



Effectiviteit van mechanische ventilatie met filtertoepassing in een school langs een drukke weg in Den Haag

In opdracht van:

GGD Haaglanden
Mevr. J.M.I. Kwekkeboom
Afdeling Leefomgeving
Postbus 16130
2500 BC Den Haag

Amsterdam, oktober 2014

Auteur(s) D. de Jonge
M. Strak

GGD Amsterdam
LO afdelingen Milieu & Gezondheid en Luchtkwaliteit
Postbus 2200
1000 CE AMSTERDAM



Aan de totstandkoming van deze rapportage werkten mee:

Peter Wallast	(beheer vaste meetopstellingen)
Harald Helmink	(validatie meetgegevens)
Dave de Jonge	(projectcoördinator, validatie, rapportage)
Maciek Strak	(gegevensverwerking, rapportage)
Saskia van der Zee	(projectleiding)
Jaap Visser	(projectleiding)

© GGD, Amsterdam, Nederland. Alle rechten voorbehouden.

GGD Amsterdam en/of de met haar gelieerde maatschappijen zijn niet aansprakelijk voor enige directe indirecte, bijkomstige of gevolgschade ontstaan door of bij het gebruik van de informatie of gegevens uit dit document, of door de onmogelijkheid die informatie of gegevens te gebruiken. De inhoud van dit rapport mag aan derden niet anders dan als één geheel worden ontsloten, voorzien van bovengenoemde aanduidingen met betrekking tot auteursrechten en aansprakelijkheid.

Inhoud

Samenvatting	4
1 Inleiding	5
2 Methoden	7
2.1 Meetlocatie	7
2.2 Ventilatiesysteem	8
2.3 Luchtmetingen	10
2.4 Data-analyse	13
3 Resultaten en interpretatie	15
3.1 Fijnstof en roet	15
3.2 CO ₂ en klimaat	25
4 Conclusie	27
Bijlage 1	28
Bijlage 2	29

Samenvatting

Het doel van dit onderzoek is om na te gaan in welke mate een mechanisch ventilatiesysteem met luchtfiltering de luchtkwaliteit in een bestaande school langs een drukke weg kan verbeteren en of de kwaliteit van het toegepaste filtermateriaal hierop van invloed is. Het onderzoek is uitgevoerd in de Prinses Marijkeschool, een basisschool op korte afstand (20 tot 70 meter) van een druk kruispunt in de Haagse Schilderswijk. Het onderzoek is uitgevoerd in opdracht van de GGD Haaglanden. De Prinses Marijkeschool is in overleg met de GGD Haaglanden geselecteerd. De school is voorzien van een mechanisch ventilatiesysteem met warmteterugwinning en centrale toe- en afvoer waarin reeds luchtfilters waren geïnstalleerd. Aanvankelijk werd, door foutieve informatie, aangenomen dat filters van gemiddelde klasse (F5) aanwezig waren. Dit bleken achteraf filters van de hoogste klasse (F9) te zijn. Om toch een vergelijking tussen verschillende filterklassen te kunnen maken is op verzoek van GGD Haaglanden en de school besloten de onderzoeksperiode te verlengen en het meetprogramma enkele weken met F5 filters voort te zetten.

Voor PM₁₀, PM_{2,5} en roetconcentraties in de binnenlucht bestaan geen normen. Voor deze componenten kan dus niet worden getoetst aan grenswaarden, wel kan de concentratie in verschillende situaties worden vergeleken.

Tijdens lesuren zijn de gemeten PM_{2,5} en -vooral- PM₁₀ concentraties in de klas vaak hoger dan in de buitenlucht. Dit komt door activiteiten van leerlingen waardoor stof wordt opgewerveld dat al was neergeslagen, en door stof afkomstig van kleding, huidschilfers etc. Mensen en menselijk handelen zijn een bron van PM_{2,5} en vooral PM₁₀, dit is ook uit ander onderzoek* bekend. In dit onderzoek is geen verschil tussen F5 en F9 filters aantoonbaar voor wat betreft de reductie van de buitenluchtconcentratie PM₁₀ en PM_{2,5}. Het gaat hierbij echter vooral om het grovere deel van het fijn stof, dat minder diep in de luchtwegen kan doordringen en minder schadelijk is dan het fijnere fijn stof. De zeer fijne, gezondheidsschadelijke roetdeeltjes komen alleen vrij bij verbrandingsprocessen, hiervan zijn geen bronnen in de school aanwezig. Toepassing van een F9 filter in het systeem leidt ertoe dat (tijdens lesuren) van elke µg/m³ roet in de buitenlucht 0,27 µg/m³ in de binnenlucht terecht komt. Met toepassing van een F5 filter wordt van elke µg/m³ roet in de buitenlucht 0,84 µg/m³ in de binnenlucht teruggevonden.

De CO₂ concentratie in de klas is tijdens lesuren gemiddeld 821 ppm, waarmee ruimschoots wordt voldaan aan de ventilatie-normen uit het Bouwbesluit. De mate van luchtverversing die met het ventilatiesysteem bereikt wordt is dus ruim voldoende. De temperatuur in het klaslokaal is met een gemiddelde van 24 °C tijdens de lesuren echter hoog te noemen, de relatieve vochtigheid is gemiddeld aan de lage kant, en tijdens lesuren is de lucht vaak te droog. Het type filter (F5 of F9) in het ventilatiesysteem is niet van invloed op het CO₂ gehalte en het klimaat in de klas.

Tenslotte merken wij op dat de goede werking van een filterinstallatie en garantie over de toegepaste filtermaterialen aandacht en controle vereist.

*) Lin, CC, C-K Peng. Characterization of indoor PM₁₀, PM_{2.5}, and ultrafine particles in elementary school classrooms: a review. Environmental Engineering Science, 2010;27(11); 915-922.
Morawska L., A. Afshari, G. N. Bae, G. Buonanno, C. Y. H. Chao, O. Hänninen, W. Hofmann, C. Isaxon, E. R. Jayaratne, P. Pasanen, T. Salthammer, M. Waring, A. Wierzbicka. Indoor aerosols: from personal exposure to risk assessment (review).⁴ Indoor Air 2013;23:462-487

1 Inleiding

Wetenschappelijk onderzoek heeft aangetoond dat langdurige blootstelling aan luchtverontreiniging van het verkeer nabij drukke wegen nadelig is voor de gezondheid, vooral voor kinderen, ouderen en mensen met al bestaande luchtwegklachten en hart- en vaatandoeningen. Gezondheidseffecten die kunnen optreden zijn: levensduurverkorting, longfunctiedaling en verergering en vaker optreden van hart- en vaatziekten en luchtwegaandoeningen.

Hoewel de luchtkwaliteit langzaam verbetert is de lucht in Den Haag, met name langs drukke wegen en nabij van snelwegen, nog lang niet schoon te noemen. Toepassing van mechanische ventilatie met filtersystemen zou een effectieve manier kunnen zijn om de blootstelling aan verkeersgerelateerde luchtverontreiniging in bestaande woningen en scholen langs drukke wegen te verlagen. De effectiviteit van deze systemen in testsituaties en in leegstaande gebouwen om fijn stof uit de lucht te filteren is uitgebreid onderzocht en is zeer groot (>95%). Er is echter nog relatief weinig onderzoek gedaan naar de effectiviteit van deze systemen in de praktijk.

Het doel van dit onderzoek is om na te gaan in welke mate een mechanisch ventilatiesysteem met filtertoepassing de luchtkwaliteit in een bestaande school langs een drukke weg kan verbeteren, en of de toegepaste filterkwaliteit hierop van invloed is. Het onderzoek is uitgevoerd in de Prinses Marijkeschool, een basisschool onderwijs op korte afstand (20 tot 70 meter) van een druk kruispunt in de Haagse Schilderswijk. Het onderzoek is uitgevoerd in opdracht van de GGD Haaglanden. De school is in overleg met de GGD Haaglanden geselecteerd.

In de periode van begin februari tot eind mei 2014 zijn onder verschillende omstandigheden metingen uitgevoerd van het fijn stof gehalte buiten de school en in een lokaal aan de wegzijde.

Er zijn metingen uitgevoerd van verschillende fracties van fijn stof in de binnen- en buitenlucht:

- PM₁₀: een mengsel van in de lucht zwevende deeltjes met een diameter kleiner dan 10 micrometer, variërend in grootte, samenstelling en herkomst.
- PM_{2,5}: een mengsel van in de lucht zwevende deeltjes met een diameter kleiner dan 2,5 micrometer, variërend in grootte, samenstelling en herkomst.
- Roet ('black carbon'): zwarte koolstofdeeltjes die ontstaan bij verbrandingsprocessen en die vooral door het wegverkeer (met name dieselverkeer) worden uitgestoten.

Deze roetdeeltjes bevinden zich voor het overgrote deel in de < 0,4 micrometer fractie van het fijn stof. In nabijheid van drukke wegen worden vooral deze hele fijne roetdeeltjes geassocieerd met het optreden van schade aan de gezondheid. Metingen in binnen- en buitenlucht zijn nodig omdat de binnenlucht altijd wordt beïnvloed door de kwaliteit van de buitenlucht. Buitenlucht komt een gebouw niet alleen binnen via ventilatie maar ook via infiltratie. Ventilatie is het bewust toevoeren van buitenlucht, infiltratie is lucht die door kieren en naden in de gebouwschil binnendringt. Lucht die via infiltratie de school binnenkomt is niet te filteren. PM₁₀ is een verzamelnaam voor fijn stofdeeltjes in de lucht met een diameter van 10 micrometer en kleiner. PM₁₀ concentraties in de klas worden bepaald door 1) bronnen in de klas: eerder neergedwarfeld stof van de vloer dat door bewegingen van aanwezige leerlingen wordt opgewerveld, stof

afkomstig van kleding, huidschilfers, haar en 2) aanvoer vanuit de buitenlucht. Dit geldt in mindere mate ook voor PM_{2,5}, fijn stof deeltjes met een diameter kleiner dan 2,5 micrometer. Het fijn stof met een diameter tussen 2,5 en 10 micrometer wordt ook wel aangeduid als "PMcoarse", dit zijn de wat grotere deeltjes van wat nog steeds als fijn stof wordt beschouwd. Activiteit in schoolklassen leidt met name tot een toename in deze PMcoarse fractie. Voor roet geldt dat dit voor het grootste deel ultrafijne deeltjes zijn, die ontstaan door verbrandingsprocessen en met een diameter die kleiner is dan 0,4 micrometer. Er zijn geen bronnen van roet in de school, aanvoer vanuit de buitenlucht is de enige bron van roet in de klas.

