

Leeghwaterstraat 44
2628 CA Delft
Postbus 6012
2600 JA Delft

www.tno.nl

TNO-rapport

TNO 2020 R11252

Laboratoriumonderzoek naar effect van verschillende opstellingen, ventilatiesystemen en ventilatiehoeveelheden op de blootstelling van aerosolen in een horecagelegenheid

Datum	17 augustus 2020
Auteur(s)	
Aantal pagina's	29
Aantal bijlagen	--
Opdrachtgever	Ministerie van Economische Zaken en Klimaat T.a.v. Rick Roelofs
Projectnaam	Onderzoek naar het effect van ventilatie op blootstelling aan aerosolen
Projectnummer	060.45679

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.

© 2020 TNO

Samenvatting

In aanvulling op TNO-rapport 2020 R10993 "Indicatief onderzoek naar effectiviteit van schermen in de horeca" d.d. 19 juni 2020 is TNO gevraagd een laboratoriumonderzoek uit te voeren naar het effect van het toepassen van verschillende opstellingen met schermen in combinatie met verschillende ventilatiesystemen en ventilatiehoeveelheden op de blootstelling aan kleine deeltjes (aerosolen) bij een binnenopstelling.

De hoofdvraag binnen het onderzoek is als volgt:

Wat is het effect van verschillende opstellingen met schermen en het ventilatiesysteem (lijnroosters / wervelroosters) op de blootstelling bij verschillende ventilatiehoeveelheden en wat is de relatie hiervan met een opstelling conform het 1,5 meter protocol?

Aanpak

In een laboratoriumomgeving is een restaurant nagebouwd met afmetingen van 7 x 9 meter met daarin een "open" keuken met afzuiging, Figuur 1. Deze opstelling is met Koninklijke Horeca Nederland afgestemd. Hierbij wordt opgemerkt dat door de grote variëteit aan horecagelegenheden niet kan worden gesteld dat dit representatief is voor alle horecagelegenheden in Nederland. Op één plaats in het restaurant produceert een aerosolgenerator deeltjes met afmetingen van 0,2 µm tot ca. 5,0 µm. Op andere plaatsen in het restaurant wordt op 4 representatieve punten gemeten wat de blootstelling aan die deeltjes is.



Figuur 1. Overzichtsfoto van een opstelling, met schermen, in het nagebouwde restaurant.

Om een realistische situatie na te bootsen (simuleren), is het restaurant volledig ingericht met tafels, stoelen, schermen en nagebootste warmteafgifte van personen. Op de vier meetpunten in de ruimte is de deeltjesconcentratie met deeltjestellers gemeten voor, tijdens en na het produceren van deeltjes.

Gemeten is de concentratie van deeltjes groter dan of gelijk aan $0,5 \mu\text{m}$. De metingen zijn uitgevoerd bij vier verschillende opstellingen, één zonder schermen en drie met “kleine” schermen (opstellingen A, B en C) zoals ook toegepast in het onderzoek beschreven in TNO-rapport 2020 R10993. Deze schermen zijn 180 cm hoog, 185 cm breed en tot 50 cm vanaf de vloer open. Verder is gemeten met twee verschillende toevoersystemen (lijnroosters in de gevel en wervelroosters) voor het ventilatiesysteem bij drie verschillende ventilatiehoeveelheden.*

Een vergelijking is gemaakt tussen gemeten blootstellingen aan aerosolen afhankelijk van de ventilatiehoeveelheid, het ventilatiesysteem (roostertype) en de opstelling met of zonder schermen. De roostertypen zijn zo gekozen dat ze de gangbare horecapraktijk weerspiegelen. Hierbij wordt de opstelling conform het 1,5 meter protocol met een wettelijke minimale ventilatiehoeveelheid van $3,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ per m^2 vloeroppervlakte (Besluit eisen inrichtingen Drank- en Horecawet d.d. 11 oktober 2000) als geaccepteerde referentie aangehouden.

* Lage, midden en hoge ventilatiehoeveelheid: resp. $4,9 \cdot 10^{-3}$; $9,3 \cdot 10^{-3}$ en $13,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ per m^2 vloeroppervlakte.

Resultaten en conclusies

Voor de vier opstellingen in het nagebouwde restaurant waarmee de metingen hebben plaatsgevonden, worden de volgende conclusies getrokken voor deeltjes met afmetingen groter dan of gelijk aan 0,5 µm en kleiner dan 5 µm:

De ventilatiehoeveelheid is de meest bepalende factor voor de totale blootstelling aan de deeltjes en voor de afnamesnelheid van de deeltjesconcentratie na het einde van de deeltjesproductie. Hoe hoger de ventilatie, hoe lager de totale blootstelling en hoe hoger de afnamesnelheid.

Bij de onderzochte opstellingen met schermen resulteren de midden en hoge ventilatiehoeveelheden in een lagere totale blootstelling dan de opstelling met het 1,5 meter protocol bij lage ventilatiehoeveelheid; de totale blootstelling is gemiddeld 44% en 63% lager voor respectievelijk de midden en hoge ventilatiehoeveelheid. Bovendien neemt bij hogere ventilatiehoeveelheid de concentratie sneller af.

Bij de lage ventilatiehoeveelheid is de totale blootstelling voor de drie opstellingen met schermen lager dan voor de opstelling conform het 1,5 meter protocol. Dit verschil is voor opstelling A echter niet significant.

Het roostertype (lijnroosters of wervelroosters) heeft geen significante invloed.

Op basis van het onderzoek lijkt het mogelijk te zijn, voor de blootstelling aan deeltjes groter dan of gelijk aan 0,5 µm en kleiner dan 5 µm, om met het toepassen van schermen een kleinere afstand tussen tafels met personen uit verschillende huishoudens aan te houden dan het volgens het 1,5 meter protocol is toegestaan.

Aanbevelingen

Er zou verantwoord voor kunnen worden gekozen om een afstand van minder dan 1,5 meter tussen personen uit verschillende huishoudens toe te staan als er schermen worden ingezet. Aanbevolen wordt om dan de voorwaarde te stellen dat wordt geventileerd met ten minste $9,3 \cdot 10^{-3}$ m³/s per m² vloeroppervlakte waar zich gasten bevinden.

De maten van de onderzochte schermen zijn: bovenzijde 180 cm, onderzijde 50 cm boven de vloer en breedte 185 cm. Verondersteld mag worden dat het gebruik van kleinere schermen geen negatief effect heeft op de blootstelling aan de onderzochte deeltjes. Aanbevolen wordt daarom om schermen toe te passen met deze of kleinere afmetingen, zolang de schermen groot genoeg zijn om het directe 'aanhoesten' met grotere deeltjes (deeltjes groter dan of gelijk aan 5 µm) te voorkomen.

Inhoudsopgave

	Samenvatting	2
1	Inleiding	6
2	Onderzoeksmethode	7
2.1	Uitvoering indicatieve metingen.....	7
3	Onderzochte opstellingen en ventilatie.....	12
3.1	Mock-up	12
3.2	Ventilatie	15
4	Resultaten indicatieve metingen.....	16
4.1	Variaties bij identieke meetomstandigheden	18
4.2	Analyse van de resultaten	19
5	Conclusies.....	24
6	Aanbevelingen	25
7	Beperkingen en discussie	26
8	Literatuur	28
9	Ondertekening	29

1 Inleiding

De minister van Justitie en Veiligheid heeft in aanvulling op TNO-rapport 2020 R10993 "Indicatief onderzoek naar effectiviteit van schermen in de horeca" d.d. 19 juni 2020 aan TNO gevraagd een aanvullend laboratoriumonderzoek uit te voeren naar het effect van het toepassen van schermen in combinatie met verschillende ventilatiesystemen en ventilatiehoeveelheden op de blootstelling aan kleine deeltjes (aerosolen) bij een binnenopstelling.

De hoofdvraag binnen het onderzoek is als volgt:

Wat is het effect van verschillende opstellingen met schermen en het ventilatiesysteem (lijnroosters / werverroosters) op de blootstelling bij verschillende ventilatiehoeveelheden en wat is de relatie hiervan met een opstelling conform het 1,5 meter protocol?

Er is besloten om een representatief en met Koninklijke Horeca Nederland afgestemde horecagelegenheid (restaurant) als mock-up na te bouwen. De afmetingen van de mock-up zijn 7 x 9 meter; de een hoogte is 3,5 meter. Binnen deze contouren is een "open" keuken van 3 x 4 meter gecreëerd. Hierbij wordt opgemerkt dat door de grote variëteit aan horecagelegenheden niet kan worden gesteld dat deze mock-up representatief, een gemiddelde, is voor de horecagelegenheden in Nederland.

De resultaten hebben alleen betrekking op de onderzochte situaties met de specifieke ventilatie-eigenschappen, schermtypen en opstellingen van tafels, stoelen en schermen. Het laboratoriumonderzoek heeft in de periode van 3 augustus t/m 7 augustus plaatsgevonden met drie verschillende opstellingen van schermen, twee verschillende ventilatiesystemen en drie verschillende ventilatiehoeveelheden.

Hoofdstuk 2 licht de onderzoeksmethode toe. Hoofdstuk 3 gaat in op de opstelling waarin indicatieve metingen zijn uitgevoerd; hoofdstuk 4 geeft daarvan de resultaten. Hoofdstuk 5 geeft de conclusies en hoofdstuk 6 de aanbevelingen. In hoofdstuk 7 zijn de belangrijkste beperkingen en discussie over de keuzes van het onderzoek weergegeven. Literatuurverwijzingen zijn opgenomen in hoofdstuk 8.

2 Onderzoeksmethode

2.1 Uitvoering indicatieve metingen

De metingen zijn uitgevoerd in een nagebouwd restaurant (mock-up) met opstellingen conform het 1,5 meter protocol alsmede drie verschillende opstellingen met schermen tussen de tafels en stoelen, zie paragraaf 3.1.

Om een realistische situatie te simuleren waarin ook de effecten zijn meegenomen van de schermen op het stromingspatroon van de lucht in de mock-up, was het van belang om de mock-up volledig in te richten met tafels, stoelen en gesimuleerde warmteafgifte van personen.

De mock-up is tijdens de metingen geventileerd door twee verschillende toevoersystemen (roostertypen) bij drie ventilatiehoeveelheden, zie paragraaf 3.2. De toegevoerde lucht is afkomstig van buiten de mock-up en bevat geen in de mock-up geproduceerde aerosolen.

