogelijk vanwege een te lage binnentemperatuur en steeg de CO<sub>2</sub>-concentratie naar ruim 2.000 ppm. Vergeleken met de situatie vóór de plaatsing van het SchoolVent ventilatiesysteem in het pre-corona tijdperk in januari 2019 is de ventilatie sterk verbeterd. Destijds traden piekconcentraties op tot bijna 4.000 ppm CO<sub>2</sub>.

### **Wintertemperatuur en WTW rendement**

Het warmteterugwinning (WTW) rendement gemeten in de pilot in de school bedraagt tussen de 60 en 70%. De fluctuatie wordt veroorzaakt door de vraagsturing op basis van de bezetting van de verschillende klaslokalen middels meting van de CO<sub>2</sub>-concentratie. Gemiddeld bedroeg het WTW rendement 67% bij een totaal luchtdebiet van 5.619 m<sup>3</sup>/uur, dit is een luchtdebiet van 1.124 m<sup>3</sup>/uur per lokaal. In de lokalen met het SchoolVent systeem is klasse A voor de wintertemperatuur (>21 °C) haalbaar. Echter in de praktijk blijkt dat de leerkrachten een lagere temperatuur prettiger vinden. In het referentielokaal was de temperatuur door de geopende ramen dermate laag, veelal 18 tot 19 °C, dat niet eens aan klasse C van Frisse Scholen werd voldaan.

### **Zomertemperatuur en koelrendement**

Het beoogde koelvermogen met indirecte adiabatische koeling wordt zowel in het laboratorium als tijdens de pilot behaald. Wel is de dauwpunt efficiëntie in de pilot bij het hoge luchtdebiet van 2.000 m<sup>3</sup>/uur per lokaal lager dan de beoogde 75%. In de proeflokalen N6 en N7 is gedurende de warme periode van september 2020 aan klasse A zomertemperatuur van Frisse Scholen voldaan. Aanbeveling is om de warmte-instroom in lokalen aan de westzijde te verlagen door verbeterde dakisolatie en optimaal gebruik van de zonwering.

### **Dashboard op basis van Smart sensing**

Er is voor de gebruikers een dashboard ontwikkeld voor automatische rapportage van het binnenklimaat op basis van het Programma van Eisen Frisse Scholen. Dit dashboard, weergegeven in Figuur 2, maakt gebruik van de sensordata waarmee het SchoolVent systeem vraaggestuurd wordt aangestuurd.



Figuur 2 Ontwikkelde smart sensing dashboard voor de eindgebruiker, links geklimatiseerd lokaal N6 en rechts referentielokaal N7 gedurende een week.

### Conclusie

De ontwikkeling van het SchoolVent concept heeft geresulteerd in een systeem welke ervoor zorgt dat de leeromgeving wordt voorzien van schone geklimatiseerde lucht op een bijzonder energie-efficiënte en duurzame manier voor een gezonde leeromgeving. De kwaliteit van de lucht wordt continue gemonitord en indien noodzakelijk bijgesteld door de regeling. Het systeem voldoet ruimschoots aan de normering welke gesteld worden voor schoolventilatie klasse A.

### Vervolg

De school in Zeist is dermate enthousiast over de prestaties van het SchoolVent luchtbehandelingsstelsel dat ze Lucam/VFA heeft gevraagd om een offerte te maken voor de klimatisering van de overige lokalen in de school.

Deze offerte is in opdracht gegeven om 14 klaslokalen te gaan voorzien met het schoolvent systeem. Bij de invulling is gekozen voor decentrale luchtbehandelingskasten waarbij 2 tot 4 lokalen worden voorzien van geconditioneerde en schone lucht. Hiermee wordt het geïsoleerde kanaalwerk en aanvullende kleppen gereduceerd.

De overige 10 lokalen zullen later worden voorzien van het schoolvent systeem in combinatie met gewenste bouwkundige aanpassingen.

# Inhoudsopgave

	<b>Samenvatting .....</b>	<b>2</b>
<b>1</b>	<b>Gegevens project.....</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Inleiding .....</b>	<b>7</b>
2.1	Achtergrond .....	7
2.2	Doelstelling .....	9
2.3	Werkwijze .....	10
<b>3</b>	<b>Programma van eisen .....</b>	<b>11</b>
3.1	PvE Frisse Scholen 2015 .....	11
3.2	PvE SchoolVent.....	11
<b>4</b>	<b>WP 2 Conceptontwikkeling.....</b>	<b>14</b>
4.1	Smart sensing.....	14
4.2	Indirecte adiabatise koeling .....	17
4.3	Elektrostatise filtermodule.....	19
<b>5</b>	<b>WP 3 laboratorium onderzoek.....</b>	<b>22</b>
5.1	Mistmetingen elektrostatise filtering.....	22
5.2	Verdampingskoeling .....	28
<b>6</b>	<b>Pilottest.....</b>	<b>32</b>
6.1	Jordan Montessori Lyceum Utrecht.....	32
6.2	Ontwerp luchtbehandelingskast met kanalsysteem en regeling .....	33
6.3	Installatie en in bedrijfstelling.....	35
6.4	Monitoring .....	36
6.5	Gebruikers feedback en automatische rapportage binnenklimaat .....	51
<b>7</b>	<b>Conclusies en mogelijkheden voor spin off en vervolgactiviteiten .....</b>	<b>53</b>
7.1	Conclusies en aanbevelingen.....	53
7.2	Mogelijkheden voor spin off en vervolgactiviteiten .....	54
<b>8</b>	<b>Ondertekening .....</b>	<b>55</b>
	<b>Bijlage(n)</b>	
	A Foto's installatie plaatsing luchtbehandelingskast	
	B Correctiefactoren per deeltjesgrootte	

# 1 Gegevens project

Projectnummer: TEUE117025

Projecttitel: Schoolventilatie met koeling en lage druk filtering (SchoolVent)

Penvoerder: TNO

Medeaanvragers: VFA Solutions B.V.  
Lucam B.V.

Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Nationale regelingen EZ-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.

## 2 Inleiding

### 2.1 Achtergrond

Nederland streeft naar een energieneutrale gebouwde omgeving in 2050. Ook scholen moeten hieraan bijdragen. Een aantal voorloper gemeentes in de provincie Utrecht, zoals Zeist, zijn hiermee al druk bezig in de vorm van een strategisch huisvestingsplan<sup>1</sup>. Gemeente Den Haag<sup>2</sup> wil vóór 2040 alle scholen klimaatneutraal maken. Daarnaast wil de gemeente Den Haag samen met de GGD Haaglanden 82 gevoelige locaties nabij drukke wegen, waarvan een groot deel scholen, van goede filters voorzien om de binnenluchtkwaliteit te verbeteren<sup>3</sup>. Ook de Gemeente Amsterdam is bezig met het programma Gezonde schoolgebouwen<sup>4</sup>. Hiermee worden jaarlijks 30 bestaande scholen op de aspecten fijnstof, lucht en licht van een gezond binnenklimaat voorzien. Betere temperatuurbeheersing is zowel in Amsterdam als Den Haag nog niet als doelstelling opgenomen. Om de aanleiding en probleemstelling van het project goed te beschrijven wordt hier nader ingegaan op de problemen met schoolventilatiesystemen:

#### **Conventionele filters veroorzaken extra energiegebruik, geluid en onderhoud**

Door de GGD worden steeds hogere eisen gesteld aan luchtfilters in schoolventilatiesystemen. Nabij drukke wegen worden in verband met gezondheidswinst F9 filters geëist. Deze filteren zeer goed fijnstof en roet, maar ze veroorzaken door de toegenomen drukval in het luchtkanalenstelsel meer energieverbruik, meer geluid en moeten meerdere malen per jaar worden vervangen, wat zeker bij decentrale units de onderhoudskosten flink verhoogt. Nog betere filters, zogenaamde Efficiency Particulate Air Filters (E filters conform EN 1822) worden niet toegepast omdat deze bij toepassing in scholen een te hoge geluidsproductie zouden veroorzaken om aan de strenge geluideisen te voldoen. Elektrostatistische filtering, een innovatieve filter oplossing met een filterkwaliteit gelijkwaardig aan een E10/11 filter, heeft een 80% lagere drukval en is succesvol toegepast bij proeven in een kinderdagverblijf<sup>5</sup> en een basisschool. Decentraal toegepast is deze techniek relatief duur. Om deze energiezuinige technologie grootschalig te kunnen toepassen is in dit project de huidige unit van 2.000 naar 10.000 m<sup>3</sup>/uur opgeschaald, zodat deze in plaats van een conventionele zakkenfilter in de filtersectie van een centrale luchtbehandelingskast kan worden toegepast.

#### **Oververhitting in klaslokalen door energiebesparing**

Het binnenklimaat in 80% van de basisscholen is niet op orde. De overheid heeft in de persoon van de Rijksbouwmeester aangegeven<sup>6</sup> dat het gewenst is dat alle scholen minimaal conform Frisse Scholen klasse B worden geklimatiseerd. Bij renovatie wordt meestal de ventilatie verbeterd met balansventilatie met

<sup>1</sup> [https://zeist.raadsinformatie.nl/document/7330144/1/06\\_0-19RV005\\_Strat\\_huisvest\\_plan\\_Onderwijs\\_-\\_Bijlage\\_6\\_Strategisch\\_Huisvestingsplan\\_2019-2034](https://zeist.raadsinformatie.nl/document/7330144/1/06_0-19RV005_Strat_huisvest_plan_Onderwijs_-_Bijlage_6_Strategisch_Huisvestingsplan_2019-2034)

<sup>2</sup> <https://denhaag.d66.nl/2017/04/schoolgebouwen/>

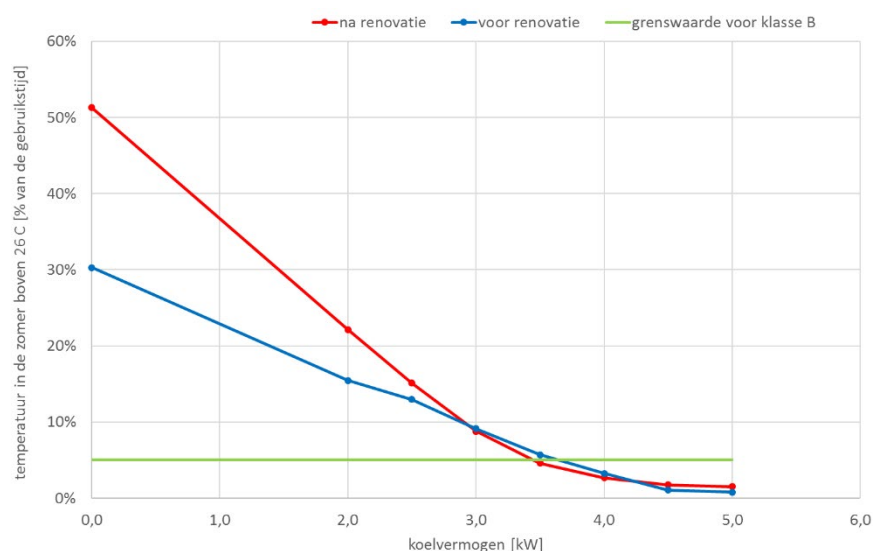
<sup>3</sup> [https://denhaag.raadsinformatie.nl/document/3321118/1/RIS283356\\_Bijlage%20Actieplan%20luchtkwaliteit%202015-2018](https://denhaag.raadsinformatie.nl/document/3321118/1/RIS283356_Bijlage%20Actieplan%20luchtkwaliteit%202015-2018)

<sup>4</sup> [Programma gezonde schoolgebouwen 2015 - 2018 uitvoeringsplan](https://www.piano.nl/sites/default/files/documents/documents/programma_gezonde_schoolegebouwen_2015_-_2018_uitvoeringsplan)

<sup>5</sup> [publications.tno.nl/publication/105428/hqQ7pu/TNO-060-DTM-2012-01945.pdf](https://publications.tno.nl/publication/105428/hqQ7pu/TNO-060-DTM-2012-01945.pdf)

<sup>6</sup> <https://www.piano.nl/sites/default/files/documents/documents/rapportgezondengoedscholenbouwintopconditierijksbouwmeester.pdf>

warmteterugwinning en wordt na-geïsoleerd door betere beglazing en extra dak- en gevelisolatie. Bij dergelijke energetische renovaties van scholen treedt echter ook een ander probleem op: toename van oververhitting. Dit probleem is door de PO raad ook gesignaleerd<sup>7</sup> en in verband gebracht met Deens onderzoek dat één graad temperatuurverhoging tot 3,5% prestatieverlies van scholieren leidt. Figuur 1 laat zien dat in het zomerseizoen in een doorsnee klaslokaal zonder koeling het gedurende 30% van de tijd warmer is dan 26 °C. Na renovatie neemt dit toe tot 50% van de tijd.



*Figuur 3 Percentage van de lestijd dat de temperatuur in een leslokaal boven 26 °C komt als functie van het geïnstalleerde koelvermogen. Om aan klasse B, PvE Frisse Scholen te voldoen mag dit maximaal 5% zijn (groene lijn)<sup>8</sup>.*

Koeling vermindert het oververhittingsprobleem, er blijkt minimaal 3,5 kW koelcapaciteit nodig per lokaal om te voldoen aan frisse scholen klasse B, zie Figuur 3. TRNSYS simulaties door TNO<sup>9</sup> geven aan dat het energiegebruik van conventionele koeling de energiebesparing op de verwarming door de renovatie vrijwel helemaal teniet doet. Dit vraagt om ontwikkeling van energiezuinige koeltechnieken die bij renovaties toepasbaar zijn en niet of nauwelijks tot meerkosten op de energierekening leiden. Indirecte adiabatische koeling, gebruikmakend van in de meeste ventilatiesystemen reeds aanwezige tegenstroom warmtewisselaar, zou hiervoor een goede kandidaat zijn. Van belang hierbij is dat het warmteterugwin (WTW) rendement in de winter hierdoor niet wordt verminderd.

### Open ramen doen effect luchtfilters teniet

Een belangrijke meerwaarde van koeling bij gevoelige bestemmingen is dat de ramen gesloten kunnen blijven en wordt voorkomen dat het effect van luchtfilters in het ventilatiesysteem vrijwel teniet wordt gedaan door het openen van ramen. Dit wordt geïllustreerd door Figuur 4, die laat zien dat bij gesloten ramen de roet concentratie binnen (rode lijn in linkerdeel grafiek) veel lager is dan buiten (blauwe

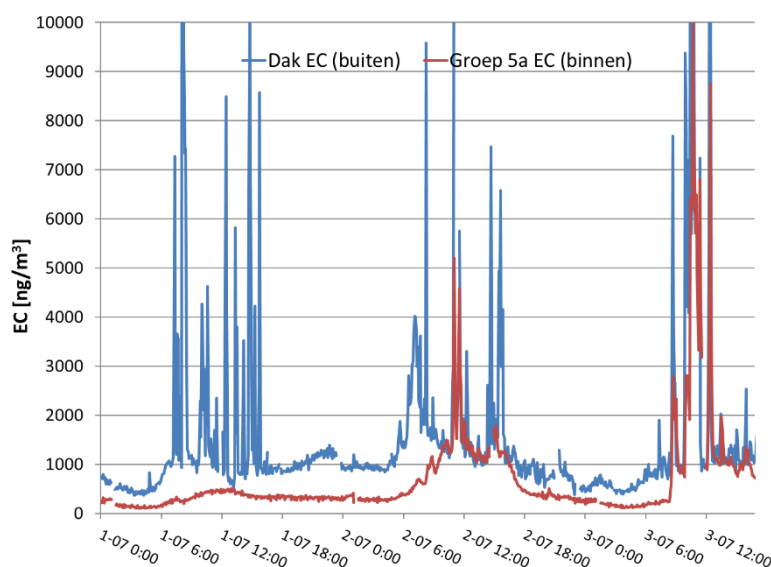
<sup>7</sup> <https://www.poraad.nl/weblogs/rinda-den-besten-stoken-voor-de-mussen>

<sup>8</sup> Bron: vooronderzoek voor Lucam in kader van MIT voucher MTVLA16517 op basis van TRNSYS simulaties

<sup>9</sup> Warmteterugwinning in scholen of passief koelen?, P. Jacobs, W. Kornaat, Bouwfysica 1, 2014



lijn) en dat door het openen van ramen de roet concentratie binnen (rode lijn, rechter deel van de grafiek) toeneemt tot vrijwel de buitenconcentratie.



Figuur 4 Haagse basisschool met F7 filters, op donderdag 2 en vrijdag 3 juli was met open ramen (blauwe lijn) de concentratie Elementair Koolstof (EC) veel hoger dan op woensdag 1 juli met gesloten ramen (rode lijn).

### Ontbreken van smart sensing

Bij toepassing van de RVO frisse scholen toets<sup>10</sup> wordt de binnenluchtkwaliteit na oplevering van het ventilatiesysteem intensief gemonitord om de werking ervan te garanderen. Veelal wordt hiervoor een separaat monitoring systeem in een aantal klaslokalen geplaatst. Vervolgens moeten de data worden geanalyseerd en teruggekoppeld aan de betreffende school. Daarnaast worden opleveringscontroles uitgevoerd waarin per klaslokaal het luchtdebiet en het geluidsniveau worden vastgesteld. De kosten voor deze monitoring en opleveringscontroles kunnen zeer hoog zijn en geven beperkt feedback aan de gebruikers. Via in het ventilatiesysteem ingebouwde smart sensing zou een goede werking met relatief geringe monitoringsinspanning over een langere tijdsperiode kunnen worden gegarandeerd. Voor gebruikers kan de data worden gepresenteerd in een eenvoudig dashboard. Ook kan fijnstof monitoring worden toegevoegd, die in de huidige RVO frisse scholen toets ontbreekt.

## 2.2 Doelstelling

Ontwikkeling en praktijktest van een centraal lagedrukventilatiesysteem met gegarandeerde luchtkwaliteit (CO<sub>2</sub> én fijnstof) en thermisch comfort, met lagere investerings-, onderhouds-, en energiekosten en bij uitstek geschikt voor de renovatie van bestaande scholen. In de praktijktest dient de werking van dauwpuntkoeling en elektrostatische filtering onderzocht te worden en of smart

<sup>10</sup> [http://www.rvo.nl/sites/default/files/2016/03/Frisse\\_Scholen\\_Toets\\_V3.pdf](http://www.rvo.nl/sites/default/files/2016/03/Frisse_Scholen_Toets_V3.pdf)

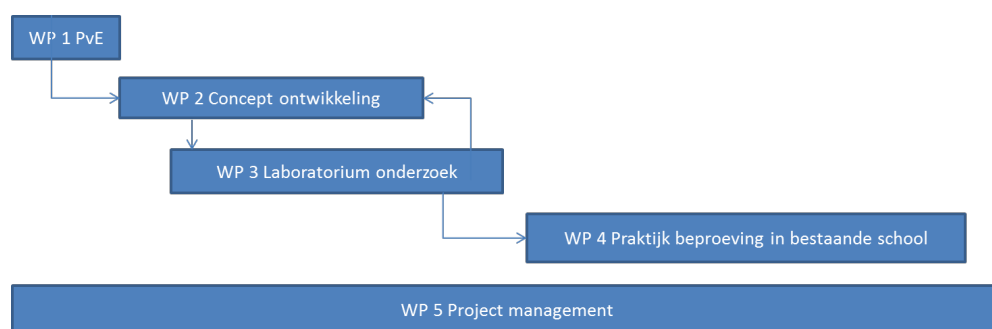
sensors in staat zijn om betrouwbaar CO<sub>2</sub>, RV, T én PM<sub>2,5</sub> fijnstof over langere duur te monitoren.

## 2.3 Werkwijze

De werkwijze en projectopbouw van het SchoolVent project is in Figuur 5 weergegeven. In werkpakket 1 (WP 1 - hoofdstuk 3) is door alle partners gezamenlijk het Programma van Eisen (PvE) opgesteld op basis van het PvE Frisse scholen uitgegeven door RVO. Aanvullend zijn vanuit ieders specifieke expertise eisen gesteld ten aanzien van filtering en koeling. Met betrekking tot legionella beheersing is een externe deskundige geraadpleegd.

In werkpakket 2 (hoofdstuk 4) zijn op basis van bureaustudie concepten ontwikkeld voor smart sensing, indirecte adiabatische koeling en elektrostatische filtering. Hierbij zijn ook een aantal vragen opgekomen die parallel in werkpakket 3 (hoofdstuk 5) in het laboratorium zijn onderzocht.