Behalve metingen van PM₁₀, PM_{2,5} en roet zijn ook metingen uitgevoerd van CO₂ gehalte, temperatuur en relatieve luchtvochtigheid. Alle metingen zijn continu uitgevoerd, zodat onderscheid kon worden gemaakt tussen lesuren en uren dat het lokaal niet in gebruik was.

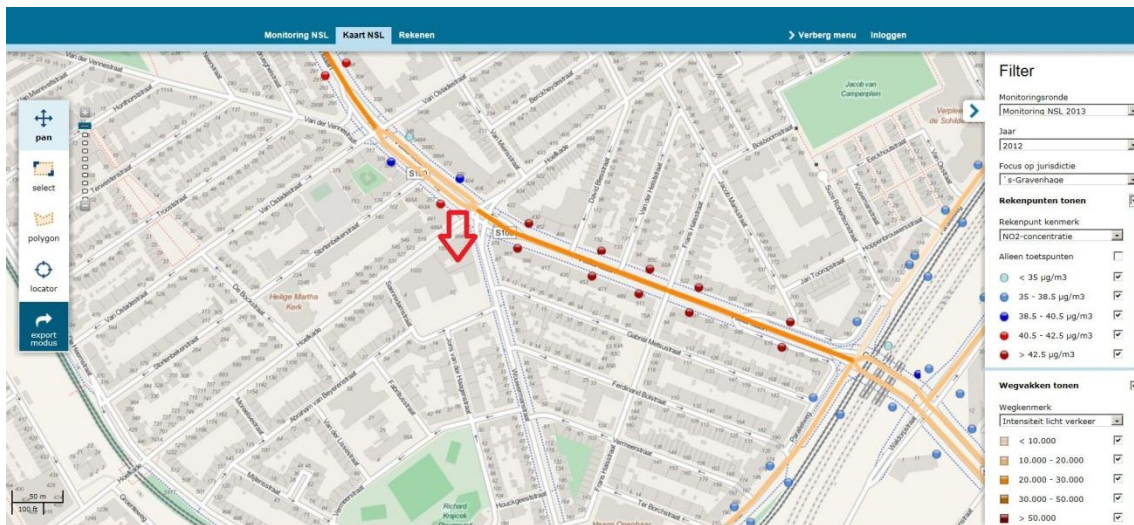
2 Methoden

2.1 Meetlocatie

De Prinses Marijkeschool is een basisschool met ongeveer 200 leerlingen, gelegen in de Haagse Schilderswijk aan de Abraham van Beyerenstraat in Den Haag. De school is gehuisvest in een nieuw gebouw, dat in januari 2010 is opgeleverd. De school heeft een begane grond en twee verdiepingen. De school ligt vlakbij de kruising van de Vaillantlaan en de Hoefkade. Figuur 1 toont de ligging van de school. De afstand tot het midden van het kruispunt bedraagt 20-70 meter. De totale intensiteit van het wegverkeer op de Vaillantlaan ter plaatse van de school, bedraagt 25.294 motorvoertuigen per etmaal (data afkomstig uit de Monitoringstool 2013). De verkeersintensiteit op de Hoefkade is onbekend, deze straat is niet in de Monitoringstool opgenomen. De jaargemiddelde stikstofdioxide (NO_2) concentratie op het dichtst bij de school gelegen toetspunt uit de Monitoringstool bedraagt 45,5 microgram/ m^3 . De toetspunten zijn in figuur 2 opgenomen.



Figuur 1. Overzicht van de Marijkeschool (M, rechts) en de onder dezelfde kap gehuisveste Koningin Beatrixschool (B, links) © OpenStreetMap



Figuur 2. Toetspunten uit de Monitoringstool

Het onderzoek is uitgevoerd in het lokaal van groep 7A, gelegen aan kruisingzijde, op de tweede en hoogste verdieping. Het lokaal heeft aan één kant vier ramen die zijn voorzien van dubbelglas en met een draaikiép systeem aan de binnenzijde geopend kunnen worden. Er zijn geen ventilatieroosters aanwezig. Het lokaal is voorzien van gladde vloerbedekking (zeil). Het volume van het lokaal bedraagt 158 m³. Groep 7A bestaat uit 19 leerlingen. Het exacte aantal leerlingen werd door beide leerkrachten bijgehouden in een dagboekje, evenals informatie over het eventuele openen van ramen en deuren en de tijdstippen waarop dit plaats vond.

De buitenluchtmetingen werden uitgevoerd op het dak van de school op een hoogte van ca. 8 meter.

2.2 Ventilatiesysteem

De school is al voorzien van een mechanisch ventilatiesysteem met warmteterugwinning en centrale toe- en afvoer. Het betreft de Liberty HR Plus van de fa. Rosenberg

http://rosenberg.nl/wp-content/uploads/2012/11/Rosenberg_LibertyHRplus.pdf

Hierbij wordt de buitenlucht centraal aangezogen in de controlekamer die zich op het dak van de school bevindt. De aangevoerde buitenlucht wordt over een voorfilter en een F7 zakkenfilter geleid. De aangevoerde lucht kruist de lucht die vanuit de school wordt afgevoerd, en wordt door middel van warmte-terugwisseling verwarmd. Vervolgens wordt de gefilterde, verwarmde aanvoerlucht via een systeem van ventilatiekanalen door de school geleid. In elk lokaal bevindt zich een toevoerrooster, via dit rooster wordt de lucht in het klaslokaal gebracht. Afzuiging vindt plaats door een naast het toevoerrooster gelegen afvoerrooster. Voorafgaand aan het onderzoek is het debiet van de toe- en afgevoerde lucht in het studielokaal indicatief gemeten met behulp van een FlowFinder mk2 (Acin Instruments). Het debiet van de toevoerlucht was beduidend meer dan het debiet van de afvoerlucht. Dit

betekent dat er overdruk is in het lokaal, waardoor luchtstromen ontstaan die van binnen naar buiten zijn gericht. Dit is tevens bevestigd door middel van een rookproef.

Er vindt regelmatig onderhoud en controle plaats van het bestaande ventilatiesysteem door een installatiebedrijf waarmee de school een onderhoudscontract heeft. Volgens informatie van de school en het installatiebedrijf was het systeem in de uitgangssituatie uitgerust met F5 filters. Deze zouden ten behoeve van het onderzoek na een voormeting van 4 weken worden vervangen door F9 filters. Na enige verwarring omtrent de juiste classificering van het oorspronkelijke filter is achteraf gebleken dat de oorspronkelijke filters eveneens van F9 kwaliteit moeten zijn geweest.

Ten behoeve van het onderzoek gaan we ervanuit dat het inderdaad F9 filters betrof. Deze filters hebben gedurende 4 weken (13 maart – 10 april) in het systeem gezeten. Met de opzet tot dusverre was het helaas niet mogelijk om de oorspronkelijke onderzoeksvraag (het vergelijken van de effectiviteit van F5 filters (of F7 filters) met F9 filters te beantwoorden. Op verzoek van de GGD Haaglanden en de school is daarom besloten om het onderzoek met 4 meetweken te verlengen. Voorafgaand aan deze verlenging zijn door de onderhoudsfirma F5 filters in het systeem geplaatst. Vervolgens is van 10 april tot 28 mei het onderzoek uitgevoerd met F5 filters in het systeem. Daarna zijn de F9 filters weer door de onderhoudsfirma teruggeplaatst. De opzet van het onderzoek is weergegeven in tabel 1.

Tabel 1. Overzicht ventilatie-omstandigheden tijdens de onderzoeksperiode.

Situatie	Periode
Voormeting met bestaand F9 filter in systeem	2 februari – 13 maart 2014*
Plaatsing nieuw F9 filter	13 maart 2014
Metingen met nieuw F9 filter in systeem	13 maart – 10 april 2014**
Plaatsing nieuw F5 filter	10 april 2014
Metingen met nieuw F5 filter in systeem	10 april – 28 mei 2014
Terugplaatsing nieuw F9 filter	2 juni 2014

* met uitzondering van voorjaarsvakantie (24-28 februari 2014)

** met uitzondering van meivakantie (28 april t/m 5 mei 2014)

Een luchtfilter van F5 klasse (sinds invoering van de NEN-EN 779 in 2012 M5 klasse genoemd) houdt gemiddeld 40-60% van het fijn stof < 0,4 micrometer tegen. De effectiviteit van deze en andere filters is vastgelegd in de NEN-EN 779 volgens de specificaties zoals genoemd in tabel 2.

Tabel 2. NEN-EN 779 tabel 1

Table 1— Classification of air filters ¹⁾

Group	Class	Final test pressure drop Pa	Average arrestance (A_m) of synthetic dust %	Average efficiency (E_m) of 0,4 μ m particles %	Minimum Efficiency ^a of 0,4 μ m particles %
Coarse	G1	250	$50 \leq A_m < 65$	-	-
	G2	250	$65 \leq A_m < 80$	-	-
	G3	250	$80 \leq A_m < 90$	-	-
	G4	250	$90 \leq A_m$	-	-
Medium	M5	450	-	$40 \leq E_m < 60$	-
	M6	450	-	$60 \leq E_m < 80$	-
Fine	F7	450	-	$80 \leq E_m < 90$	35
	F8	450	-	$90 \leq E_m < 95$	55
	F9	450	-	$95 \leq E_m$	70
^a Minimum efficiency is the lowest efficiency among the initial efficiency, discharged efficiency and the lowest efficiency throughout the loading procedure of the test.					

2.3 Luchtmetingen

De PM₁₀ en PM_{2.5} concentratie is gemeten met behulp van TEOM's (Tapered Element Oscillating Microbalance). Voordeel van het gebruik van TEOM's is dat hiermee met een korte tijdsresolutie betrouwbare meetgegevens worden verkregen. TEOM's geven evenwel een systematische onderschatting van het fijn stof gehalte, omdat bij een temperatuur van 50 °C wordt gemeten waardoor vluchtige componenten in het fijn stof kunnen verdampen. Om hiervoor te corrigeren is in het verleden voor PM₁₀ een correctiefactor van 1,3 toegepast, afgeleid van vergelijkingsmetingen met de referentiemethode op basis van filterweging. In dit onderzoek is geen correctiefactor toegepast omdat er niet aan wettelijke grenswaarden getoetst kan worden, en omdat er voor PM_{2,5} geen correctiefactor bekend is. De TEOM's meten continu in de tijd, datacommunicatie gebeurt met een datalogger (SAM) via een internetverbinding waardoor de meetgegevens op afstand zijn uit te lezen. Voor dit onderzoek zijn de concentraties als halfuurgemiddelden opgeslagen.