Metingen

Uitgangspunt bij het onderzoek is de vergelijking van blootstellingen aan aerosolen in relatie tot de ventilatiehoeveelheid, het ventilatiesysteem (roostertype) en de opstelling met of zonder schermen. De opstelling zonder schermen is opgebouwd volgens het 1,5 meter protocol. Op basis van het protocol voor de horeca geldt voor deze afstand van 1,5 meter de afstand van "neus tot neus".

Om de verspreiding van aerosolen onder verschillende omstandigheden vast te stellen, zijn op een gedefinieerde plaats aerosolen geëmitteerd/verspreid op een representatieve ademhoogte van de gasten, ca. 127 cm vanaf de vloer. Dit is 10 cm hoger dan de 117 cm aangehouden in TNO-rapport 2020 R10993 "Indicatief onderzoek naar effectiviteit van schermen in de horeca" d.d. 19 juni 2020 en bevindt zich in de ademzone van gasten. Het verschil in hoogte is ontstaan door de hoogte van de stoelen in combinatie met de hoogte van de warmtebronnen.

De emissie van aerosolen heeft continu plaatsgevonden met een richting en snelheid die representatief zijn voor spreken: horizontaal met een uittredesnelheid van ca. 2 m/s in de richting van de tafel en met een constante volumestroom van 11,2 l/min.^{1,2} Dit is gelijk aan de emissie in het onderzoek zoals beschreven in TNO-rapport 2020 R10993 "Indicatief onderzoek naar effectiviteit van schermen in de horeca". De luchtstroom werd verwarmd tot $33 \pm 2^\circ\text{C}$ om daarmee de temperatuur van de uitgedemde lucht te benaderen.² De gekozen luchthoeveelheid en -snelheid komen overeen met de gemiddelde luchtstroom die optreedt tijdens een intensief gesprek. Dit is een vereenvoudiging van de werkelijke situatie, waarbij deze stroom intermitterend is.

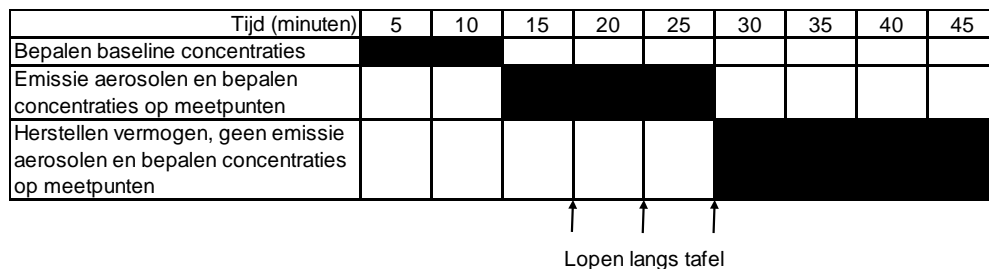
De deeltjesgrootte die vrijkomt bij spreken kan volgens recent onderzoek worden onderverdeeld in deeltjescategorieën tussen 1-10 μm en tussen 100-1000 μm .³ Ander onderzoek geeft ook twee categorieën deeltjesgroottes aan: 0,25 tot 1,0 μm voor spreken en normale ademhaling en groter dan 2,5 μm voor deeltjes waarin erfelijk materiaal (RNA) van SARS-CoV-2 is aangetroffen.⁴⁻⁶ In een recente studie is ook infectieus SARS-CoV-2 virus aangetroffen in aerosolen met een omvang $> 4 \mu\text{m}$, 1-4 μm en $< 1 \mu\text{m}$.⁷

De aerosolgenerator produceert aerosolen met een afmeting van 0,2 µm tot ca. 5 µm. De met de generator gegenereerde deeltjesgrootte komt grotendeels overeen met de categorieën van de deeltjes die vrijkomen bij spreken en normale ademhaling. Deeltjes ≥ 5 µm konden in deze testopstelling niet worden gegenereerd, zodat hiervoor de gemeten concentraties nauwelijks boven de achtergrondconcentratie uitkomen (baseline) en daardoor een onbetrouwbaar beeld geven. Daarbij vallen deze deeltjes buiten de hier aangehouden definitie van aerosol, want er is van uitgegaan dat deeltjes ≥ 5 µm niet volledig airborne zijn.⁸ De hoeveelheid geëmitteerde aerosolen overstijgt de werkelijke hoeveelheid uitgeademde deeltjes. Hiervoor is gekozen om een betrouwbare deeltjestelling (meting) te kunnen verrichten en ruim boven de baseline concentratie (achtergrondconcentratie) uit te komen.

Het luchtstromingspatroon in de ruimte wordt in de praktijk niet alleen door de ventilatie beïnvloed, maar ook door het bewegen van personen en de thermiek door temperatuurverschillen in de ruimte, onder andere veroorzaakt door de warmteproductie van gasten. Om deze warmteproductie te simuleren, wordt gebruik gemaakt van warmtebronnen van 80 Watt.⁹ Hiervoor worden kartonnen dozen gebruikt die dit vermogen aan warmte produceren met afmetingen die overeenkomen met een gemiddeld persoon.⁹ Er zijn 21 (bij de opstelling conform het 1,5 meter protocol) of 22 (bij opstelling A, B en C) van deze warmtebronnen ingezet bij:

- het emissiepunt;
- de tafelgasten het dichtst bij de emissiebron;
- op de 4 meetlocaties;
- verder verspreid over de hele ruimte van de mock-up.

De deeltjesconcentratie is met deeltjestellers gelijktijdig gemeten op de vastgestelde (4) plaatsen bij alle ventilatie-instellingen en opstellingen zonder en met de schermen (zie paragraaf 3.1 voor de opstellingen). Op deze wijze kan niet alleen de verspreiding van de geëmitteerde aerosolen worden vastgesteld, maar ook het effect van ventilatie en de opstelling daarop. De blootstelling aan de aerosolen in de situatie met het 1,5 meter protocol (zonder schermen) en een gangbare wettelijk toegestane ventilatiehoeveelheid is als referentie gehanteerd. De blootstelling met schermen is daarmee vergeleken. Zo kon worden afgeleid of de situaties met hogere ventilatiehoeveelheid en met schermen waarbij de afstand tussen personen (van neus tot neus) minder is dan 1,5 meter, tot een gelijkwaardige of lagere blootstelling (tijd maal concentratie) hebben geleid dan onder het 1,5 meter protocol met lage ventilatie.



Figuur 2. Meetcyclus

Baselinefase

Tijdens de baseline metingen wordt de stabiele concentratie deeltjes bepaald zonder dat er emissie of andere activiteiten plaatsvinden.

Emissiefase

Na het afronden van de baseline metingen (10 minuten) wordt de emissie geactiveerd. Deze emissie blijft tijdens de gehele emissieperiode actief (15 minuten). Tijdens deze fase gaat de meettechnicus om de 5 minuten de mock-up binnen en loopt in een rustig tempo een gedefinieerde route door de mock-up. Aan het einde van de emissie periode wordt de emissie gestopt en start de herstelfase.

Herstelfase

Tijdens de herstelfase (20 minuten) wordt het herstellend vermogen van het systeem in combinatie met de betreffende opstelling bepaald. Gedurende deze periode zal de concentratie met een bepaalde snelheid afnemen door de luchtverversing via het ventilatiesysteem.

Per situatie is deze meetcyclus achtereenvolgens 3 maal uitgevoerd om de 'toevallige variatie' te bepalen en door middeling de betrouwbaarheid van de meetuitkomsten te vergroten. Als uitkomstmaat zijn de volgende variabelen aangehouden waarmee de belangrijkste effecten worden gerepresenteerd:

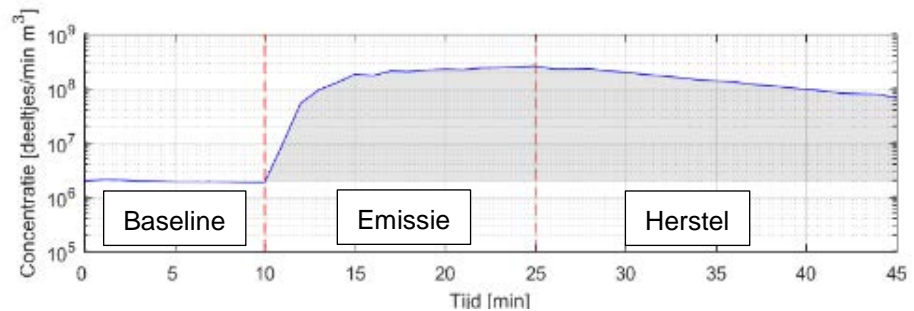
- totale blootstelling;
- blootstelling start emissie;
- toename van de concentratie;
- 100-voudige hersteltijd.

Blootstelling

Dit is het potentieel om in contact komen met een concentratie aan deeltjes van een gedefinieerde afmeting gedurende een bepaalde tijd.

Totale blootstelling

Dit betreft de verhoging van de concentratie t.o.v. de baseline concentratie maal de tijdsduur (het grijze oppervlak onder de curve van de concentratie, uitgezet tegen de tijd, Figuur 3) over de gehele periode van emissie (15 min) en daaropvolgende afname tijdens de herstelfase (20 min, zie Figuur 2). Dit is een maat voor de totale blootstelling tijdens deze periode van 35 minuten, waarin alle effecten zoals de snelheid van toenemen van de concentratie, de verhoging van de concentratie alsmede het afnemen van de concentratie na het stoppen van de emissie (herstelfase), tot uiting komen. Dit is voor de vergelijking van de blootstelling onder de verschillende omstandigheden de belangrijkste maat.



Figuur 3. Grafische weergave van het verloop van de blootstelling, $\geq 0,5 \mu\text{m}$ deeltjes.

Blootstelling start emissie

Dit betreft de verhoging van de concentratie t.o.v. de baseline over de eerste 4 scans maal de tijdsduur (4 minuten) na start van de emissie (emissiefase). Deze variabele is de maat die de toename van de concentratie direct na het starten van de emissie aangeeft. Deze variabele representeert met name effecten van de tijd tussen het starten van de emissie en de gemeten verhoging van de concentratie en de snelheid waarmee deze concentratieverhoging plaatsvindt.

Toename van de concentratie

Dit betreft de gemiddelde toename van de concentratie t.o.v. de baseline concentratie tijdens de laatste 5 scans (5 minuten) van de emissieperiode. Deze variabele representeert met name effecten van de ventilatiehoeveelheid en de homogeniteit van de concentratie bij de verschillende meetpunten.

