



RAPPORTAGE

2025

Programmaliin III – Ventilatie en verspreiding van ademhalingsbioaerosolen in binnenruimten: een experimenteel onderzoek.

Projectnummer 060.51323

DATUM

2 oktober 2025

AUTEURS

Inge M. Wouters, PhD; Effy Kritsi, MSc; Lidwien A.M. Smit, Prof. PhD
Institute for Risk Assessment Sciences
Universiteit Utrecht

INHOUD

Samenvatting	6
1 Inleiding	8
2 Onderzoekopzet en Methoden	10
2.1 Studieopzet	10
2.1.1 Globale opzet	10
2.1.2 Testruimte	10
2.1.3 Ventilatie-instellingen	11
2.1.4 Deelnemers	12
2.1.5 Activiteiten tijdens studiedag	12
2.2 Instrumentatie en meetmethoden	15
2.2.1 Instrumentatie en bemonsteringsopstelling	15
2.2.2 Analyse van bioaerosolen	17
2.3 Dataverwerking en statistische analyse	19
2.3.1 Voorverwerking van gegevens	19
2.3.2 Statistische analyse	19
3 Resultaten	20
3.1 Bio-aerosolen	20
3.1.1 Neus- en keelwabs	20
3.1.2 Luchtmonsternamen	20
3.2 Deeltjes- en omgevingsmetingen	22
3.2.1 Piekwaarden na aanvang	22
3.2.2 Tijdtrend en boxplots gefilterde data	22
3.2.3 Mixed model analyse	26
4 Discussie en conclusies	27
Dankwoord	30
5 Referenties	31
bijlage A – overzichtsplots deeltjesconcentraties en omgevingscondities per studiedag	34
bijlage B – geluidsniveaus per studiedag en ventilatieconditie	46

SAMENVATTING

Er is nog veel onduidelijk over in hoeverre empirisch onderzoek met artificiële aerosolen inzicht geeft in effectiviteit van ventilatie op de verspreiding van bioaerosolen onder realistische omstandigheden. Het hier beschreven experimentele onderzoek binnen het P3Venti-programma heeft als doel om te testen hoe verschillende mechanische ventilatiestrategieën presteren onder gecontroleerde, maar realistische omstandigheden met mensen als bron van bioaerosolen in de ruimte.

Hiertoe werd onderzoek uitgevoerd in een speciaal gebouwde 'large room' testfaciliteit bij de TU Eindhoven die ingericht was als een algemene woonkamer van een langdurige zorginstelling. Gedurende vier studiedagen werden vijf vrijwillige gezonde deelnemers uitgenodigd om drie sessies van 1,5 uur in de ruimte aan tafel plaats te nemen en mee te doen met gecontroleerde vocale activiteiten. Tijdens elke studiedag varieerden de ventilatiestrategieën (150 m³/uur, 150 m³ uur + UV-C luchtreiniger, 400 m³/uur) willekeurig over de drie sessies. Op diverse afstanden van de deelnemers werden bioaerosolen bemonsterd middels passieve platenmethode, NIOSH en GSP monsternamen, gevolgd door kweek om totaal bacteriën te bepalen en moleculaire analyse van 16S-rRNA als maat voor totaal bacteriën, *Streptococcus salivarius* als maat voor orale bacteriën, en *Staphylococcus epidermidis* als maat voor huidbacteriën. Daarnaast werden op de monsternamelocaties ook deeltjesconcentraties gemeten met behulp van een optische meetmethode en omgevingscondities (CO₂, temperatuur en luchtvochtigheid) met behulp van sensoren.

Het aantal bacteriën zoals gemeten met de passieve platenmethode en de NIOSH methode (actieve monsternamen) was laag met slechts één of enkele bacteriekolonies per monsternamen. In het overgrote deel van de 216 geanalyseerde samples verkregen met actieve luchtmonsternamen werden geen bacteriële markers aangetoond met moleculaire analyse, waardoor het niet mogelijk was om een patroon van verspreiding in de ruimte te onderzoeken. Met de gemonitorde stofdeeltjes in diverse grootteklassen is een nadere analyse uitgevoerd, na verstoring door pieken als gevolg van bewegingen van de deelnemers en het openen van de deur van de ruimte te excluderen. Met de mobiele luchtreiniger in de ruimte waren deeltjesconcentraties tussen 23% en 48% lager ten opzichte van wanneer er alleen geventileerd werd met een ventilatiedebiet van 150 m³/uur. Een hoger ventilatiedebiet van 400 m³/uur resulteerde in grotere afname van deeltjesconcentraties met veranderingen tussen 52% en 79%. Tussen de verschillende meetlocaties worden beperkte verschillen in deeltjesconcentraties waargenomen (~10-15% verschil), wat suggereert dat de aanwezigheid van vijf (zittende, niet door de kamer bewegende) personen in de ruimte geen aanzienlijke ruimtelijke verschillen in deeltjesconcentraties oplevert. Bij eerdere metingen in PLIII met aerosolisatie van grote hoeveelheden inerte deeltjes in dezelfde ruimte werden grotere verschillen in deeltjesconcentraties tussen locaties gevonden (tot en met factor 2).

Het bestuderen van bioaerosolcomponenten onder realistische omstandigheden is uniek. Ondanks de focus op een brede groep van bacteriën in plaats van specifieke ziekteverwekkers (bacteriën of virussen) bleek het moeilijk om bioaerosolen aan te tonen als gevolg van de lage concentraties.

Desondanks zien we voor deeltjesconcentraties wel invloed van ventilatiestrategieën. Het was echter niet mogelijk om volledig uitsluitel te geven over de herkomst van deze deeltjes: deze zullen deels afkomstig zijn van de deelnemers (al dan niet respiratoir), maar andere bronnen van buiten de testruimte waren ook niet uit te sluiten. In toekomstig onderzoek is het aan te bevelen om een sluis te overwegen om invloeden van buitenaf meer te reguleren en een groter aantal personen in de studie te betrekken om de bronsterkte te vergrootten.

1 INLEIDING

Binnen het onderzoeksprogramma Pandemische Paraatheid en Ventilatie (P3Venti) heeft de Universiteit Utrecht experimenteel onderzoek uitgevoerd naar de invloed van ventilatiecondities op de verdeling van door mensen geproduceerde (bio-)aerosolen in een ruimte. Dit onderzoek valt binnen programmalijn III: Experimenteel onderzoek ventilatie en deeltjesgedrag. Deze programmalijn richt zich op kennisontwikkeling met betrekking tot de bijdrage van ventilatie aan het voorkomen van besmettingen in de langdurige zorg.

Sinds de COVID-19-pandemie is er meer aandacht voor de rol van ventilatie in de overdracht van door lucht verspreide ziekten (Goodwin e.a, 2021; Morawska & Cao, 2020). Veel infectieziekten, waaronder luchtweginfecties zoals griep en COVID-19, verspreiden via kleine druppeltjes en aerosolen die mensen produceren bij uitademen, praten, hoesten of niezen. Bij onvoldoende luchtverversing kunnen deze infectieuze deeltjes langere tijd in de lucht blijven hangen, waardoor de concentratie in de binnenlucht en het risico op besmetting toeneemt. Door buitenlucht binnen te brengen en gebruikte binnenlucht af te voeren, wordt de concentratie van ziekteverwekkers in een ruimte aanzienlijk verminderd. Een literatuurstudie van voor de pandemie liet al zien dat er een sterk verband bestaat tussen slechte ventilatie en transmissie van luchtweginfecties (zoals tuberculose, SARS, mazelen en griep) (Li e.a., 2007).

Recent onderzoek naar de effectiviteit van ventilatiesystemen en/of luchtreinigers vindt veelal plaats onder gesimuleerde omstandigheden waarbij vaak gebruik gemaakt wordt van hoge aantallen inerte deeltjes die gedurende een bepaalde tijd constant geëmitteerd worden (de Lange rapportage 2025, Ding e.a., 2024). Een dergelijke experimentele opzet verschilt op een aantal fronten van realistische omstandigheden, bijvoorbeeld door de veel grotere dynamiek in de uitstoot van respiratoire infectieuze deeltjes als gevolg van inherente verschillen tussen personen en hun wisselende activiteiten zoals praten, hoesten en bewegen. Experimentele studies gaan bij modellering daarnaast vaak uit van uniforme menging van lucht, wat zeker bij beperkte ventilatie niet realistisch is. Een andere onderbelichte beperking van onderzoek naar kunstmatig verspreide inerte deeltjes is dat deze deeltjes zich mogelijk anders kunnen gedragen dan bioaerosolen—deeltjes in de lucht die biologisch materiaal bevatten of daarvan afkomstig zijn. Van mensen afkomstige bioaerosolen komen onder meer vrij tijdens ademen, spreken, niezen, en hoesten (Alsved e.a., 2022; Coleman e.a., 2022; Tan e.a. 2023). Naast gebrek aan informatie over de fysieke eigenschappen van deze bioaerosolen is er weinig bekend over de gevoeligheid voor omgevingsfactoren zoals luchtvochtigheid, temperatuur en luchtturbulentie, en in welke mate dit een rol speelt bij de verspreiding van bioaerosolen in een ruimte onder verschillende ventilatieregimes. Door de beperkingen in empirisch onderzoek blijven kennislacunes bestaan over de effectiviteit van ventilatie op de verspreiding van bioaerosolen onder realistische omstandigheden.