Roetdeeltjes zijn gemeten met een draagbare Aethalometer (micro Aeth, model AE51, Aethlabs). De Aethalometer meet de lichtabsorptie van de opgevangen aerosoldeeltjes bij een golflengte van 880 nanometer. De Aethalometer is ingesteld op een tijdsresolutie van 5 minuten. Naarmate de Aethalometer langer aerosoldeeltjes (roetdeeltjes) verzamelt neemt de zwarting van het filter toe en verandert de absorptie van het filter. Dit is een maat voor het Black Carbon (=roet) gehalte. De meetwaarden worden per 5 minuten geregistreerd en opgeslagen in het interne geheugen. Om te

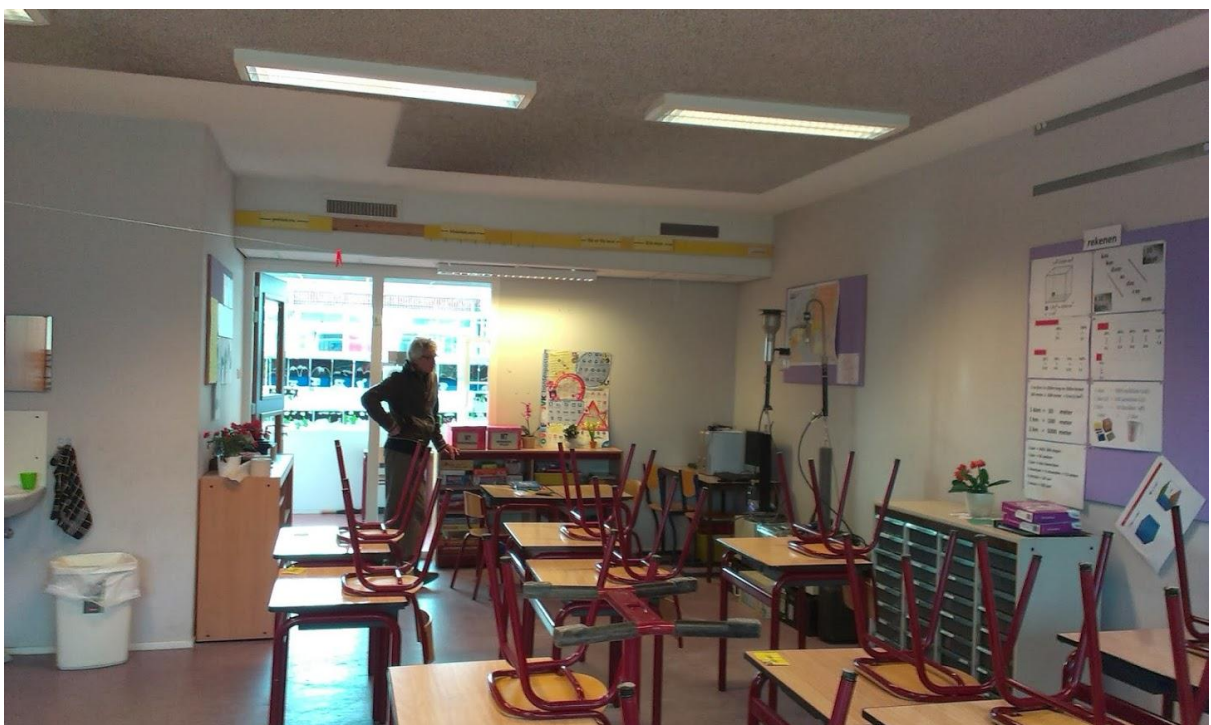
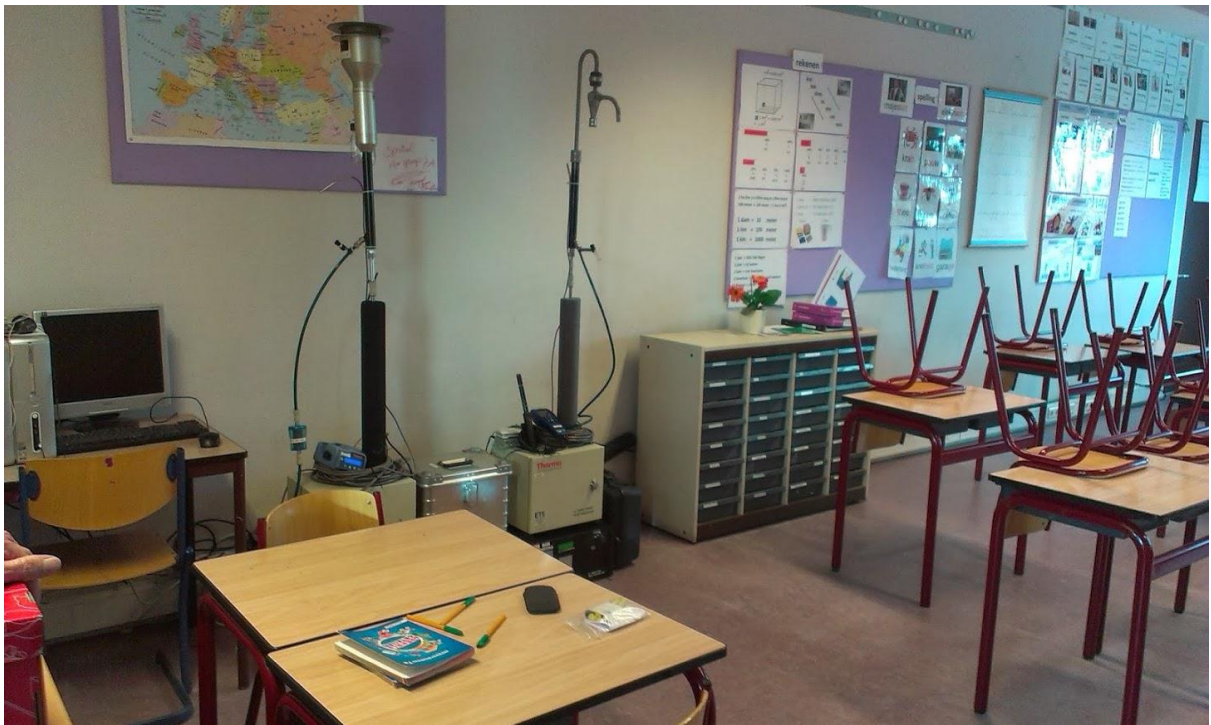
voorkomen dat het filter verzadigd raakt is het iedere schooldag vervangen. Dit gebeurde elke dag tijdens de lunchpauze. De exacte begin- en eindtijd van elke meting is geregistreerd. In totaal werden vier Aetholometers gebruikt, twee voor de metingen binnen en twee voor de metingen buiten, waarbij steeds dezelfde combinatie van Aethalometers voor binnen en buiten werd gebruikt. Elke tweede vrijdag werden parallelmetingen uitgevoerd van alle vier Aethalometers, waarbij ze werden vergeleken met elkaar.

CO₂ concentratie, temperatuur en relatieve luchtvochtigheid zijn gemeten met een Q-Trak op een tijdsinterval van 10 minuten.

De aanzuigkoppen van de TEOM's in de klas zijn geplaatst op een aanzuighoogte van ongeveer 1,5 meter, de pompen werden – om geluidsoverlast te voorkomen – geplaatst in het aangrenzende rommelhokje. De Aethalometers, Q-Trak en Palmes buisjes (in duplo) werden eveneens achterin het lokaal geplaatst. De metingen buiten zijn uitgevoerd op het dak. Figuur 3 en 4 tonen achtereenvolgens de meetopstellingen in het lokaal en op het dak.

Dagboekje

Door de beide leerkrachten is gedurende het gehele onderzoek in een dagboekje bijgehouden of en zo ja op welke tijden het raam open is geweest. Ook zijn de tijdvakken waarin de deur naar het lokaal langer dan 5 minuten open was geregistreerd. In het dagboekje zijn tevens afwijkingen van het normale lesrooster geregistreerd (bijvoorbeeld een extra vrije dag of een schoolreisje). Tenslotte is per dag het aantal leerlingen genoteerd – dit kon afwijken van het normale aantal van 19 leerlingen -, het gebruik van zonwering, ervaren geluidhinder van het ventilatiesysteem en tocht.



Figuur 3. Overzicht van de meetopstelling in lokaal 7A. Op de onderste foto zijn de toevoer- en afvoerroosters zichtbaar (in de koof boven de deur naar de gang).



Figuur 4. Meetopstelling op het dak van de Prinses Marijkeschool. Links van de meetopstelling het ketelhuis waarin het rooster zichtbaar is waardoor de buitenlucht wordt aangezogen (NB het andere rooster voert lucht aan voor de naastgelegen school die zich onder dezelfde kap bevindt.)

2.4 Data-analyse

Om de PM en roetconcentraties te kunnen vergelijken zijn de roetconcentraties, gemeten met een 5-minuutsinterval, omgerekend naar halfuurgemiddelden. Op basis van de vergelijkingsmetingen die zijn uitgevoerd tussen de vier Aethalometers konden geen systematische afwijkingen worden aangetoond, daarom zijn geen correcties toegepast, temeer de metingen steeds met dezelfde combinatie van apparaat binnen – apparaat buiten zijn uitgevoerd.

De Aethalometers zijn dagelijks gewisseld tussen de middag. In verband met de tijd die nodig was voor het wisselen zelf en voor het opnieuw stabiel instellen van de meetapparatuur zijn de roetconcentraties die tussen de middag zijn gemeten niet meegenomen.

De PM₁₀ en PM_{2,5} concentraties zijn niet gecorrigeerd voor onderschatting van het aandeel vluchtige componenten in het fijn stof.

Er is onderscheid gemaakt tussen lesuren en 'niet-lesuren' in eerste aanzet op basis van het lesrooster en daarbij op het door de docent ingevulde dagboekje. Ook uren waarop slechts een klein aantal leerlingen (tenminste 1) aanwezig was zijn als lesuur aangemerkt.

Ook is er onderscheid gemaakt tussen momenten dat raam en/of deur open was en momenten dat zowel raam als de deur gesloten was. Dit is als extra ja/nee variabele per half uur aan het bestand toegevoegd op basis van de informatie uit het dagboekje.

Vanuit oogpunt van blootstelling zijn alleen de lesuren relevant. De concentraties die zijn gemeten in afwezigheid van docent en leerlingen geven wel aanvullende nuttige informatie over de luchtkwaliteit in de klas in afwezigheid van 'lokale' bronnen: mensen en menselijk handelen zijn immers een bron van zowel CO₂ als ook PM₁₀ en in mindere mate PM_{2,5}. Ook geeft het nuttige informatie over het functioneren van het ventilatiesysteem 'sec'.