100-voudige hersteltijd

Dit betreft de tijd die nodig is om de concentratie aan het eind van de emissiefase een factor 100 te verlagen. Deze tijd wordt bepaald op basis van de gemeten afname van de concentratie tijdens de herstelfase, waarbij de 100-voudige hersteltijd is bepaald met Vergelijking 1. De afnamesnelheid van de concentratie is een maat voor de verversing en distributie van de lucht door de mock-up. Naast dat verdunning (en daarmee concentratieafname) wordt veroorzaakt door de toevoer van schone lucht, kan een afname van de concentratie optreden door depositie (het neerslaan van vooral de grotere deeltjes) en coagulatie (samenklonteren van deeltjes). Bij de gehanteerde deeltjesgrootte en concentraties is dit effect echter zeer gering.⁷ Ook als het optreedt, zal dit effect bij alle situaties in gelijke mate optreden en de resultaten slechts in zeer beperkte mate beïnvloeden.

Vergelijking 1. Concentratie op tijdstip t bij ideale menging.

$$C_t = C_0 \cdot e^{-\text{Constante} \cdot t}$$

Waarin:

C_t = Concentratie op tijd t

C_0 = Initiële concentratie op tijd = 0

Constante = Constante die de ventilatievoud/decay rate, hoeveelheid schone toevoerlucht en volume van de ruimte representeert

Met behulp van het softwareprogramma voor statistische analyses SPSS zijn de resultaten geanalyseerd om verschillen in de uitkomstmaten inzichtelijk te maken en te verklaren.

3 Onderzochte opstellingen en ventilatie

De tijdens het onderzoek gehanteerde opstellingen zijn in dit hoofdstuk beschreven. Dit betreft zowel de opstelling volgens het 1,5 meter protocol als drie verschillende opstellingen met schermen.

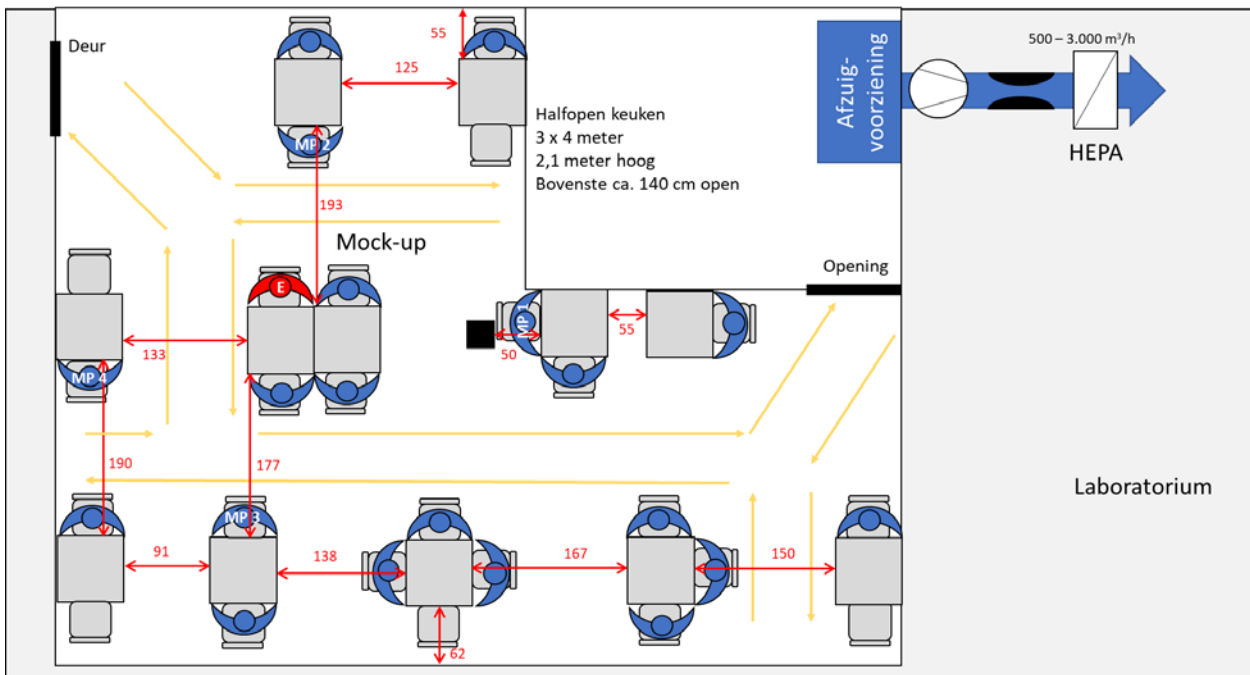
3.1 Mock-up

De afmetingen van de mock-up zijn 7 x 9 meter met een hoogte van 3,5 meter. Binnen deze contouren is een "open" keuken van 3 x 4 meter gecreëerd. In de keuken is op 1,80 m hoogte een ventilator geplaatst die de afzuigkap simuleert. Deze opstelling is met Koninklijke Horeca Nederland afgestemd. Hierbij wordt opgemerkt dat door de grote variëteit aan horecagelegenheden niet kan worden gesteld dat deze mock-up representatief, een gemiddelde, is voor de horecagelegenheden in Nederland.

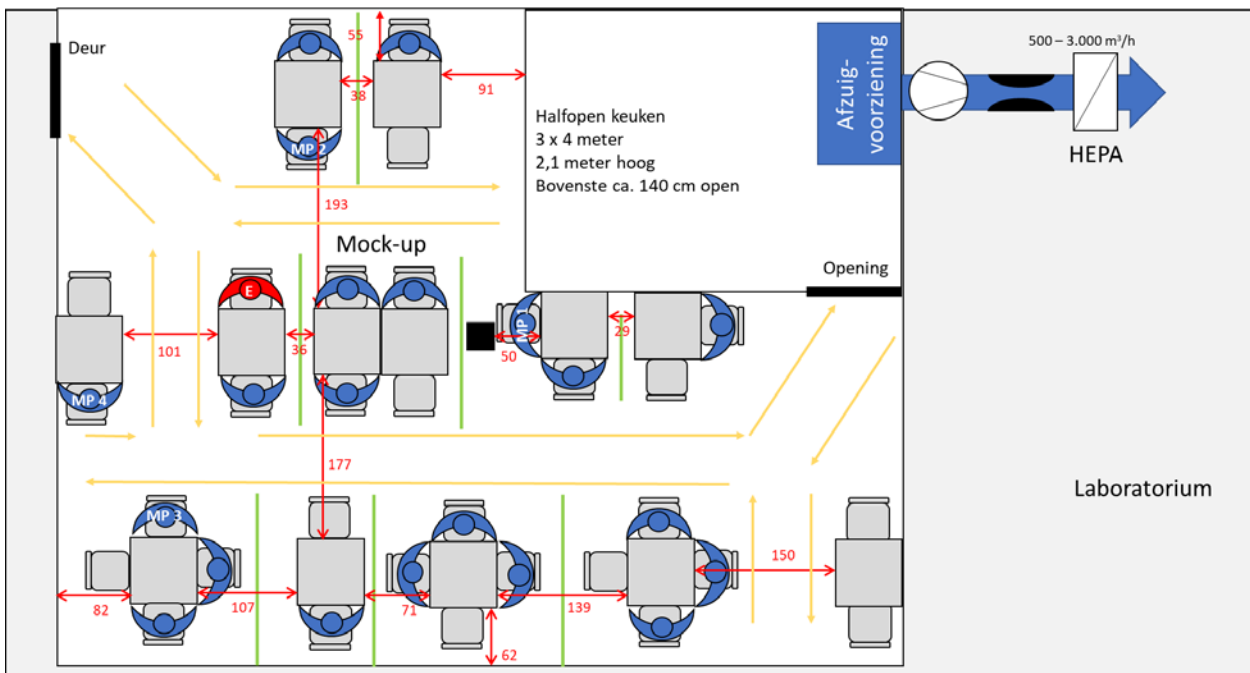
De opstelling voor het 1,5 meter protocol is weergegeven in Figuur 4. Daarnaast zijn er drie verschillende opstellingen met schermen gedefinieerd, waarbij de afstand tussen de stoelen aan verschillende tafels minder dan 1,5 meter kan zijn. De schermen zijn 185 cm breed, 180 cm hoog en tot 50 cm vanaf vloerniveau open. De drie opstellingen met schermen zijn als volgt gekarakteriseerd:

- Bij *opstelling A* is gebruik gemaakt van 6 volledige schermen en één gehalveerd scherm van 92 cm breed. Deze opstelling is weergegeven in Figuur 5.
- Bij *opstelling B* is gebruik gemaakt van 5 volledige schermen en twee gehalveerde schermen van 92 cm breed, Figuur 6.
- Bij *opstelling C* is ook gebruik gemaakt van 5 volledige schermen en twee gehalveerde schermen van 92 cm breed, Figuur 7.

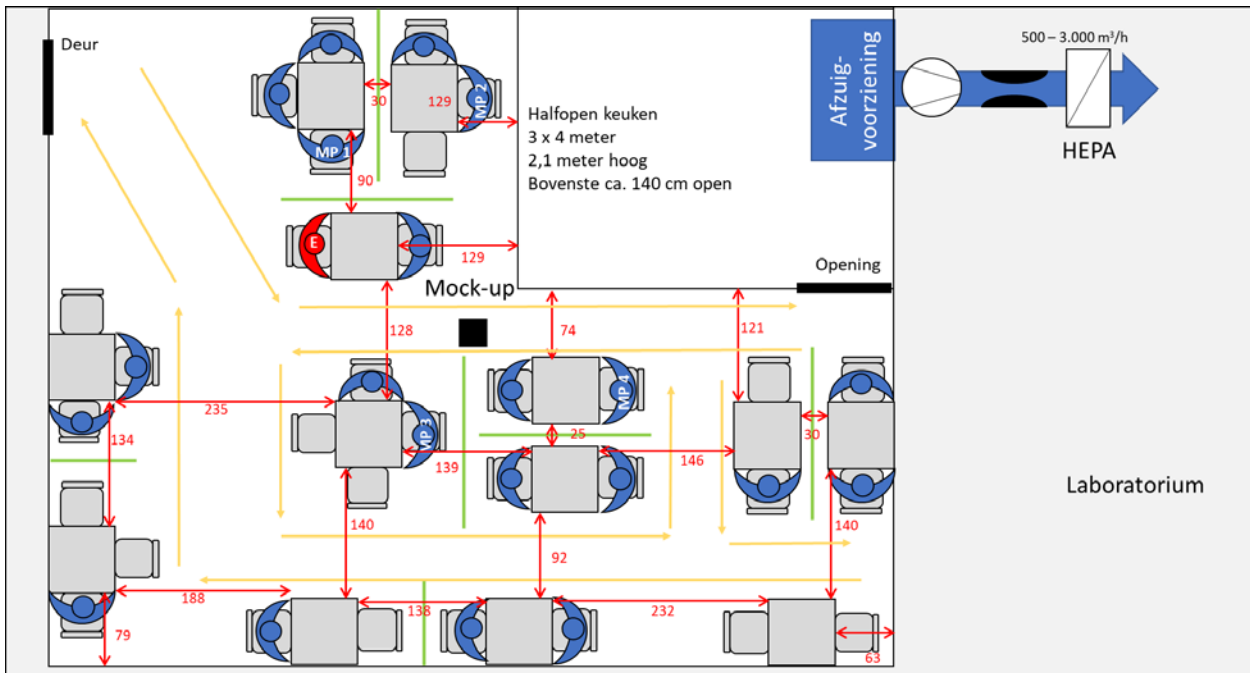
De afmetingen van de schermen zijn weergegeven in Figuur 8.