Het hier beschreven experimentele onderzoek binnen het P3Venti-project heeft als doel om te testen hoe verschillende mechanische ventilatiestrategieën presteren onder gecontroleerde, maar realistische omstandigheden met mensen als bron van bioaerosolen in de ruimte.

De onderzoeksvragen die in dit rapport centraal staan zijn:

1. Hoe hoog zijn bioaerosol- en deeltjesconcentraties in een ruimte als gevolg van gecontroleerde menselijke bezetting en activiteiten?
2. In welke mate worden deze concentraties beïnvloed door verschillende ventilatiecondities?

Door het beantwoorden van deze onderzoeksvragen wordt onderzocht of een dergelijke onderzoeksopzet in staat is om nieuwe inzichten te genereren om het effect te bepalen van ventilatie op blootstellingsconcentraties onder realistische omstandigheden.

Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt de onderzoeksopzet en de gebruikte methoden beschreven. Hoofdstuk 3 geeft een overzicht van de resultaten. In hoofdstuk 4 wordt de betekenis en de interpretatie van de resultaten besproken, en samengevat in een algemene conclusie.

2 ONDERZOEKSOPZET EN METHODEN

2.1 Studieopzet

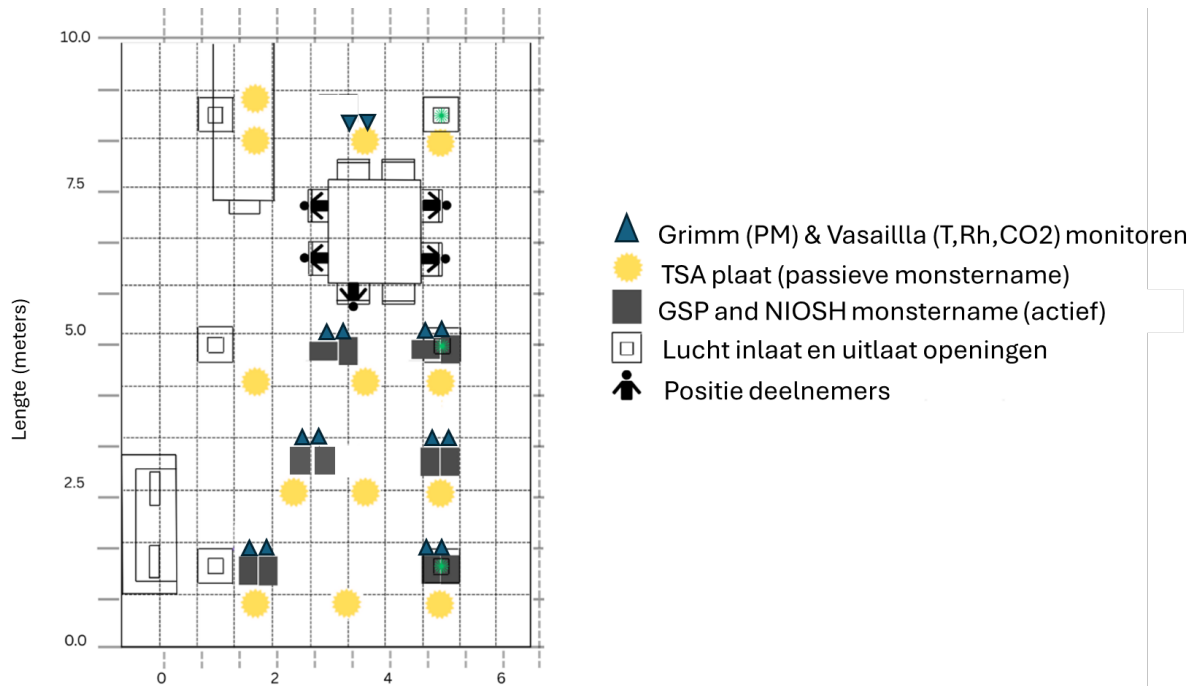
2.1.1 Globale opzet

Het onderzoek vond begin 2025 plaats in een speciale testruimte in de Technische Universiteit Eindhoven (TU/e) die een algemene ruimte in een langdurige zorginstelling simuleert. Het gebruik door bewoners van een dergelijke ruimte, en de daarmee gepaard gaande aerosolproductie, werd gesimuleerd door vrijwillige deelnemers. Tijdens een studiedag verbleven deelnemers drie maal gedurende anderhalf uur aan een stuk in de ruimte, waarbij de ventilatiecondities van de ruimte werden gevarieerd. Om de variatie in de hoeveelheid van (bio-)aerosolen in de ruimte te onderzoeken werden op verschillende plekken in de ruimte tegelijkertijd metingen uitgevoerd. Er werden verschillende methoden van monsternamen ingezet, die in meer detail beschreven worden in de paragraaf meetmethoden. Het onderzoek is op vier verschillende dagen herhaald uitgevoerd. Bij de deelnemers werd aan het begin van de dag een neus- en keelmonster verzameld.

De studieopzet is beoordeeld als niet vallend onder de Wet medisch-wetenschappelijk onderzoek met mensen (WMO) door de Medisch Ethische Toetsingscommissie (METC) van het Universitair Medisch Centrum (UMC) Utrecht. Het protocol is daarnaast goedgekeurd door de ethische beoordelingscommissie van de TU/e. Deelnemers gaven schriftelijk *informed consent* voor deelname.

2.1.2 Testruimte

De experimenten werden uitgevoerd in een speciaal gebouwde 'large room' onderzoeksfaciliteit bij de TU/e. Deze faciliteit bestaat uit een ruimte van 9,9 m × 6,7 m × 3,0 m (lengte × breedte × hoogte) die luchtdicht is afgesloten van de omgeving. In deze ruimte wordt de ventilatie volledig gereguleerd, waarbij lucht die in de ruimte geleid wordt eerst HEPA gefilterd wordt. De testen zijn uitgevoerd met een configuratie van 3 inlaat- en 3 uitlaat-ventielen zoals regelmatig voorkomt in langdurige zorginstellingen. In de testruimte is een opstelling van meubels geplaatst die vergelijkbaar is met opstellingen zoals in algemene ruimtes/woonkamers in langdurige zorginstellingen (zie figuur 1).



Figuur 1. Overzicht van de inrichting van de testfaciliteit. Weergegeven zijn de positie in de ruimte van meubels, deelnemers en de verschillende meetopstellingen. De verschillende meetopstellingen staan in meer detail beschreven in de meetmethodes. De locatie van de drie luchtinlaat- (groen) en drie luchtuitlaatventielen (wit) is tevens weergegeven.

2.1.3 Ventilatie-instellingen

De volgende drie ventilatieconfiguraties werden geëvalueerd in het onderzoek.

1. Uitsluitend laag ventilatiedebiet (150 m³/uur):

Toevoer van schone buitenlucht in de ruimte met een debiet van 150 m³/uur. Dit komt overeen met luchtdebiet-instellingen zoals in de praktijk werden waargenomen.

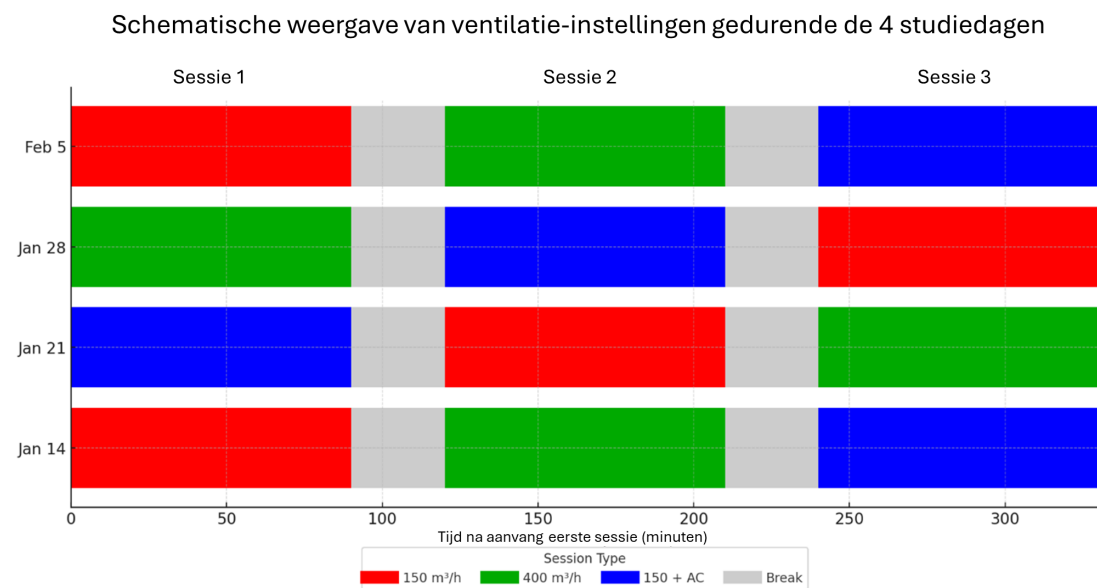
2. Laag ventilatiedebiet + mobiele luchtreiniger op basis van UV-C techniek (150 m³/uur + *air cleaner*; AC): Toevoer van schone buitenlucht in de ruimte met een debiet van 150 m³/uur. Daarnaast werd een mobiele luchtreiniger met 150W UV-C technologie in de ruimte geplaatst, bij de achterste wand. Deze luchtreiniger bevat tevens een stof- en HEPA-filter en heeft een capaciteit om 300 m³/uur te verwerken.