Met de resultaten van het laboratorium onderzoek is in WP 4 (hoofdstuk 6) het ontwerp opgesteld voor de pilot opstelling. VFA Solutions was hierbij verantwoordelijk voor het ontwerp van het elektrostatische filter. Lucam was verantwoordelijk voor het ontwerp van het de indirecte adiabatische koeling en de integratie van het elektrostatische filter. TNO was verantwoordelijk voor de selectie van een geschikte praktijklocatie en het ontwerp en toetsing van de monitoring om aan te tonen dat het binnenklimaat aan het PvE voldoet. Alle partners hebben intensief samengewerkt met de betreffende school om maximale terugkoppeling te krijgen op het SchoolVent concept, zodat tussentijds en ook na het project verbeteringen doorgevoerd konden worden. Er is aan het eind van het project geprobeerd om op een objectieve manier feedback van gebruikers te krijgen. Hiervoor was een enquête opgesteld. Helaas was het door de COVID-19 lock-down vanaf medio december 2020, waardoor geen onderwijs meer werd gegeven, niet meer mogelijk om deze enquête in te laten vullen.



Figuur 5 Werkwijze aan de hand van een schematische weergave van de werkpakketten.

## 3 Programma van eisen

### 3.1 PvE Frisse Scholen 2015

Het Programma van Eisen in dit onderzoek is gebaseerd op het “Programma van Eisen Frisse Scholen 2015” Onderstaande tabel geeft hier een samenvatting van.

Tabel 1 Samenvatting Programma van eisen Frisse Scholen 2015.

	<b>Klasse C</b>	<b>Klasse B</b>	<b>Klasse A</b>
CO <sub>2</sub>	1200 ppm	950 ppm	800 ppm
Ventilatiecapaciteit p.p.	> 21,6 m <sup>3</sup> /uur	> 30,6 m <sup>3</sup> /uur	> 43,2 m <sup>3</sup> /uur
Ventilatiecapaciteit klas	> 670 m <sup>3</sup> /uur	> 949 m <sup>3</sup> /uur	> 1339 m <sup>3</sup> /uur
Zomertemperatuur	< 27 °C	< 26 °C	< 25,5 °C Per lokaal regelbaar met een band breedte van 4 °C
Wintertemperatuur	> 19 °C	> 20 °C	> 21 °C
Filterkwaliteit	> F5	> F6	> F7
Installatiegeluid	< 35 dB	< 33 dB	< 30 dB

Uitgangspunt voor bezetting is 30 leerlingen en 1 docent. Aan de eisen dient gedurende 95% van de gebruikstijd te worden voldaan. Bij de berekening van dit percentage ten aanzien van de zomertemperatuur wordt alleen de tijd van aanwezigheid in het lokaal beschouwd op dagen dat de 24-uur gemiddelde buitentemperatuur groter is dan 10 graden. Dit is de definitie van “zomer” in het Programma van Eisen (PvE) Frisse Scholen. Voor koeling zijn de eisen uit het PvE gehanteerd die gelden voor “zichtbare actieve koeling”.

#### Eisen ten aanzien van smart sensing

De RVO frisse scholen toets, geeft de volgende toetscriteria ten aanzien van metingen na de oplevering:

Duurmeting in minimaal twee representatieve ruimtes gedurende minimaal 10 dagen:

- CO<sub>2</sub> bij winterweer;
- Operatieve temperatuur winter;
- Operatieve temperatuur zomer.

Met smart sensing kunnen deze opleveringsmetingen automatisch worden uitgevoerd met de sensoren die in elk lokaal aanwezig zijn om de ventilatie aan te sturen.

### 3.2 PvE SchoolVent

Voor dit project gaan we uit van het in Tabel 2 vermelde Programma van Eisen ten aanzien van het binnenklimaat en de luchtbehandelingskast (LBK).

Tabel 2 Programma van eisen binnenklimaat en luchtbehandelingskast

In klaslokaal	uitgangspunt	PVE frisse scholen, klasse
CO <sub>2</sub>	< 800 ppm	A
Zomertemperatuur	< 25,5 °C	A
Installatiegeluid <sup>1</sup>	< 30 dB	A
Smart sensing	Sensoren klimaatsysteem gebruiken voor Frisse Scholen opleveringscontrole CO <sub>2</sub> en thermisch comfort zomer en winter	

<sup>1</sup>Installatie geluid wordt bepaald in opleveringsmeting

luchtbehandelingskast	uitgangspunt	PVE frisse scholen, klasse
Maximum debiet	10.000 m <sup>3</sup> /uur	n.v.t.
COP <sup>1</sup>	> 10	n.v.t.
Dauwpunt efficiëntie	> 75%	n.v.t.
WTW efficiëntie	> 80%	n.v.t.
Filterkwaliteit winter	E10	A++
Filterkwaliteit zomer	F7	A

<sup>1</sup>Definitie COP: koelvermogen gedeeld door extra benodigd ventilatorvermogen

Filtervervanging: 2 maal per jaar (afhankelijk van locatie)

Filterkwaliteit ten aanzien PM<sub>2,5</sub>: 97 – 99,5% afvangst. De filterkwaliteit is afhankelijk van de aanstroomsnelheid van de ionisatiesectie en de collector. De aanstroomsnelheid is in de zomer tot tweemaal zo hoog als in de winter in verband met de noodzakelijke koelcapaciteit.

Ten aanzien van Legionella is een externe expert geraadpleegd<sup>11</sup>. Deze heeft een legionella risicoanalyse uitgevoerd. Conclusie was dat bij normaal bedrijf geen aerosol verspreiding optreedt en dat door de bedrijfswijze en het ontwerp het versproeiende proceswater legionella veilig is. Om deze reden zijn een beheersplan en een logboek niet vereist.

Het ontwerp omvat onder andere de volgende maatregelen:

- Het gebruikte water is onthard leidingwater.
- In droog bedrijf is de opvangbak leeg. In nat bedrijf wordt het water in de opvangbak minimaal 1 x per 24 uur gespuid, waardoor indikking van het water wordt voorkomen.
- Na de pomp stroomt het water langs een UV lamp waardoor eventueel aanwezige bacteriën worden gedood voordat het water wordt verspreid.

### Koelcapaciteit

Op basis van TRNSYS berekeningen is bepaald dat voor klasse A een koelvermogen van ca. 4 kW per lokaal nodig is, afhankelijk van de thermische isolatie en zonbelasting van het lokaal. Voor klasse B is een koelvermogen van 3,5 kW nodig. Hierbij is uitgegaan dat buitenzonwering aanwezig is. Bij aanname van een inblaasttemperatuur 6 K onder de ruimtetemperatuur (de huidige prestatie van

<sup>11</sup> Beoordeling Legionellaveiligheid Lucam indirecte adiabatische koeler, van Wolferen Research, rapport 2021-003, maart 2021

indirecte adiabatiscbe koeling) is voor 4 kW koelvermogen 2.000 m<sup>3</sup>/uur per lokaal toevoerlucht nodig. Voor klasse B is 1750 m<sup>3</sup>/uur nodig. Op basis van de gewenste koelcapaciteit zou een 10.000 m<sup>3</sup>/uur HVAC unit 4 a 5 lokalen kunnen klimatiseren. Op basis van luchtverversing (CO<sub>2</sub> als marker) zou een HVAC unit circa 8 lokalen van verse lucht kunnen voorzien. De te bereiken COP van indirecte adiabatiscbe koeling is geschat uitgaande van 10% extra ventilatorvermogen ten opzichte van de situatie zonder indirecte adiabatiscbe koeling op:  $4.000/300 = 13$ .

## 4 WP 2 Conceptontwikkeling

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de verschillende onderdelen die te samen een smart lage drukventilatie- en koelsysteem vormen, voor toepassing in scholen.

### 4.1 Smart sensing

#### 4.1.1 Achtergrond

Bij toepassing van de RVO frisse scholen toets<sup>12</sup> wordt de binnenluchtkwaliteit na oplevering van het ventilatiesysteem intensief gemonitord om de werking ervan te garanderen. Veelal wordt hiervoor een separaat monitoringsysteem in een aantal klaslokalen geplaatst. Vervolgens moeten de data worden geanalyseerd en aan de gebruiker teruggekoppeld. Daarnaast worden opleveringscontroles uitgevoerd waarin per klaslokaal het luchtdebiet en het geluidsniveau worden vastgesteld. De kosten voor deze monitoring en opleveringscontroles kunnen zeer hoog zijn en geven beperkt feedback naar de gebruikers. Via in het ventilatiesysteem ingebouwde smart sensing zou een goede werking met relatief geringe inspanning over een langere tijdsperiode kunnen worden gegarandeerd en via een eenvoudig dashboard aan de gebruiker worden gepresenteerd. Ook kan fijnstof monitoring worden toegevoegd, die in de huidige RVO frisse scholen toets ontbreekt.

#### 4.1.2 Sensoren voor smart sensing

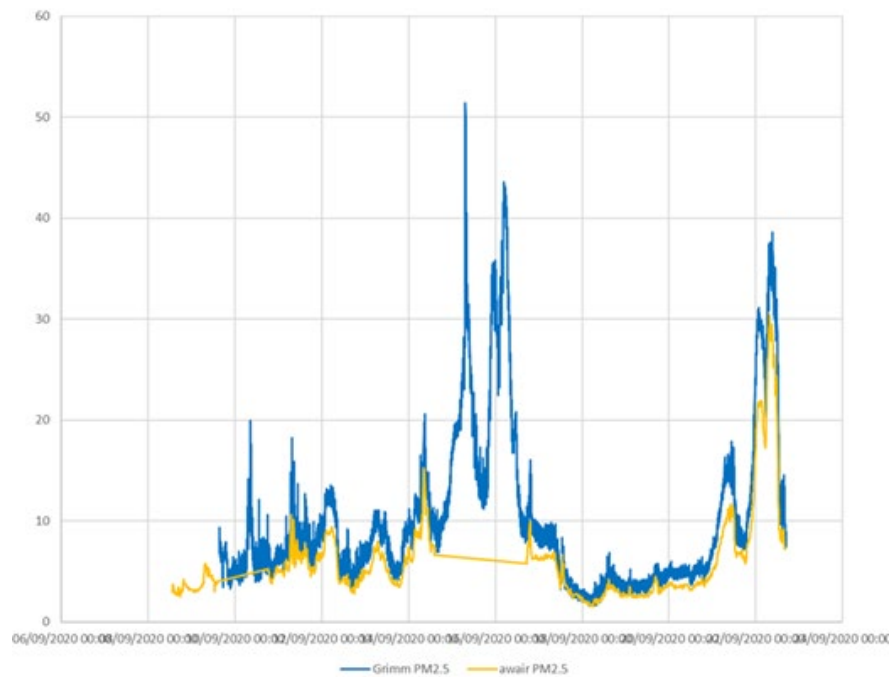
De Awair sensor zou zowel PM<sub>2.5</sub> als Vluchtige Organische Componenten (VOC) meten. Alhoewel VOC niet in het PvE vermeld staat was het toch interessant om te kijken in hoeverre een dergelijke sensor een betrouwbare waarde hiervoor kan aanleveren. De Awair sensor is hiertoe door VFA wat betreft PM<sub>2.5</sub> en VOC vergeleken met Grimm laboratorium apparatuur, zie Figuur 6 en Figuur 7. Wat betreft PM<sub>2.5</sub> is er een goede overeenkomst. Wat betreft VOC is de overeenkomst afwezig. Mogelijk is de door de Awair getoonde waarde een afgeleide waarde van een andere gemeten grootheid, bijvoorbeeld CO<sub>2</sub>.

Uiteindelijk is vanwege praktische problemen met het uitlezen van de Awair sensoren in de schoolomgeving er voor gekozen om Airvisual sensoren te gebruiken om PM<sub>2.5</sub> in de lokalen te meten. In paragraaf 6.4.1.1 worden deze sensoren tijdens de praktijktest vergeleken met twee geijkte Grimm fijnstofsensoren.

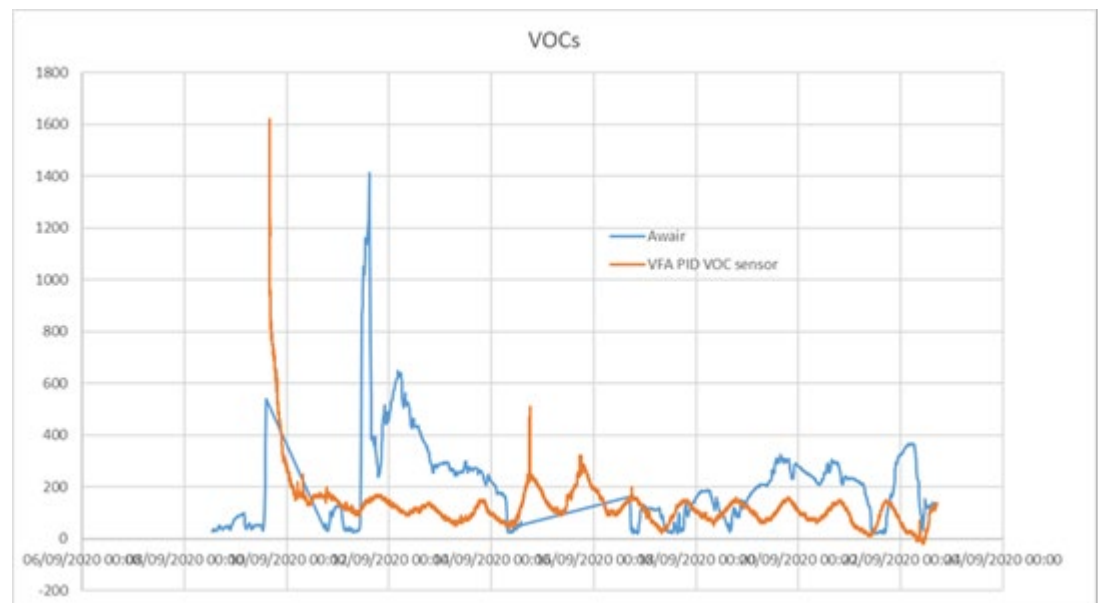
Voor monitoring van CO<sub>2</sub> en T worden sensoren aanwezig in de lokalen die ook zorgdragen voor de regeling van het de luchtbehandelingskast gebruikt.

---

<sup>12</sup> [http://www.rvo.nl/sites/default/files/2016/03/Frisse\\_Scholen\\_Toets\\_V3.pdf](http://www.rvo.nl/sites/default/files/2016/03/Frisse_Scholen_Toets_V3.pdf)



Figuur 6 Vergelijking Awair met Grimm 1.09 wat betreft  $PM_{2.5}$  in  $\mu g/m^3$ .



Figuur 7 Vergelijking Awair met PID sensor VFA wat betreft vluchtige organische koolwaterstoffen (VOC)

Naast de Awair is door VFA ook de Cubic getest. Deze gaf goede resultaten. Helaas was het moeilijk om de sensoren bij de pilot op de school uit te lezen. Uiteindelijk is er voor gekozen om in de lokalen Airvisual (Pro) sensoren te plaatsen die via een API automatisch kunnen worden uitgelezen. De Airvisual sensor heeft zich in eerdere projecten<sup>13</sup> als betrouwbare sensor bewezen.

<sup>13</sup> Fijnstof bronnen in en rondom woningen, P. Jacobs, TVVL magazine, 6, 2017.

#### 4.1.3 Dashboard voor prestatie klimatisering

De data van alle sensoren wordt in een database ingelezen. Vervolgens wordt vastgesteld welke data binnen de lesuren vallen. Bijvoorbeeld tussen 8.45 uur en 16.00 uur. Per parameter wordt dan de 95 percentiel waarde bepaald, dit is de waarde waarbinnen 95% van alle data ligt. Op basis hiervan kan met het PvE frisse scholen worden vastgesteld in welke klasse de parameter in die week valt. Met letters en kleurcodes kan de klasse worden weergegeven. Dit is geïllustreerd in Figuur 8.

Week 40	CO <sub>2</sub>	T zomer	T winter	PM <sub>2.5</sub>
Lokaal 1	A	A	A	A
Lokaal 2	B	A	A	A
Lokaal 3	A	A	A	A
Lokaal 4	A	A	A	C
Lokaal 5	A	A	A	A

Figuur 8 Voorzet voor smart sensing dashboard



## 4.2 Indirecte adiabatistische koeling

### 4.2.1 Huidige stand van zaken adiabatistische koeling

Er bestaan twee verschillende typen adiabatistische koeling. Directe en indirecte. Bij directe adiabatistische koeling wordt water in een luchtstroom verneveld zonder energie toe te voeren, hierdoor stijgt de luchtvochtigheid tot circa 90% en zal de temperatuur tot circa 1 K boven de natteboltemperatuur afkoelen. Deze gekoelde en bevochtigde luchtstroom wordt naar het vertrek gevoerd. Deze toevoerlucht is niet comfortabel.

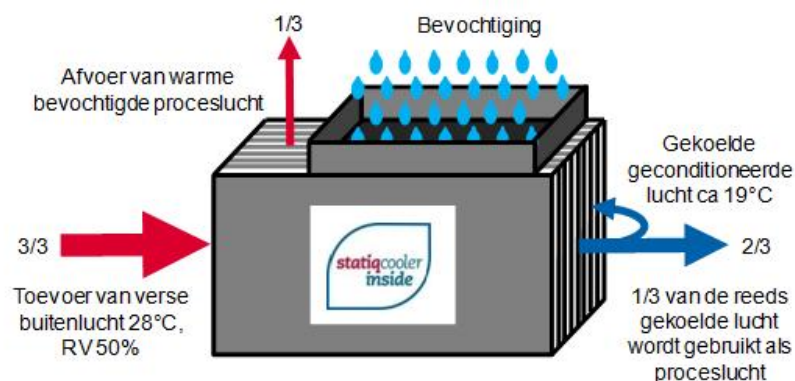
Bij indirecte adiabatistische koeling wordt er gebruik gemaakt van een tweede luchtstroom en een warmtewisselaar. In de tweede luchtstroom wordt water verneveld, waardoor vervolgens de toevoerlucht wordt gekoeld zonder de absolute luchtvochtigheid te verhogen.

Indien een deel van de aangezogen lucht wordt gebruikt als tweede luchtstroom voor het verdampen van water wordt er gesproken van dauwpuntkoeling. Deze systemen zijn jaren geleden ontwikkeld en maken gebruik van één ventilator en zijn in staat om tot circa 2 K boven het dauwpunt te koelen. Voorbeelden hiervan zijn Coolerado<sup>14</sup> en Staticooling<sup>15</sup>.

Deze systemen zijn alleen ontworpen voor geventileerde koeling en daardoor minder geschikt in scholen waarbij de warmtewisselaar bij voorkeur ook wordt gebruikt om in de winter de buitenlucht voor te verwarmen.

<sup>13</sup> [Parameters affecting the performance of a dewpoint cooler consisting of a counter flow heat exchanger using water as refrigerant](http://www.re-gent.nl/images/Documents/Paper_GL_2010_DewPointCooler_V3.pdf) [http://www.re-gent.nl/images/Documents/Paper\\_GL\\_2010\\_DewPointCooler\\_V3.pdf](http://www.re-gent.nl/images/Documents/Paper_GL_2010_DewPointCooler_V3.pdf)

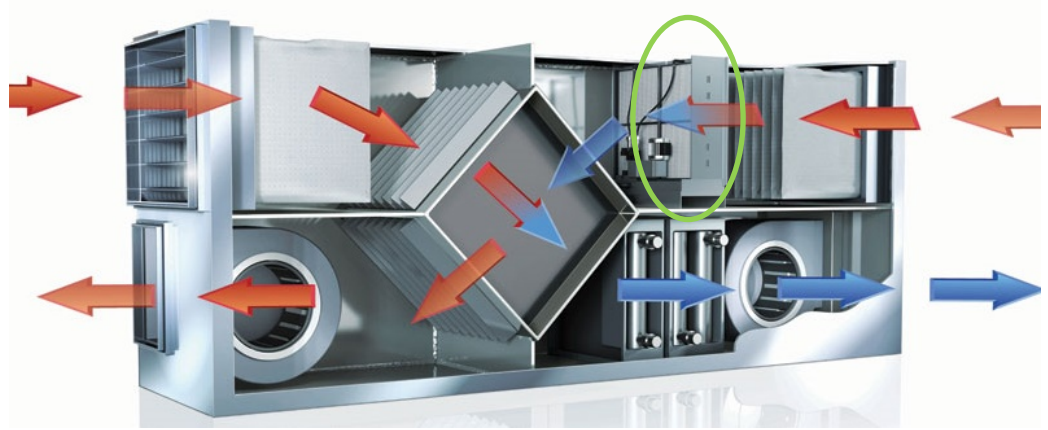
<sup>14</sup> [Coolerado Cooler Helps to Save Cooling Energy and Dollars New cooling technology targets peak load reduction](https://www.nrel.gov/docs/fy07osti/40041.pdf) <https://www.nrel.gov/docs/fy07osti/40041.pdf>



Figuur 9 Schematische opzet van dauwpuntkoeling<sup>14</sup>

<sup>15</sup> <https://nl.wikipedia.org/wiki/Dauwpuntkoeling>

Momenteel wordt Indirecte adiabatistische koeling in luchtbehandelingskasten toegepast door met een verdampingscassette of een vernevelaar in de afvoerstroom water te verdampen waardoor de lucht afkoelt tot circa 1 K boven de natte bol temperatuur, zie Figuur 10. In de platenwarmtewisselaar wordt de afgekoelde lucht gebruikt om de toevoer lucht te koelen.