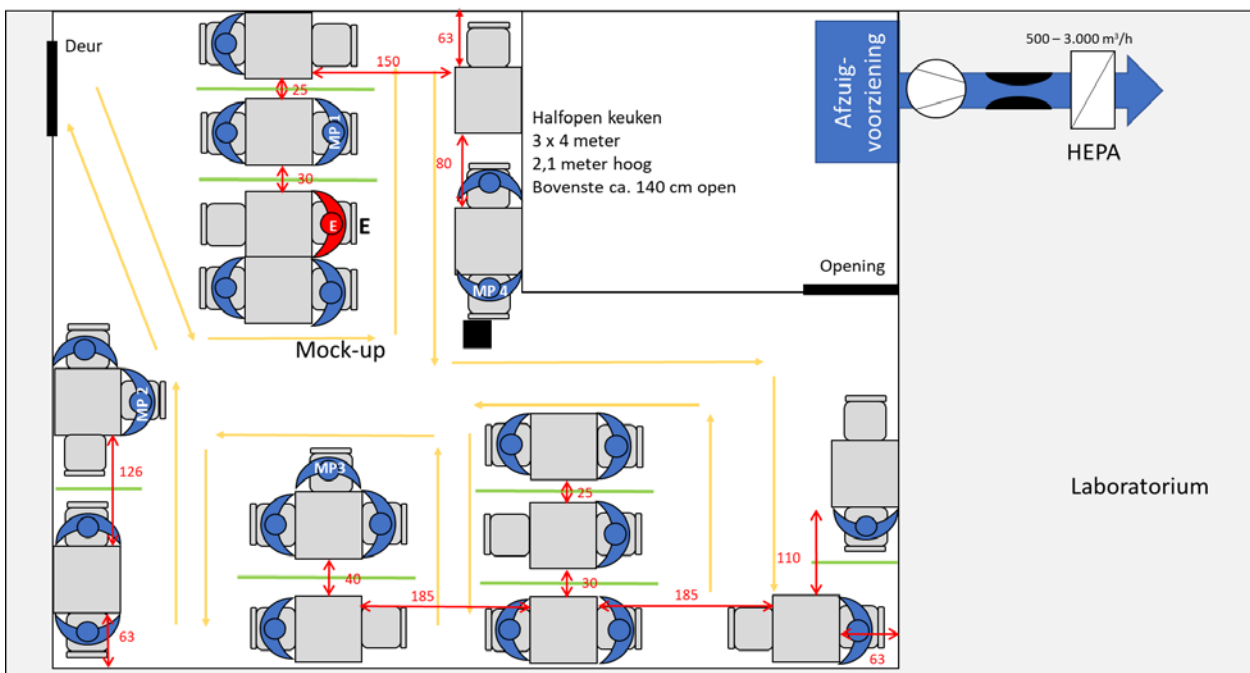
Figuur 4. Opstelling 1,5 meter protocol: 12 tafels, 26 stoelen en 21 gesimuleerde gasten. Op één stoel (rood) vindt emissie van deeltjes plaats en op vier plaatsen (MP1 t/m MP4) wordt de deeltjesconcentratie gemeten. Bij de rode pijlen zijn afstanden aangegeven (in cm). De gele pijlen geven de aangehouden looppoute weer.



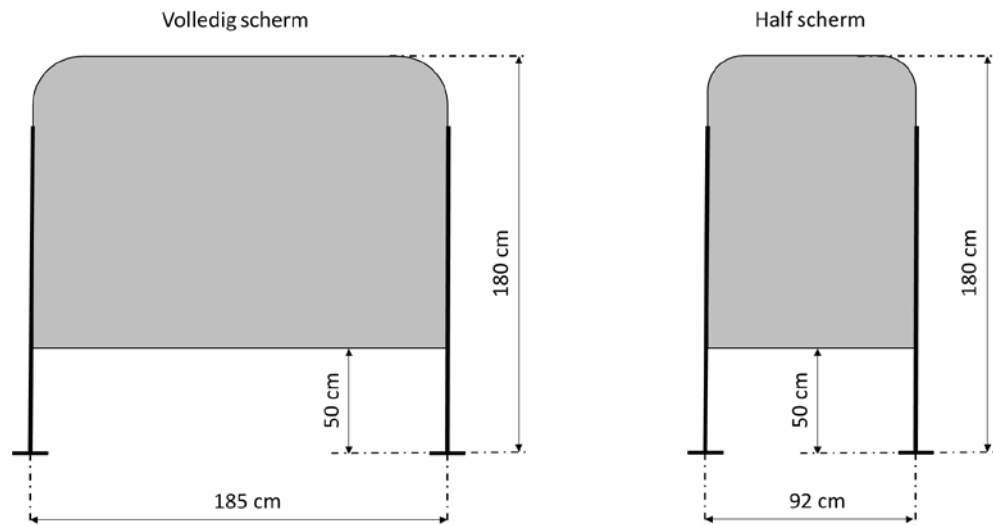
Figuur 5. Opstelling A: 7 schermen (groen aangegeven), 13 tafels, 32 stoelen en 22 gesimuleerde gasten. Op één stoel (rood) vindt emissie van deeltjes plaats en op vier plaatsen (MP1 t/m MP4) wordt de deeltjesconcentratie gemeten. Bij de rode pijlen zijn afstanden aangegeven (in cm). De gele pijlen geven de aangehouden looppoute weer.



Figuur 6. Opstelling B: 7 schermen (groen aangegeven), 13 tafels, 32 stoelen en 22 gesimuleerde gasten. Op één stoel (rood) vindt emissie van deeltjes plaats en op vier plaatsen (MP1 t/m MP4) wordt de deeltjesconcentratie gemeten. Bij de rode pijlen zijn afstanden aangegeven (in cm). De gele pijlen geven de aangehouden looproute weer.



Figuur 7. Opstelling C: 7 schermen (groen aangegeven), 15 tafels, 31 stoelen en 22 gesimuleerde gasten. Op één stoel (rood) vindt emissie van deeltjes plaats en op vier plaatsen (MP1 t/m MP4) wordt de deeltjesconcentratie gemeten. Bij de rode pijlen zijn afstanden aangegeven (in cm). De gele pijlen geven de aangehouden looproute weer.



Figuur 8. Schematische weergave schermen.

3.2 Ventilatie

Twee typen ventilatiesystemen zijn gebruikt, die veelvuldig toegepast worden in horecagelegenheden:

- Vijf wervelroosters verspreid over het plafond van de mock-up. Vanuit deze roosters ontstaat een luchtstroming naar beneden.
- Zes lijnroosters in de lange zijde (gevelzijde) van de mock-up, ca. 35 cm onder het plafond, in de schematische weergaven in paragraaf 3.1 gepositioneerd aan de onderzijde. Vanuit deze roosters ontstaat een horizontale luchtstroming onder het plafond.

De luchtafvoer van de mock-up wordt verzorgd door de ventilator in de keuken die het effect van de afzuigkap representeert, dit is in een restaurant een gangbare situatie. De ventilator is traploos regelbaar en voert de lucht via een HEPA-filter af naar buiten de mock-up. Het HEPA-filter zorgt ervoor dat de deeltjes in de afgevoerde lucht niet opnieuw via de toevoerroosters de mock-up binnen kunnen komen.

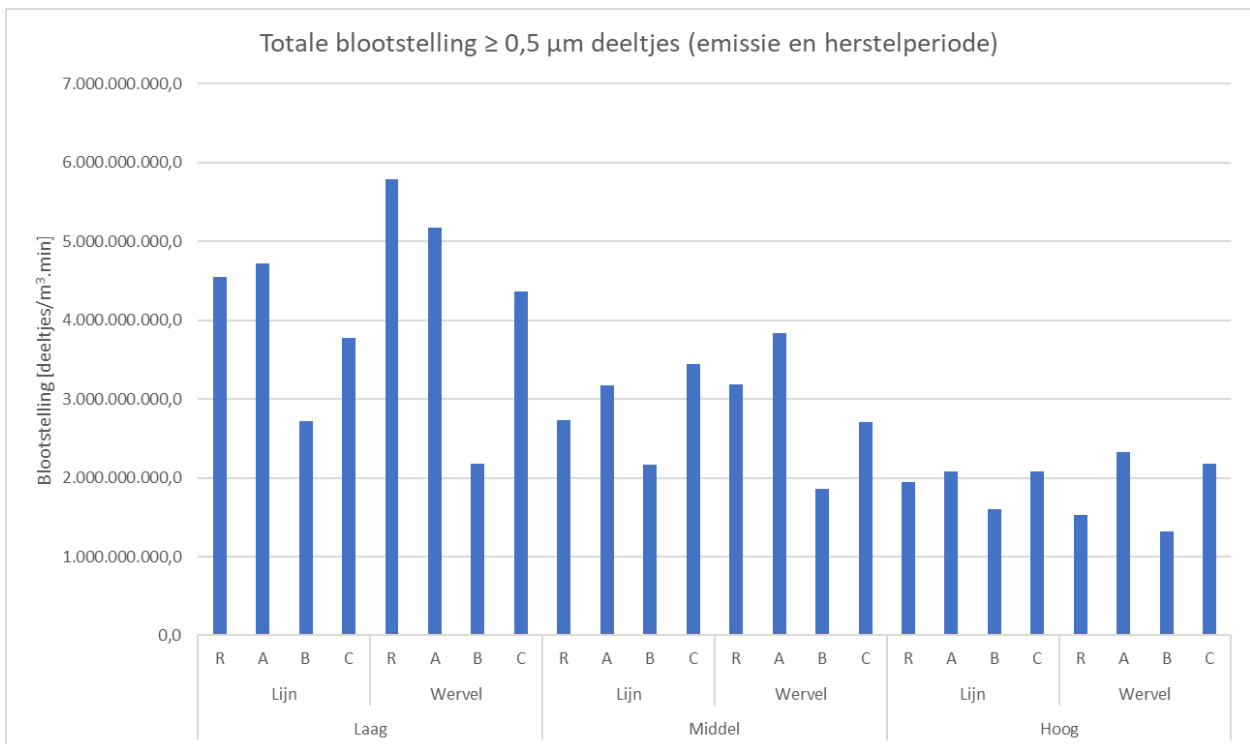
Er zijn drie ventilatiehoeveelheden toegepast:

- Lage stand, ca. 900 m³/h, wat iets hoger is dan het wettelijk minimum van ca. 700 m³/h ($3,8 \cdot 10^{-3}$ m³/s per m² vloeroppervlakte maal 51 m² restaurantoppervlakte).
- Middel stand, ca. 1700 m³/h, wat een gangbare kookafzuiging voor deze keukenomvang representeert; dit komt volgens een vuistregel overeen met een afzuiginstallatie met een breedte van 1,7 meter.
- Hoge stand, ca. 2500 m³/h, wat een beduidend hoger dan gangbare afzuiging is, bedoeld om de invloed van de ventilatiehoeveelheid op de blootstelling goed te kunnen evalueren.