3. Hoger ventilatiedebiet (400 m³/uur):

Toevoer van schone buitenlucht in de ruimte met een debiet van 400 m³/uur. Deze setting komt overeen hoger ventilatiedebiet zoals wenselijk zou zijn in langdurige zorginstellingen waarbij de gehele ruimte circa vier maal per uur van schone lucht wordt voorzien (4 *air changes per hour*; ACH).

De volgorde van ventilatie-instellingen werd willekeurig toebedeeld tijdens de studiedagen om mogelijke effecten van dagritmepatronen tijdens de meetdag te verdisconteren. Zie figuur 2 voor een overzicht van de ventilatie-instellingen van de sessies gedurende de vier studiedagen in 2025 (14 januari, 21 januari, 28 januari en 5 februari). Elke sessie van 90 minuten waarin de deelnemers in de ruimte aanwezig waren werd gevolgd door een pauze van 60 minuten (in grijs weergegeven). Tijdens

de pauze werd de ruimte geschoond een HEPA filtratie mobiele luchtreiniger en het maximaal ventileren van de ruimte door maximale verhoging van het luchtdebiet in de ruimte.



Figuur 2. Schematisch overzicht van de volgorde van ventilatie-instellingen gedurende de studiedagen.

2.1.4 Deelnemers

Door middel van korte berichten op informatiezuilen en prikboards binnen de Faculteit Bouwkunde van de TU/e werden personen tussen de 18 en 65 jaar geattendeerd op de studie en gevraagd om als vrijwilliger deel te nemen. Potentiële deelnemers werd meer informatie verstrekt via e-mail, alvorens ze een beslissing namen over deelname.

Uitsluitingscriteria voor de studie waren leeftijd (jonger dan 18 of ouder dan 65 jaar), roken, het hebben van een chronische luchtwegaandoening (inclusief allergieën), of het hebben van gezichtsbeharings. Voorafgaand aan deelname vulden de deelnemers een korte screeningsvragenlijst in over deze items om deelnamecriteria te verifiëren. Uitsluiting van deelname op basis van recente luchtweginfectie in de drie dagen voorafgaand aan de studiedag werd op de testdag zelf beoordeeld en gedocumenteerd. De verkregen informatie werd verwijderd nadat het experiment was afgelopen.

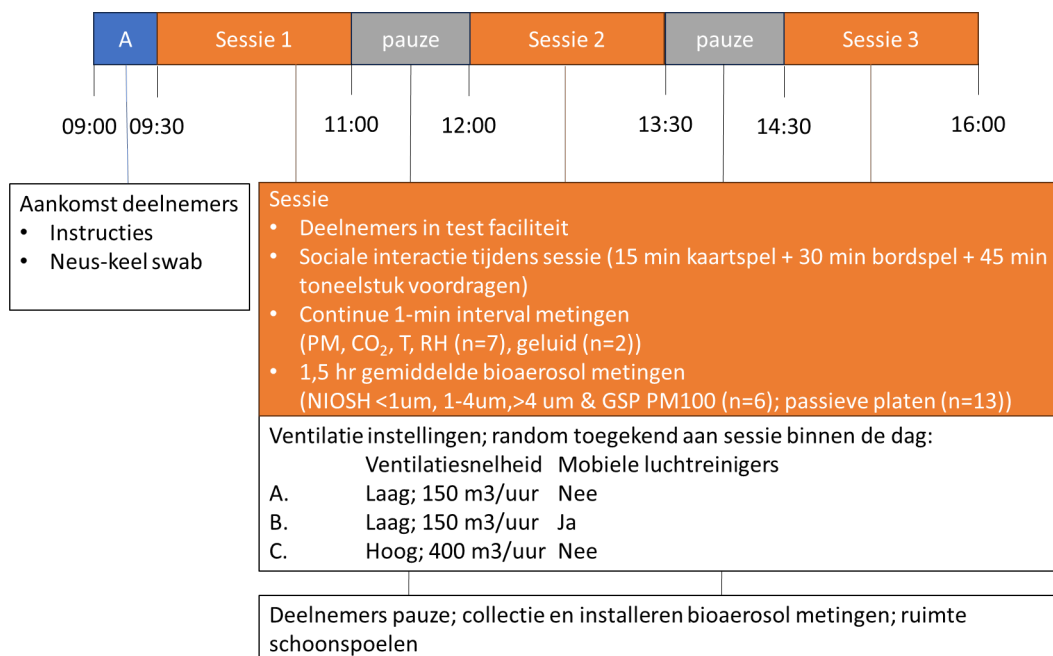
2.1.5 Activiteiten tijdens studiedag

Voorafgaand aan elke studiedag werden vier deelnemers uitgenodigd om naar de testfaciliteit te komen. Van elke deelnemer werd aan het begin van de dag een neus- en keeluitstrijkje afgenomen. Deze wattenstaafjes waren bedoeld om de aanwezigheid en concentratie van een aantal goed meetbare bacteriën te schatten. Er werd geen medische interpretatie of diagnose uitgevoerd.

Deelnemers droegen een polypropyleen overall, polyethyleen haarnetje en polyethyleen overschoenen (Romed, van Oostveen Medicalcs BV) tijdens de sessies om aerosolisatie van deeltjes van kleding,

haren en schoenen te minimaliseren, aangezien het onderzoek is gericht op het detecteren van respiratoire bio-aerosolen.

Gedurende iedere 1,5 uur durende sessie in de onderzoeksfaciliteit per studiedag zaten de deelnemers rond de tafel in de ruimte, en voerden gestructureerde sociale interactie-activiteiten uit. Ze speelden 15 minuten lang het kaartspel "Uno", gevolgd door 30 minuten het bordspel "Wie, Wat, Hoe" en sloten af met een 45 minuten durende voordracht van het toneelstuk "Lang en Gelukkig" waarbij de rollen verdeeld werden over alle personen in de ruimte. De activiteiten werden geleid door één van de onderzoekers die eveneens de gehele tijd in de ruimte aan de tafel gezeten was en meedeed bij de activiteiten. Het totaal aantal personen in de ruimte betrof vijf personen tijdens drie van de vier studiedagen, en vier personen tijdens één studiedag. Figuur 3 geeft een schematisch overzicht van de activiteiten gedurende een studiedag. Tabel 1 geeft een overzicht van deelnemers gedurende de studiedagen. Figuur 4 illustreert de opstelling van de deelnemers en de meetapparatuur in de ruimte.



Figuur 3. Schematisch overzicht van de activiteiten op een testdag.

Tabel 1. Overzicht van aanwezigheid van de verschillende deelnemers tijdens de vier studiedagen. Eén van de deelnemers aangeduid met een * betref de onderzoeker die de sociale interactie tijdens de sessies leidde.

Deelnemers-ID	Dag 1 Jan 14	Dag 2 Jan 21	Dag 3 Jan 28	Dag 4 Feb 5
A*	X	X	X	X
B				X
C			X	X
D	X	X	X	X
E	X	X		
F	X	X		
G	X		X	
H			X	X
Totaal deelnemers	5	4	5	5



Figuur 4. Impressie van de metingen met vrijwilligers in de testfaciliteit. De zwarte kokers representeren additionele warmtebronnen.

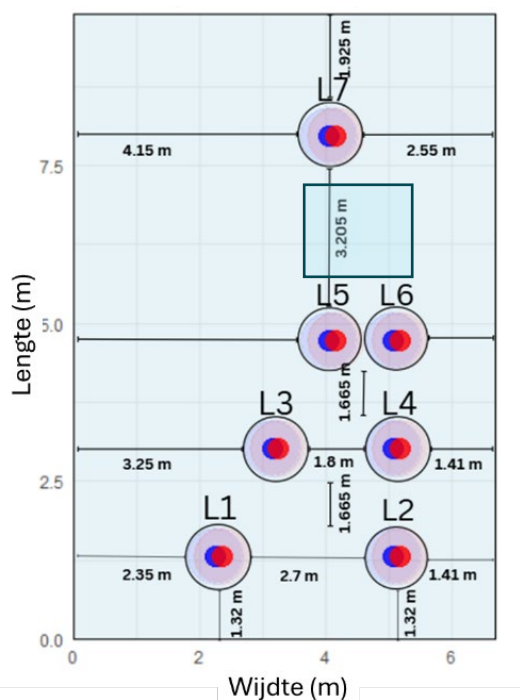
2.2 Instrumentatie en meetmethoden

2.2.1 Instrumentatie en bemonsteringsopstelling

De volgende meetopstellingen werden in de ruimte opgesteld en op 1,2 m hoogte geïnstalleerd om de blootstelling in de ademzone van zittende personen te simuleren.

Deeltjes- en omgevingsmonitoren:

- Grimm optische deeltjesmonitoren:** Zeven Grimm11D deeltjesmonitoren (Grimm aerosol technologies, Durag group, Hamburg, Duitsland) bepaalden het aantal deeltjes tussen 0,25 en 35 μm grootte in 31 klassen, en de massaconcentraties PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$, PM_{10} , en totaal stofdeeltjes (total suspended particles (TSP)) in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ met één minuut interval. Hun posities omvatten zowel perimeter- als centrale locaties (zie figuur 5).
- Omgevingsomstandigheden-sensoren:** In de nabijheid van elk van de zeven Grimms werden Vaisala sensoren (Vaisala, Hamburg, Duitsland) geplaatst die CO_2 (ppm), temperatuur ($^{\circ}\text{C}$) en relatieve luchtvochtigheid (%) bepaalden met een minuut interval om de binnenlucht-omgevingscondities in de kamer op verschillende locaties te monitoren.