Figuur 10 Conventionele toepassing van verdampingskoeling middels een groen omcirkelde verdampingscassete<sup>16</sup>.

Dit proces wordt indirect uitgevoerd, de te koelen lucht is via een warmtewisselaar gescheiden van de door waterverdamping afgekoelde lucht. Door de indirecte manier van koelen wordt aan de binnenlucht geen vocht toegevoegd wat anders het comfortniveau zou verlagen.

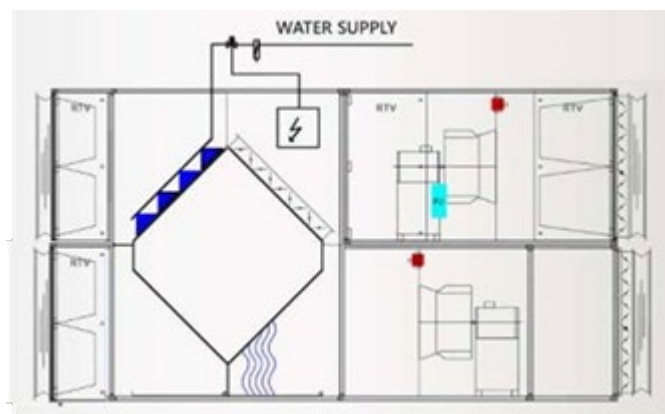
#### 4.2.2 Concepten voor indirecte adiabatistische koeling

De innovatie in dit project is dat de tegenstroom warmtewisselaar zowel voor warmteterugwinning in de winter als voor koeling in de zomer kan worden gebruikt en dat beide processen worden geoptimaliseerd. De indirecte adiabatistische koeling wordt hierbij toegepast door het water direct op de platenwisselaar te sproeien, zie Figuur 11. De technologische stap die gemaakt dient te worden is het oppervlak van de warmtewisselaar zodanig hygroscopisch te maken en/of qua geometrie zodanig aan te passen dat het water optimaal spreidt en een 100% benatting wordt bereikt.

Het verdampingsrendement neemt hierdoor aanzienlijk toe en zorgt hiermee dat de energie voor het verdampen direct wordt onttrokken van de aangezogen buitenlucht welke hiermee wordt afgekoeld tot een droge bol temperatuur gelijk aan de natte bol buiten temperatuur.

<sup>16</sup> [Adiabatische koeling met verdampingscassets](https://www.airefreshsystems.com/ftp/download/nl/brochure-skv-nl.pdf)

<https://www.airefreshsystems.com/ftp/download/nl/brochure-skv-nl.pdf>



Figuur 11 Schematische weergave van beoogde indirecte adiabatische koeling in de luchtbehandelingskast.

### 4.3 Elektrostatische filtermodule

#### 4.3.1 Achtergrond

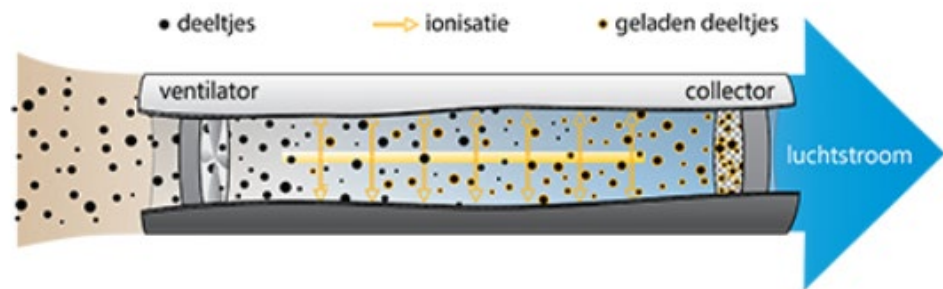
Door de GGD worden steeds hogere eisen gesteld aan luchtfilters in schoolventilatiesystemen. Nabij drukke wegen worden in verband met gezondheidswinst F9 filters geëist. Deze filteren zeer goed fijnstof en roet, maar ze veroorzaken door de toegenomen drukval in de luchtkanalen meer energieverbruik, meer geluid en moeten meerdere malen per jaar worden vervangen, wat zeker bij decentrale units de onderhoudskosten flink verhoogd. Nog betere filters, zogenaamde Efficiency Particulate Air Filters (E filters conform EN 1822) worden niet toegepast omdat deze bij toepassing in scholen een te hoge drukval veroorzaken om aan de strenge geluideisen te voldoen. Elektrostatische filtering, een innovatieve filter oplossing met een filterkwaliteit gelijkwaardig aan een E10/11 filter, heeft een 80% lagere drukval en is succesvol toegepast bij proeven in een kinderdagverblijf<sup>15</sup> en een basisschool. Decentraal toegepast is deze techniek relatief duur. Om deze energiezuinige technologie grootschalig te kunnen toepassen is opschaling van huidige unit van 2.000 naar 10.000 m<sup>3</sup>/uur in een compacte betaalbare vorm noodzakelijk, zodat deze in plaats van conventionele zakkenfilters in de filtersectie van centrale luchtbehandelingskasten kan worden toegepast.

#### 4.3.2 Concepten voor elektrostatische filtering

Figuur 12 toont de werking van elektrostatische filtering toegepast in een rond luchtkanaal. De lucht wordt blootgesteld aan een ionisator, een onder hoge spanning staande elektrodedraad. De ionisator, voorgesteld door de horizontale gele lijn in de figuur, laadt door een gecontroleerd ionisatieproces de deeltjes op die zich in de lucht bevinden, van fijnstof tot aan microbiologische verontreinigingen en allergenen. Alle geladen deeltjes worden vervolgens door een collector aan het eind opgevangen. De collector heeft een zeer open structuur, hierdoor is de drukval vergeleken met mechanische filters veel lager en constant in de tijd. Het filter

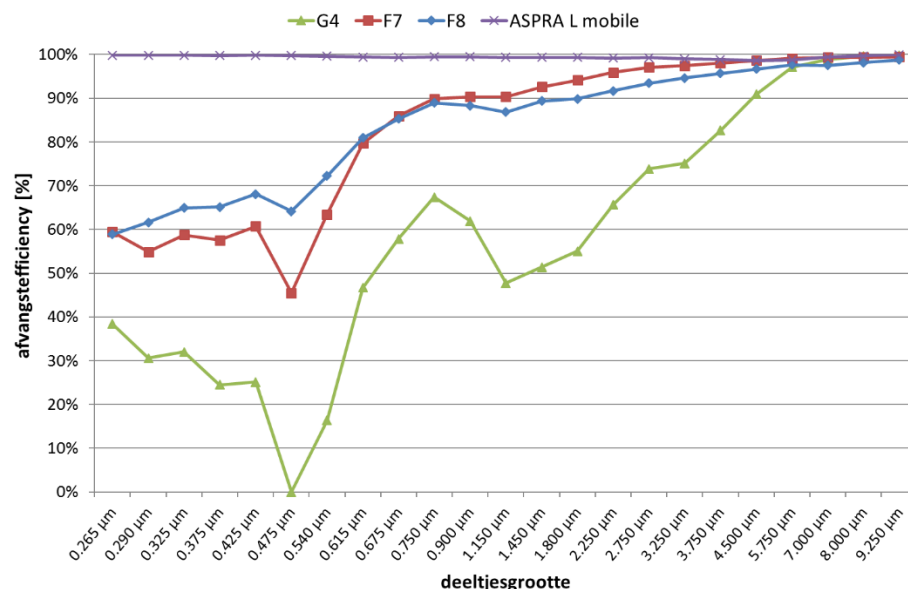
<sup>15</sup> [publications.tno.nl/publication/105428/hqQ7pu/TNO-060-DTM-2012-01945.pdf](https://publications.tno.nl/publication/105428/hqQ7pu/TNO-060-DTM-2012-01945.pdf)

verstopt niet, de luchttoevoer hoeveelheid is hierdoor constant in de tijd. Zodra het gehele oppervlak verzadigd is met deeltjes moet de collector worden vervangen.



Figuur 12 Werkingsprincipe van het VFA elektrostatisch filter<sup>16</sup>

In Figuur 13 is de afvangstefficiency van het door VFA ontwikkelde ASPRA L mobile vergeleken met die van een G4, F7 en G8 filter. Duidelijk te zien is dat de prestatie van het elektrostatisch filter van VFA veel beter is dan de filters die momenteel in scholen worden toegepast, vooral voor deeltjes kleiner dan 1  $\mu\text{m}$ . De technologische stap die gemaakt moet worden is opschaling van huidige unit van 2.000 naar 10.000  $\text{m}^3/\text{uur}$  in een compacte vorm met een standtijd van minimaal een half jaar zodat deze technologie in plaats van een conventionele zakkenfilter in centrale luchtbehandelingskasten kan worden toegepast. Daarnaast zijn er nog een aantal praktische vragen die moeten worden beantwoord. Wat is het effect van mist op de vangstefficiëntie van het filter? En is een voorfilter noodzakelijk? Bijvoorbeeld om mistdruppeltjes af te vangen. Deze vragen zijn beantwoord aan de hand van laboratorium onderzoek (paragraaf 5.1).



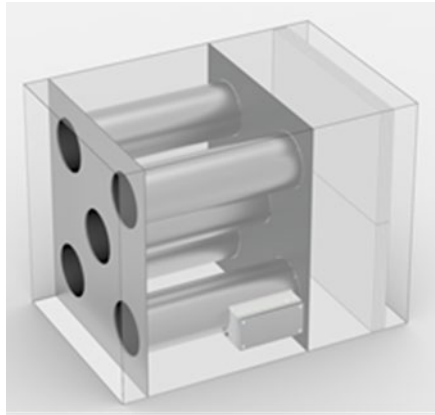
Figuur 13 Vangstefficiëntie per deeltjesgrootte voor vier verschillende filtertypen<sup>17</sup>.

De opschaling van 2.000 naar 10.000  $\text{m}^3/\text{uur}$  kan worden gerealiseerd door een aantal (5-6) ionisatoren parallel aan elkaar te plaatsen, zie Figuur 14. Hierachter

<sup>16</sup> <https://www.vfa-solutions.com/en/our-technology/ASPRA-air-purification/>

<sup>17</sup> [publications.tno.nl/publication/34618909/8tSJuz/TNO-2015-R10356.pdf](https://publications.tno.nl/publication/34618909/8tSJuz/TNO-2015-R10356.pdf)

bevindt zich de collector. Deze bestaat uit een zeer open quasi-permanent elektrisch geladen electret filter of een polypropyleen F7 plaatfilter.



*Figuur 14 Elektrostatische filtermodule voor luchtbehandelingskast, in de buizen wordt lucht geïoniseerd, in de collector rechts worden de verontreinigingen afgevangen*

## 5 WP 3 laboratorium onderzoek

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de beantwoording van de vragen die in het vorige hoofdstuk zijn opgeworpen.

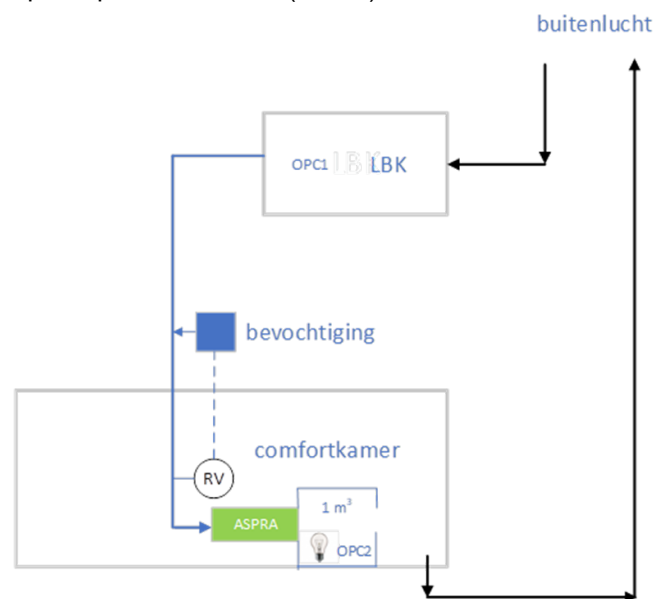
### 5.1 Mistmetingen elektrostatische filtering

Wat is het effect van hoge luchtvochtigheid of zelfs mist op de vangstefficiëntie van het filter? Is een voorfilter noodzakelijk om mistdruppeltjes af te vangen? Om deze vragen te beantwoorden is in het TNO MEC IAQ laboratorium een testopstelling gebouwd en zijn hierin 3 filters bemeten: een schoon en een vervuild electret filter en een F7 filter. De filters en de ASPRA unit zijn door VFA aangeleverd.

#### 5.1.1 Meetopzet

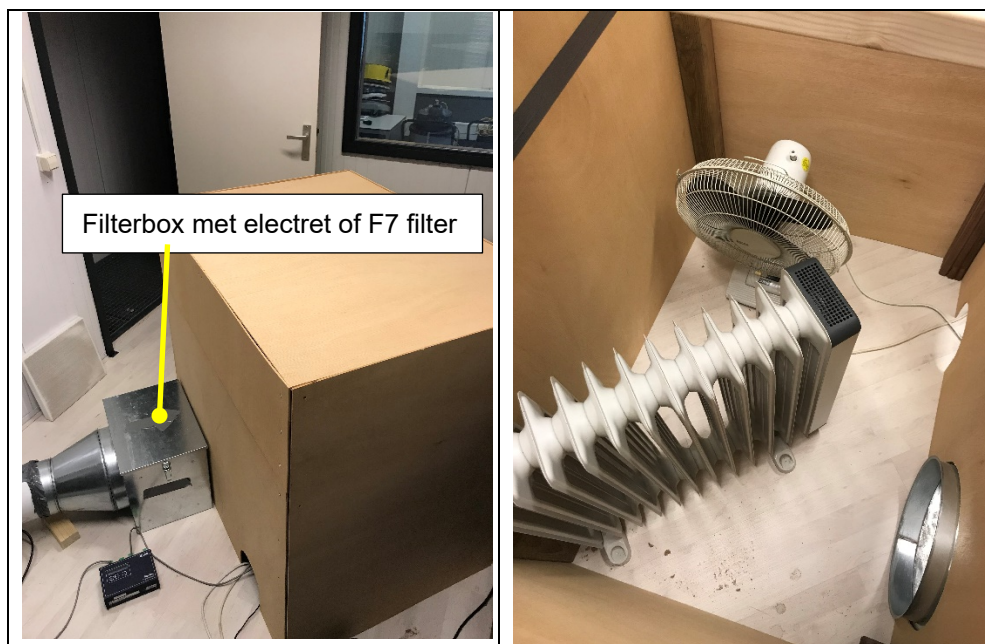
Om het effect van mist op de werking van het elektrostatische filter te bestuderen is een ASPRA 200 mm filterunit in een houten box met een volume van circa 1 m<sup>3</sup> in de comfortkamer van het lab geplaatst, zie Figuur 15. In de comfortkamer kan de lucht van de 'omgeving' van de box worden geklimatiseerd.

Voordeel van het gebruik van een box is dat door het beperkte volume snel een evenwichtssituatie optreedt. De luchtinlaat van de filterunit is direct aangesloten op de luchttoevoer van de comfortkamer. De stoombevochtiging van de luchtbehandelingsinstallatie van de comfortkamer (Devatec, ElectroVap CMC3) is zo ingesteld dat de inblaaslucht een bepaalde RV, bijvoorbeeld 95%, bereikt. De luchtbehandelingsinstallatie wordt voorzien van buitenlucht. Uitgangspunt is om de meting gedurende enkele uren uit te voeren. Tijdens de proef is de PM<sub>2,5</sub> deeltjesconcentratie in de uitblaas van de ASPRA gemeten met een Grimm 11-R optical particle counter (OPC2).



Figuur 15 Schematische meetopzet.

Deeltjestellers kunnen bij hogere relatieve vochtigheden, hoger dan 70%, ook waterdruppeltjes voor fijnstof aanzien en daarnaast treedt bij deze hoge luchtvochtigheden ook adsorptie van water aan deeltjes op waardoor te hoge fijnstof waarden kunnen worden gerapporteerd. Om deze reden staat in de 1 m<sup>3</sup> box een verwarmingselement, zie Figuur 16. Hiermee wordt de temperatuur verhoogd zodat eventuele waterdampdruppels verdampen en de RV onder 70% blijft.



Figuur 16 Elektrostatisch filter blaast lucht in houten box met verwarmingselement en mengventilator.

In Tabel 3 is de meetstrategie samengevat om het effect van mist druppeltjes (stoom) op de effectiviteit van het elektrostatisch filter te achterhalen. Hiertoe wordt met de ingeschakelde ASPRA de PM<sub>2.5</sub> concentratie gemeten met de stoombevochtiging in- en uitgeschakeld. Het stroomverbruik van het ASPRA filter is gemonitord met een wattmeter.

Tabel 3 Meetstrategie

Meting	Stoom	Ionisatie ASPRA
1. Referentie	Uit	uit
2. ASPRA	Uit	aan
3. Effect stoom	Aan	uit
4. Effect stoom op ASPRA	Aan	aan



### 5.1.2 Resultaten filtermetingen

Op 11 december 2018 is een in de praktijk reeds gebruikt (vervuild) electret filter getest onder verschillende condities, zie Figuur 17. Om 10.48 uur is het F7 zakkenfilter in de luchtbehandelingskast (LBK) van de comfortkamer verwijderd zodat buitenlucht als verontreinigingsbron kan dienen. Dit veroorzaakt slechts een beperkte verhoging van de concentratie fijnstof (blauwe en oranje lijnen). Dit komt ook omdat zelfs met uitgeschakelde ionisatie een deel van het fijnstof wordt tegengehouden door het electret filter. Verwijdering van het electret filter om 11.00 uur zorgt ervoor dat de concentratie PM<sub>2.5</sub> (oranje lijn) toeneemt tot circa 2,5 µg/m<sup>3</sup>. Inschakeling van de ASPRA om 11.21 uur reduceert de concentraties tot vrijwel nul en uitschakeling verhoogt de concentratie weer.

Inschakeling van de stoombevochtiger om 11.43 zorgt voor een sterke verhoging van de gemeten PM<sub>2.5</sub> concentratie. Dit wordt veroorzaakt doordat de stoombevochtiger wordt gevoed met leidingwater. De stoombevochtiger gebruikt de aanwezigheid van zouten in het leidingwater waardoor het water geleidend is en elektrisch kan worden opgewarmd. Door de aanwezigheid van zouten in het water zorgt de bevochtiging voor veel fijnstof dat vrijwel volledig uit deeltjes kleiner dan 1 µm (PM<sub>1</sub>) bestaat. De stoombevochtiging produceert zoveel fijnstof dat fijnstof afkomstig van buitenlucht feitelijk niet nodig is. Duidelijk te zien is dat inschakeling van de ASPRA om 12.49 uur de zoutdeeltjes bijna volledig laat neerslaan.