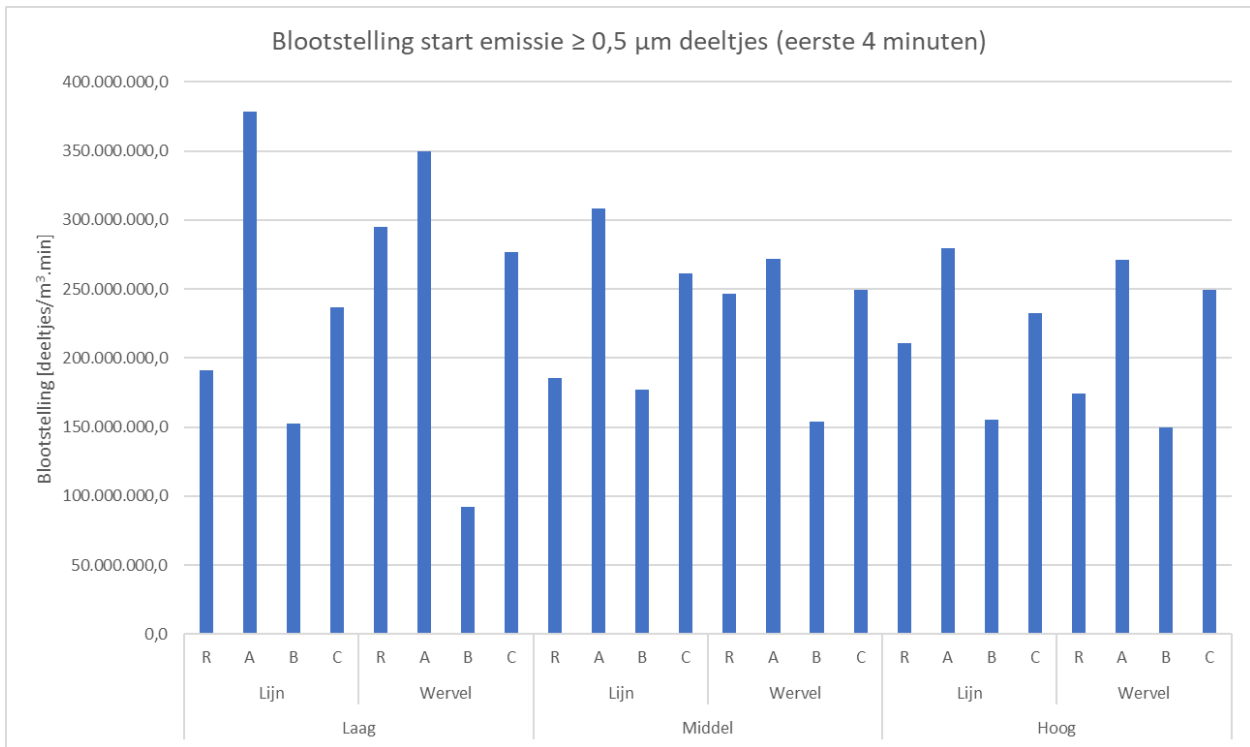
De ventilatiehoeveelheid wordt bij iedere meting ingesteld via een luchtsnelheidsmeter in de meetsectie met bekende diameter en meetflens, deze opstelling (luchtsnelheidsmeter en meetsectie) is gekalibreerd.

4 Resultaten indicatieve metingen

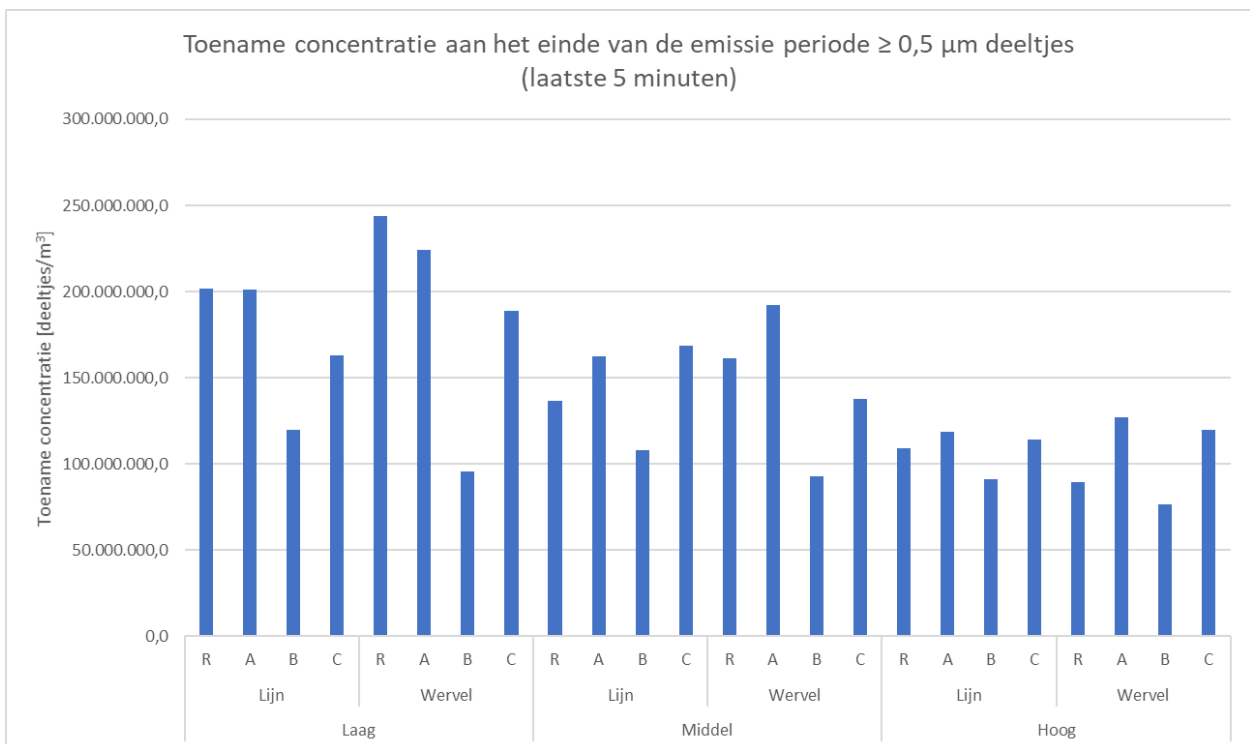
De uitkomstmaten “totale blootstelling”, “blootstelling start emissie”, “toename van de concentratie” en “100-voudige hersteltijd” zijn als gemiddelde waarden voor de vier meetpunten en de drie herhalingsmetingen weergegeven in Figuur 9 t/m Figuur 12.



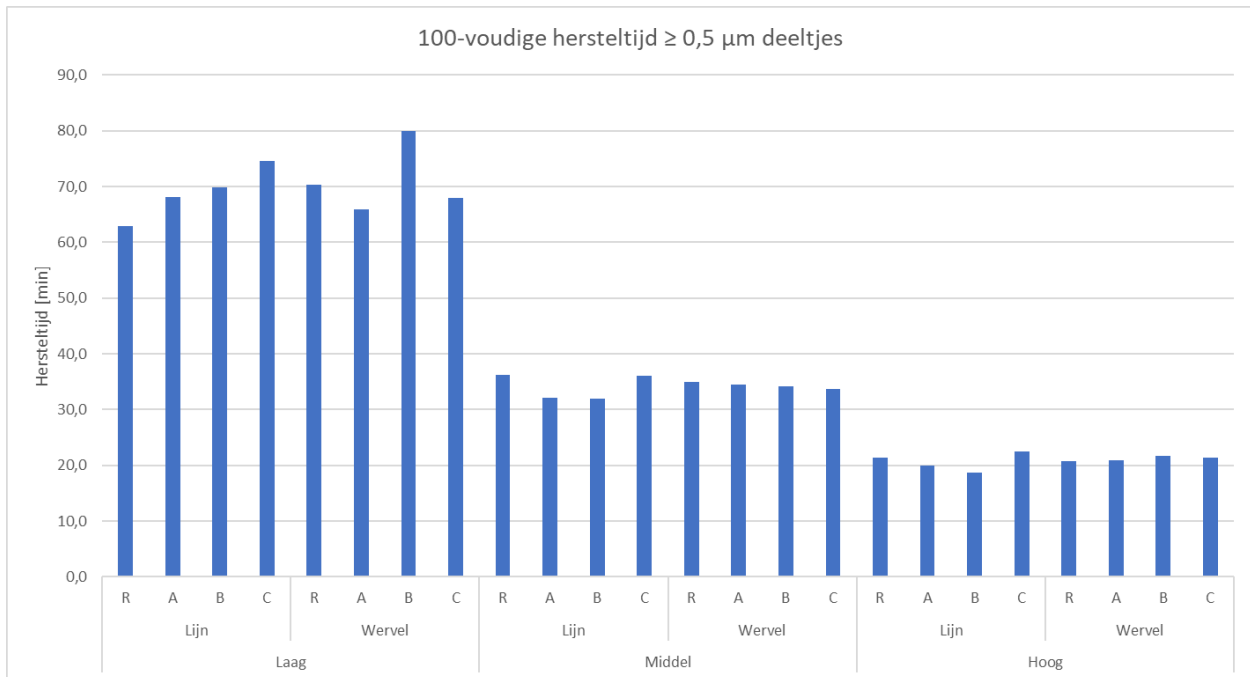
Figuur 9. Totale blootstelling, gemiddelde van de meetpunten 1 t/m 4 en de 3 herhalingsmetingen. R = opstelling conform het 1,5 meter protocol, A = opstelling A, B = opstelling B en C = opstelling C. Onderscheid is verder gemaakt tussen lijnroosters en wervelroosters en tussen de ventilatiehoeveelheden (laag – middel – hoog).