Figuur 5. Parametrisering van de locaties van de zeven Grimm deeltjesmonitoren (in blauw) en Vaisala-omgevingsensoren (in rood) in de ruimte van de testfaciliteit. De tafel waar de deelnemers aan plaatsnamen is schematisch weergegeven.

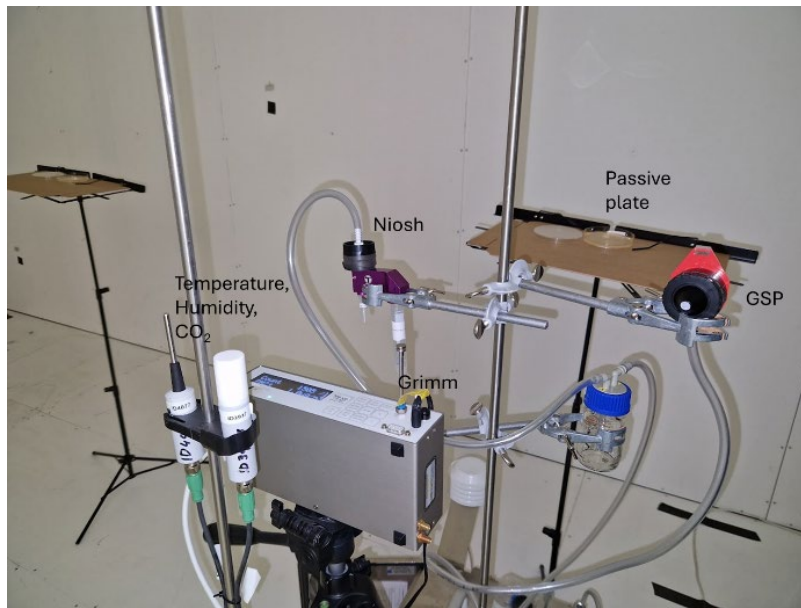
Bio-aerosolen:

- a. **NIOSH bioaerosol samplers:** een zestal TE-BC251 NIOSH Bioaerosol Cycloon samplers (Tisch Environmental, Cleves, USA) werd opgesteld in de nabijheid van de Grimm monitors locaties L1 tot en met L6 (zie figuur 5) met een offset $\pm 0,3$ m. Hiermee werden aerosolen in drie groottefracties bemonsterd, te weten aerosolen van $4 \mu\text{m}$ en groter in een 15ml Greiner buis die 2 ml fysiologisch zout bevatte, aerosolen van 1 tot $4 \mu\text{m}$ grootte in een 2ml buis welke 1,4 ml fysiologisch zout bevatte, en aerosolen van $1 \mu\text{m}$ en kleiner werden opgevangen op een Teflon filter (Pall PTFE $2.0 \mu\text{m}$ poresize with PMP ring; Pall Corporation, Ann Arbor, Michigan) bij een debiet van 3,5 liter per minuut (L/min). Monsternamen vond plaats gedurende de gehele 1,5 uur van elke sessie. Na monsternamen werden de buizen en filterkoppen opgeslagen in individuele zip-lock zakjes tot verwerking in het laboratorium de volgende ochtend, en werden de locaties voorzien van nieuwe samplers.
- b. **GSP-koppen:** Aerosolen in de inhaleerbaar stof fractie (mediane aerodynamische diameter van $100 \mu\text{m}$) werden bemonsterd op een Teflon filter (Pall PTFE $2.0 \mu\text{m}$ poresize with PMP ring; Pall Corporation, Ann Arbor, Michigan) bij een debiet van 3,5 liter per minuut (L/min) met behulp van GSP-filterkoppen (Gesamtstaub-Probenahmesystem, variant CIS, JS Holdings, Stevenage, UK). De GSP monsternamen apparatuur werd geplaatst nabij de locaties 1 tot en met 6 (offset $\pm 0,3$ m). Monsternamen vond plaats gedurende de gehele 1,5 uur van elke sessie. Na monsternamen werden de filterkoppen opgeslagen in individuele zip-lock zakjes tot verwerking in het laboratorium de volgende ochtend.
- c. **Passieve platen:** Dertien petri-schalen met daarin trytone soy agar (TSA) werden over de ruimte verdeeld geplaatst rekening houdend met positie van de deelnemers, de andere meetopstellingen en de ventilatie-layout. De TSA platen werden aan de lucht blootgesteld gedurende de gehele 1,5 uur duur van een sessie. Aerosolen werden hiermee via sedimentatie of luchtstromen op de voedingsbodem bemonsterd. Het TSA groeimedium is een algemeen medium voor de kweek van bacteriën. Na monsternamen werden de platen per sessie in een plastic zak verpakt en opgeslagen tot verwerking in het laboratorium dezelfde avond.

Alle instrumenten werden voorafgaand aan elke studiedag gekalibreerd. Samplerdebieten van de NIOSH en GSP werden geverifieerd en alle filters, buizen en platen werden vooraf geladen en gelabeld om verwerkingsfouten te minimaliseren. Veldblanco's werden verzameld om achtergrondcontaminatie van bioaerosolen te bepalen. Hierbij werden alle handelingen hetzelfde uitgevoerd als voor gewone monsternamen maar zonder luchtblootstelling. In figuur 6 is een detailbeeld van de meetopstellingen weergegeven.

Akoestische bewaking:

Een Extech-geluidsniveaumeter werd centraal geplaatst op de tafel met daaraan de deelnemers. Deze registreerde met 2-minuut intervallen de geluidsniveaus tijdens alle sessies om post-hoc beoordeling van de geluidsproductie ten tijde van elke sessie en elk ventilatiescenario mogelijk te maken.



Figuur 6 Close-up van de verschillende meetopstellingen.

2.2.2 Analyse van bioaerosolen

2.2.2.1 Kweek

Passieve platen

De passieve platen werden in de avond na terugkomst in het laboratorium in een stoof geplaatst en gedurende 40 uur geïncubeerd bij 37 °C, waarna waarneming van groei van bacteriën (ja/nee) en het aantal bacteriekolonies op de plaat gedocumenteerd werd.

NIOSH

Van de fysiologisch zoutoplossing in de 2ml en 15ml buizen van de NIOSH sampler werd na schudden op een vortexer respectievelijk 0,8 ml en 1 ml aangebracht op een Aerobic Count Petrifilm (Neogen, Lansing, UK). Het filter werd met steriele pincetten overgebracht in een 5ml buis (Eppendorf BV, Nijmegen, NL) waarna 2 ml fysiologisch zout oplossing werd toegevoegd, gevolgd door 5 minuten schudden op een vortexer. Hierna werd een deel van de vloeistof, 1 ml, aangebracht op een Aerobic Count Petrifilm (Neogen, Lansing, USA). De petrifilms werden gedurende 48 uur geïncubeerd in een stoof bij 37 °C, waarna waarneming van groei van bacteriën (ja/nee) en het aantal bacteriën werd gedocumenteerd.

2.2.2.2 DNA extractie en moleculaire analyse

DNA extractie

NIOSH

Het restant van de fysiologisch zoutoplossing van de samples werd 1:1 gemengd met lysisbuffer (LGC, Biosearch technologies, Middlesex, UK) en bij -80 °C opgeslagen tot verdere DNA extractie volgens gemodificeerd LGC (LGC Biosearch technologies, Middlesex, UK) extractie protocol, zoals beschreven in

Fakunle e.a. (2023). In het kort, respectievelijk 800 µl (filter en 15ml buis) en 400 µl (2ml buis) van de oplossing werd verhit (95 °C, 10 min) en daarna gemengd met 1300 µl bindingsbuffer en magnetische beads. Na incubatie (30 min, 800 rpm, kamertemperatuur) en magnetische scheiding werd het pellet achtereenvolgens gewassen met wasbuffer I en II. Na drogen van de beads bij 55 °C werd het DNA geëluëerd in 100 µl elutiebuffer en opgeslagen bij -80 °C.

GSP

Het filter uit de GSP kop werd met steriele pincetten overgebracht in een 5ml buis (Eppendorf BV, Nijmegen, NL) waarna 1 ml Dulbecco's fosfaat gebufferde zoutoplossing (Gibco, Thermofisher Scientific) en 1 ml lysisbuffer (LGC) werd toegevoegd. Na 5 minuten schudden op een vortexer, werd 1 ml bij -80 °C opgeslagen tot verdere DNA extractie volgens gemodificeerd LGC (LGC Biosearch technologies, Middlesex, UK) extractieprotocol zoals hierboven beschreven.

Neus en keelwabs

Na verzamelen van neus en keelwabs werden deze direct in 2ml 1:1 oplossing van Dulbecco's fosfaat gebufferde zoutoplossing (Gibco, Thermofisher Scientific) en lysisbuffer (LGC) gebracht. De volgende ochtend werd na 5 minuten schudden met behulp van een vortexer, 1 ml van de vloeistof bij -80 °C opgeslagen tot verdere DNA extractie met 800 µl start volume volgens gemodificeerd LGC (LGC Biosearch technologies, Middlesex, UK) extractieprotocol zoals hierboven beschreven op een later tijdstip.

Moleculaire analyse

Samples werden met behulp van qPCR met een BioRAD CFX 384 (Biorad technologies) geanalyseerd op de targets 16SrRNA regio v3v4 als maat voor totaal bacteriële load, *Streptococcus salivarius* als maat voor orale bacteriën en *Staphylococcus epidermidis* als maat voor bacteriën afkomstig van de huid. De volgende primers werden gebruikt (Tabel 2).