In Tabel 5-4, Tabel 5-5 en Tabel 5-6 worden de reductie percentages vermeld voor de ASPRA in combinatie met respectievelijk als collector in de filterbox het vervuilde electret filter, een nieuw ongebruikt electret filter en een gepleat statisch F7 filter. De PM waarden en de testcondities voor het ongebruikte electret filter en het statische F7 filter worden in Figuur 18 getoond.

Tabel 5-4 Meetresultaten vervuild electret filter

		tijd		concentratie [µg/m <sup>3</sup> ]		reductie	
		begin	eind	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>1</sub>	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>1</sub>
1	Referentie	11.00	11.13	2.22	0.79		
2	ASPRA	11.21	11.35	0.05	0.01	97.7%	99.1%
3	Stoom	11.43	12.49	30.64	29.88		
4	Stoom en ASPRA	12.49	14.00	0.1	0.1	99.5%	99.6%

Tabel 5-5 Meetresultaten nieuw ongebruikt electret filter

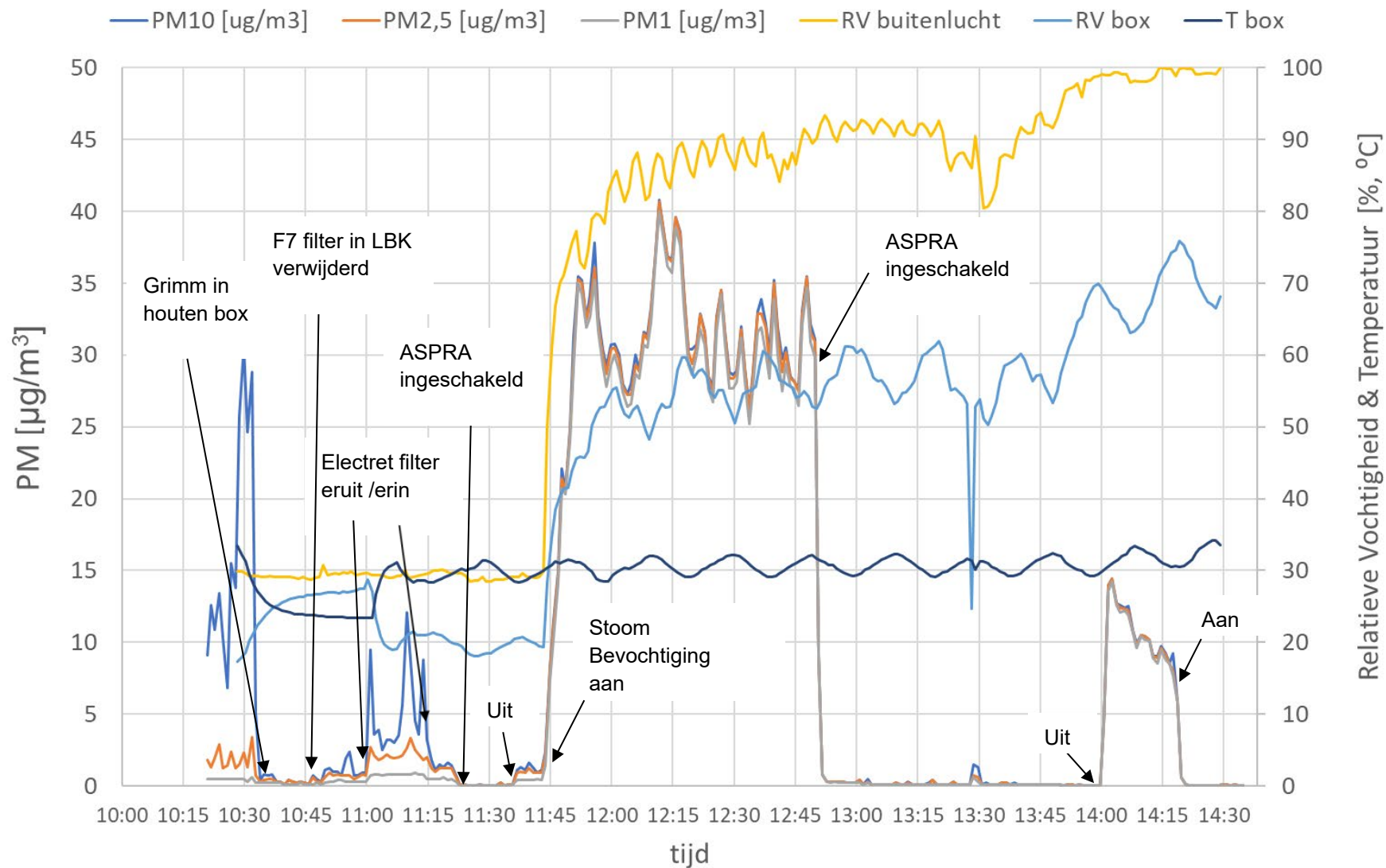
		tijd		concentratie [µg/m <sup>3</sup> ]		reductie	
		begin	eind	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>1</sub>	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>1</sub>
1	Referentie	9.23	10.13	0.21	0.14		
2	ASPRA	10.13	10.38	0.004	0.000	97.9%	100%
3	Stoom	10.39	11.39	14.50	14.38		
4	Stoom en ASPRA	11.39	12.03	0.02	0.02	99.9%	99.9%



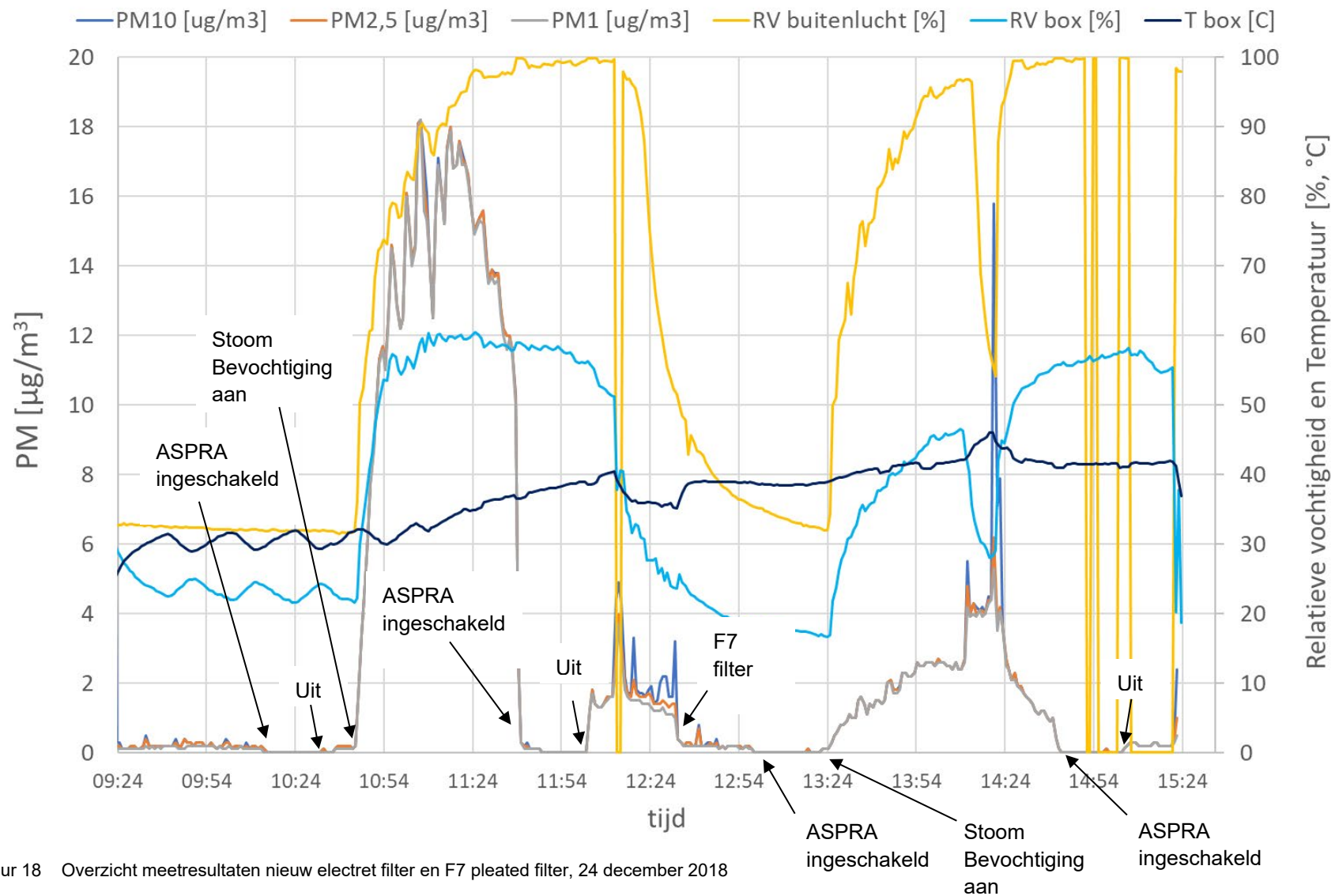
Tabel 5-6 Meetresultaten statisch F7 filter

		tijd		concentratie [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]		reductie	
		begin	eind	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>1</sub>	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>1</sub>
1	Referentie	12.34	12.58	0.05	0.03		
2	ASPRA	12.58	13.22	0.004	0.000	91.7%	100%
3	Stoom	13.22	14.41	2.13	2.09		
4	Stoom en ASPRA	14.41	15.05	0.000	0.005	100%	99.8%

Uit de meetwaarden blijkt duidelijk dat inschakeling van het ASPRA filter effectief is in het verwijderen van PM<sub>2.5</sub> en PM<sub>1</sub> en dat deze effectiviteit bij hoge luchtvochtigheid behouden blijft. Inschakeling van het ASPRA filter veroorzaakt een stroomverbruik van 3 tot 4 W.



Figuur 17 Overzicht meetresultaten vervuild electret filter, 11 december 2018



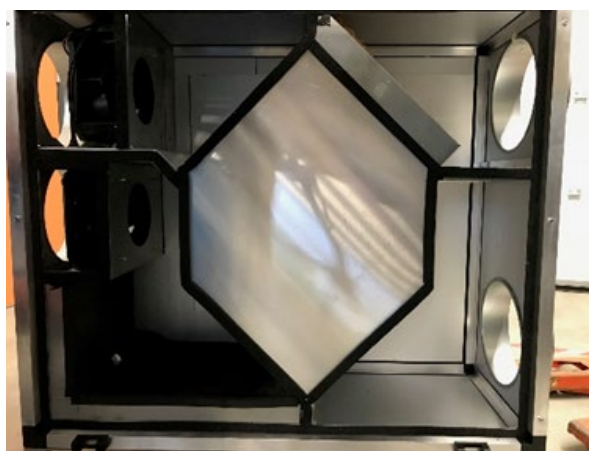
Figuur 18 Overzicht meetresultaten nieuw electret filter en F7 pleated filter, 24 december 2018

## 5.2 Verdampingskoeling

Wat is het rendement van de warmteterugwinning en het koelvermogen onder representatieve buitenluchtcondities? Wat is het waterverbruik voor verdampingskoeling, kan dit worden geoptimaliseerd? Om deze vragen te beantwoorden is in de duo klimaatkamer van het TNO MEC laboratorium een testopstelling gebouwd en is een testmodel bemeten. In de duo klimaatkamer kunnen in een van de kamers realistische buitencondities (temperatuur en relatieve, vochtigheid) worden gerealiseerd en in de andere kamer binnencondities. Het testmodel is door Lucam aangeleverd.

### 5.2.1 Meetopzet

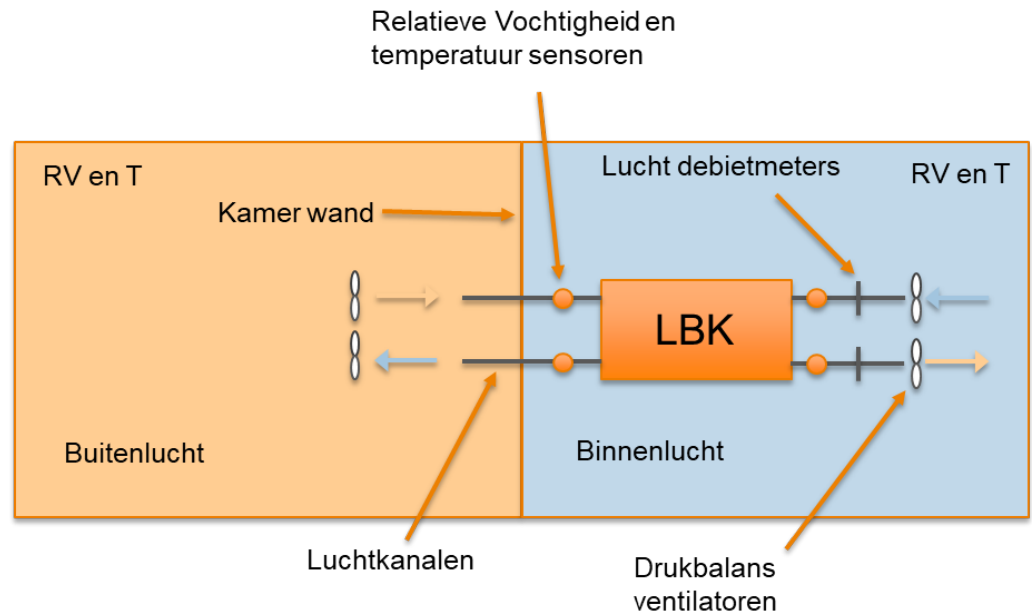
Om nauwkeurige metingen in de duo klimaatkamer mogelijk te maken is het testmodel van Lucam geschaald naar een luchtdebiet van circa 600 m<sup>3</sup>/uur. De luchtbehandelingskast bevat een aluminium tegenstroom warmtewisselaar, zie Figuur 19. Om te verifiëren of het water de warmtewisselaarplaten volledig benat en of het water homogeen uit de warmtewisselaar stroomt is tijdens een aantal proeven het zijpaneel verwijderd en is een doorzichtige polystyreen plaat op de zijkant geplaatst. Dit geeft de mogelijkheid om foto's en filmopnamen te maken van de uitstroming van water uit de warmtewisselaar en van de sproeicondities van de watervernevelaars tijdens de metingen. De bevochtigingssectie is aan de bovenzijde afgesloten met een kokosmat om te voorkomen dat water terugspreeit en weglekt.



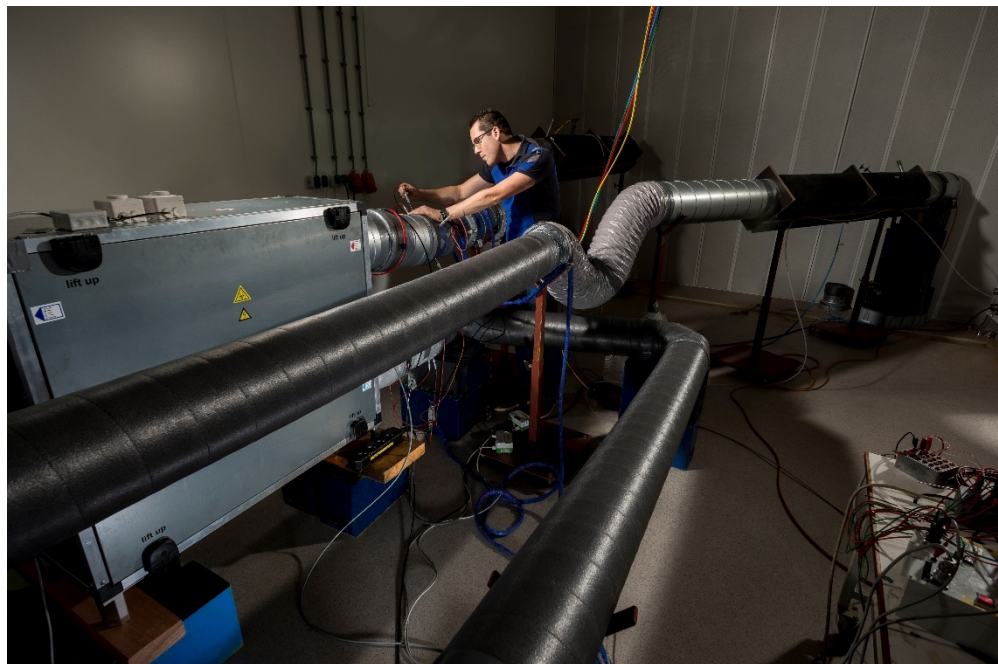
Figuur 19 Zijaanzicht van testmodel van de LBK met polystyreen plaat afgedekt. Rechtsboven zit de bevochtigingssectie met sproeiers.

Figuur 20 geeft schematisch weer hoe het testmodel van de LBK luchttechnisch is aangesloten en hoe de buiten- en de binnenluchtcondities zijn gesimuleerd. Op alle vier de aansluitingen van het testmodel zijn aan het eind steunventilatoren geplaatst om de drukval van de luchtdebietmeters (orifices) te compenseren, zie Figuur 21.

Alle aansluitingen zijn flexibel gerealiseerd waardoor het mogelijk is om de unit en daarmee ook de warmtewisselaar onder een hellingshoek tot circa 45° te positioneren. Dit leidt mogelijk tot een betere benutting van de warmtewisselaarplaten en een hoger koelvermogen.



Figuur 20 Schematische weergave van de luchttechnische inpassing in de duo klimaatkamer met in de linker kamer buitencondities en in de rechter kamer binnencondities.



Figuur 21 Testmodel van de LBK in de duo klimaatkamer met luchtkanalen en meetsecties.

Water voor de verdampingskoeling wordt aangevoerd vanuit het gedemineraliseerd watersysteem. Vooraf is een legionella test uitgevoerd om uit te sluiten dat via verdamping van het gedemineraliseerde water legionella kan worden verspreid. De watertoevoer wordt geregeld middels een coriolis flowmeter.

Op basis van de temperatuurafname wordt uitgerekend hoeveel water verdampt is. Een deel van het water verdampt niet en komt uit de condensafvoer. Voor de energiebalans wordt de temperatuur van deze waterstroom gemeten.

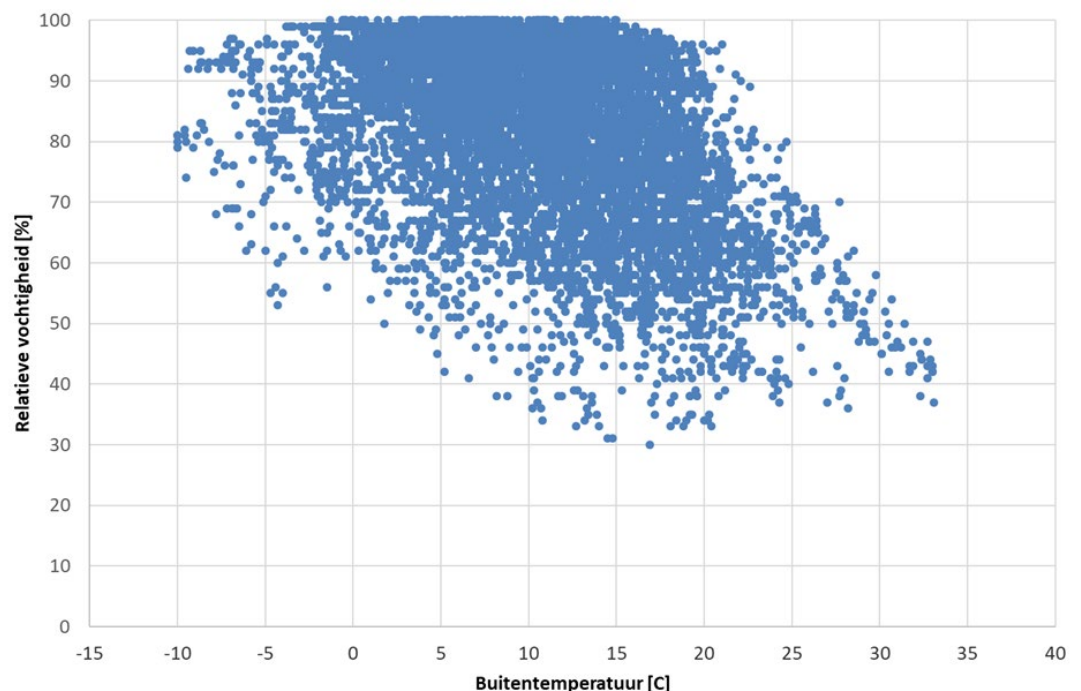
Alle temperatuur-, relatieve vochtigheid- en druksensoren zijn aangesloten op een Agilent data acquisitiesysteem. De tests werden uitgevoerd totdat een stabiele toestand werd bereikt, waarbij gedurende ten minste 30 minuten meetdata werden verzameld. Deze uitvoering is vergelijkbaar met de Europese norm voor warmtewisselaar testen, EN308: 1997.