Figuur 10. Blootstelling start emissie, gemiddelde van de meetpunten 1 t/m 4 en de 3 herhalingsmetingen. R = opstelling conform het 1,5 meter protocol, A = opstelling A, B = opstelling B en C = opstelling C. Onderscheid is verder gemaakt tussen lijnroosters en wervelroosters en tussen de ventilatiehoeveelheden (laag – middel – hoog).



Figuur 11. Toename concentratie, gemiddelde van de meetpunten 1 t/m 4 en de 3 herhalingsmetingen. R = opstelling conform het 1,5 meter protocol, A = opstelling A, B = opstelling B en C = opstelling C. Onderscheid is verder gemaakt tussen lijnroosters en wervelroosters en tussen de ventilatiehoeveelheden (laag – middel – hoog).



Figuur 12. 100-voudige hersteltijd, gemiddelde van de meetpunten 1 t/m 4 en de 3 herhalingsmetingen. R = opstelling conform het 1,5 meter protocol, A = opstelling A, B = opstelling B en C = opstelling C. Onderscheid is verder gemaakt tussen lijnroosters en wervelroosters en tussen de ventilatiehoeveelheden (laag – middel – hoog).

4.1 Variaties bij identieke meetomstandigheden

In hoofdstuk 2 is toegelicht dat voor iedere situatie de meetcyclus drie-maal is uitgevoerd (triple metingen). Het doel is om inzicht te krijgen in de variaties in de uitkomstmaten en het effect van 'toevallige variatie' te minimaliseren. Deze toevallige variatie wordt weergegeven door de standaarddeviatie van de triple metingen, Tabel 1.

Tabel 1 Relatieve standaarddeviaties van de gemeten totale blootstelling in de triple metingen.

Standaarddeviatie (%)	Deeltjes $\geq 0,5 \mu\text{m}$	Deeltjes $\geq 3,0 \mu\text{m}$
Gemiddeld	6	9
Mediaan	5	7
Minimum	0	1
Maximum	23	24

Uit deze resultaten blijkt dat de variaties voor deeltjes $\geq 0,5 \mu\text{m}$ kleiner zijn dan voor deeltjes $\geq 3,0 \mu\text{m}$. Dat is toe te schrijven aan het feit dat het aantal geëmitteerde deeltjes $\geq 0,5 \mu\text{m}$ beduidend groter is dan het aantal deeltjes $\geq 3,0 \mu\text{m}$ en de deeltjesgrootte $\geq 3,0 \mu\text{m}$ een deelverzameling is van $\geq 0,5 \mu\text{m}$. Om deze reden zijn bij de analyses alleen de deeltjes $\geq 0,5 \mu\text{m}$ betrokken.

Voor deze categorie deeltjes is de standaarddeviatie voor de helft van de metingen lager dan 5%. Variaties $>20\%$ treden sporadisch op, bij minder dan 2% van de metingen, en alleen bij de laagste ventilatiehoeveelheid. Dat wordt verklaard vanuit het feit dat de luchtbewegingen dan het minst geforceerd zijn, dus meer willekeurig kunnen zijn.

4.2 Analyse van de resultaten

Om tot de resultaten te komen, zijn de gemeten deeltjesaantallen geanalyseerd met behulp van het softwareprogramma voor statistische analyses SPSS. Hierbij is inzichtelijk gemaakt hoe de uitkomstmaten samenhangen met de verklarende parameters (ventilatiehoeveelheid, roostertype, opstelling en meetpunt).

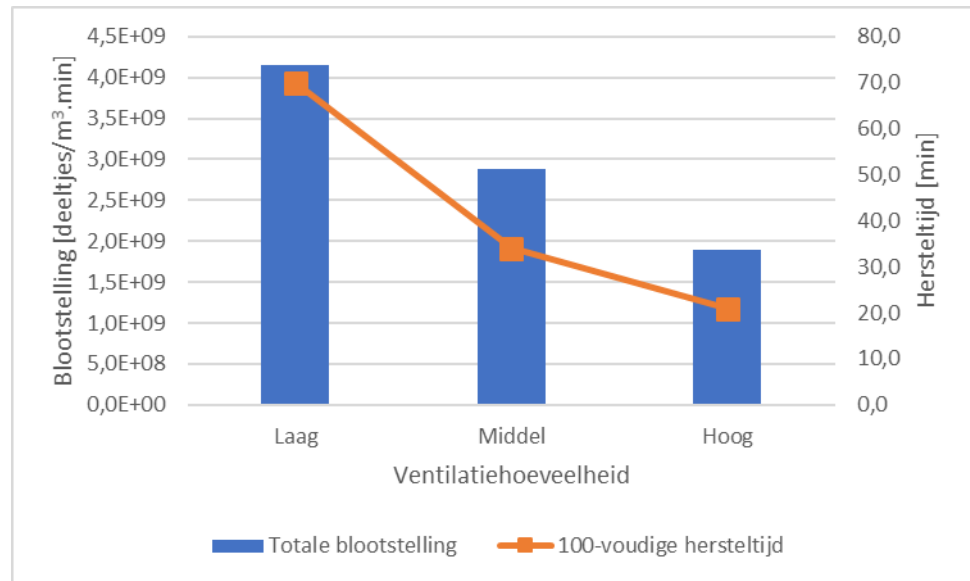
De meetuitkomsten met het 1,5 meter protocol en de lage ventilatiehoeveelheid vormen de referentie waarmee de andere uitkomsten vergeleken zijn. Het uitgangspunt is dat de blootstellingen voor deze referentie acceptabel zijn. Deze waarden zijn immers verkregen op basis van de wettelijk toegestane minimale ventilatiehoeveelheid en het 1,5 meter protocol. Wordt bij metingen met een andere opstelling (opstelling A, B of C) een lagere blootstelling vastgesteld, dan wordt ervan uitgegaan dat dit ook acceptabel is. Hierbij zijn niet alleen de verschillende opstellingen bij een bepaald roostertype en ventilatiehoeveelheid geanalyseerd, maar zijn de twee ventilatiesystemen (lijnroosters en wervelroosters) ook onderling vergeleken bij de verschillende ventilatiehoeveelheden.

Correlaties tussen uitkomstmaten

Als eerste zijn de correlaties van de verschillende uitkomstmaten vastgesteld. Uit deze analyse blijkt dat de "toename van de concentratie", Figuur 11 een sterke significante ($p < 0,01$) samenhang heeft ($> 0,97$, Pearson correlatie) met de uitkomstmaat "totale blootstelling", Figuur 9. Om deze reden is besloten om de uitkomstmaat "toename van de concentratie" verder buiten de analyse te houden omdat deze al meegenomen wordt via de uitkomstmaat "totale blootstelling".

Multivariate variantieanalyse met alle opstellingen, roostertypen en ventilatiehoeveelheden

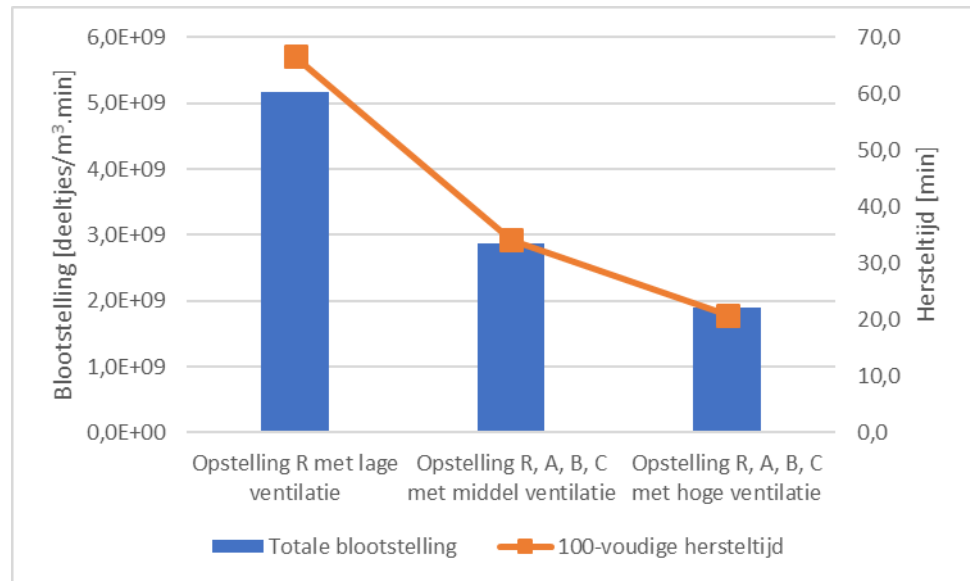
Vervolgens zijn verschillende condities vergeleken voor de drie uitkomstmaten in een multivariate variantieanalyse. Uit de analyse met opstelling (R, A, B en C), ventilatiehoeveelheid (laag, midden en hoog) en roostertype (lijn en wervel) voor alle meetpunten (meetpunt 1 t/m 4), blijkt dat "ventilatiehoeveelheid" de belangrijkste voorspeller is voor de totale blootstelling en de 100-voudige hersteltijd. Deze variabele "ventilatiehoeveelheid" verklaart $>93\%$ van de variantie in "100-voudige hersteltijd" en $>41\%$ van de variantie in "totale blootstelling". De variabele "opstelling" bepaalt $>20\%$ van de variantie in "totale blootstelling" en 15% van de variantie in "blootstelling start emissie", Figuur 13.



Figuur 13. Totale blootstelling en 100-voudige hersteltijd als functie van de ventilatiehoeveelheid voor de $\geq 0,5 \mu\text{m}$ deeltjes.