Tabel 2. Beschrijving van gebruikte primersets ten behoeve van de detectie van bacteriële targets in qPCR.

Target (gen)	Primers	Sequentie	Referentie
Totaal bacteriën (16SrRNAv3v4)	forward	CCTACGGGAGGCAGCAG	Shahsavari (2016)
	reverse	GGACTACHVGGGTWTCTAAT	Caporaso (2010)
S.epidermidis (femA-SE)	forward	CAA CTC GAT GCA AAT CAG CAA	Chun (2016)
	reverse	GAA CCG CAT AGC TCC CTG C	Chun (2016)
	probe	[CY5] TAC TAC GCT GGT GGA ACT TCA AAT CGT TAT CG [BBQ650]	Chun (2016)
S.salivarius (gtfK)	forward	GAT GCC AAG GGT GAA GTT GT	Giampaoli (2012)
	reverse	GAG CCA TCA GGA TTC GTA GC	Giampaoli (2012)
	probe	[CY5] TGG CGA ACA GAC GAT CAA CGG [BBQ650]	Giampaoli (2012)

2.3 Dataverwerking en statistische analyse

2.3.1 Voorverwerking van gegevens

Aan alle minuutwaarden van deeltjes- en omgevingsmonitoring en de 2-minuut waarden van de geluidsmonitoren werd informatie over studiedag, sessie binnen de studiedag en ventilatie-condities gedurende de sessies toegevoegd aan de hand van datum en tijdstempel aanduidingen. De gegevens over alle studiedagen werden samengevoegd tot één gestandaardiseerde dataset.

Vergelijkbaar werd aan de uitslagen van de bioaerosol analyses van de passieve platen, NIOSH en GSP monsternamen-informatie over de studiedag, sessie en ventilatiecondities toegevoegd en samengevoegd tot één gestandaardiseerde dataset.

2.3.2 Statistische analyse

Een algemene indruk van de resultaten werd verkregen door de resultaten te visualiseren in boxplots, tijdserie-plots en barplots en beschrijvende statistiek met behulp van R en Rstudio (versie 4.3.2; R Core Team, 2023).

We voerden een zogenaamd mixed model analyse uit om het effect van factoren zoals ventilatie-condities op deeltjesconcentraties en omgevingscondities te onderzoeken. De analyse werd uitgevoerd in R (versie 4.3.2) met behulp van het nlme-pakket. Modelaanname werden gecontroleerd. Hierbij werden de gemiddelde trends voor ventilatiecondities verkregen rekening houdend met andere factoren (bv sessie en tijd) als additionele factoren, én rekening houdend dat metingen op dezelfde locaties meer op elkaar lijken (de random factor). Onderstaande model specificatie geeft het gehanteerde model weer:

$$y_{ijk} = \beta_0 + \beta_1 \text{Ventilatieconditie}_i + \beta_2 \text{Sessie}_j + \beta_3 \text{Tijd}_d + \mu_{\text{sensor}_k} + \epsilon_{ijk}$$

Waarbij :

y_{ijk} = concentratie van deeltjes of omgevingsmonitoring voor sensor k , ventilatie-conditie i , sessie j en tijdstip binnen sessie d ;

ventilatieconditie i = indicatoren ventilatiecondities (ref=150 m³ h, 150 m³/h + AC, 400 m³/h);

sessie $_j$ = indicatoren voor sessievolgorde binnen de dag (ref= sessie A, sessie B; sessie C);

tijd $_d$ = tijd binnen de sessie (minuten), die temporele trends binnen de sessie vastlegt;

sensor $_k$ = random intercept voor sensorlocatie k ;

ϵ_{ijk} = residuele fout.

3 RESULTATEN

3.1 Bio-aerosolen

3.1.1 Neus- en keelwabs

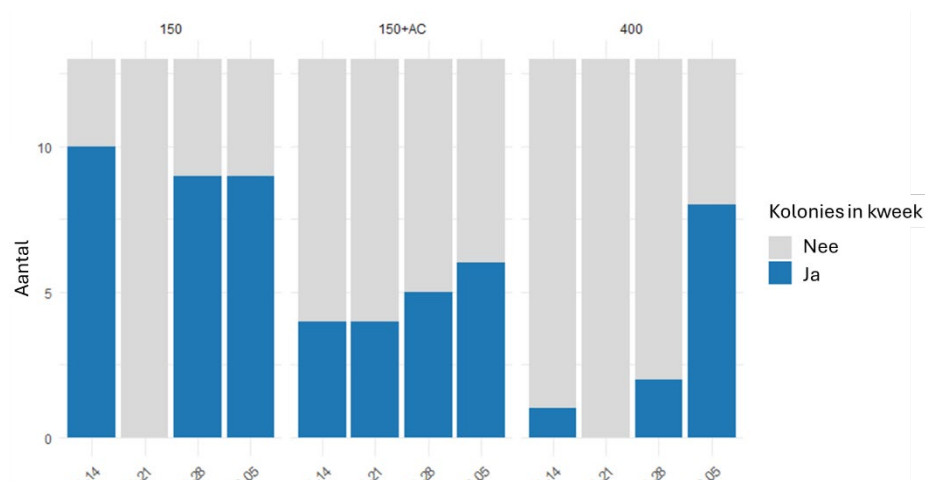
Alle neus- en keelwabs (n=19) testten positief op 16S rRNA wat een maat is voor de totale hoeveelheid bacterieel DNA in de samples. *S. salivarius* DNA werd wel in de keel- maar niet in neuswabs waargenomen, wat erop duidt dat deze bacterie een indicator is voor uit de keel afkomstige aerosolen. *S. epidermidis* DNA werd niet aangetroffen in de neus- en keelmonsters, wat niet onverwacht is omdat deze bacterie vaak op de huid aanwezig is. Deze uitslagen bevestigen dat specifieke bacteriën beschouwd worden als een indicator voor aerosolen afkomstig van de huid en keel zoals eerder beschreven door Piana et al. (2021).

3.1.2 Luchtmonstername

3.1.2.1 Kweek

Passieve platen

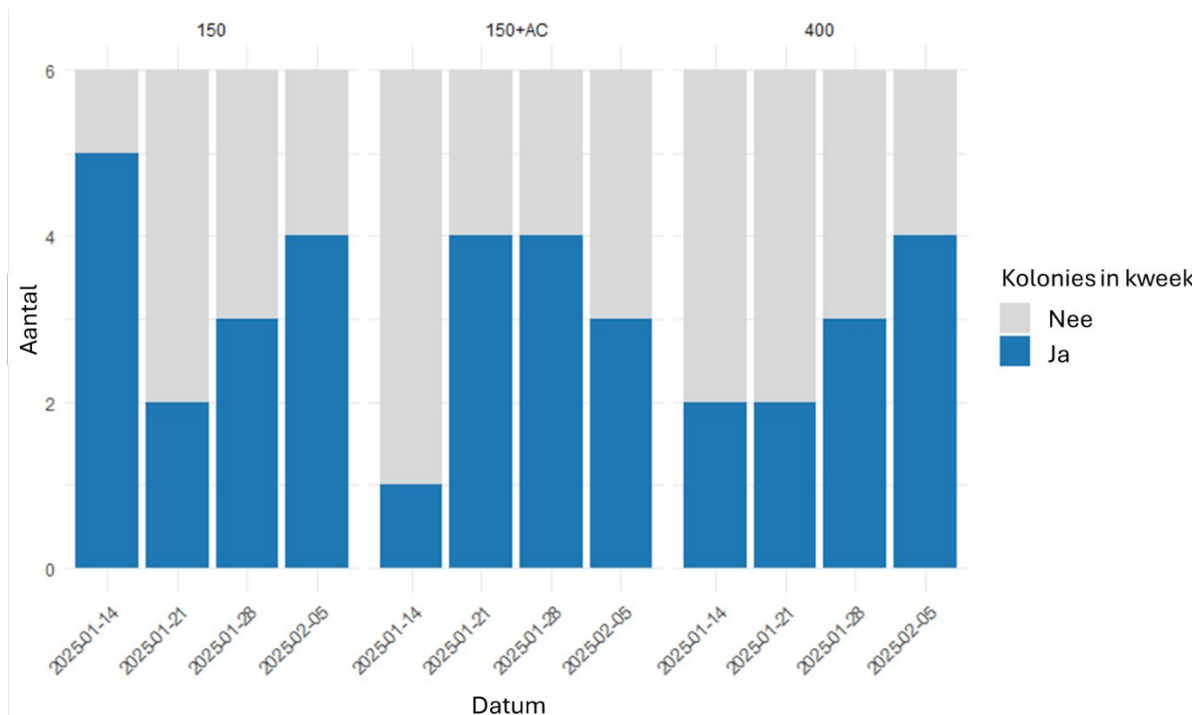
De hoeveelheid kweekbare bacteriën in de lucht zoals gemeten met de passieve platenmethode was laag, met slechts één of enkele bacteriekolonies per monsternameplaat. Het was daardoor niet mogelijk om een kwantitatieve analyse uit te voeren. Het aantal locaties waar bacteriën wel en niet na kweek aanwezig waren is gevisualiseerd per studiedag en ventilatieconditie (Figuur 7). Ten opzichte van de metingen met een ventilatie van 150 m³/uur werden in het algemeen minder vaak levensvatbare bacteriën aangetroffen wanneer de ruimte geventileerd werd met een hoger ventilatiedebiet van 400 m³/uur, en wanneer bij een laag ventilatiedebiet ook een mobiele luchtreiniger actief was in de ruimte. Dit duidt erop dat bio-aerosolconcentraties in de lucht verlaagd kunnen worden door inbreng van meer schone lucht. Ook toepassen van de luchtreiniger met UV-C en HEPA filtratie lijkt de bacterie hoeveelheden te verminderen.