### 5.2.2 *Standaard EN WTW test*

Als referentie is testmodel van de LBK onderworpen aan een standaard EN WTW test zonder water toe te voegen en onder niet-condenserende luchtcondities. Bij een toe- en afvoer luchtdebiet van 700 m<sup>3</sup>/uur bedroeg het warmterugwin temperatuur rendement 79%. Dit is exclusief de warmte ten gevolge van de ventilatormotoren, dus dit is de werkelijke warmterugwin efficiëntie van de warmtewisselaar in de luchtbehandelingskast.

### 5.2.3 *Meetcondities verdampingskoeling*

Uitgangspunt is het behalen van Frisse scholen PvE klasse A: < 25,5 °C gedurende 95% van de lestijd. Figuur 22 toont de uurgemiddelde referentieklimaatgegevens voor het referentiejaar conform NEN 5060 (2008). In de figuur zijn de buitentemperatuur en de bijbehorende relatieve vochtigheid weergegeven.



Figuur 22 Uurgemiddelde waarden voor de buitentemperatuur en relatieve vochtigheid voor het referentiejaar conform NEN 5060 (2008).

Door de aanwezigheid van kinderen en leerkrachten wordt in het klaslokaal vocht geproduceerd. Stel dat per persoon per uur 60 g vocht wordt afgegeven, dat er 25 personen aanwezig zijn en dat de ventilatie 2.000 m<sup>3</sup>/uur bedraagt. Dan is de toename van de absolute vochtigheid uiteindelijk  $(60 \times 25)/(2.000 \times 1,2) = 0,63$  g/kg lucht bij aanname van een dichtheid van 1,2 kg/m<sup>3</sup>. Tabel 5-7 geeft twee typische condities weer.

Tabel 5-7 Typische buiten- en binnenluchtcondities voor koelsituatie in klaslokalen.

Conditie	buiten			binnen		
	Temperatuur (°C)	abs. Vocht (gr/kg)	RV (%)	temperatuur	abs. vocht	RV
Warme dag	25	10,9	55	25,5	11,5*	55
Hete dag	30	13,3	50	25,5	13,9*	65

\*Door de vochtproductie neemt de absolute vochtigheid binnen toe met 0,63 gr/kg t.o.v. buiten

#### 5.2.4 Resultaten verdampingskoeling

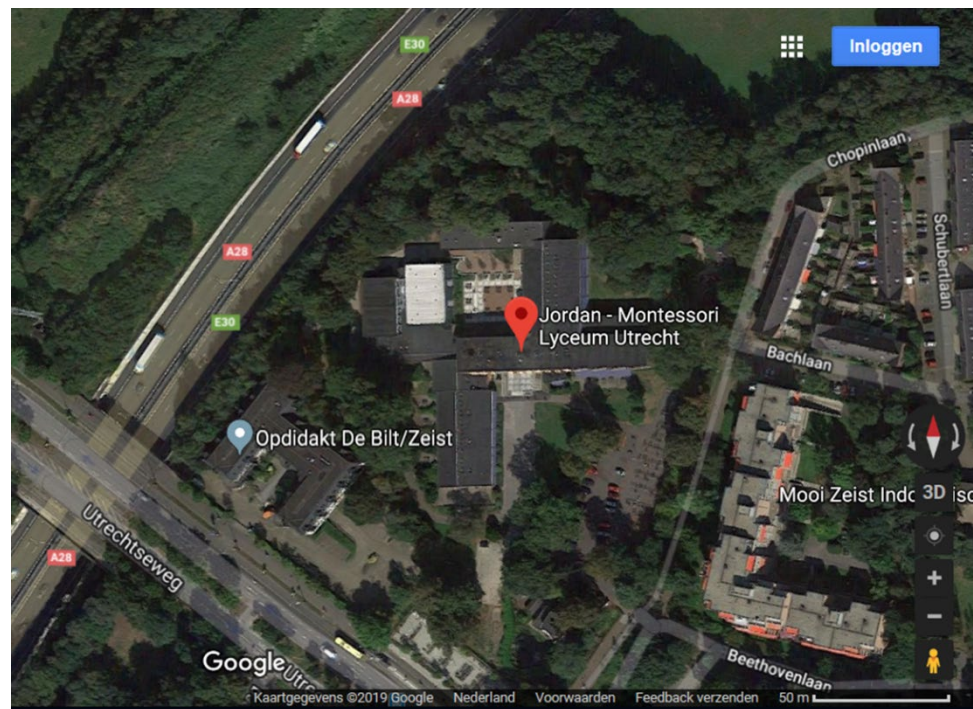
Door optimalisatie van het ontwerp blijkt uit de laboratorium metingen dat bij een buitentemperatuur van 25 °C de effectieve koeling is toegenomen van 58% naar 86% van de maximaal bereikbare theoretische koeling. In vermogen uitgedrukt is dit een toename van 489 W tot maximaal 1284 W bij een luchtdebiet van 670 m<sup>3</sup>/uur. Om zomertemperatuur klasse A te bereiken is circa 4 kW koelcapaciteit per lokaal noodzakelijk. Hiervoor zou dan een luchtdebiet van  $4.000/1284 \times 670 = 2.087$  m<sup>3</sup>/uur per lokaal noodzakelijk zijn. Dit komt vrijwel overeen met de schatting in het programma van eisen van 2.000 m<sup>3</sup>/uur.



## 6 Pilottest

### 6.1 Jordan Montessori Lyceum Utrecht

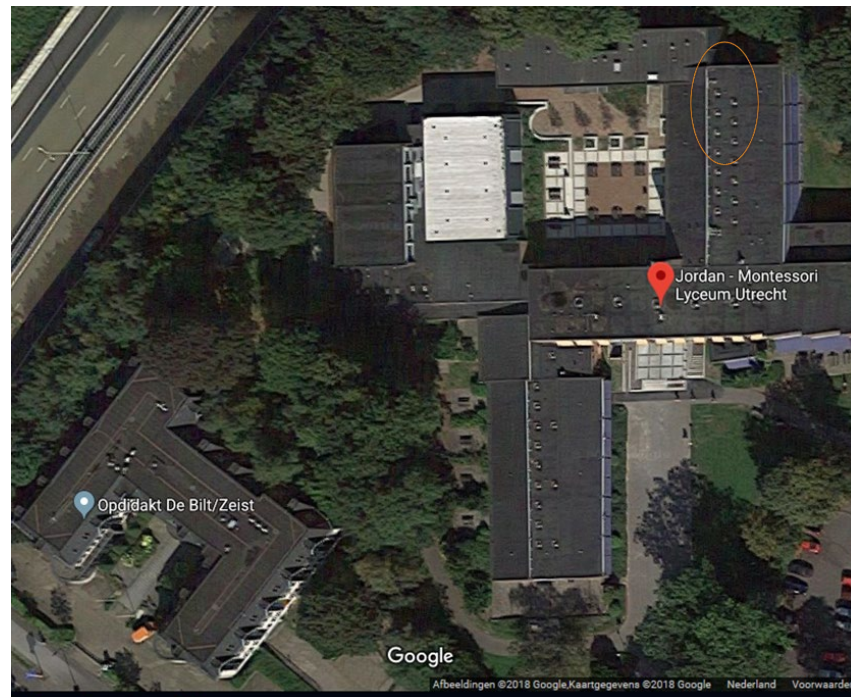
De pilot is na bemiddeling van de Provincie Utrecht uitgevoerd in het Jordan Montessori Lyceum Utrecht in Zeist. Deze middelbare school is op minder dan 50 m ten oosten van de A28 gelegen en ten NO van de Utrechtse weg, zie Figuur 23. Bij ZW wind, een windrichting die in Nederland vaak voorkomt, is er dus sprake van maximale blootstelling aan uitlaatgassen van beide wegen.



Figuur 23 Locatie Jordan Montessori Lyceum Utrecht nabij de A28 en de Utrechtseweg.

In Figuur 24 is de locatie van de luchtbehandelingskast en het kanalsysteem op het dak oranje omcirkeld. Om te voorkomen dat door het dak opgewarmde lucht wordt aangezogen, is de luchtaanzuig van de luchtbehandelingskast aan de noordgevel gesitueerd.





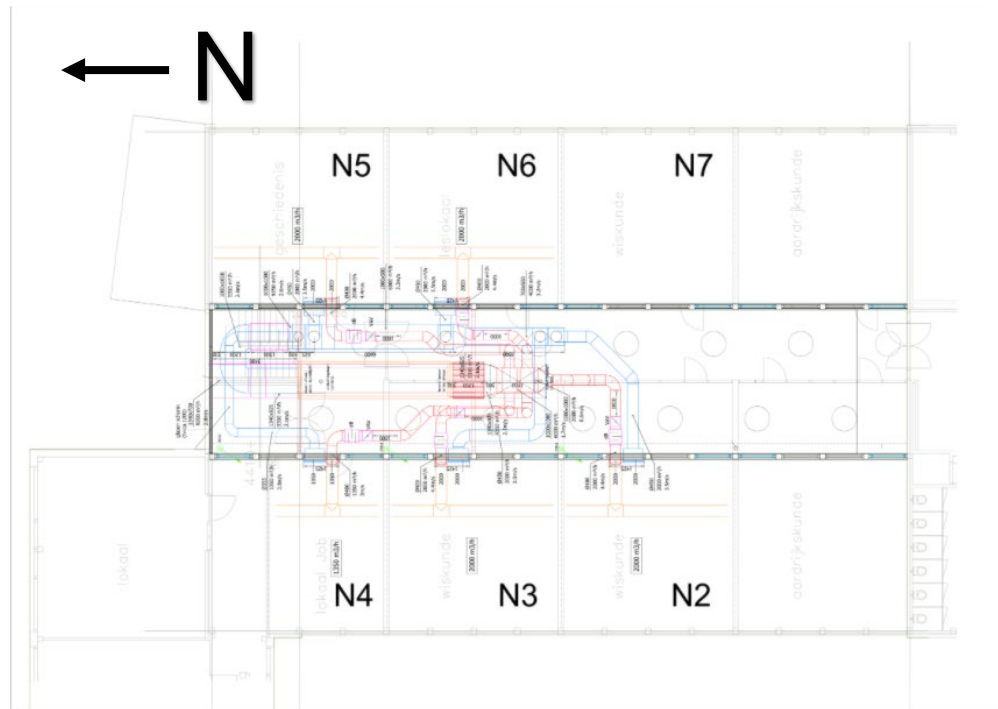
Figuur 24 Locatie luchtbehandelingskast op het platte dak is oranje omcirkeld.

## 6.2 Ontwerp luchtbehandelingskast met kanalsysteem en regeling

Op basis van de resultaten van de laboratorium testen in hoofdstuk 5 is de luchtbehandelingskast met bijbehorend kanalsysteem ontworpen voor een capaciteit van 10.000 m<sup>3</sup>/uur. De luchtbehandelingskast is op het dak tussen de 5 te klimatiseren lokalen geplaatst, zie Figuur 25. Elk lokaal is met een 400 mm diameter toe- en afvoerkanaal met de luchtbehandelingskast verbonden.

In de kanalen zijn kleppen aangebracht die zorgen voor de vraagsturing van het ventilatiedebiet op basis van temperatuur en CO<sub>2</sub>-sensoren die in elk lokaal zijn aangebracht. Voor de regeling en aansturing wordt gebruik gemaakt van een OJ GreenZone systeem, zie Figuur 26 voor de proefopstelling van dit regelsysteem. Dit systeem optimaliseert de klepstanden voor de 5 lokalen naar het laagste drukniveau. De luchthoeveelheid wordt vraaggestuurd verdeeld op basis van de bezetting en de thermische belasting van de lokalen. Bij lage vraag wordt de totale luchthoeveelheid van 10.000 m<sup>3</sup>/uur omlaag gebracht naar minimaal 3.000 m<sup>3</sup>/uur.

In de luchtbehandelingskast is een warmtewisselaar aanwezig om in de winter de warmte en in de zomer de koelte terug te winnen. In de luchtbehandelingskast zit geen (na)verwarmingssectie. De verwarming vindt plaats met de in de lokalen reeds aanwezige radiatoren. Om te voorkomen dat verwarming en koeling tegen elkaar in gaan werken zijn de radiatorknoppen voorzien van servomotoren die ook via het OJ systeem worden aangestuurd. De temperatuur is in elk lokaal individueel in te stellen met een wandthermostaat voorzien van een klein LCD scherm.



Figuur 25 Bovenaanzicht van de bemeten lokalen N2-N6, met daarin de positie van de luchtslangen en het leidingverloop naar de luchtbehandelingskast, lokaal N7 is het referentielokaal.



Figuur 26 Testopstelling van temperatuur en CO<sub>2</sub>-regeling per lokaal.

### 6.3 Installatie en in bedrijfstelling

De installatie is gestart op 27 augustus 2019 door het ophijzen van alle materialen, zie Bijlage A. De hijs activiteiten zijn op deze dag uitgevoerd tijdens de zomervakantie om eventuele hijsrisico's door de afwezigheid van leerlingen en leerkrachten te minimaliseren. Vervolgens zijn de kanalen en appendages voor de verschillende lokalen op de luchtbehandelingskast aangesloten. In de lokalen zijn zogenaamde inblaasslurven aan het plafond gehangen die zorgen voor een tochtvrije luchtdistributie, zie Figuur 27. In december 2019 is de na-isolatie van de luchtkanalen op het dak afgerond en is gestart met de in bedrijfstelling en inregeling van de luchtbehandelingskast.



Figuur 27 Testlokaal N3 met inblaasslurf.



Figuur 28 Luchtbehandelingskast met linksonder het aanzuigrooster in de noordgevel.



## 6.4 Monitoring

### 6.4.1 Fijnstof

#### 6.4.1.1 Vergelijking meetapparatuur en bepaling $PM_{2.5}$ filterrendement

Op woensdagmiddag 2 december 2020 is de fijnstof meetapparatuur in lokaal N6 en N7 vergeleken met twee geijkte Grimm fijnstofsensoren door deze op het dak van de school naast de luchtbehandelingskast in de buitenlucht naast elkaar te plaatsen, zie Figuur 29.

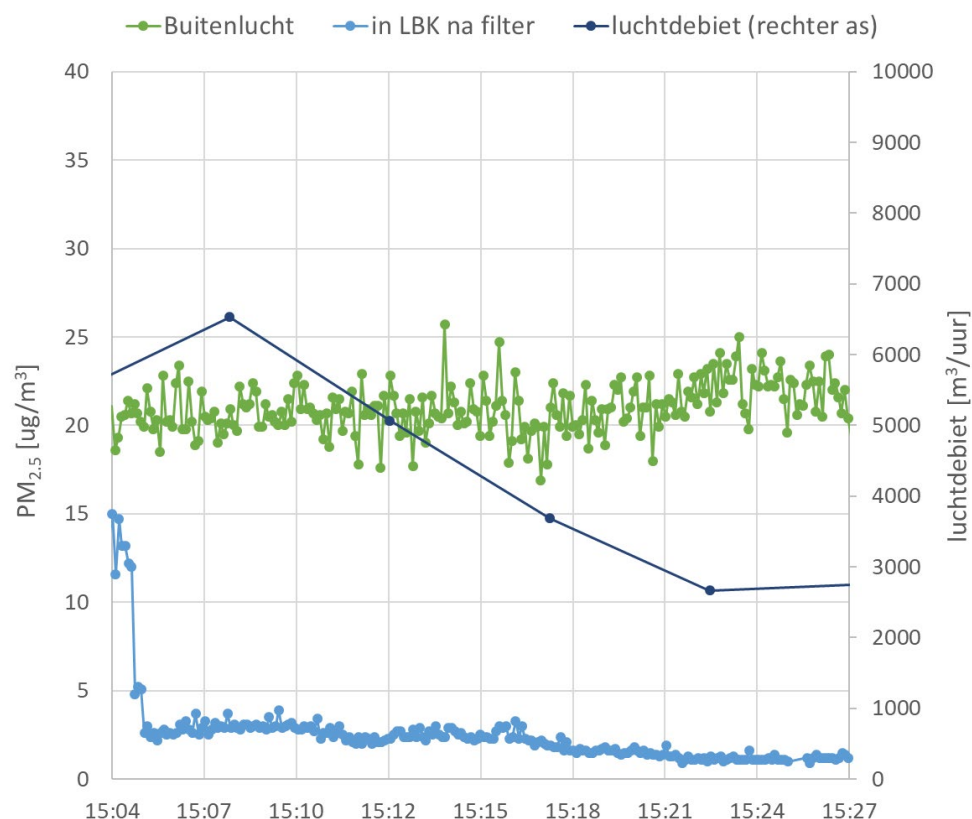


Figuur 29 Woensdag 2 december 2020 (week 49), vergelijking Airvisual fijnstof meetapparatuur voor lokaal N6, N7 (referentie) met Grimm 1.109 (links onder) en Grimm 11-R (rechtsonder).

De resultaten van deze vergelijking tussen 13.45 en 14.45 uur staan in Tabel 8 vermeld. Uit deze vergelijking volgt dat de Airvisual apparatuur in lokaal N6 en N7 een beperkte afwijking heeft van maximaal 10%. Na de vergelijking is de Grimm van TNO in de luchtbehandelingskast stroomafwaarts van het filter geplaatst. De tijdsduur tussen twee metingen was ingesteld op 6 s. De meting is weergegeven in Figuur 30. Op basis van de gemeten waarden bedraagt over de gehele periode 15.05 – 15.27 uur de filter effectiviteit ten aanzien van  $PM_{2.5}$  gemiddeld 89,7% (1 – 2,2/21). Gedurende deze tijdsperiode daalde door vraagsturing op basis van de  $CO_2$ -concentratie in de lokalen, een maat voor het aantal aanwezige leerlingen, het luchtdebiet over het filter van circa 6.000 naar circa 3.000  $m^3$ /uur. Bij dit lagere debiet, tussen 15.21 en 15.27 uur steeg het  $PM_{2.5}$  filterrendement naar 94,5% (1 – 1,2/21,9).

Tabel 8 Woensdag 2 december 2020 (week 49), vergelijking meetapparatuur en bepaling filter effectiviteit ten aanzien van PM<sub>2.5</sub> uitgedrukt in µg/m<sup>3</sup>.

	buitenlucht 13.45 - 14.45 uur		in LBK na filter 15.05 - 15.27 uur	buitenlucht 15.05 - 15.27	in LBK na filter 15.21 - 15.27 uur	buitenlucht 15.21 - 15.27
Grimm VFA	18.8			21.0	1.2	21.9
Grimm TNO	18.3		2.2			
N6	19.7	6.0%				
N7	20.4	10.0%				
PM <sub>2.5</sub> reductie ten gevolge van filter				89.7%		94.5%

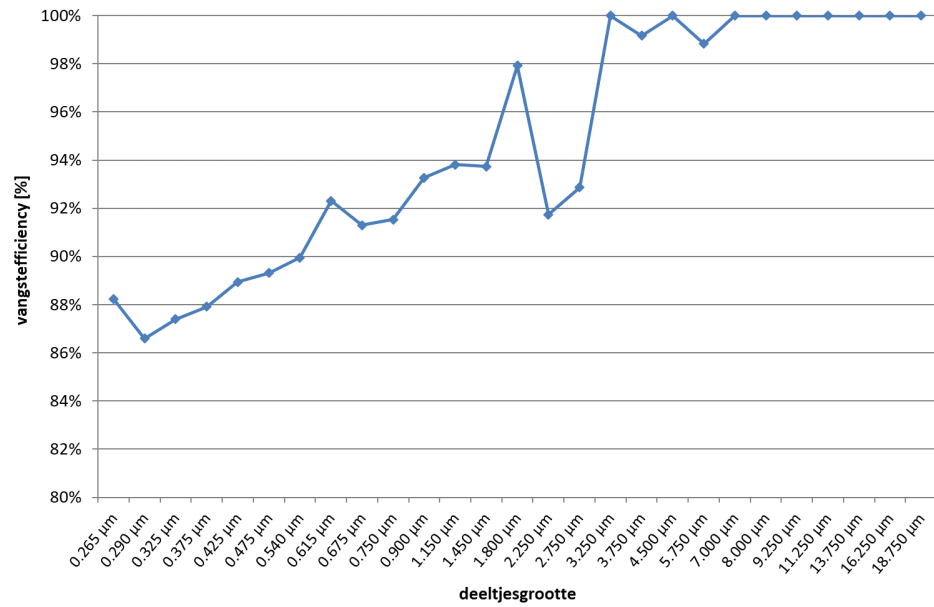


Figuur 30 Woensdag 2 december 2020 (week 49), linkeras: Grimm 1.109 in de buitenlucht en Grimm 11-R in de luchtbehandelingskast stroomafwaarts van het filter. Rechteras: luchtdebiet van de luchtbehandelingskast.