De analyses zijn uitgevoerd in SAS versie 9.2.

3 Resultaten en interpretatie

3.1 Fijnstof en roet

In tabel 3 zijn de meetresultaten samengevat voor PM₁₀, PM_{2,5} en roet gemeten tijdens de lesuren. Weergegeven zijn de binnen en buiten gemeten concentraties bij verschillende ventilatie-omstandigheden. De concentraties in de buitenlucht worden uiteraard niet beïnvloed door de ventilatie-omstandigheden in de klas, maar zijn van invloed op de binnenluchtconcentraties.

Omdat er geen verschil is tussen de meetresultaten met het oorspronkelijke F₉ filter en het nieuw geplaatste F₉ filter (zie hiervoor bijlage 1) zijn de meetresultaten hiervan samen genomen.

Overigens kunnen de PM₁₀ en PM_{2,5} concentraties in de buitenlucht **niet** worden getoetst aan de wettelijke grenswaarden, omdat er niet gedurende een heel kalenderjaar is gemeten. Er is ook niet gecorrigeerd voor onderschatting van het aandeel vluchtige componenten in het fijn stof. Voor roet is er geen wettelijke (of gezondheidskundige) grenswaarde in de buitenlucht. Voor zowel PM₁₀, PM_{2,5} als roet zijn er geen grenswaarden voor de concentratie in de binnenlucht.

Tabel 3. Gemiddelde PM₁₀, PM_{2,5} en roetconcentratie in µg/m³ tijdens de meetperiode met F₅ en F₉, aantal half-uur meetwaarden (N).

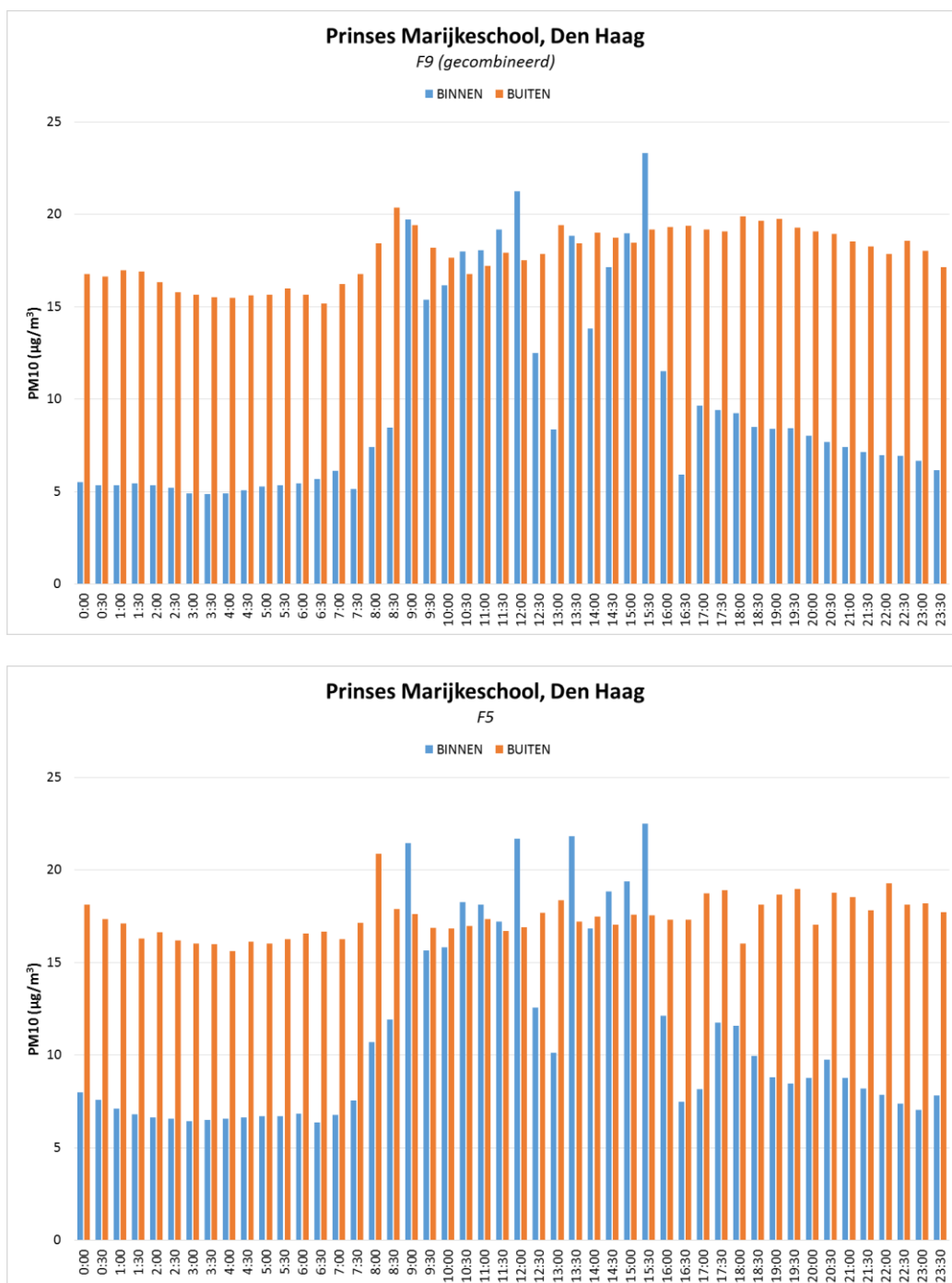
	N (PM)	N (roet)	Binnen			Buiten		
			PM10	PM2,5	roet	PM10	PM2,5	roet
Alle uren								
F5	2192	843	11,0	9,3	0,81	17,6	11,2	0,94
F9	3130	1279	9,8	7,7	0,49	17,8	11,2	1,08
Tijdens lesuren								
F5	324	162	25,1	15,0	0,93	18,9	11,8	0,85
F9	396	162	27,6	13,9	0,46	19,4	11,9	1,09

Tabel 3 toont dat:

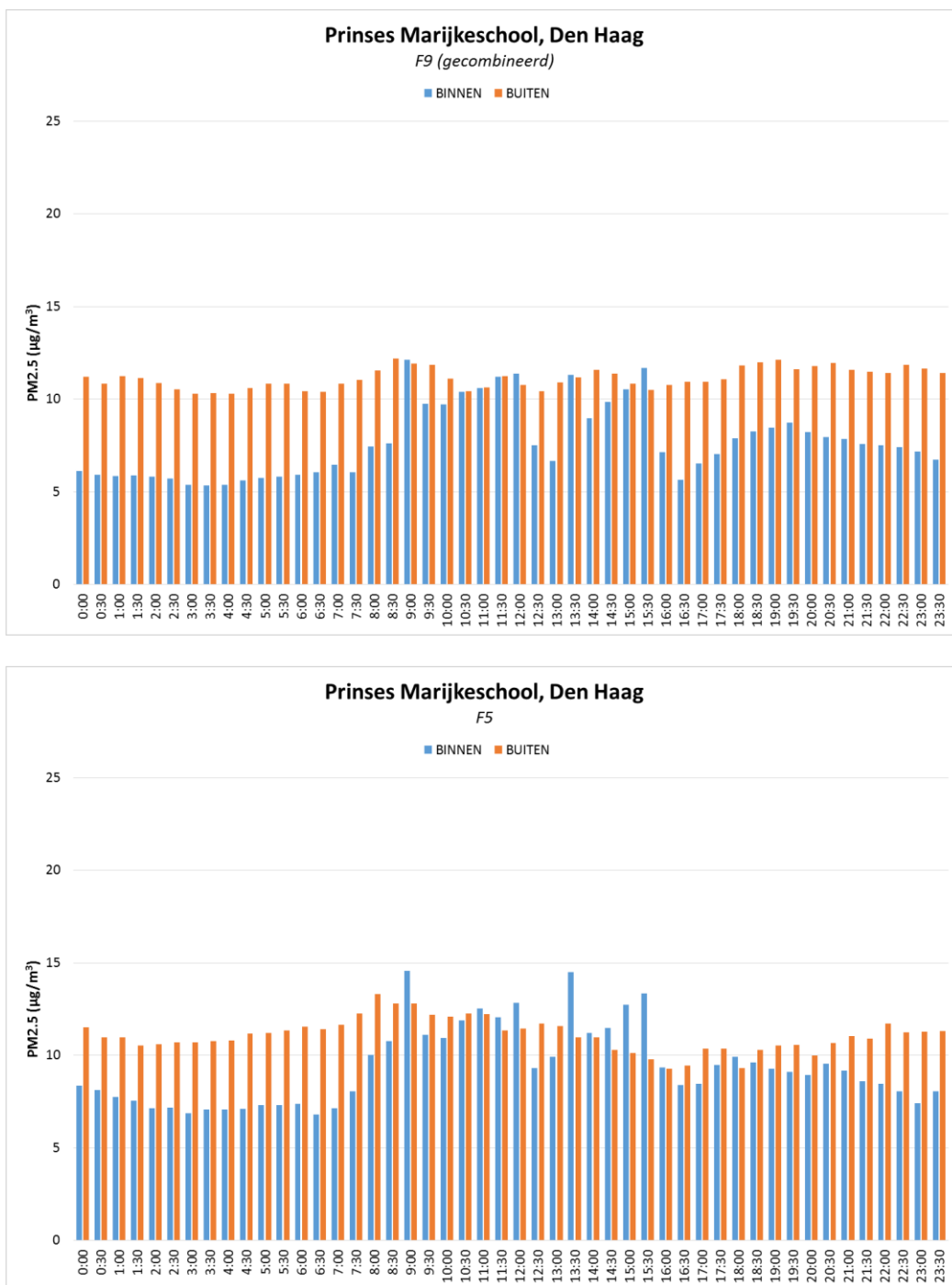
- De PM₁₀ en PM_{2,5} concentraties tijdens lesuren veel hoger zijn dan gemiddeld in de hele periode. Dit komt door de aanwezigheid van de kinderen (opwerveling van stof).
- Voor de roetconcentratie geldt dit niet, er zijn immers geen roetbronnen in de klas aanwezig.

NB: Tijdens lesuren met F₅ filters in gebruik, toont binnen (0,93) ogenschijnlijk een hogere roetconcentratie dan buiten (0,85), dit verschil is echter niet significant en wordt door de meetfout veroorzaakt.