Vergelijking 1,5 meter protocol met lage ventilatie (referentie) met de overige situaties

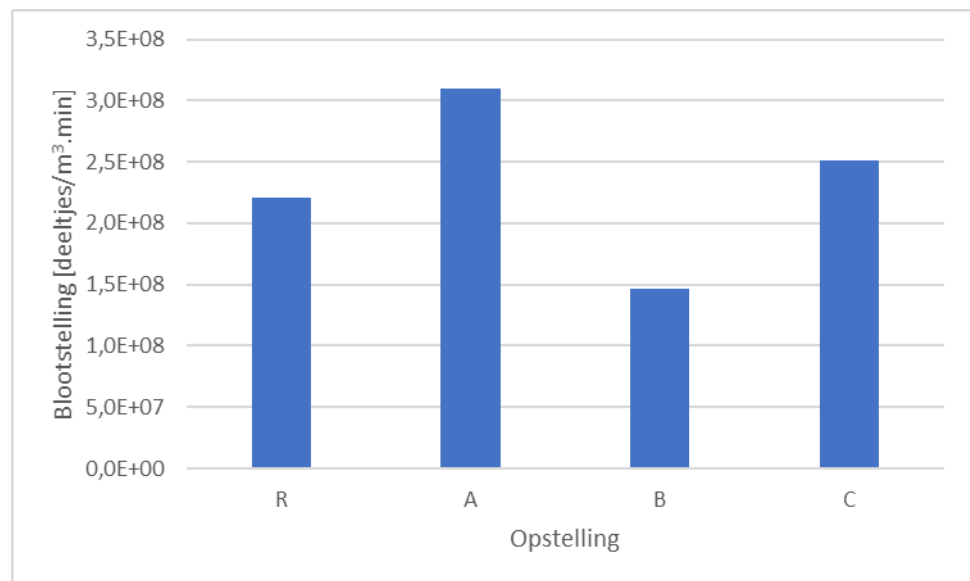
Uit een ANOVA analyse met een groeperingsvariabele die de referentieconditie met lage ventilatie (groep 1) afzet tegen de opstellingen (R, A, B en C) met een middel ventilatiehoeveelheid (groep 2) en een hoge ventilatiehoeveelheid (groep 3) blijkt dat een hogere ventilatiehoeveelheid (middel en hoog) leidt tot een lagere blootstelling en een kortere hersteltijd dan de opstelling conform het 1,5 meter protocol (opstelling R) met lage ventilatie, Figuur 14. Hoe meer ventilatie, hoe beter: middel is beter dan laag, en hoog is beter dan middel.



Figuur 14. Effect van midden en hoog ventilatie op de totale blootstelling en 100-voudige hersteltijd voor de $\geq 0,5 \mu\text{m}$ deeltjes.

Invloed van de variabele “opstelling”

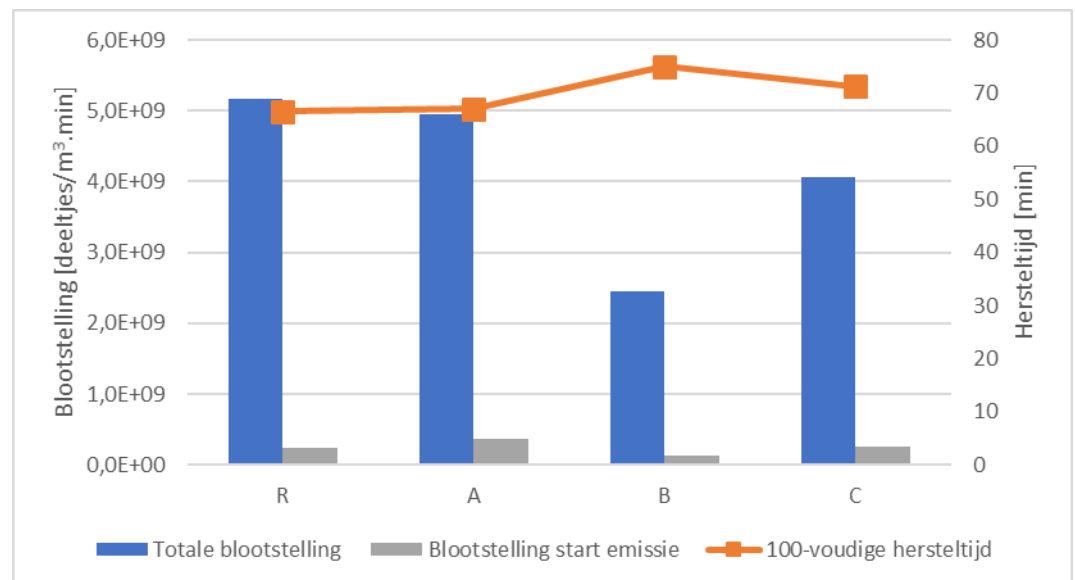
De variabele “opstelling” is de enige significante voorspeller voor de uitkomst “blootstelling begin emissie”, Figuur 15. Hierbij geldt dat opstelling B een significant lagere blootstelling bij start emissie geeft dan de andere drie opstellingen. Opstelling A geeft een significant hogere blootstelling bij start emissie dan opstelling B en opstelling R, maar het verschil met opstelling C is niet significant. Dit geldt voor beide roostertypes, en voor alle drie de ventilatiehoeveelheden (laag, midden en hoog).



Figuur 15. Blootstelling start emissie als functie van opstelling voor de $\geq 0,5 \mu\text{m}$ deeltjes.

Voor de lage ventilatiehoeveelheid geldt dat de variabele “opstelling” (R, A, B of C) de significante voorspeller is voor totale blootstelling en blootstelling start emissie, Figuur 16. Hierbij is de totale blootstelling voor opstelling A, B en C lager dan voor de opstelling conform het 1,5 meter protocol. Voor opstelling A is dit verschil echter niet significant. De uitkomstmaat “blootstelling start emissie” is bij opstelling B het laagst en bij opstelling A het hoogst. Opvallend is hierbij opstelling B waarbij zowel de totale blootstelling als de blootstelling start emissie het laagst zijn maar waarbij de 100-voudige hersteltijd het langst is. De lagere blootstelling wordt vermoedelijk veroorzaakt door de positie van de meetpunten waardoor het na het starten van de emissie langer duurt voordat de emissie op de meetpunten wordt aangetroffen en er een stabiele situatie ontstaat. Dit wordt veroorzaakt door de afstand tussen de emissiebron en het meetpunt, door de obstakels daartussen zoals schermen, alsmede door de luchtstroming. De langere 100-voudige hersteltijd wordt vermoedelijk verklaard door een slechtere doorspoeling.

Voor de uitkomstmaat “100-voudige hersteltijd” geldt dat hiervoor de interactie tussen de variabelen “opstelling” en “roostertype” significant is. De optimale opstelling voor hersteltijd is dus afhankelijk van het roostertype. Voor het roostertype “lijnrooster” blijkt de variabele “opstelling” een voorspeller te zijn van alle drie de uitkomstmaten. Voor roostertype “wervelrooster” blijkt de variabele “opstelling” alleen een voorspeller te zijn van de uitkomstmaat “blootstelling totaal”.



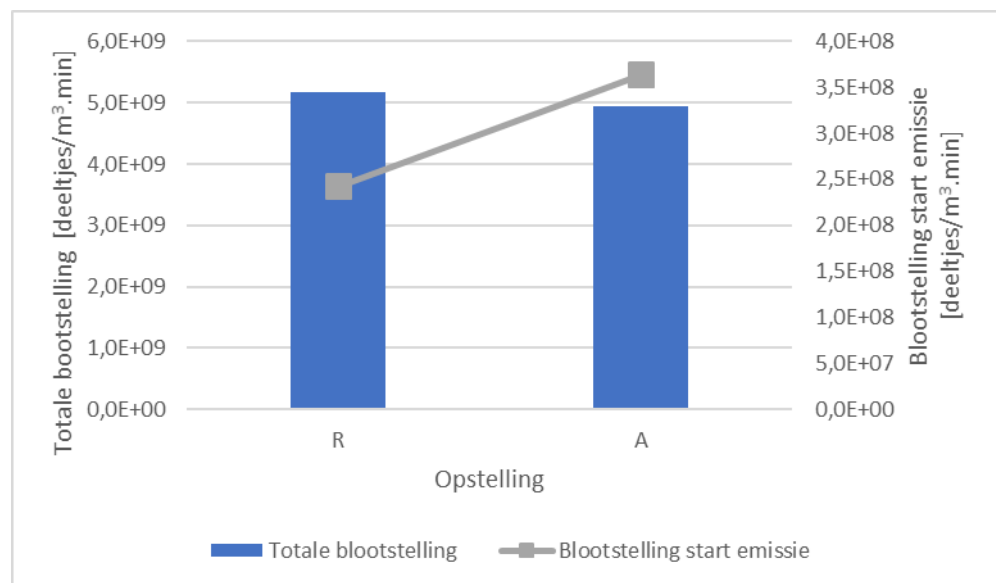
Figuur 16. Uitkomstvariabelen bij lage ventilatiehoeveelheid voor de $\geq 0,5 \mu\text{m}$ deeltjes.

Invloed van de variabele “roostertype”

Het roostertype heeft alleen in combinatie met de opstelling en de ventilatiehoeveelheid (driewegsinteractie) een significant effect. Dit houdt in dat het effect van de opstelling en de ventilatiehoeveelheid op de totale blootstelling iets verschilt voor de verschillende roostertypen. De invloed hiervan op de verklaarde variantie (effect size) is echter zeer laag ($< 0,1$).

Vergelijk tussen de opstelling conform het 1,5 meter protocol en opstelling A met lage ventilatie

Vervolgens is een regressieanalyse uitgevoerd waarbij opstelling A met de opstelling conform het 1,5 meter protocol (opstelling R) is vergeleken voor de twee roostertypen (lijnrooster en wervelrooster) bij de lage ventilatiehoeveelheid. Uit deze analyse blijkt dat de uitkomstmaat “blootstelling start emissie” voor opstelling A significant hoger is dan voor opstelling R, Figuur 17. Het roostertype maakt hierbij geen verschil. Dit betekent dat bij opstelling A de gemiddelde toename op de 4 meetpunten in de eerste 4 minuten groter is dan bij de referentieopstelling R. Mogelijk kan dit worden verklaard doordat de schermen in opstelling A de doorspoeling van de ruimte met de lage ventilatiehoeveelheid negatief beïnvloedt. Voor de totale blootstelling en de 100-voudige hersteltijd is het verschil tussen opstelling A en R niet significant.



Figuur 17. Blootstelling start emissie en totale blootstelling bij lage ventilatie en opstelling R en A voor de $\geq 0,5 \mu\text{m}$ deeltjes.

5 Conclusies

Voor de vier opstellingen in het nagebouwde restaurant waarmee de metingen hebben plaatsgevonden, worden de volgende conclusies getrokken voor deeltjes met afmetingen groter dan of gelijk aan 0,5 µm en kleiner dan 5 µm.