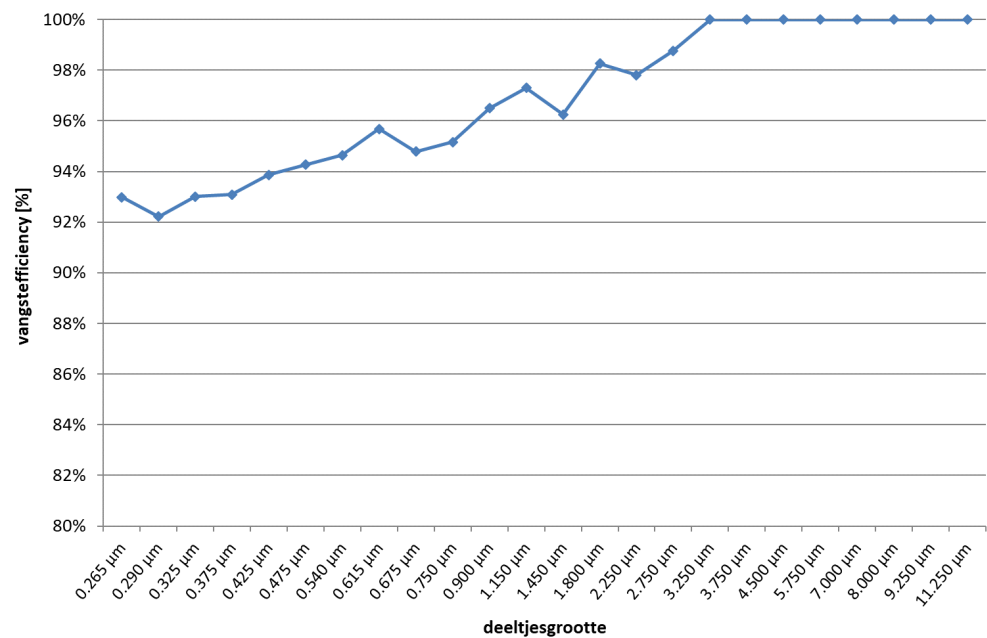
Om het filter in de (H)EPA klasse te kunnen indelen moet per deeltjesgrootte klasse de vangstefficientie worden bepaald. Om voor afwijkingen tussen beide Grimm deeltjestellers te corrigeren zijn eerst op basis van de buitenlucht meting tussen 13.45 - 14.45 uur per deeltjesgrootteklasse correctiefactoren bepaald, zie Bijlage B. De minimum vangstefficientie over de hele meetperiode voldoet aan de specificaties van een E10 filter: > 85%. Bij het laatste deel van de meting, bij een debiet van 3.000 m<sup>3</sup>/uur bedraagt de minimum vangstefficientie 92%. Het filter voldoet in dit deel van de meting bijna aan het criterium voor een E11 filter: > 95% voor alle deeltjesgrootteklassen.

Voorgaande filterprestaties zijn bereikt met de combinatie van een voorfilter, ionisatie sectie en een statisch F7 plaatfilter als collector. De uit de monitoring vastgestelde drukval van deze combinatie bedraagt ca. 150-180 Pa bij 10.000

m<sup>3</sup>/uur. Naar verwachting kan dit verder worden geoptimaliseerd naar 70 – 100 Pa. Dit is hoger dan met een zeer open electret filter waarbij de drukval ca. 30 Pa bedraagt. Bij een standaard E10/E11 filter bedraagt de drukval ca. 300 Pa. De drukval van het SchoolVent filter is dan dus circa 70% lager.



Figuur 31 Vangstefficiëntie ASPRA per deeltjesgrootte, periode 15.05 – 15.27 uur.

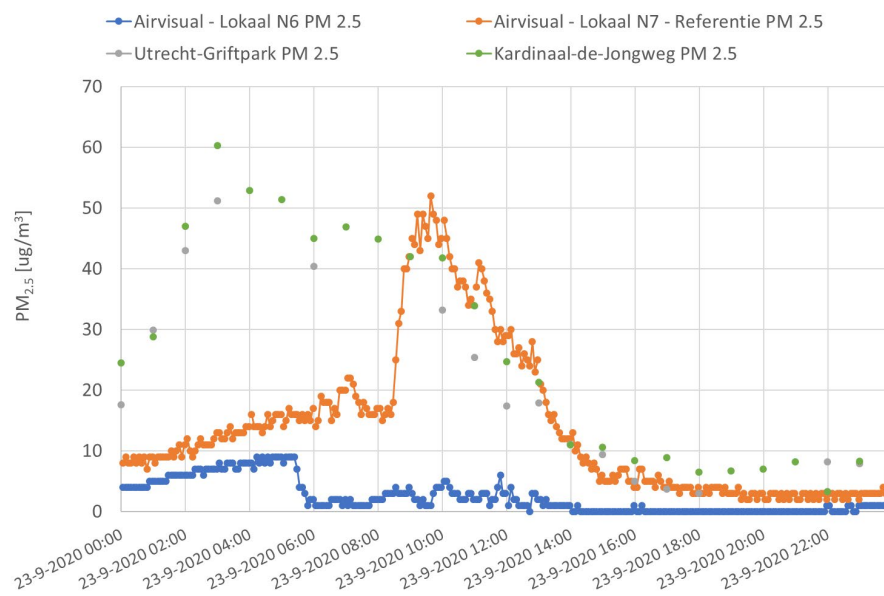


Figuur 32 Vangstefficiëntie ASPRA per deeltjesgrootte, 15.21 – 15.27 uur, circa 3.000 m<sup>3</sup>/uur.

### 6.4.2 Vergelijking tussen lokaal N6 en N7

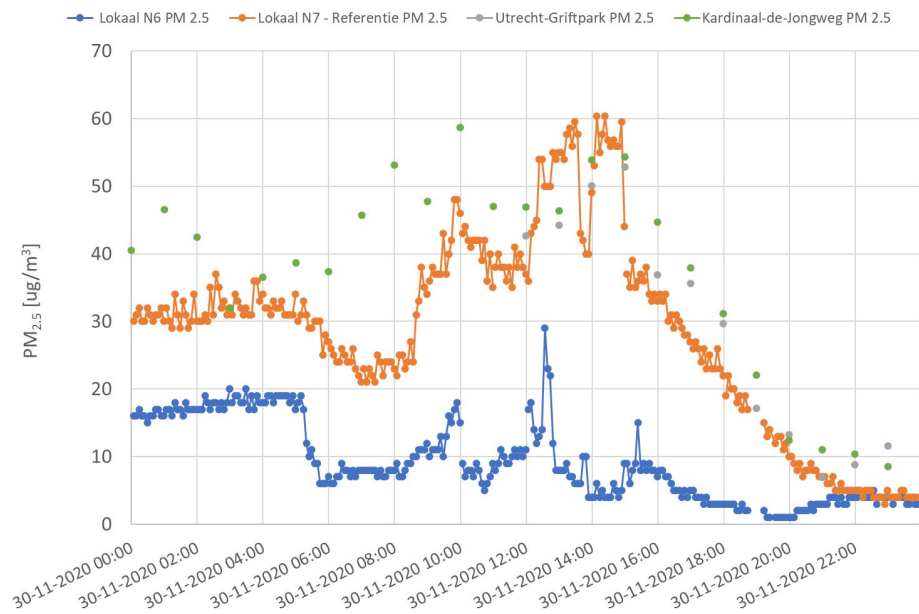
Allereerst wordt op twee typische dagen wat betreft  $PM_{2.5}$  een vergelijking gemaakt tussen lokaal N6 het referentielokaal N7. Hierbij wordt ook de buitenconcentratie betrokken van twee nabij gelegen meetstations van [www.luchtmeetnet.nl](http://www.luchtmeetnet.nl). Vervolgens wordt voor de maand december een systematische vergelijking gemaakt tussen de twee lokalen.

23 september 2020 was een mistige dag met hoge buitenconcentratie fijnstof, zie de groene en grijze punten in Figuur 33 die elk een uurgemiddelde waarde voorstellen. Om 5 uur treedt het ventilatiesysteem in werking en daalt de concentratie in lokaal N6 (blauwe lijn). In het referentielokaal N7 (oranje lijn) worden waarschijnlijk vanaf 8.30 uur de ramen open gezet en stijgt de concentratie naar de buitenconcentratie

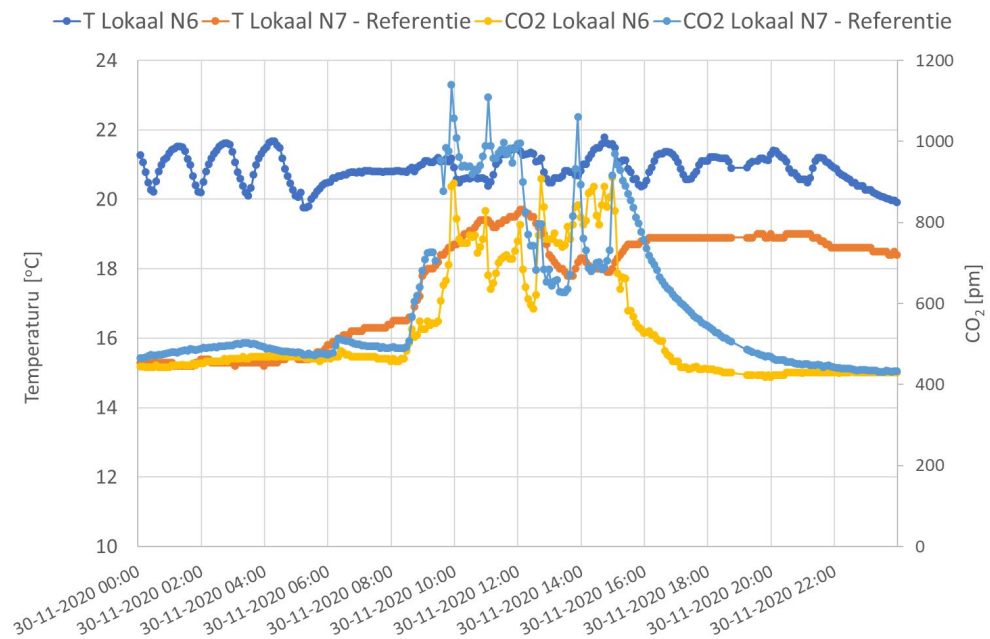


Figuur 33 23 september 2020, fijnstofconcentratie in lokaal N6 en N7 vergeleken met buiten.

Op 30 november is wat betreft fijnstof in Figuur 34 een vergelijkbaar beeld te zien. Door het met open ramen ventileren is de temperatuur in lokaal N7 (ca. 19 °C, oranje lijn) wel duidelijk lager dan in lokaal N6 (ca. 21 °C, blauwe lijn), zie Figuur 35. Het openen van de ramen gaat dus gepaard met comfortverlies.



Figuur 34 30 november 2020, fijnstofconcentratie in lokaal N6 en N7 vergeleken met buiten.



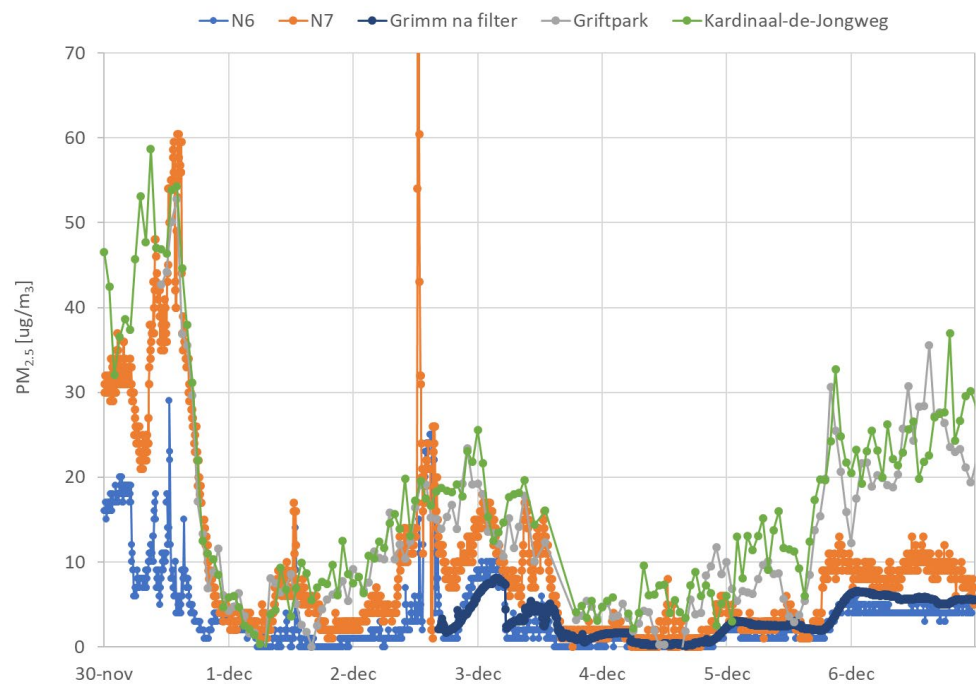
Figuur 35 30 november 2020, CO<sub>2</sub>-concentratie en temperatuur in lokaal N6 en N7.

Figuur 36, Figuur 37 en Figuur 38 tonen de fijnstofconcentratie in de buitenlucht, direct na het filter (Grimm na filter) en in de lokalen N6 en N7 in respectievelijk week 49, 50 en 51. Ook op de dagen na 30 november is te zien dat de fijnstofconcentratie in lokaal N7 vrijwel gelijk is aan de buitenconcentratie en deze volgt. In dit referentielokaal is geen ventilatiesysteem aanwezig en wordt vanwege COVID-19 ruim geventileerd met de open ramen. Dit heeft als nadelig effect dat de

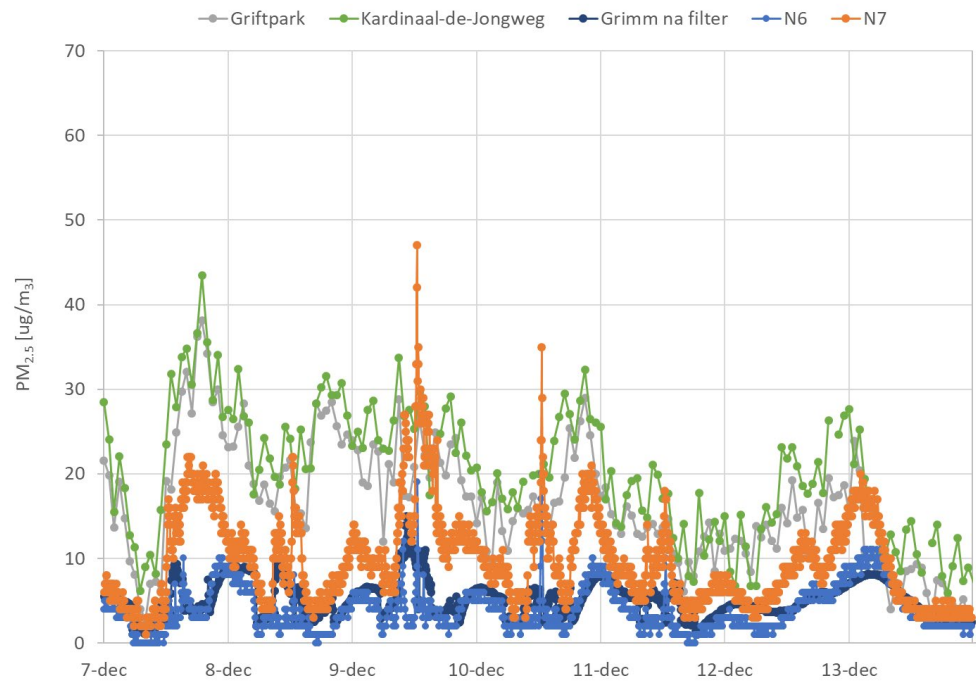


concentratie fijnstof vrijwel gelijk is aan de buitenlucht. Gedurende korte periodes, waarschijnlijk aan het eind van een lesuur is de fijnstofconcentratie binnen hoger dan buiten. Waarschijnlijk wordt dit veroorzaakt door re-suspensie van op de grond neergeslagen stof.

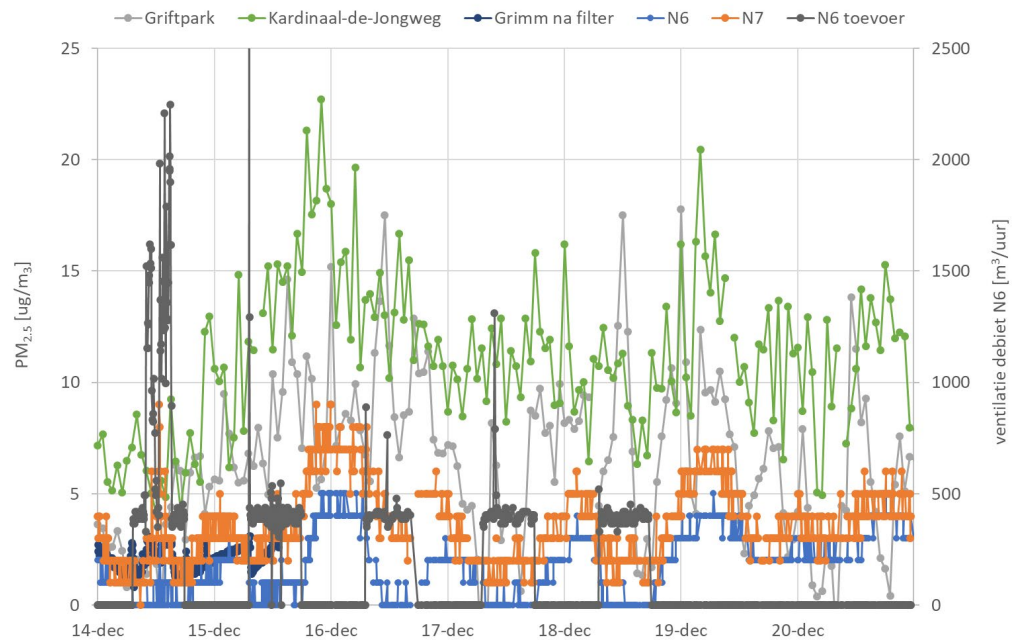
De fijnstofconcentratie in het met van gefilterde lucht voorziene lokaal N6 is duidelijk lager dan in N7 en in de buitenlucht. Indien de ventilatie is ingeschakeld is de concentratie vrijwel gelijk aan de concentratie in de toevoerlucht (Grimm na filter, de donkerblauwe lijn in de figuren). Het in- en uitschakelen van de ventilatie is in Figuur 38 op de rechter as getoond. Duidelijk zichtbaar is dat, zodra de ventilatie uitgeschakeld wordt, de fijnstofconcentratie in lokaal N6 stijgt.



Figuur 36 2020, week 49, fijnstofconcentratie in lokaal N6, N7 (referentie), Grimm na filter (luchtoevoer naar N6) en de buitenluchtstations Utrecht Griftpark en Kardinaal de Jongweg.



Figuur 37 2020, week 50, fijnstofconcentratie in lokaal N6, N7 (referentie), Grimm na filter (luchtoevoer naar N6) en de buitenluchtstations Utrecht Griffpark en Kardinaal de Jongweg.



Figuur 38 2020, week 51, fijnstofconcentratie in lokaal N6, N7 (referentie), Grimm na filter (luchtoevoer naar N6) en de buitenluchtstations Utrecht Griffpark en Kardinaal de Jongweg. Op de rechter as wordt het ventilatiedebiet in lokaal N6 getoond (zwarte lijn).