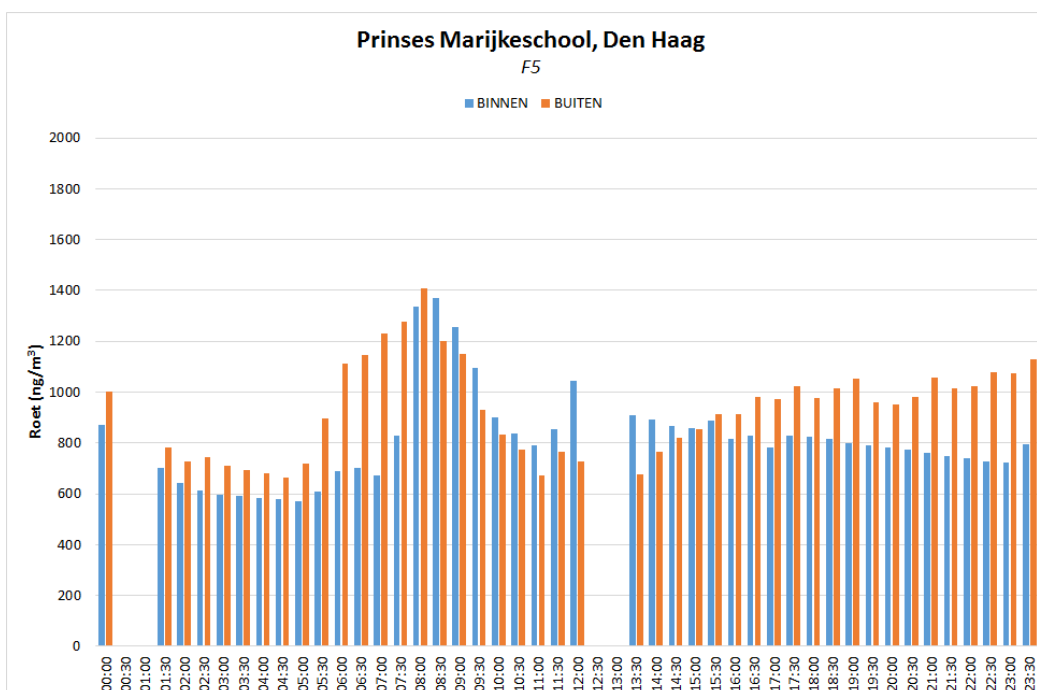
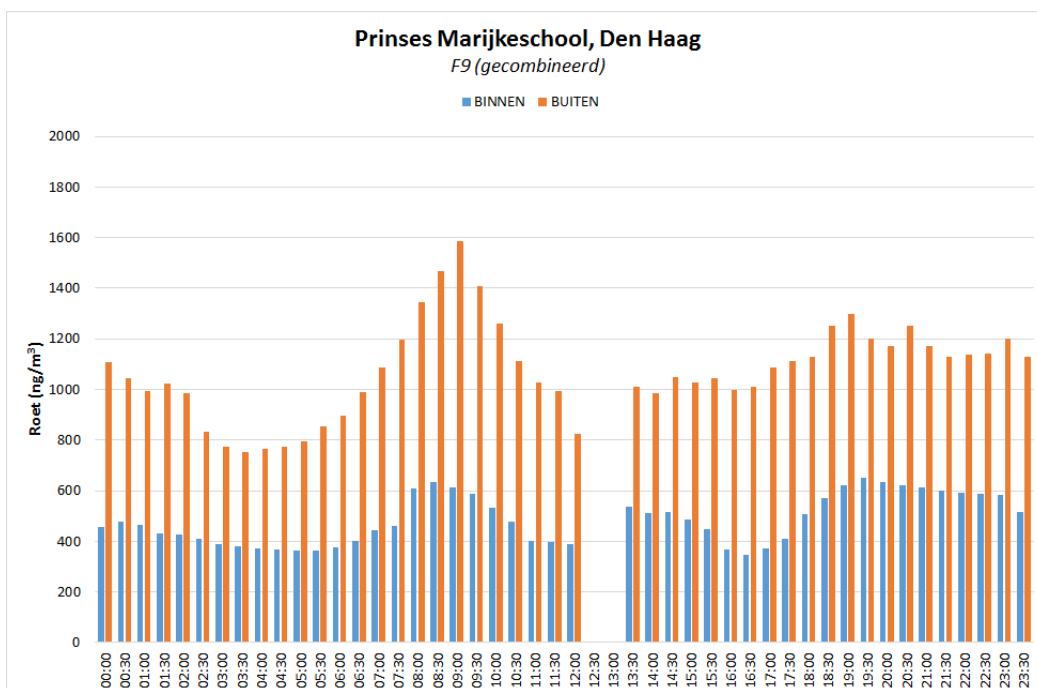
In figuur 5 a tot en met c is achtereenvolgens het verloop van de PM₁₀ concentratie, de PM_{2,5} concentratie en de roetconcentratie in de buitenlucht en in het klaslokaal over de dag weergegeven. Uiteraard is het type filter van geen enkele invloed op de buitenluchtconcentratie, maar de buitenluchtconcentratie is wel van invloed op de binnenluchtconcentratie, daarom is ook de buitenluchtconcentratie uitgesplitst naar filtertype.



Figuur 5a. Dagpatroon in binnen en buiten gemeten PM10 concentratie (µg/m³) tijdens meetperiode met F9 filter (boven) en F5 filter (onder)



Figuur 5b. Dagpatroon in binnen en buiten gemeten PM_{2,5} concentratie (µg/m³) tijdens meetperiode met F₉ filter (boven) en F₅ filter (onder)



Figuur 5c. Dagpatroon in binnen en buiten gemeten roetconcentratie (ng/m³) tijdens meetperiode met F9 filter (boven) en F5 filter (onder)

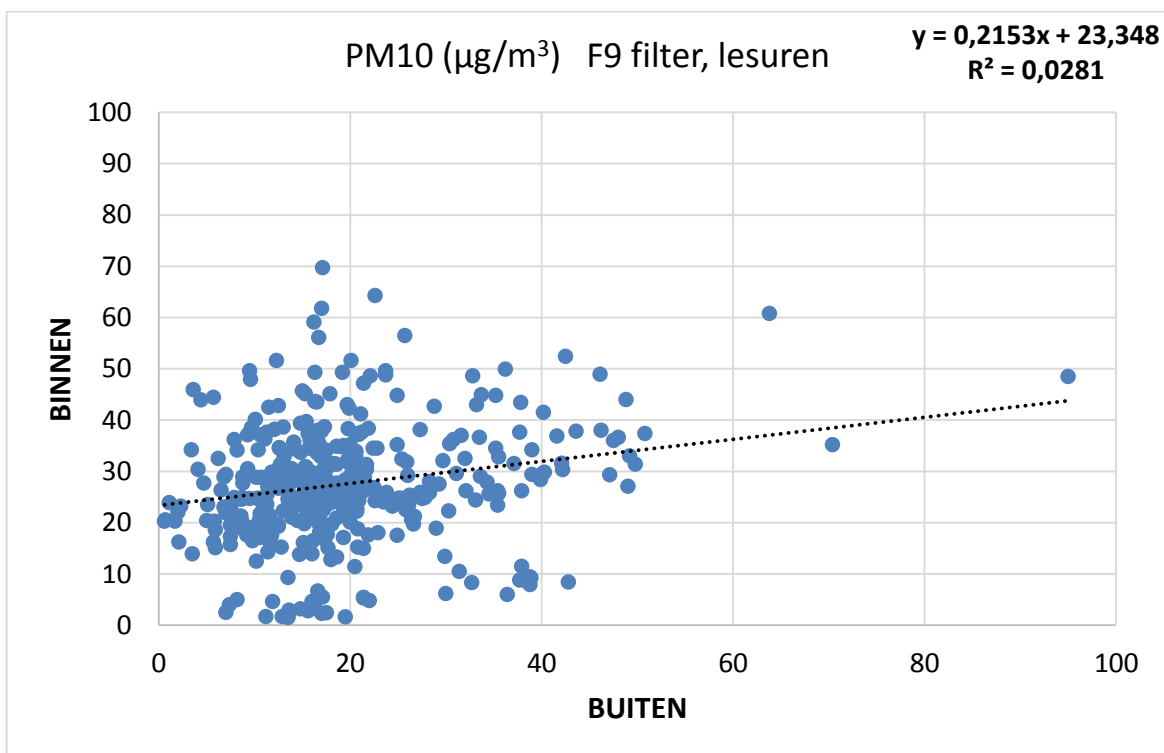
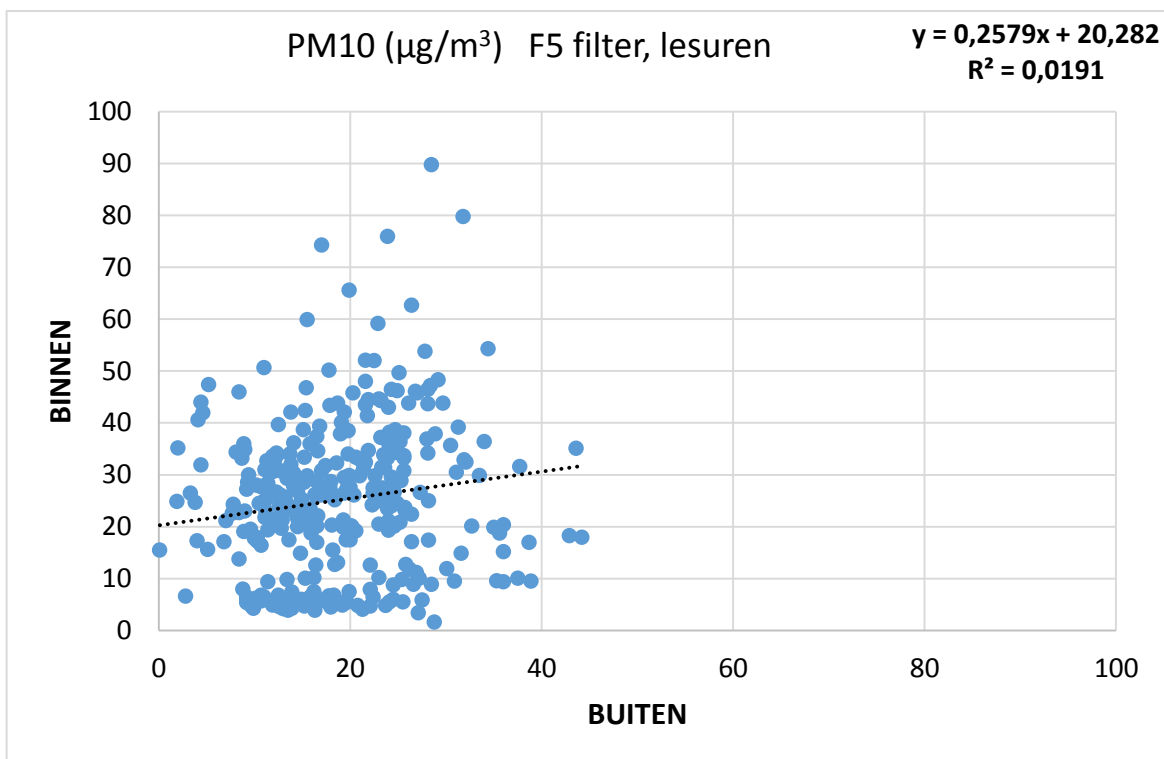
De invloed van de ochtendspits en in mindere mate de avondspits is vooral op de concentraties roet duidelijk te zien. Dat geldt voor de roetconcentraties in de buitenlucht en voor de roetconcentratie in het klaslokaal voorzien van F5 en F9 filter. Met F9 filter in het systeem liggen de roetconcentraties echter op een veel lager niveau.