Figuur 7. Waarneming van bacteriegroei (ja/nee) op de passieve platen in de ruimte uitgesplitst naar studiedag en ventilatie-instelling.

NIOSH

De hoeveelheid kweekbare bacteriën in de lucht zoals gemeten met de NIOSH methode was eveneens laag met slechts één of enkele bacteriekolonies per kweek. Het was daardoor niet mogelijk om een kwantitatieve analyse uit te voeren, en is alleen kwalitatief het effect van ventilatiecondities onderzocht. Er was geen duidelijk onderscheid waarneembaar in de hoeveelheid locaties waar bacteriën in de kweek voorkwamen tussen de geteste ventilatiecondities (Figuur 8).



Figuur 8. Waarneming van bacteriegroei (ja/nee) in de NIOSH samples uitgesplitst naar studiedag en ventilatie-instelling.

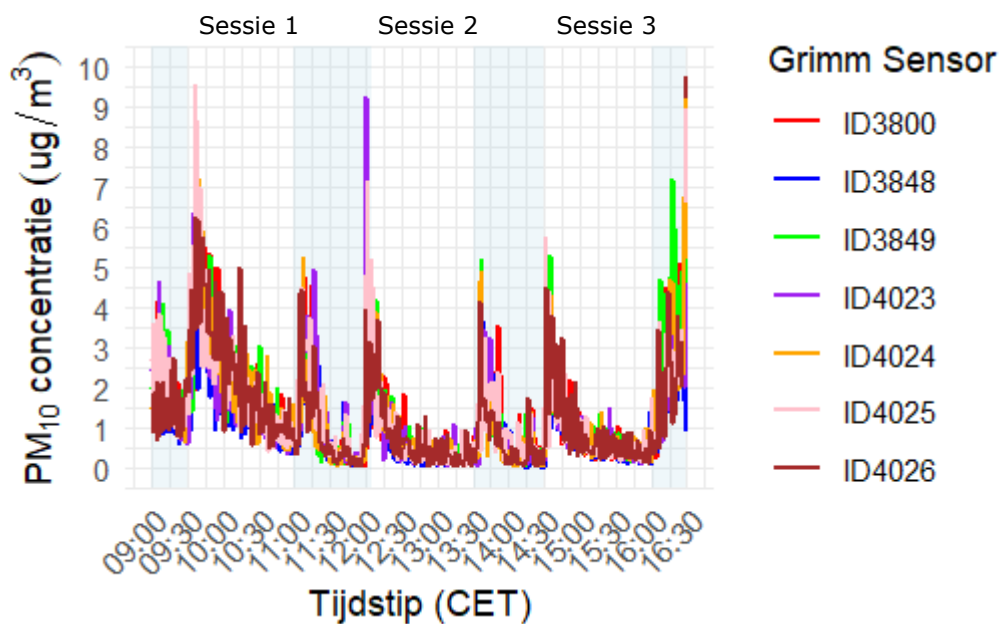
3.1.2.2 Moleculaire detectie

In geen van de ruim 200 geanalyseerde samples verkregen met actieve luchtmonsternamen (NIOSH en GSP monsternamen) werd *S. salivarius* aangetoond met moleculaire analyse. *S. epidermidis* was aantoonbaar in minder dan 10% van de samples. De hoeveelheid totaal bacterieel DNA in de samples was niet te onderscheiden van de altijd aanwezige achtergrondbelasting zoals bepaald met behulp van veldblanco's. Dit is in lijn met het lage aantal bacteriën in de kweek van de passieve monsternamenplaten en de NIOSH samples. Een nadere analyse met deze resultaten was niet mogelijk.

3.2 Deeltjes- en omgevingsmetingen

3.2.1 Piekwaarden na aanvang

Bij visualisatie van de deeltjesmetingen zoals verkregen met de Grimm bleek dat hoge pieken waargenomen werden bij aanvang van de sessies tijdens een studiedag. Dit had waarschijnlijk te maken met het openen van de deuren van de afgesloten ruimte, en de beweging en wervelingen als gevolg van het betreden van de deelnemers en onderzoekers in de ruimte. Ter illustratie is het verloop over de tijd van PM₁₀ concentraties in de lucht op een studiedag weergegeven in figuur 9. Te zien is dat de PM₁₀ concentraties pieken bij het begin van de sessie om daarna af te nemen en min of meer te stabiliseren. De verdere statistische data-analyse werd daarom beperkt tot de observaties verkregen gedurende de laatste 30 minuten van elke sessie, om de invloed van pieken die optraden na aanvang van de sessie uit te sluiten.

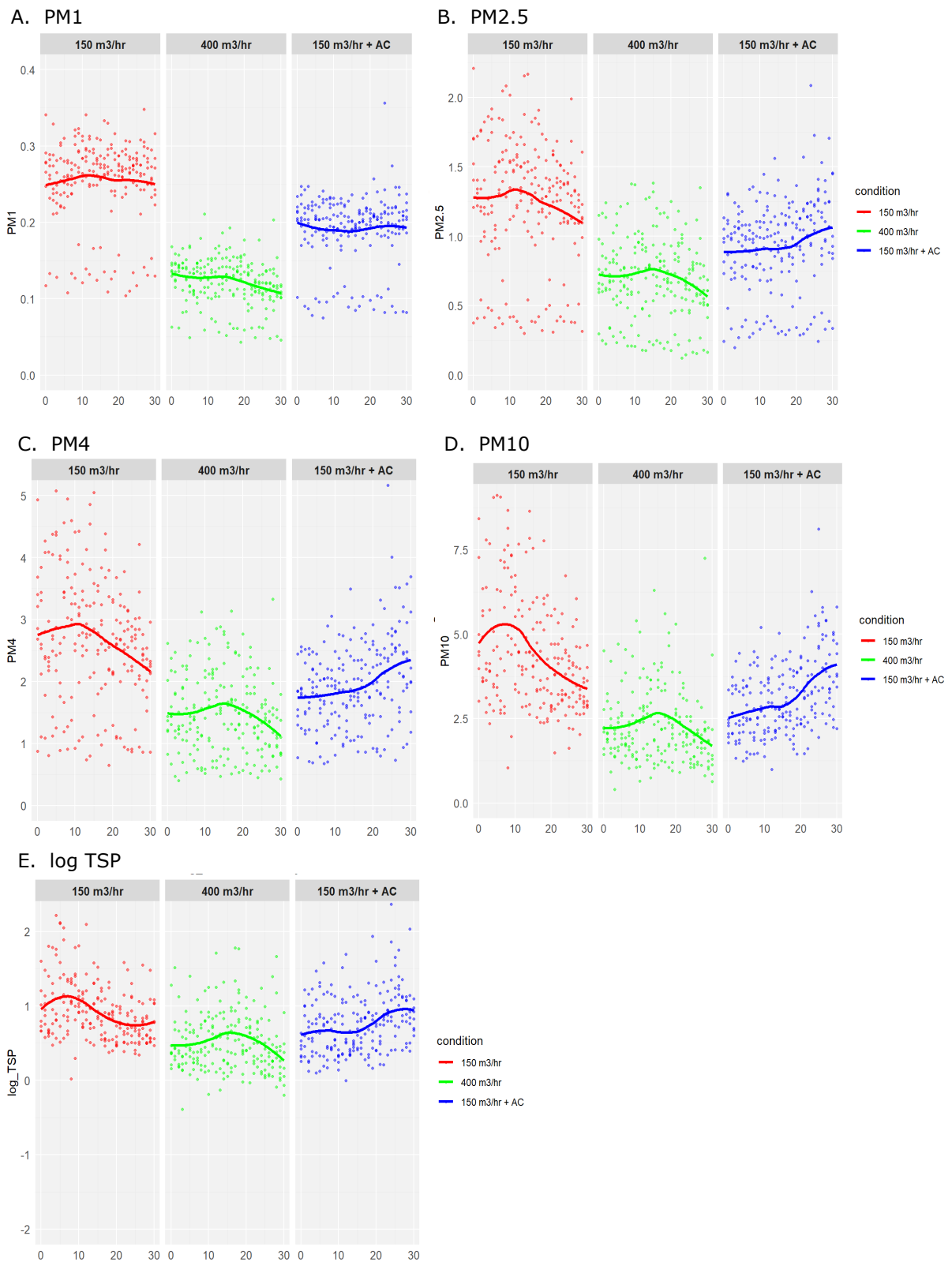


Figuur 9. Verloop over de tijd van Grimm PM₁₀ concentraties op de 7 locaties in de ruimte. De tijd voor aanvang, tussen en na afloop van de sessies met de deelnemers in de ruimte zijn met een gekleurde achtergrond aangeduid. Hoge piekconcentraties worden waargenomen bij aanvang en na afloop van de sessie wanneer deelnemers de ruimte betreden en/of verlaten.