Tabel 9 laat zien dat de daggemiddelde fijnstofconcentratie tijdens lesuren in lokaal N6 70 tot 96% lager is dan in lokaal N7. De daggemiddelde concentratie tijdens lestijd is in lokaal N7 vergelijkbaar met die in de buitenlucht meetstations Grifpark en Kardinaal de Jongweg van het landelijk luchtmeetnet<sup>18</sup>.

Tabel 9 Daggemiddelde PM<sub>2,5</sub> fijnstofconcentratie n lokaal N6, N7 en in de buitenlucht gedurende lestijden (8.30 – 15.00 uur). De reductie betreft de reductie in lokaal N6 ten opzichte van lokaal N7.

		fijnstof [ug/m3]		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

De reducties in Tabel 9 zijn lager dan de filter efficiëntie in Figuur 31 en Figuur 32. Dit komt omdat er in het lokaal ook nog fijnstof kan vrijkomen, uit bijvoorbeeld kleding. Daarnaast kan ook fijnstof uit de buitenlucht infiltreren en binnen voor een hogere concentratie zorgen.

### 6.4.3 Temperatuur

#### 6.4.3.1 Zomertemperatuur

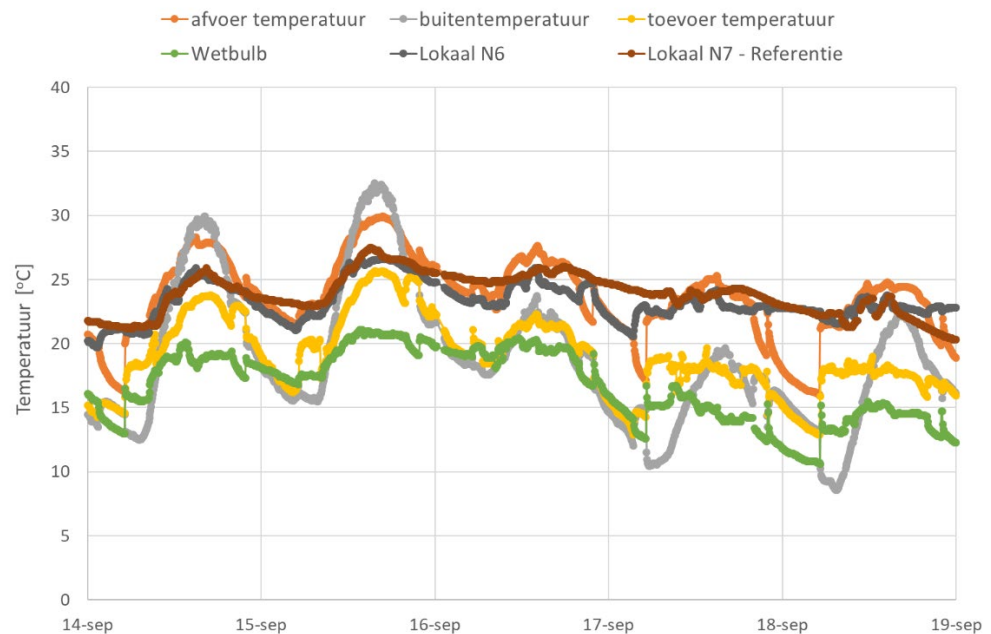
Op verzoek van de school is op 28 augustus 2020 het temperatuur setpoint van 21 naar 23 °C aangepast. Vervolgens was in september 2020 week 38 een zeer warme week. In deze week wordt in lokaal N2 – N6 aan Frisse Scholen klasse A voor zomertemperatuur voldaan. In het referentielokaal N7 staan vanwege COVID-19 de ramen open en wordt daar een vergelijkbare temperatuur bereikt als in de proeflokalen N2 -N6, zelfs bij de hoge buitentemperatuur (maandag 14/9 ca. 30°C, dinsdag 15/9 ca. 32°C, zie Figuur 39). De zomernachtventilatie werkt blijkbaar effectief.

<sup>18</sup> [www.luchtmeetnet.nl](http://www.luchtmeetnet.nl)

In Figuur 39 is de toevoertemperatuur van de luchtbehandelingskast (gele lijn) op 14 en 15 september duidelijk lager dan de buitentemperatuur. De toevoertemperatuur bevindt zich grofweg in het midden tussen de natte bol (wet bulb, groene lijn) en de buitentemperatuur (grijze lijn). Hieruit kan worden afgeleid dat de koeling circa 50% van de maximaal bereikbare theoretische koeling bedraagt. Dit is lager dan de beoogde 75% dauwpunt efficiëntie. In Figuur 40 zijn de temperaturen op 15 september uitgezet, rond 14.00 uur is de inblaasttemperatuur ca. 6,5 °C lager dan de buitentemperatuur. Het toevoer debiet aan lokaal N6 bedraagt dan 2.000 m<sup>3</sup>/uur. Hiermee wordt een koelcapaciteit bereikt van ca. 4,4 kW<sup>19</sup> per lokaal. De binnentemperatuur in N6 bedraagt dan 26,2 °C. In lokaal N7 is het dan 27 °C.

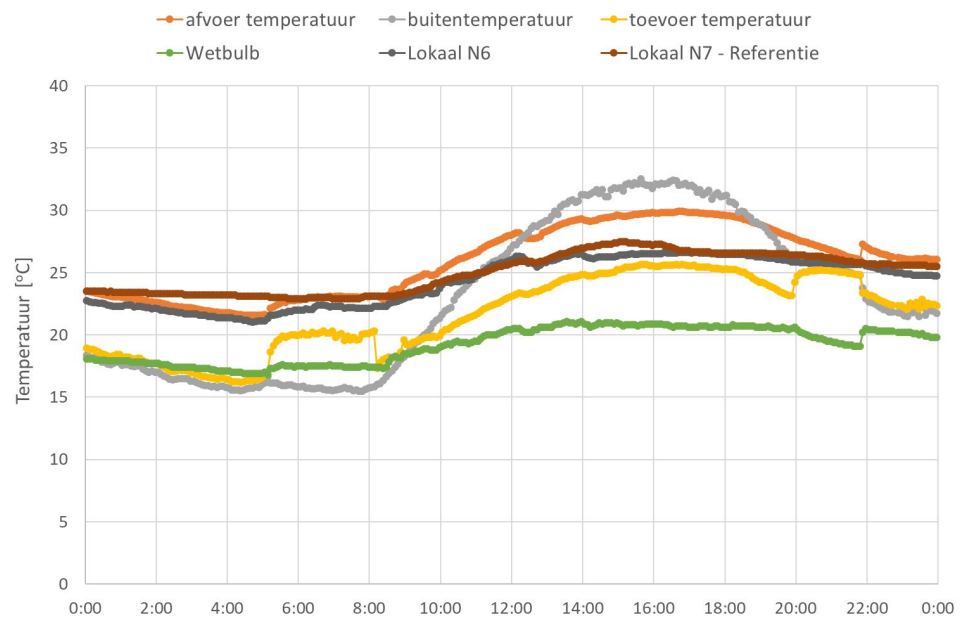
Het koelend effect is kleiner dan verwacht, mogelijke oorzaken zijn:

- De koel efficiëntie is lager dan in het laboratorium, mogelijk doordat de superficiële snelheid hoger is dan bij het proefmodel van de laboratorium meting waardoor de warmteoverdracht van de warmtewisselaar een beperkende factor wordt (dit effect treedt ook in de winter op, zie Figuur 43);
- De afvoertemperatuur gemeten in de luchtbehandelingskast is hoger dan de temperatuur op 1,2 m hoogte in het lokaal. De lucht in het lokaal wordt bovenin afgezogen, de temperatuur is hier enkele graden hoger dan op 1,2 m hoogte. Daarnaast treedt er opwarming op in het afvoer kanaal bovendaks.



Figuur 39 September 2020, week 38 temperatuur luchtbehandeling en temperatuur in lokaal N6 en N7

<sup>19</sup> 2.000 m<sup>3</sup>/uur \* 1/3600 uur/s \* 6,5 K \* 1230 J/m<sup>3</sup> K ~4,4 kW



Figuur 40 15 september 2020, temperatuur luchtbehandeling en temperatuur in lokaal N6 en N7.

De temperatuur van lokaal N2 is 1,5 °C á 2 °C warmer in vergelijking met lokaal N3. Een mogelijke oorzaak van dit verschil is dat de twee lichtkoepels van lokaal N2 vol in de zon staan, zie Figuur 41. De lichtkoepels van lokaal N3 staan in de schaduw van de luchtbehandelingskast. Een mogelijke oplossing om de opwarming tegen te gaan is om de lichtkoepels van lokaal N2 in de zomer wit te kalken en de dakisolatie te verbeteren.



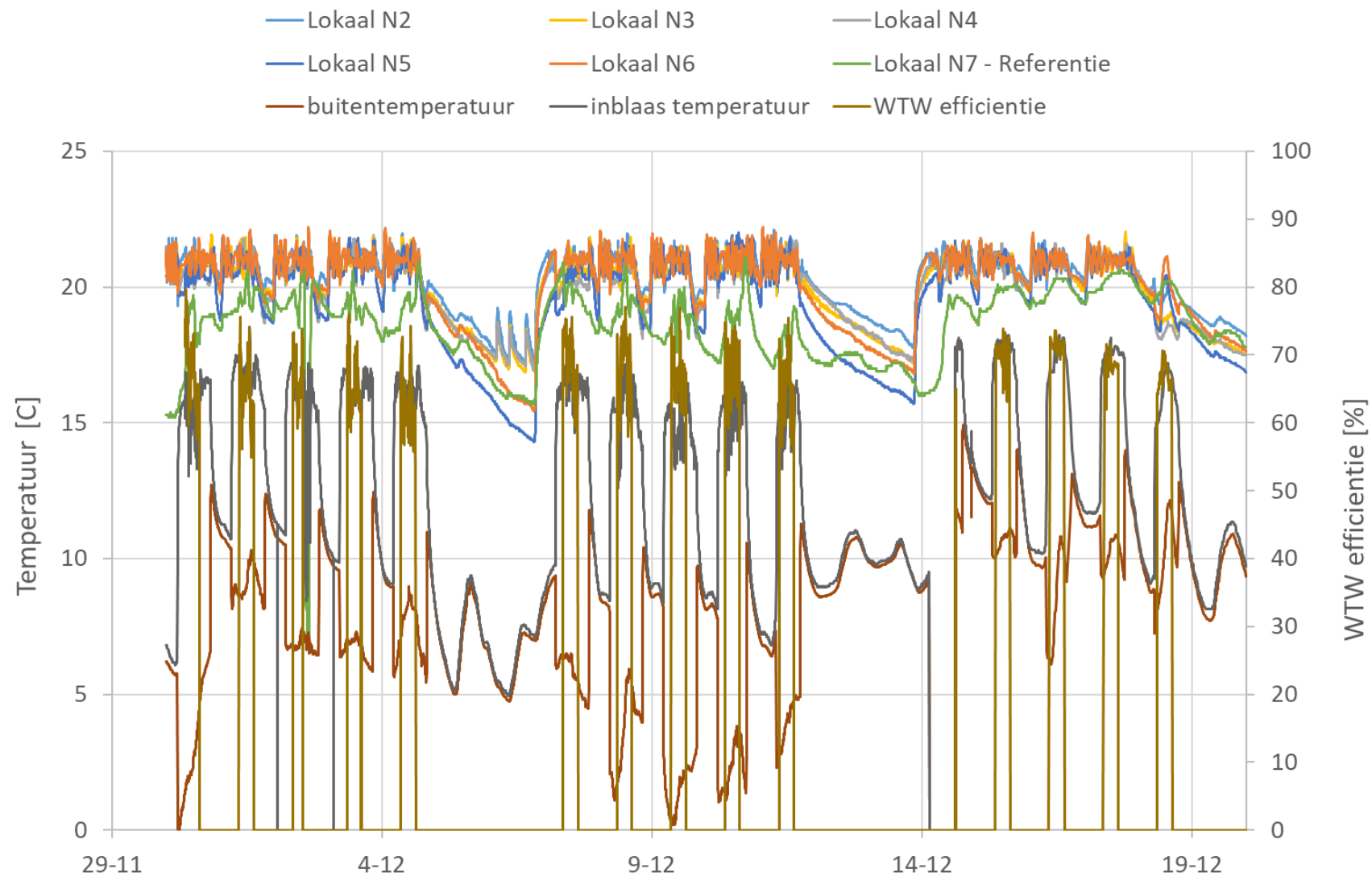
Figuur 41 Lichtkoepels bij lokaal N2 staan vol in de zon en zorgen voor opwarming van het lokaal.

#### 6.4.3.2 Wintertemperatuur en WTW rendement

Figuur 42 geeft een overzicht van de inblaas- en luchttemperatuur in lokaal N2 tot en met N6 vergeleken met referentielokaal N7 (groene lijn) voor week 49, 50 en 51 van 2020. Duidelijk te zien is dat de temperatuur in lokaal N7, waar met open

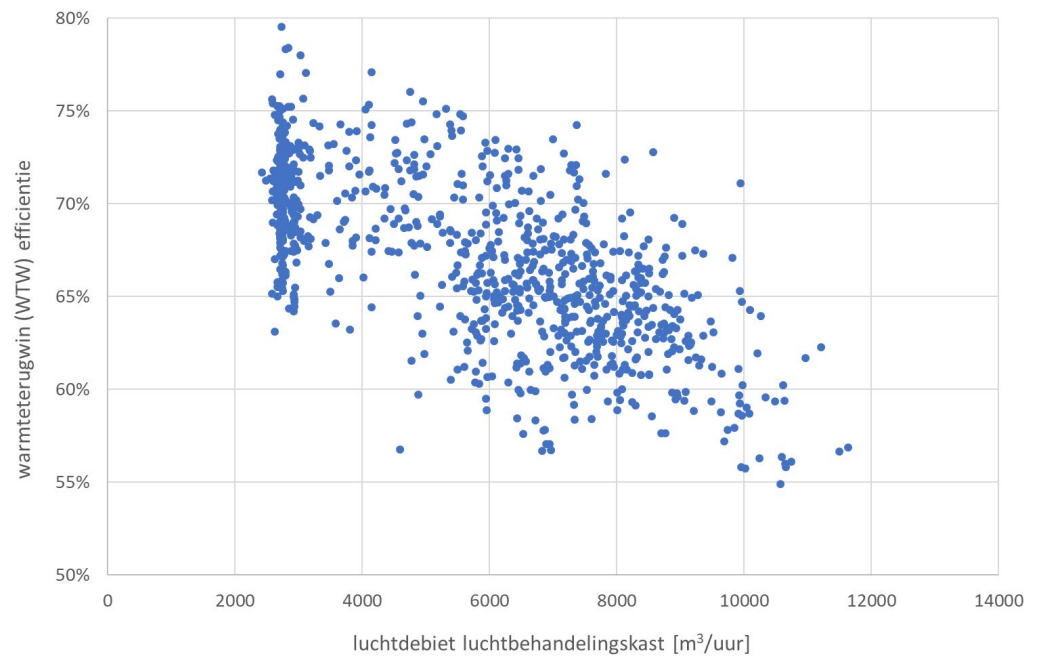
ramen wordt geventileerd, 2-5 °C lager is dan in de lokalen waarin voorverwarmde lucht wordt ingeblazen. De temperatuur in het lokaal N7 voldoet zelfs niet aan de minimum eis van 19 °C volgens klasse C van PVE Frisse Scholen.

De temperatuur van de voorverwarmde lucht in lokaal N2 tot en met N6 bedraagt circa 17 °C bij een buitentemperatuur van circa 5 °C. Het warmteterugwin (WTW) rendement tijdens lesuren (8.30 – 15.00 uur) bedraagt tussen de 60 en 70%. De fluctuatie wordt veroorzaakt door de vraagsturing op basis van de bezetting van de verschillende klaslokalen middels meting van de CO<sub>2</sub>-concentratie. Figuur 43 laat zien dat bij toenemend luchtdebiet het temperatuur rendement afneemt. In de weken 49 -51 bedroeg het gemiddelde WTW rendement 67% bij een totaal luchtdebiet van 5619 m<sup>3</sup>/uur, dit is een luchtdebiet van 1124 m<sup>3</sup>/uur per lokaal.



Figuur 42 Week 49, 50 en 51 2020, inblaas- en luchttemperatuur in lokaal N2 tot en met N6 vergeleken met referentielokaal N6. WTW efficiëntie tussen 8.30 – 15.00 uur.





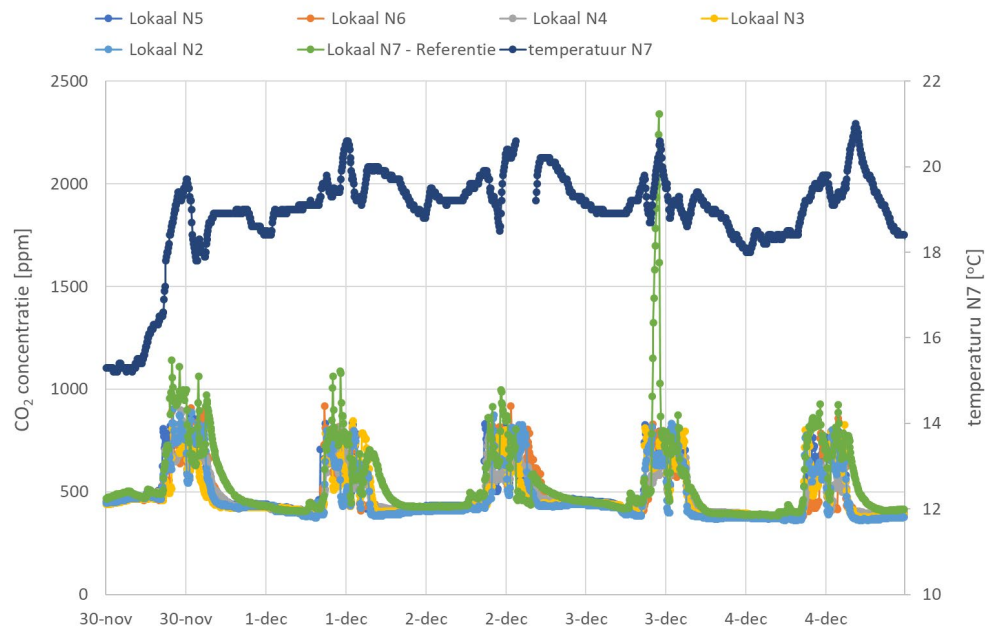
Figuur 43 WTW efficiëntie luchtbehandelingskast tussen 8.30-15.00 uur in week 49, 50 en 51 van 2020.

#### 6.4.4 CO<sub>2</sub>

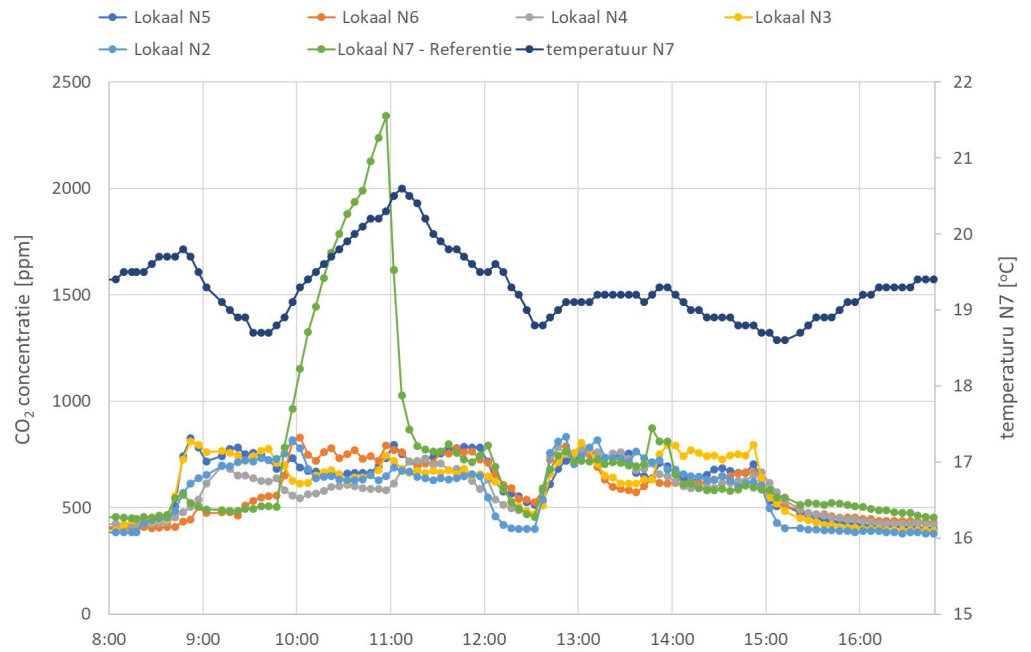
In Figuur 44 zijn de CO<sub>2</sub>-concentratie in de lokalen gedurende de eerste week van december 2020 uitgezet. Deze laat zien dat op een paar kleine kortstondige piekmomenten na, de CO<sub>2</sub>-concentratie in de lokalen N2-N7 lager is dan de gewenste waarde van 800 ppm voor klasse A van PVE Frisse Scholen. Zoals eerder vermeldt in de vorige paragraaf, gaat dat in referentielokaal N7, waar met open ramen wordt geventileerd, wel ten koste van het thermisch comfort (blauwe lijn in Figuur 44).