Om te illustreren op welke manier de concentraties in de buitenlucht samenhangen met de concentraties in de binnenlucht is in figuur 6, 7 en 8 achtereenvolgens voor PM₁₀, PM_{2,5} en roet de concentratie buiten afgezet tegen de concentratie binnen met gebruik van het F5 en het F9 filter afzonderlijk. In de verdere beschouwingen zijn de meetgegevens van het oorspronkelijke F9 filter samengevoegd met de meetgegevens van het nieuw geplaatste F9 filter, voor roet zijn de meetresultaten voor iedere periode afzonderlijk weergegeven in bijlage 1, deze tonen geen significante verschillen. De concentratie in de klas is afhankelijk van de concentratie in de buitenlucht volgens:

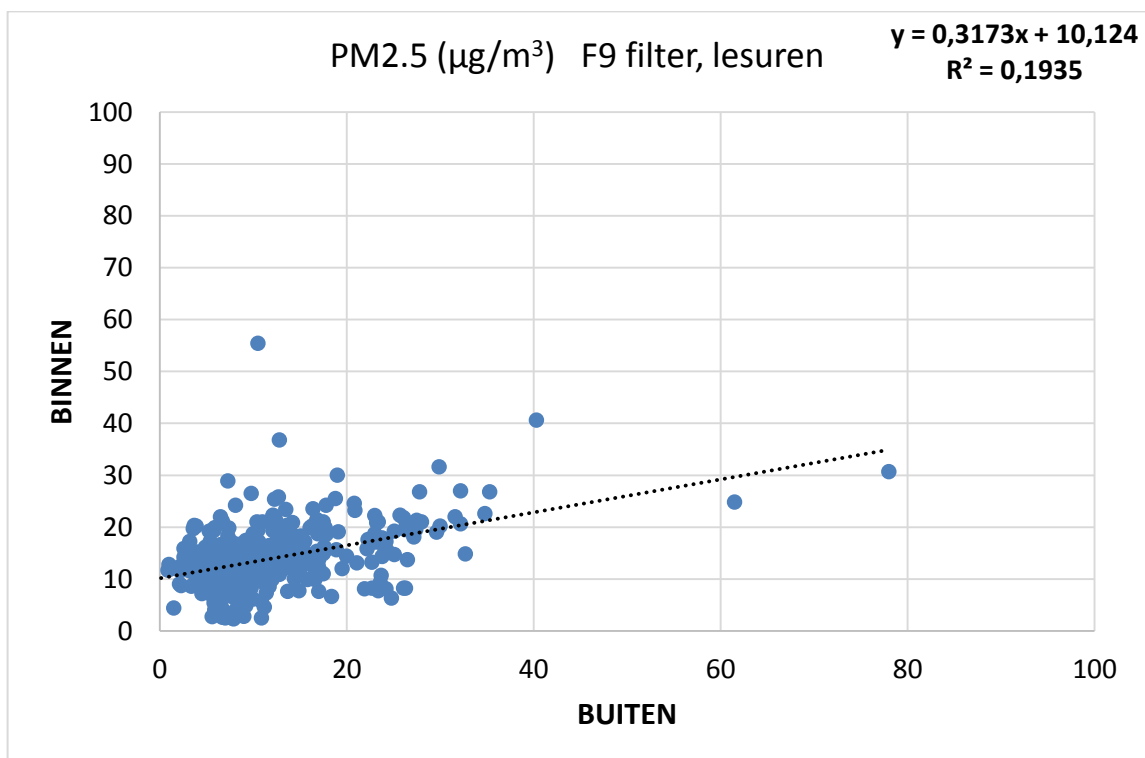
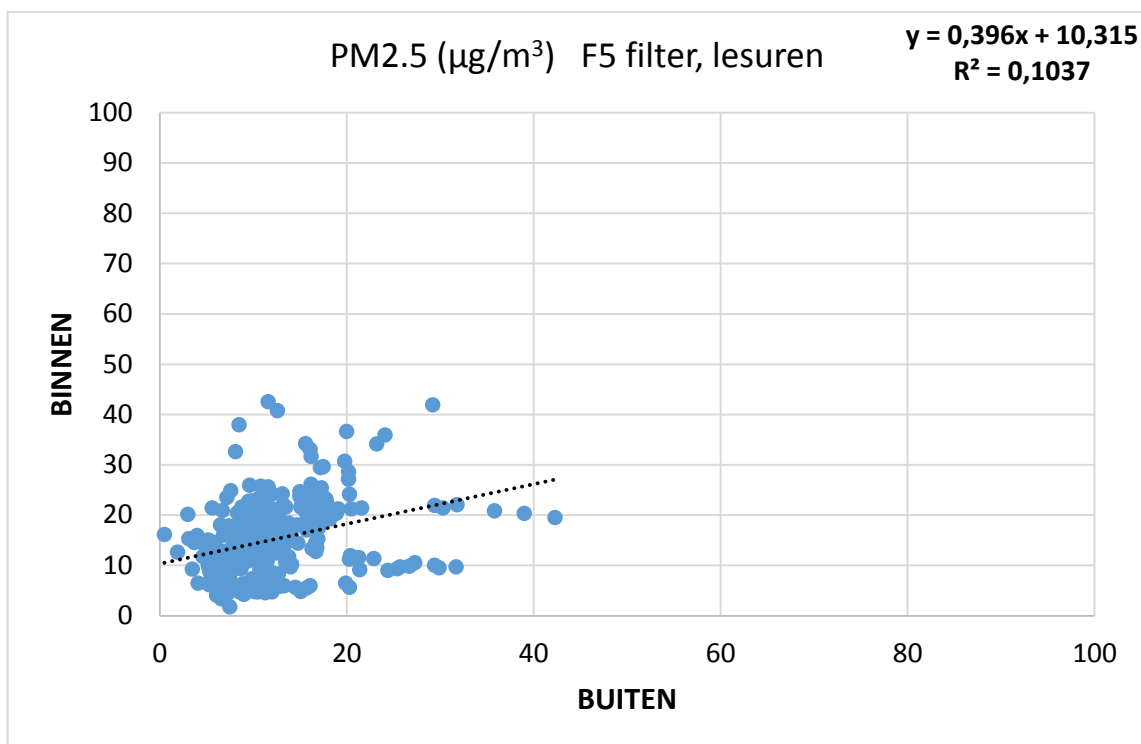
$$\text{concentratie binnen} = b_0 + b_1 * \text{concentratie buiten}$$

In deze vergelijking kan de richtingscoëfficiënt (b_1) worden geïnterpreteerd als een fractie die aangeeft welk deel van de buitenconcentratie terug te vinden is in de klas. De as-afsnede (b_0) is een maat voor de concentratie afkomstig van andere bronnen, vooral bij PM₁₀ wordt door menselijke activiteit in de school een relatief hoge as-afsnede vastgesteld.