De ventilatiehoeveelheid is de meest bepalende factor voor de totale blootstelling aan de deeltjes en voor de afnamesnelheid van de deeltjesconcentratie na het einde van de deeltjesproductie. Hoe hoger de ventilatie, hoe lager de totale blootstelling en hoe hoger de afnamesnelheid.

Bij de onderzochte opstellingen met schermen resulteren de midden en hoge ventilatiehoeveelheden in een lagere totale blootstelling dan de opstelling met het 1,5 meter protocol bij lage ventilatiehoeveelheid; de totale blootstelling is gemiddeld 44% en 63% lager voor respectievelijk de midden en hoge ventilatiehoeveelheid. Bovendien neemt bij hogere ventilatiehoeveelheid de concentratie sneller af.

Bij de lage ventilatiehoeveelheid is de totale blootstelling voor de drie opstellingen met schermen lager dan voor de opstelling conform het 1,5 meter protocol. Dit verschil is voor opstelling A echter niet significant.

Het roostertype (lijnroosters of wervelroosters) heeft geen significante invloed.

Op basis van het onderzoek lijkt het mogelijk te zijn, voor de blootstelling aan deeltjes groter dan of gelijk aan 0,5 µm en kleiner dan 5 µm, om met het toepassen van schermen een kleinere afstand tussen tafels met personen uit verschillende huishoudens aan te houden dan het volgens het 1,5 meter protocol is toegestaan.

6 Aanbevelingen

Er zou verantwoord voor kunnen worden gekozen om een afstand van minder dan 1,5 meter tussen personen uit verschillende huishoudens toe te staan als er schermen worden ingezet. Aanbevolen wordt om dan de voorwaarde te stellen dat wordt geventileerd met ten minste $9,3 \cdot 10^{-3}$ m³/s per m² vloeroppervlakte waar zich gasten bevinden.

De maten van de onderzochte schermen zijn: bovenzijde 180 cm, onderzijde 50 cm boven de vloer en breedte 185 cm. Verondersteld mag worden dat het gebruik van kleinere schermen geen negatief effect heeft op de blootstelling aan de onderzochte deeltjes. Aanbevolen wordt daarom om schermen toe te passen met deze of kleinere afmetingen, zolang de schermen groot genoeg zijn om het directe 'aanhoesten' met grotere deeltjes (deeltjes groter dan of gelijk aan 5 µm) te voorkomen.

7 Beperkingen en discussie

Het onderzoek is hoofdzakelijk gebaseerd op de mogelijke blootstelling van personen aan een deeltjesconcentratie gedurende een bepaalde tijd. De beschouwde deeltjesgrootte komt overeen met de deeltjes waarvan bekend is dat deze mogelijk infectieus virus kunnen bevatten. Of door deze blootstelling mensen geïnfecteerd kunnen raken, valt buiten de scope van dit onderzoek. Er is in deze studie een vergelijking gemaakt tussen blootstellingen aan deeltjes op een aantal relevante punten in de ruimte bij de opstelling volgens het 1,5 meter protocol en bij verschillende andere opstellingen, ventilatiehoeveelheden en roostertypen.

Voor de metingen is gebruik gemaakt van optische deeltjestellers die zijn gekalibreerd op deze specifieke bron. De bron produceert deeltjes door verneveling van een specifieke olie. Deze geproduceerde deeltjes zijn relatief stabiel. Door mensen geproduceerde aerosolen kunnen na verloop van tijd in omvang afnemen door verdamping. De toegepaste methode negeert dit effect van afnemende deeltjesgrootte. Door de toegepaste methode voor de vergelijking van de blootstelling aan deeltjes bij de verschillende situaties is dat een voordeel omdat de deeltjesverdeling beter geborgd is.

De resultaten van het onderzoek zijn alleen van toepassing op de onderzochte situaties (opstelling, roostertype en ventilatiehoeveelheid). Echter, door de keuze van een mock-up van een relatief kleine horecagelegenheid (type bistro, 51 m²) en de gekozen opstellingen met 12 - 15 tafels (26 tot 32 plaatsen) kan deze situatie qua blootstelling als relatief ongunstig worden gekwalificeerd. In andere situaties kunnen betere resultaten worden verwacht. Dit geldt met name voor grotere horecagelegenheden, waar doorgaans meer ruimte per gast beschikbaar is. De opstellingen resulteren in 1,5 – 2,0 m² vloeroppervlakte per gast, waarmee deze op basis van kengetallen getypeerd wordt als een middenklasse (1,25-1,75) tot luxe (1,5-2,0) restaurant. Hierbij wordt opgemerkt dat bij het 1,5 meter protocol het hoogst aantal vierkante meter per gast (2,0 m² per gast, maximaal 26 gasten) beschikbaar is. Bij opstellingen A en B is de minste ruimte per gast beschikbaar (1,6 m² per gast, maximaal 32 gasten). Opstelling C met 15 tafels en 31 plaatsen (1,6 m² per gast) is een opstelling waarbij vrijwel geen uitbreiding meer mogelijk is. De tafels staan 15 tot 40 cm van elkaar verwijderd, gescheiden door een scherm. Daar waar geen schermen konden worden toegepast, is de afstand van 1,5 meter aangehouden.

Bij het onderzoek is gebruik gemaakt van verschillende typen toevoerroosters: lijnroosters en wervelroosters. Beide systemen worden veelvuldig in de praktijk toegepast maar de variaties van de in de praktijk toegepaste systemen is groot. Het verschil in de uitkomstmaten veroorzaakt door de verschillende roostertypen in dit onderzoek is zeer beperkt. De lijnroosters zijn aan de andere zijde geplaatst dan de keuken waardoor de lucht door de gehele ruimte moet stromen om bij de keukenafzuiging te komen. De resultaten zijn dan ook geldig voor een ruimte waarbij de toegevoerde verse lucht zich volledig door de ruimte verspreidt, mengt en er geen zones zijn met een veel beperktere 'doorspoeling'.

Uit het onderzoek blijkt dat bij een ventilatiehoeveelheid van $9,3 \cdot 10^{-3}$ m³/s per m² vloeroppervlakte waar zich gasten bevinden de totale blootstelling gemiddeld ca 44% lager is dan bij de opstelling conform het 1,5 meter protocol met een ventilatiehoeveelheid die het wettelijke minimum benadert.

Door de hoeveelheid van $9,3 \cdot 10^{-3}$ m³/s per m² vloeroppervlakte aan te houden, wordt een extra marge aangehouden voor het opvangen van onvoorspelbare variaties en voor het gegeven dat een mock-up een vereenvoudiging is van de werkelijke situatie. Deze ventilatiehoeveelheid kan in kleinere horecagelegenheden over het algemeen goed worden gerealiseerd als er een keuken aanwezig is met een afzuigkap in bedrijf, of als andere ventilatievoorzieningen zijn aangebracht zoals bijvoorbeeld in het verleden om sigarettenrook af te voeren. Ook in TNO-rapport 2020 R10993 "Indicatief onderzoek naar effectiviteit van schermen in de horeca" d.d. 19 juni 2020 blijkt dat met een verhoogde ventilatiehoeveelheid een reductie van ca. 50% op de blootstelling goed haalbaar is met het bestaande ventilatiesysteem en afzuigkap. Om deze redenen vindt TNO het verantwoord om aan te bevelen om de 1,5 meter tussen tafels met verschillende huishoudens te reduceren, als die afgeschermd zijn door een scherm en daarbij een ventilatiehoeveelheid van ten minste $9,3 \cdot 10^{-3}$ m³/s per m² vloeroppervlakte wordt aangehouden.

De invloed van de afmetingen van de schermen is in deze studie niet expliciet onderzocht. Echter op basis van fysica en ervaringen van TNO wordt gesteld dat de luchtstroming in een ruimte door grotere schermen meer beperkt wordt dan door kleine schermen. De luchthoeveelheid, luchtstroming door de ruimte en menging zijn zeer belangrijk voor de resulterende concentratie en de daardoor veroorzaakte totale blootstelling en afnamesnelheid. In een ruimte met kleinere schermen is de luchtstroming zeer waarschijnlijk gelijk of beter dan met de onderzochte schermen. Zolang de schermen voldoende groot zijn om de route die grote deeltjes volgen te blokkeren (dus tegen te houden), lijkt het verantwoord ook kleinere schermen toe te passen.

8 Literatuur

1. Ai A, Hashimoto K, Melikov AK. Influence of pulmonary ventilation rate and breathing cycle period on the risk of cross-infections. *Indoor Air*. 2019;29(6):993-1004. doi:10.1111/ina.12589
2. Xu C, Nielsen P V., Gong G, Liu L, Jensen RL. Measuring the exhaled breath of a manikin and human subjects. *Indoor Air*. 2015;25(2):188-197. doi:10.1111/ina.12129
3. Somsen GA, Rijn C Van, Kooij S, Bem RA, Bonn D. Comment Small droplet aerosols in poorly ventilated spaces and SARS-CoV-2 transmission. *Lancet Respir*. 2020;2600(20):9-10. doi:10.1016/S2213-2600(20)30245-9
4. Liu Y, Ning Z, Chen Y, et al. Aerodynamic Characteristics and RNA Concentration of SARS-CoV-2 Aerosol in Wuhan Hospitals during COVID-19 Outbreak. *bioRxiv*. 2020;86(21):2020.03.08.982637. doi:10.1101/2020.03.08.982637
5. Asadi S, Wexler AS, Cappa CD, Barreda S, Bouvier NM, Ristenpart WD. Aerosol emission and superemission during human speech increase with voice loudness. *Sci Rep*. 2019;9(1):1-10. doi:10.1038/s41598-019-38808-z
6. Morawska L, Johnson GR, Ristovski ZD, et al. Size distribution and sites of origin of droplets expelled from the human respiratory tract during expiratory activities. *J Aerosol Sci*. 2009;40(3):256-269. doi:10.1016/j.jaerosci.2008.11.002
7. Santarpia JL, Rivera DN, Herrera V, et al. Transmission Potential of SARS-CoV-2 in Viral Shedding Observed at the University of Nebraska Medical Center. *medRxiv*. 2020:2020.03.23.20039446. doi:10.1101/2020.03.23.20039446
8. Hussein T, Hruška A, Dohányosová P, et al. Deposition rates on smooth surfaces and coagulation of aerosol particles inside a test chamber. *Atmos Environ*. 2009;43(4):905-914. doi:10.1016/j.atmosenv.2008.10.059
9. Jacobs P, De Gids WF. Individual and collective climate control in aircraft cabins. *Int J Veh Des*. 2006;42(1-2):57-66. doi:10.1504/IJVD.2006.010177

9 Ondertekening

Delft, 17 augustus 2020

TNO

Research manager

MBA Auteur