3.2.2 Tijdtrend en boxplots gefilterde data

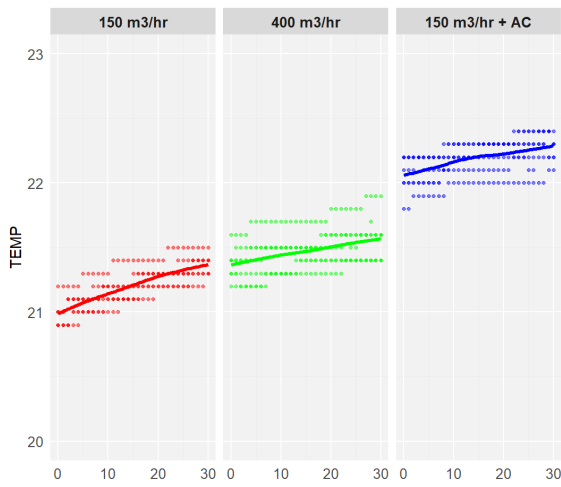
De plots van de tijdtrends van deeltjesconcentraties over de laatste 30 minuten van elke opeenvolgende sessie (Figuur 10; hier getoond voor studiedag 5 februari) bevestigen dat er na filtering geen hoge pieken meer in de data analyse werden betrokken. De temperatuur in de ruimte nam met circa 1 graad toe over de loop van de studiedag, terwijl de luchtvochtigheid constant bleef. CO₂

concentraties varieerden afhankelijk van de ventilatiecondities (Figuur 11; hier getoond voor studiedag 5 februari, zie bijlage A voor alle studiedagen).

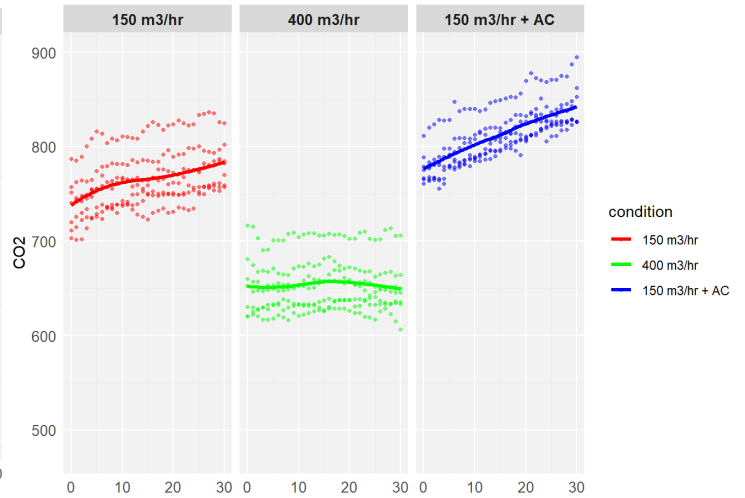


Figuur 10. Verloop over de tijd van deeltjesconcentraties voor de laatste 30 minuten van een sessie binnen een studiedag. Gegevens zijn weergegeven voor 5 februari 2025. Alle deeltjesconcentraties zijn weergegeven in µg/m³.

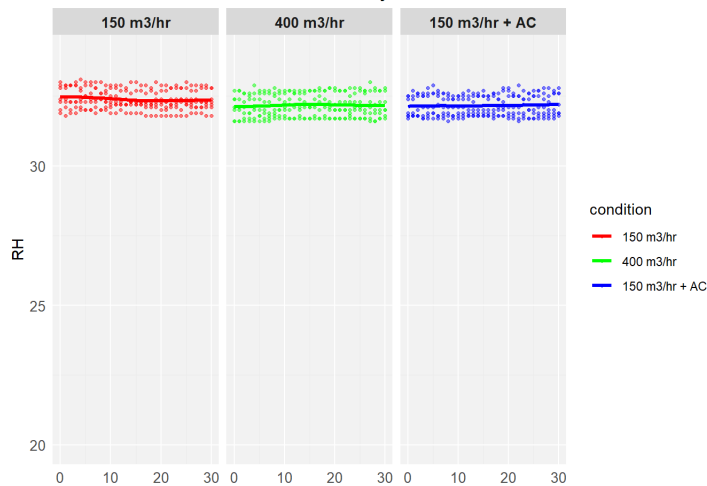
A. Temperatuur



B. CO₂

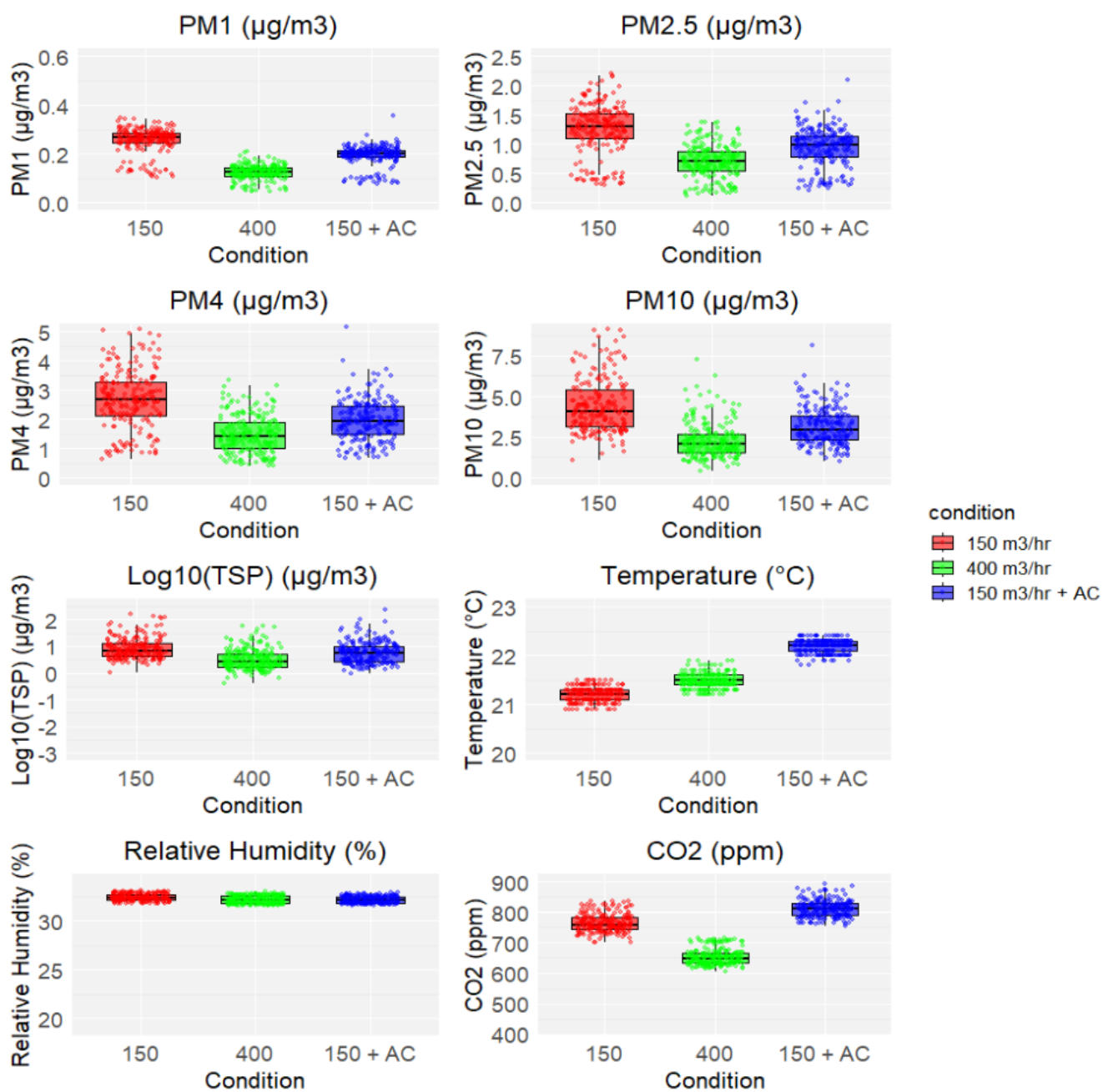


C. Relatieve luchtvochtigheid



Figuur 11. Verloop over de tijd van omgevingscondities voor de laatste 30 minuten van een sessie binnen een studiedag. Gegevens zijn weergegeven voor 5 februari 2025. A. temperatuur in graden Celsius, B. CO₂ in ppm en C. relatieve luchtvochtigheid in %.

In het algemeen werden de laagste deeltjesconcentraties waargenomen wanneer het ventilatiedebiet 400 m³/uur bedroeg, en de hoogste wanneer het ventilatiedebiet 150 m³/uur bedroeg (Figuur 10 & 12). Kooldioxide concentraties in de ruimte waren het laagst wanneer het ventilatiedebiet 400 m³/uur bedraagt. Het verschil in temperatuur in de ruimte met de ventilatiecondities werd mogelijk veroorzaakt door een toename van temperatuur gedurende de studiedag. In een nadere analyse van de gegevens van alle studiedagen tegelijkertijd werd hiervoor gecorrigeerd.



Figuur 12. Boxplots van deeltjesconcentraties in omgevingscondities in de ruimte uitgesplitst naar ventilatie-instellingen gedurende de studiedag. De gegevens voor de studiedag van 5 februari 2025 zijn weergegeven.