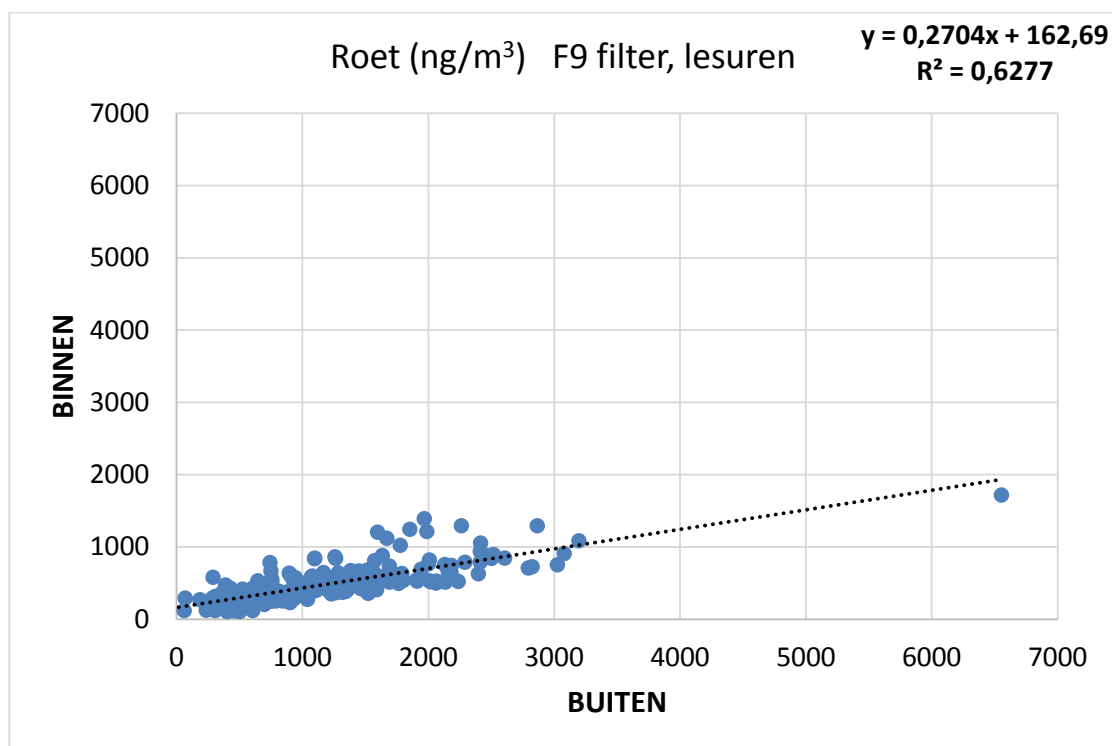
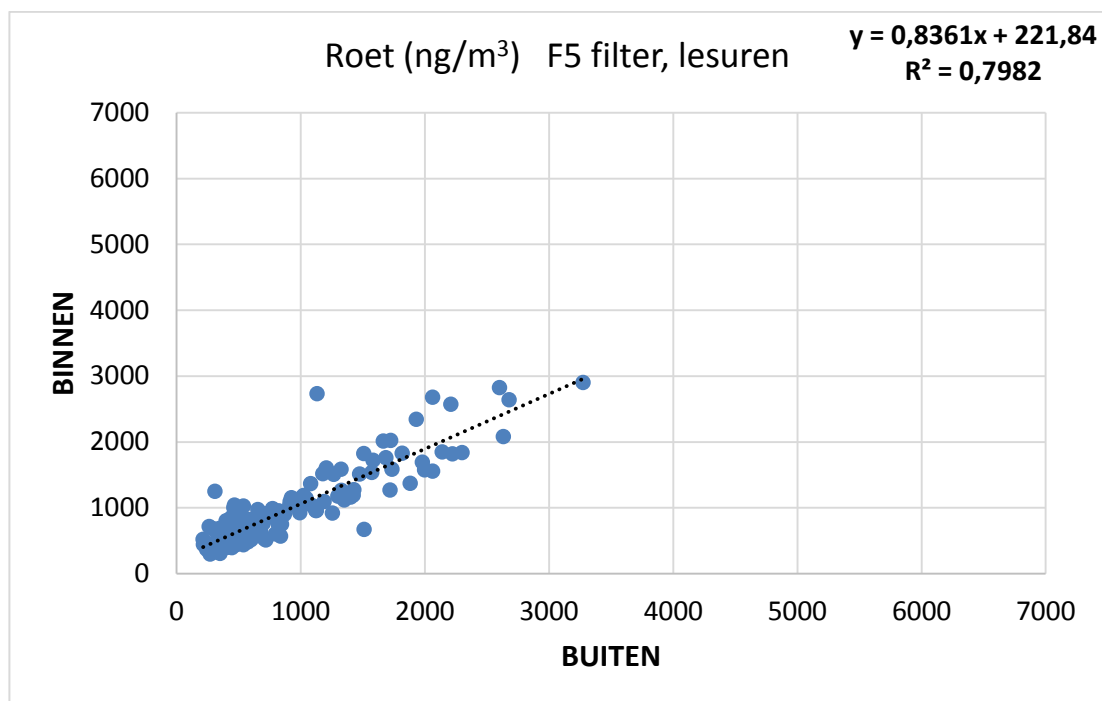
De relatie tussen de buiten en binnen gemeten concentratie is afzonderlijk bepaald voor lesuren en voor de periode buiten de lessen om. Vanuit oogpunt van gezondheid is eigenlijk alleen het eerste van belang, immers wanneer er niemand in de klas aanwezig is vindt er ook geen blootstelling plaats.



Figuur 6: PM10 tijdens lesuren F5 filters(boven) en F9 filters(onder)



Figuur 7. PM_{2,5} tijdens lesuren F5 filters(boven) en F9 filters(onder)



Figuur 8. Roet tijdens lesuren F5 filters(boven) en F9 filters(onder)

In tabel 4 wordt de richtingscoëfficiënt weergegeven van alle componenten tijdens alle ventilatie-omstandigheden.

Tabel 4. Fractie van de concentratie buiten die doordringt naar binnen tijdens de verschillende ventilatie-omstandigheden, tussen haakjes geplaatst is de standaarderror.

	PM ₁₀	PM _{2,5}	roet
Tijdens lesuren			
F ₅	0,26 (0,10)	0,40 (0,06)	0,84 (0,03)
F ₉	0,22 (0,06)	0,32 (0,03)	0,27 (0,01)
Alle uren			
F ₅	0,28 (0,02)	0,36 (0,02)	0,66 (0,02)
F ₉	0,27 (0,02)	0,34 (0,01)	0,31 (0,01)

De resultaten in tabel 4 moeten als volgt worden geïnterpreteerd: met F₅ filter in het systeem (tijdens lesuren) gaat een toename in de roetconcentratie van 1 µg/m³ in de buitenlucht gepaard met een toename van 0,84 µg/m³ in de klas. In dezelfde situatie leidt een toename van 1 µg/m³ in de PM₁₀ concentratie tot een toename van 0,26 µg/m³ in de klas. Het verschil tussen F₅ en F₉ filters kan voor wat betreft reductie van PM₁₀ en PM_{2,5} niet significant worden aangetoond, alleen de reductie van roet verbetert aantoonbaar met het toepassen van F₉ filters.

Hoe lager de richtingscoëfficiënt, hoe groter de efficiency van het systeem om die component buiten de klas te houden. Tabel 4 laat zien dat toepassing van een F₉ filter in het systeem ertoe leidt dat (tijdens lesuren) van elke µg/m³ roet in de buitenlucht, 0,27 µg/m³ in de binnenlucht terecht komt tegen 0,84 µg/m³ in de situatie met F₅ filter. Toch is er ook met F₉ filter nog steeds een significante invloed van de uitstoot van het wegverkeer op de luchtkwaliteit van het klaslokaal.

Invloed van natuurlijke ventilatie

Hoewel de luchttoevoer en -afvoer in de school plaats vindt via het centrale ventilatiesysteem op het dak kunnen de ramen van de lokalen open. Lokaal 7A beschikt over 4 ramen aan de straatzijde, met een afmeting van 90 x 120 cm. Deze kunnen worden geopend via een draai-kiep systeem waardoor aan de bovenzijde van het raam een opening van ca 10 cm ontstaat die naar beneden toe afneemt.

Een deel van de metingen tijdens lesuren is uitgevoerd met geopend raam/ramen en/of de deur naar de gang. In het dagboekje is bijgehouden in welke tijdvakken ramen en deur open stonden. In de periode

met F9 filter en F5 filter waren deze percentages, tijdens de lesuren, respectievelijk 8% en 31%. De metingen met het F5 filter zijn in het voorjaar uitgevoerd, daarom is het raam in die periode vaker geopend.

De leerkrachten waren bewust niet geïnstrueerd om ramen en deuren gesloten te houden, omdat het van belang is om de werkelijke situatie in beeld te brengen. Mede vanwege de warmte in de klas is er bij de leerkrachten – ondanks geluidhinder van het wegverkeer – behoefte aan natuurlijke ventilatie.

Alleen in de meetperiode met F5 filter in het systeem was het aantal halfuur gemiddelde meetwaarden groot genoeg om een aparte analyse uit te voeren voor de situatie met ramen gesloten versus ramen open. Voor roet was de richtingscoëfficiënt met ramen dicht 0,84 en met ramen open 0,86. Het effect van het openen van de ramen is dus beperkt, dit blijkt ook uit het kooldioxidegehalte, zie bijlage 2. Waarschijnlijk is dit een gevolg van de overdruksituatie in de klas.

3.2 CO₂ en klimaat

Toetswaarden

Het Bouwbesluit vormt de wettelijke basis voor de ventilatienormen waaraan scholen moeten voldoen. De ventilatienormen in het Bouwbesluit beogen de CO₂ concentratie te beperken tot de grens van 1200 ppm (als 98 percentiel). Deze grenswaarde is gebaseerd op een advies van de Gezondheidsraad. De optimale temperatuur voor hersenactiviteit is 20- 22°C. Een aangename temperatuur in scholen ligt tussen de 18-22°C. Bij temperaturen vanaf 25°C neemt de behaaglijkheid af en wordt het prestatievermogen minder. De relatieve luchtvochtigheid geeft aan in welke mate de lucht verzadigd is met vocht. De relatieve luchtvochtigheid dient tussen ca. 30-70% te zijn. Tabel 5 toont de resultaten van de CO₂ en klimaatmetingen tijdens de lesuren en in de periode dat het leslokaal niet in gebruik was.

Tabel 5. CO₂ concentratie (in parts per million, ppm), temperatuur (in °C) en relatieve luchtvochtigheid (%) tijdens en buiten lesuren. Metingen zijn uitgevoerd in een interval van 10 minuten.

	TIJDENS LESUREN (N=2117)	BUITEN LESUREN (N=15175)
CO₂ concentratie (ppm)		
Gemiddelde	821	445
Range (min-max)	381 – 1460	352 – 1435
% van de tijd > 1200 ppm	0,7	0,1
norm is ≤ 2%		
Temperatuur (°C)		
Gemiddelde	24,0	23,1
Range (min-max)	21,6 – 26,0	20,0 – 25,9
% van de tijd > 22 °C	99	85
% van de tijd > 25 °C	14	0,7
Rel. luchtvochtigheid (%)		
Gemiddelde	31	31
Range (min-max)	16 - 45	16 – 46
% tijd < 30%	41	40
% tijd > 70%	0	0

Tabel 5 laat zien dat ruimschoots wordt voldaan aan de norm voor CO₂. De CO₂ concentratie in de klas is tijdens lesuren gemiddeld 821 ppm, waarmee ruimschoots wordt voldaan aan de ventilatie-normen uit het Bouwbesluit. De mate van luchtverversing die met het ventilatiesysteem bereikt wordt is dus ruim voldoende.

De temperatuur in het klaslokaal is met een gemiddelde van 24 °C tijdens de lesuren echter hoog te noemen. Gedurende 99% van de tijd is de temperatuur hoger dan 22 °C, de bovengrens van wat als aangename temperatuur wordt ervaren. Gedurende 14% van de tijd was de temperatuur zelfs hoger dan 25 °C. Bij temperaturen vanaf 25°C neemt de behaaglijkheid af en wordt het prestatievermogen

minder. Opvallend is ook dat het klaslokaal buiten lestijden nauwelijks afkoelt. De gemiddelde temperatuur buiten de lesuren (waaronder ook de nachten, weekends en zelfs een aantal vakantieweken) is de temperatuur 23,1°C.

De relatieve luchtvochtigheid is met een gemiddelde van 31% aan de lage kant. Tijdens lesuren is de relatieve luchtvochtigheid 41% van de tijd onder de 30%, dat wil zeggen dat de lucht in het lokaal een groot deel van de tijd te droog is.

Het type filter (F5 of F9) in het ventilatiesysteem is niet van invloed op het CO₂ gehalte en het klimaat in de klas. Tabel 6 toont het gemiddelde en de range in CO₂ concentratie, temperatuur en relatieve luchtvochtigheid tijdens de meetweken met bestaand F9 filter, nieuw F9 filter en F5 filter.