Op 3 december 2020 treedt in lokaal N7 een verhoging van de CO<sub>2</sub>-concentratie op tot ruim 2300 ppm. Waarschijnlijk is dit een gevolg van het sluiten van de ramen. Mogelijk omdat de temperatuur in het lokaal laag was. In Figuur 45 is ingezoomd op deze dag. Duidelijk te zien is dat met het oplopen van de CO<sub>2</sub>-concentratie de temperatuur van 18,7 naar 20,6 °C oploopt. Om 11 uur daalt de CO<sub>2</sub>-concentratie snel en ook de temperatuur vertoont een daling, waarschijnlijk omdat de ramen open gingen en de klas niet meer bezet was door leerlingen.





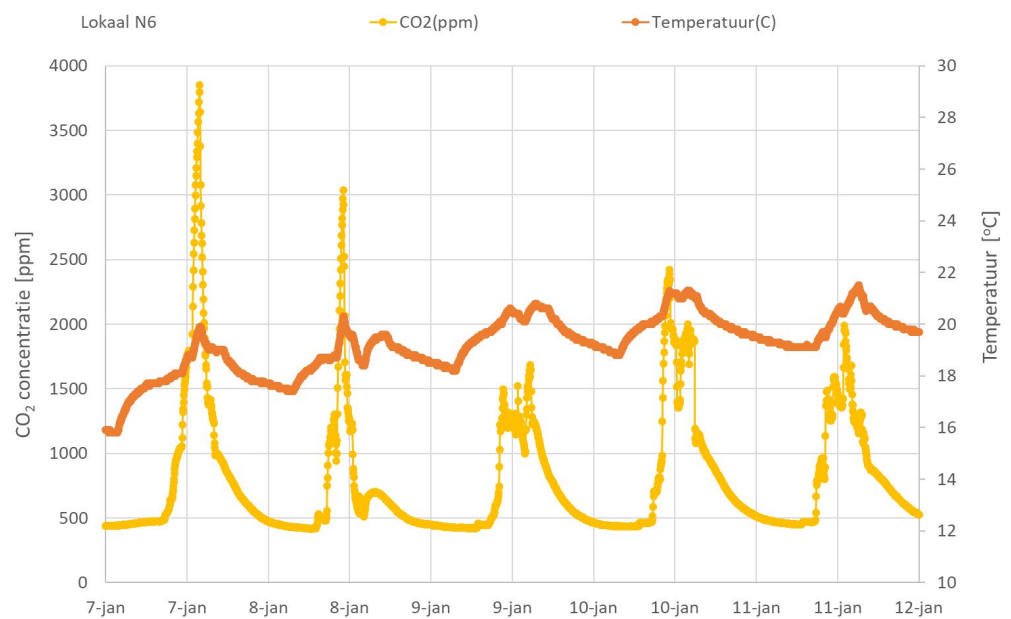
Figuur 44 CO<sub>2</sub>-concentraties (linker as) in lokalen N2-N7 en temperatuur in lokaal L7 (rechter as) in week 49 (december 2020)



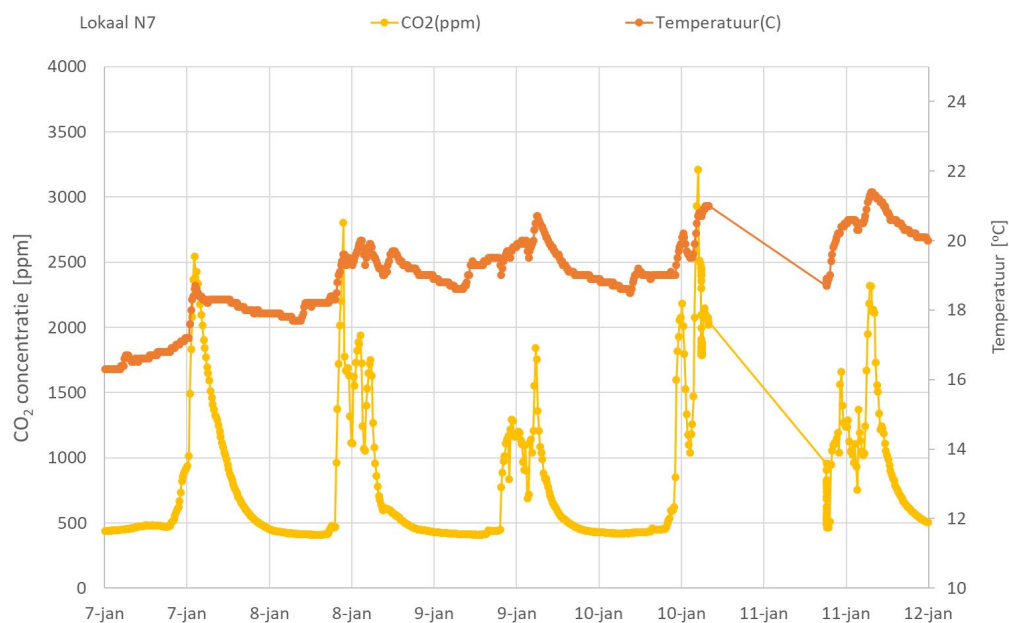
Figuur 45 CO<sub>2</sub>-concentraties (linker as) in lokalen N2-N7 en temperatuur in lokaal L7 (rechter as) op 3 december 2020 (week 49).

Figuur 46 en Figuur 47 laten de CO<sub>2</sub>-concentratie en temperatuur zien in respectievelijk lokaal N6 en N7 in januari 2019, dus vóór de plaatsing van het ventilatiesysteem. Met name in lokaal N6 werden zeer hoge piekconcentraties CO<sub>2</sub> bereikt, tot bijna 4.000 ppm op maandag ochtend 7 januari. Mogelijk werden de klapramen en roosters dichtgehouden vanwege de lage temperatuur in het lokaal.

Op basis van deze data kan worden geconcludeerd dat door het SchoolVent ventilatiesysteem zowel de CO<sub>2</sub>-concentratie als ook het thermisch comfort sterk zijn verbeterd. In het referentielokaal N7 is in 2020 met de extra ventilatie ten gevolge van COVID-19 ten opzichte van 2019 ook sprake van een verbetering van de CO<sub>2</sub>-concentratie, die echter wel ten koste is gegaan van het thermisch comfort en veel grotere energieverliezen en een verhoogde fijnstofconcentratie.



Figuur 46 CO<sub>2</sub>-concentratie en temperatuur in lokaal N6 vóór installatie ventilatiesysteem in januari 2019.



Figuur 47 CO<sub>2</sub>-concentratie en temperatuur in referentielokaal N7 in januari 2019.

## 6.5 Gebruikers feedback en automatische rapportage binnenklimaat

### 6.5.1 Gebruikersfeedback

Vanuit de school is de volgende terugkoppeling gekregen over het binnenklimaat in de lokalen uitgerust met het SchoolVent systeem:

“Heel fijn dat temperatuur en CO<sub>2</sub>-concentratie automatisch geregeld worden. In lokalen zonder CO<sub>2</sub>-sturing moet je steeds schipperen tussen ramen open te zetten als de CO<sub>2</sub>-concentratie te hoog wordt en ramen weer dicht doen omdat het te koud wordt. Het in de gaten houden van de CO<sub>2</sub>-meter wordt daarbij ook nog geregeld vergeten. Daarnaast heb je last van tocht bij geopende ramen als het buiten waait en met ramen dicht uiteraard niet. In een nieuwbouwdeel van de school is een ander CO<sub>2</sub>-gestuurd systeem. Dat systeem houdt de temperatuur echter niet constant. De temperatuur in die lokalen loopt na binnenkomst van een groot aantal leerlingen direct 4 à 5 graden op en vervolgens regelt systeem temperatuur niet of nauwelijks bij, is de ervaring. In de zomer loopt de temperatuur in die lokalen ook snel op tot boven de 30 graden. Daarnaast reageert dat systeem niet snel genoeg op oplopende CO<sub>2</sub>-waarden.

Als in de zomer de temperatuur oploopt, is het pilot-systeem heel prettig omdat de temperatuur een paar graden gekoeld kan worden. Dat helpt enorm om dan toch goed te kunnen concentreren. Over de fijnstoffiltering merkt een docent nog op dat hij voorheen altijd thuis kwam met het gevoel alsof hij een dag in Londen gelopen had. Bij het snuiten van zijn neus moest hij daar steeds aan denken. Nu heeft hij dat gevoel in het geheel niet meer. Desbetreffende docent zit de hele dag in hetzelfde lokaal. Tot slot nog de opmerking dat er een collega is die enorme vrees heeft om corona te krijgen wegens een chronische ontstekingsziekte. Lesgeven in

een lokaal met luchtzuivering geeft desbetreffend docent een veiliger gevoel en durft les te geven zonder alle deuren en ramen geopend te houden (waarbij in de winter de temperatuur onder de 17 graden kwam). Al met al is de school zo tevreden over dit systeem dat het in het voorjaar uitgerold wordt over andere lokalen.”

Ook de leerlingen gaven aan dat het klimaat in de geklimatiseerde lokalen prettiger is dan in de andere lokalen. Er is geprobeerd om op een objectievere manier feedback van gebruikers te krijgen gedurende de maand december 2020. Hiervoor was een enquête opgesteld. Helaas was het door de nieuwe COVID-19 lock-down vanaf medio december 2020 niet meer mogelijk om deze enquête in te vullen.

### 6.5.2 Automatische rapportage binnenklimaat

Het in paragraaf 4.1.3 ontwikkelde concept voor smart sensing is verder uitgewerkt binnen de mogelijkheden die het gebruikte Grafana database dashboard visualisatie programma biedt en heeft geleid tot het dashboard in Figuur 48, een mix tussen een grafische weergave en de vermelding van de PvE Frisse Scholen klassen. De lokalen met het SchoolVent systeem voldeden in week 49 niet aan een klasse A voor wintertemperatuur (> 21 °C) omdat in de lokalen het setpoint op 21 °C was ingesteld. Klasse A zou wel haalbaar zijn geweest door het setpoint te verhogen, maar blijktbaar was hieraan vanuit de school geen behoefte.



Figuur 48 Dashboard smart sensor systeem voor automatische toetsing binnenklimaat, als voorbeeld week 49, 2020. Linkerkolom: testlokaal N6, rechter kolom: referentielokaal N7. Van boven naar beneden indicatoren voor CO<sub>2</sub>, T\_winter, T\_zomer en PM<sub>2.5</sub> (fijnstof). Groene lijnen en tekst geven aan dat het lokaal voldoet aan klasse A frisse scholen. Geel, oranje en rood geven respectievelijk klasse B, C en D aan. Bij PM<sub>2.5</sub> wordt ook de gemiddelde waarde weergegeven.

## 7 Conclusies en mogelijkheden voor spin off en vervolgactiviteiten

### 7.1 Conclusies en aanbevelingen

Het SchoolVent concept is succesvol ontwikkeld tot een energiezuinig ventilatiesysteem toepasbaar bij renovatie van scholen. Het systeem is in een pilot bestaande uit 5 lokalen van een middelbare school beproefd en vergeleken met de uitgangssituatie. Vergeleken met de uitgangssituatie is het binnenklimaat sterk verbeterd. De leerkrachten en leerlingen zijn zeer tevreden met het binnenklimaat.

#### Filtering

Het VFA ASPRA elektrostatische filter is opgeschaald van 2.000 naar 10.000 m<sup>3</sup>/uur en is ingebouwd in de filtersectie van een Lucam luchtbehandelingskast. Het filterrendement voldoet bij een bijna 80% lagere drukval aan de specificaties van een E10 filter. Bij een laag debiet (3.000 m<sup>3</sup>/uur) wordt zelfs bijna aan de specificaties voor E11 filter voldaan. Fijnstof (PM<sub>2.5</sub>) wordt voor 90 – 95% verwijderd uit de toevoerlucht. In de geklimatiseerde lokalen zorgt dit voor een 70 tot 96% lagere PM<sub>2.5</sub> concentratie vergeleken met het referentielokaal.

#### CO<sub>2</sub>

De CO<sub>2</sub>-concentratie is een maat voor de hoeveelheid ventilatie per persoon. Zowel in de geklimatiseerde lokalen als in het referentielokaal wordt in het stookseizoen voldaan aan Frisse Scholen klasse A. Met name in het referentielokaal is dit een gevolg van extra ventilatie met open ramen vanwege COVID-19. Dit gaat wel ten koste van de binnentemperatuur. Op enkele dagen waren mogelijk vanwege een lage binnentemperatuur de ramen gesloten en steeg de CO<sub>2</sub>-concentratie naar ruim 2.000 ppm. Vergeleken met de situatie voor de plaatsing van het SchoolVent ventilatiesysteem in het pre-corona tijdperk in januari 2019 is de ventilatie sterk verbeterd. Destijds traden piekconcentraties op tot bijna 4.000 ppm CO<sub>2</sub>.

#### Wintertemperatuur en WTW rendement

Het warmteterugwin (WTW) rendement van de luchtbehandelingskast bedraagt tussen de 60 en 70%. De fluctuatie wordt veroorzaakt door de vraagsturing op basis van de bezetting van de verschillende klaslokalen middels meting van de CO<sub>2</sub>-concentratie. Gemiddeld bedroeg het WTW rendement 67% bij een totaal luchtdebiet van 5619 m<sup>3</sup>/uur, dit is een luchtdebiet van 1124 m<sup>3</sup>/uur per lokaal. In de lokalen met het SchoolVent systeem is klasse A voor de wintertemperatuur haalbaar. Echter in de praktijk blijkt dat de leerkrachten een lagere temperatuur prettiger vinden. In het referentielokaal was de temperatuur door de geopende ramen dermate laag, veelal 18 tot 19 °C, dat niet eens aan klasse C van Frisse Scholen werd voldaan.

#### Zomertemperatuur en koelrendement

Het beoogde koelvermogen met indirecte adiabatische koeling wordt behaald. Wel is de dauwpunt efficiëntie bij het hoge luchtdebiet van 2.000 m<sup>3</sup>/uur per lokaal lager dan de beoogde 75%. In de proeflokalen N6 en N7 is gedurende de warme periode van september 2020 aan klasse A zomertemperatuur van Frisse Scholen voldaan. Aanbeveling is om de warmte-instroom in de lokalen aan de westzijde te verlagen door verbeterde dakisolatie en optimaal gebruik van zonwering.

### **Dashboard op basis van Smart sensing**

Naast een uitgebreid dashboard met alle monitoringsdata is een vereenvoudigd dashboard ontwikkeld voor automatische rapportage van het binnenklimaat richting de school op basis van het Programma van Eisen Frisse Scholen. Dit dashboard maakt gebruik van de sensordata waarmee het SchoolVent systeem vraaggestuurd wordt aangestuurd.

## **7.2 Mogelijkheden voor spin off en vervolgactiviteiten**

De school in Zeist is dermate enthousiast over de prestaties van het SchoolVent luchtbehandelingssysteem dat ze Lucam/VFA heeft gevraagd om een offerte te maken voor de klimatisering van de overige lokalen in de school.

Deze offerte is in opdracht gegeven om 14 klaslokalen te gaan voorzien met het SchoolVent systeem. Bij de invulling is gekozen voor decentrale luchtbehandelingskasten waarbij 2 tot 4 lokalen worden voorzien van geconditioneerde en schone lucht. Hiermee wordt het geïsoleerde kanaalwerk en aanvullende kleppen gereduceerd.

De overige 10 lokalen zullen later worden voorzien met het schoolvent systeem in combinatie met gewenste bouwkundige aanpassingen.

## 8 Ondertekening

Delft, 10 mei 2021

TNO

Ir. A.C. Westerlaken  
Research Manager

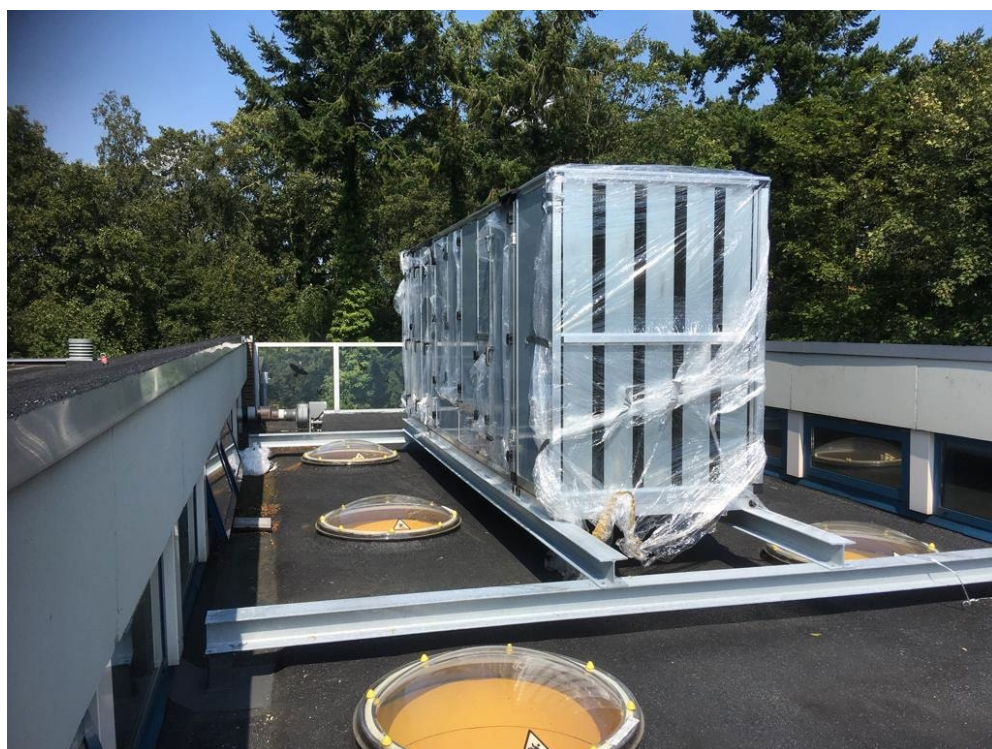
Ir. P. Jacobs  
Auteur

## A Foto's installatie plaatsing luchtbehandelingskast



Figuur 49 Plaatsing frame op 27 augustus 2019, tijdens vakantie om hijsrisico's te beperken.





Figuur 50 Plaatsing luchtbehandelingskast op frame op 27 augustus 2019.



Figuur 51 Monteren luchtkanalen en appendages 17 oktober 2019.





Figuur 52 Isoleren luchtkanalen november/december 2019.

## B Correctiefactoren per deeltjesgrootte

Bij de metingen zijn twee Grimm optische deeltjestellers gebruikt. Om te corrigeren voor eventuele verschillen tussen de meetinstrumenten zijn deze in de buitenlucht gekalibreerd. De correctiefactor is bepaald door de counts per deeltjescategorie van de TNO Grimm 11-R unit te delen door het aantal counts in dezelfde deeltjescategorie bij de VFA Grimm 1.109 unit. Onderstaande figuur laat zien dat bij kleine deeltjes de meetinstrumenten beperkt van elkaar afwijken. Boven circa 10  $\mu\text{m}$  is de correctiefactor minder representatief vanwege het geringe aantal grote deeltjes. Om hiervoor een representatieve correctiefactor vast te stellen dient langer te worden gemeten. Deze deeltjesgrootte was in dit onderzoek echter minder van belang.