Tabel 6. Buitentemperatuur en RH, binnenlucht CO₂ concentratie (in parts per million, ppm), temperatuur (in °C) en relatieve luchtvochtigheid (%) tijdens en buiten lesuren. Binnenlucht metingen zijn uitgevoerd met een interval van 10 minuten.

	F9 bestaand filter (2/2/14 – 13/3/14)	F9 nieuw filter (13/3/14 – 10/4/14)	F5 filter (10/4/14 – 28/5/14)
Buitenlucht			
Gemiddelde (range) T ¹	6,9 (-0,9-18,5)	10,1 (1,2 -21,0)	12,4 (0,8-24,9)
Gemiddelde (range) RH ¹	81,4 (43-100)	78,0 (33-100)	78,5 (37-100)
Binnenlucht			
CO ₂ (ppm)	801 (403 – 1001)	841 (381 – 1460)	803 (418 – 1167)
Temperatuur (°C)	23,2 (21,6 – 24,7)	24,2 (21,9 – 26,0)	24,5 (23,0 – 25,8)
Rel.Luchtvochtigheid (%)	32 (26 – 45)	31 (20 – 44)	28 (16 – 38)

1) Bron: KNMI op uurgemiddelde basis, station 210 "Vliegveld Valkenburg".

Kooldioxide

De verschillen die er zijn, zijn gering. Voor wat betreft de klimaatmetingen zijn de geringe verschillen waarschijnlijk toe te schrijven aan de oplopende buitenluchttemperatuur; het onderzoek startte in de winter en eindigde in de lente.

Luchtdebiet

Indicatieve meting van het aangezogen en afgevoerde volume in het klaslokaal toont ongeacht het toegepaste filter (F5 of F9 filter) geen noemenswaardig verschil. In beide situaties wordt meer ingaande lucht gemeten, dit leidt ertoe dat de aanwezige luchtstromen van binnen naar buiten het lokaal gericht zijn.

Binnentemperatuur en relatieve luchtvochtigheid

De verschillende meetperioden tonen onderling geen grote verschillen.

4 Conclusie

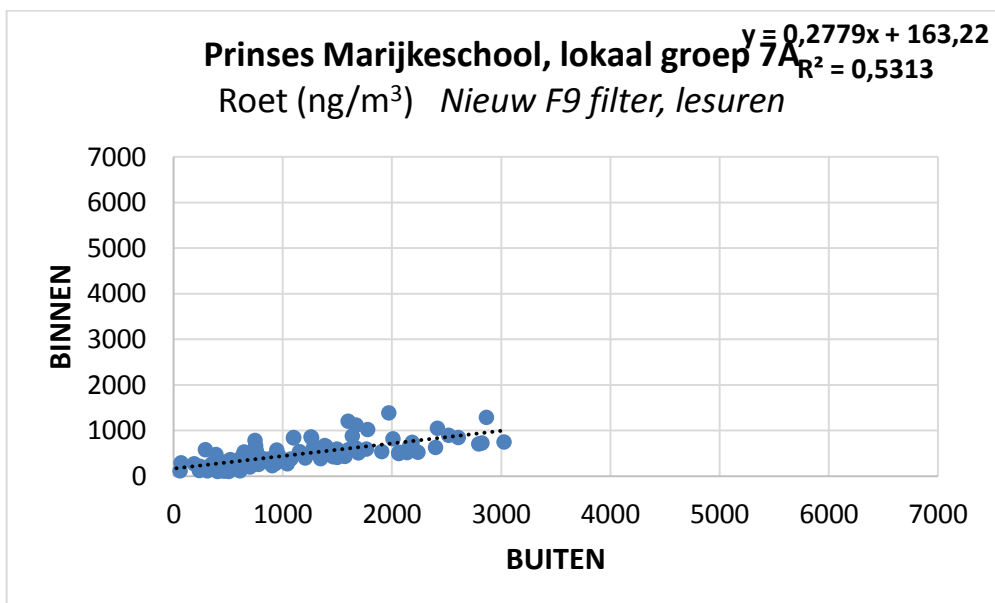
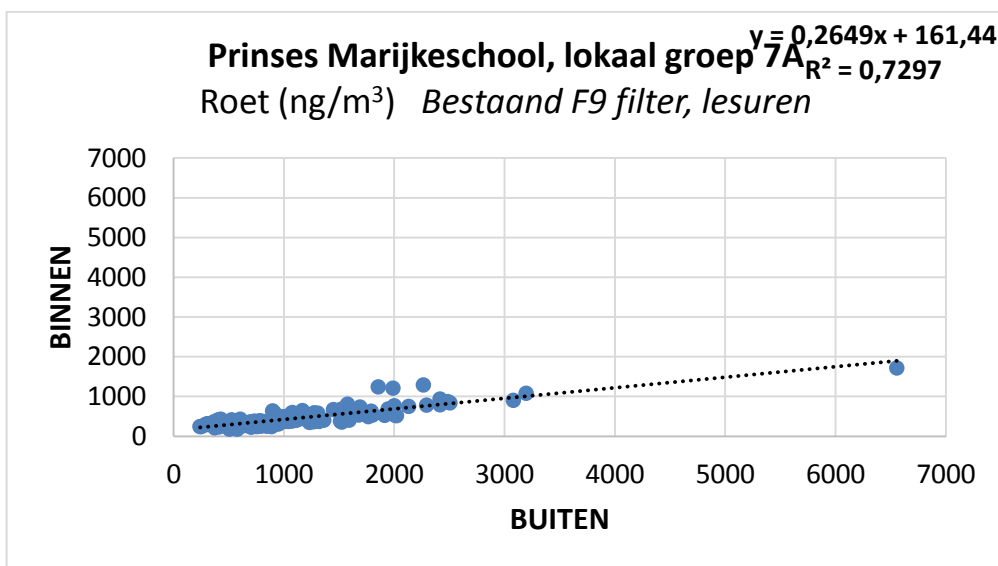
Van elke microgram/m³ toename in de buitenluchtconcentratie PM₁₀, PM_{2,5} en roet is in een situatie met F5 filter tijdens lesuren respectievelijk 0,26, 0,40 en 0,84 microgram/m³ terug te vinden in de klas. Met F9 filter in het systeem is dat respectievelijk 0,22, 0,32 en 0,27 microgram/m³. De onzekerheid (standaarderror) in bovenstaande waarnemingen bepaalt dat voor wat betreft de reductie PM₁₀ en PM_{2,5} geen significant verschil met toepassing van F5 of F9 filters meetbaar is. Alleen voor roet wordt met een F9 filter aantoonbaar verbetering bereikt.

De CO₂ concentratie in de klas is tijdens lesuren gemiddeld 821 ppm, waarmee ruimschoots wordt voldaan aan de ventilatie-normen uit het Bouwbesluit. De mate van luchtverversing die met het ventilatiesysteem bereikt wordt is dus ruim voldoende. De temperatuur in het klaslokaal is met een gemiddelde van 24 °C tijdens de lesuren echter hoog te noemen, de relatieve vochtigheid is gemiddeld aan de lage kant, en tijdens lesuren is de lucht vaak te droog. Het type filter (F5 of F9) in het ventilatiesysteem is niet van invloed op het CO₂ gehalte en het klimaat in de klas.

Tenslotte merken wij op dat de goede werking van een filterinstallatie en garantie over de toegepaste filtermaterialen aandacht en controle vereist.

Bijlage 1

Roetconcentratie relatie binnen/buiten met bestaande F9 filter en nieuw geplaatst F9 filter



Bijlage 2

Resultaten van CO₂ en klimaatparameters uitgesplitst naar type filter

CO₂ concentratie (in parts per million, ppm), temperatuur (in °C) en relatieve luchtvochtigheid (%)

	Hele periode	Bestaand F9 filter	Nieuw F9 filter	F5 filter
TIJDENS LESUREN				
Aantal meetwaarden	2117	605	996	516
CO ₂ concentratie (gemiddelde, range)	821 (381-1460)	801 (403-1001)	841 (381-1460)	803 (418-1167)
98-percentiel CO ₂		955	1167	1119
norm is 1200 ppm				
% van de tijd > 1200 ppm		0	1,4	0
norm is ≤ 2%				
Temperatuur (gemiddelde, range)	24,0 (21,6-26,0)	23,2 (21,6-24,7)	24,2 (21,9-26,0)	24,5 (23,0-25,8)
Rel.luchtvochtigheid (%)	31 (16-45)	32 (26-45)	31 (20-44)	28 (16-38)
BUITEN LESUREN				
Aantal meetwaarden	15175	4901	6991	3283
CO ₂ concentratie (gemiddelde, range)	445 (352-1435)	427 (376-909)	450 (352-1435)	460 (395-1151)
98-percentiel CO ₂		711	893	856
% van de tijd > 1200 ppm		0	0,3	0
Temperatuur (gemiddelde, range)	23,1 (20,0-25,9)	22,3 (20,4-24,9)	23,4 (20,0-25,9)	23,6 (20,4-25,6)
Rel. luchtvochtigheid (%)	31 (16-46)	33 (23-43)	31 (18-46)	27 (16-39)

Bijlage 2 vervolg, CO₂ en klimaatparameters met dicht of geopend raam en/of deur

	Hele periode	Deur en raam dicht	Deur of raam open
TIJDENS LESUREN			
Aantal meetwaarden	2117	1471	646
CO ₂ concentratie (gemiddelde, range)	821 (381-1460)	816 (381-1460)	831 (408-1113)
CO ₂ % van de tijd > 1200 ppm	0,7	1,0	0
norm is ≤ 2%			
Temperatuur (gemiddelde, range)	24,0 (21,6-26,0)		
% van de tijd > 22 C	99	99	100
% van de tijd > 25 C	14	17	8
Relatieve luchtvochtigheid (%)	31 (16-45)		
% tijd RH < 30%	41	40	30
BUITEN LESUREN			
Aantal meetwaarden	15175	14882	293
CO ₂ concentratie (gemiddelde, range)	445 (352-1435)	440 (352-1435)	662 (402-997)
% van de tijd > 1200 ppm	0,1	0,1	0
Temperatuur (gemiddelde, range)	23,1 (20,0-25,9)		
% van de tijd > 22 C	85	85	98
% van de tijd > 25 C	0,7	0,6	3
Rel. luchtvochtigheid (%)	31 (16-46)		
% tijd RH < 30%	40	40	39

Bijlage 2 vervolg, roetconcentratie met dicht of geopend raam en/of deur