3.2.3 Mixed model analyse

Met behulp van mixed model analyse werd verder statistisch onderbouwd inzicht verkregen in de algemene trend van variaties in ventilatie-instellingen op de deeltjesconcentraties en omgevingscondities in de ruimte over de vier studiedagen heen, waarbij rekening gehouden werd met mogelijk andere storende variabelen zoals tijdtrends binnen de studiedag en binnen sessies. Met de mobiele luchtreiniger in de ruimte waren deeltjesconcentraties tussen 23% en 48% lager ten opzichte van wanneer er alleen geventileerd werd met een ventilatiedebiet van 150 m³/uur. Een hoger ventilatiedebiet van 400 m³/uur resulteerde in grotere afname van deeltjesconcentraties met veranderingen tussen 52% en 79%. Met oplopende deeltjesgrootteklassen werd het effect van de ventilatiecondities groter, behalve voor de allergrootste deeltjesklasse (totaal stof; verandering 57%). De omgevingstemperatuur en luchtvochtigheid waren niet verschillend tussen de geteste ventilatiecondities. Dit was in tegenstelling tot CO₂ concentraties die circa 20% verlaagd waren bij het hogere ventilatiedebiet van 400 m³/uur. Dit suggereert dat er netto meer CO₂ afgevoerd en/of verdund met schone lucht werd dan dat er CO₂ geproduceerd werd door de mensen in de ruimte. Deeltjesconcentraties en omgevingscondities waren in het algemeen niet betekenisvol verschillend tussen de monsternamelocaties in de ruimte met verschillen in de range van maximaal 10-15%.

Tabel 3. Mixed model effectschattingen voor de impact van ventilatiecondities op deeltjesconcentraties en omgevingscondities.

Modelschattingen zijn gecorrigeerd voor trends als gevolg van sessievolgorde binnen studiedag en tijd binnen sessie, en bevatte een random intercept voor sensor locatie.

	Ventilatieconditie #				
	150 m ³ /u (referentie) coëfficiënt $\beta_0 \pm SE$	150 m ³ /u + AC coëfficiënt β_{1a}		400 m ³ /u coëfficiënt β_{1b}	
			% verandering		% verandering
Deeltjesconcentraties					
PM ₁ (µg m ⁻³)	0,26 ± 0,01	- 0,06	-23 % *	- 0,14	-52 % *
PM _{2.5} (µg m ⁻³)	0,83 ± 0,06	- 0,31	-37 % *	- 0,58	-70 % *
PM ₄ (µg m ⁻³)	1,59 ± 0,11	- 0,69	-43 % *	- 1,22	-76 % *
PM ₁₀ (µg m ⁻³)	2,51 ± 0,13	- 1,22	-48 % *	- 2,01	-79 % *
log_TSP (log ₁₀ µg m ⁻³)	0,29 ± 0,04	- 0,34	-29 % *	- 0,85	-57 % *
Omgevingscondities					
CO ₂ (ppm)	720,7 ± 7,6	- 30,2	-4 %	- 160,3	-22 % *
Relatieve vochtigheid (%)	28,1 ± 0.22	- 0,19	0 %	- 1,25	-4 %
Temperatuur (°C)	20,8 ± 0.04	0,30	1 %	0,15	0 %

volledig model effectschatting: $Y = \beta_0 + \beta_1 \text{Ventilatiecondities} + \beta_2 \text{Sessie} + \beta_2 \text{Tijd} + \mu \text{Locatie} + \epsilon$

* significant $p < 0.05$

4 DISCUSSIE EN CONCLUSIES

Het hier beschreven experimentele onderzoek met mensen als bron van bioaerosolen in een testruimte werd uitgevoerd om te testen hoe verschillende mechanische ventilatiestrategieën presteren onder realistische en gecontroleerde omstandigheden. Het aantal bacteriën dat in luchtmonsters werd gemeten was laag met slechts één of enkele bacteriekolonies per monsternamen. In het overgrote deel van de ruim 200 geanalyseerde samples verkregen met actieve luchtmonsternamen werden geen bacteriële markers aangetoond met moleculaire analyse, waardoor het niet mogelijk was om een patroon van verspreiding of invloed van ventilatiecondities in de ruimte te onderzoeken. Met hogere ventilatieflow (400 m³/uur) én met een mobiele luchtreiniger zijn deeltjesconcentraties wel significant verlaagd ten opzichte van de lagere ventilatieflow (150 m³/uur). Hierbij gaat het om 'algemene' deeltjes en niet specifiek om (door mensen uitgeademde) bioaerosolen.

De onderzoeksopzet heeft een realistische situatie in de langdurige zorg gesimuleerd, waarbij het onderzoek uitging van de vraag of ventilatie kan bijdragen aan het verminderen van de kans dat mensen (in elkaars nabijheid, of verder weg in dezelfde ruimte) elkaar kunnen besmetten met een infectieus agens. De humane vrijwilligers hadden geen recente luchtwegklachten die zouden kunnen duiden op een luchtweginfectie. De onderzoekers richtten zich op algemene bioaerosolen die waarschijnlijk afkomstig zijn uit de luchtwegen, en die kunnen dienen als proxy voor respiratoire ziekteverwekkers. Ondanks de relatief lange periodes van anderhalf uur die de 4-5 vrijwilligers doorbrachten in de testruimte met gecontroleerde vocale activiteiten, waren de concentraties van bioaerosolen te laag om kwantitatief onderzoek uit te voeren. Resultaten laten daarmee zien dat het toevoegen van een veilige en realistische bioaerosol-component aan een dergelijk gecontroleerd experiment uitdagend is vanwege de lage concentratie onder normale omstandigheden. Hoewel waarschijnlijk grotere hoeveelheden bioaerosolen uitgescheiden worden ten tijde van luchtweginfecties, mede als gevolg van hoesten en niezen (Alsved e.a., 2022; Coleman e.a., 2022; Tan e.a. 2023), bleek ook uit eerder onderzoek bij infectieuze personen dat bioaerosolen in de lucht moeilijk gekwantificeerd kunnen worden (Thuresson e.a., 2022; Linde e.a., 2023; Niese e.a., 2025).

Deeltjesconcentraties bleken wel te verschillen tussen ventilatiecondities. Het is echter niet mogelijk om volledig uitsluitend te geven over de herkomst van deze deeltjes: deze zullen deels afkomstig zijn van de deelnemers (al dan niet respiratoir), maar andere bronnen van buiten de testruimte zijn ook niet uit te sluiten. Er werden beperkte verschillen in deeltjesconcentraties waargenomen tussen de meetlocaties in de testruimte (~ 10-15% verschil). Dit suggereert dat de aanwezigheid van vijf (zittende, niet lopende) personen in een ruimte geen grote impact heeft op ruimtelijke verschillen in deeltjesconcentraties. Bij de eerdere metingen met aerosolisatie van inerte deeltjes in dezelfde ruimte lijken grotere verschillen in deeltjesconcentraties tussen locaties op te treden (tot en met factor 2) (Rapportage PLIII -de Lange e.a. 2025). Dit kan mogelijk verklaard worden doordat de metingen na aerosolisatie van korte duur waren, en door de puntbron die vele malen hogere niveaus van inerte deeltjes emitteert ten opzichte van de vrijwilligers als bronnen die over een groter ruimteoppervlak, lagere en meer variabele niveaus emitteren. Ook kunnen luchtverplaatsingen als gevolg van personen

in de ruimte een rol spelen. Personen die weliswaar niet lopen, bewegen wel in enige mate en introduceren daarmee meer luchtverplaatsing. In het eerdere onderzoek in de testfaciliteit werd gevonden dat wanneer een ventilator aangezet werd in de ruimte de deeltjesconcentraties meer homogeen over de ruimte verspreiden (De Jonge e.a., 2025). Deze bevindingen laten daarmee ook zien dat het emitteren van inerte deeltjes uit een puntbron waarschijnlijk beperkt vergelijkbaar is met een werkelijke situatie waarin mensen respiratoire deeltjes verspreiden.

Het huidige experiment kende verschillende beperkingen. Vanwege ethische redenen werd gekozen om met gezonde vrijwilligers te werken die, voor zover bekend, geen actieve luchtweginfectie hadden tijdens het onderzoek. Dit beperkte de te onderzoeken bioaerosolen tot bekende algemene bacteriële markers, terwijl (infectieuze) virusdeeltjes mogelijk weer andere resultaten zouden kunnen geven. Tussen de vier meetdagen was er overlap tussen de deelnemers, maar idealiter zouden dezelfde vijf personen steeds zijn onderzocht om onbekende tussen-persoonsvariatie tussen dagen te voorkomen. Zo bleken geluidsniveaus niet gelijk voor de verschillende studiedagen en ventilatiecondities (zie Bijlage B). Aan het begin van een sessie, wanneer de vrijwilligers de ruimte betraden, bleken grote pieken in deeltjesconcentraties op te treden als gevolg van bewegingen van de deelnemers en het openen van de deur van de ruimte. Deze verstoring kon worden weggenomen door te focussen op het laatste half uur van de metingen tijdens de sessie. Dit beperkte echter het aantal bruikbare observaties en ook de variatie in activiteiten in de testruimte kon hierdoor niet verder worden onderzocht.

In het kader van pandemische paraatheid blijft het belangrijk om onderzoek uit te voeren onder realistische omstandigheden, om de evidentie rond het voorkomen van infecties door middel van ventilatie en/of luchtreiniging te versterken. De huidige studie suggereert dat bevindingen van empirisch onderzoek (de Lange e.a. 2025) mogelijk niet overeenkomen met die onder meer realistische omstandigheden. In een eerder literatuurreview concludeerden we al dat het toevoegen van een bioaerosol component in experimentele studies niet triviaal is. Het vernevelen van bioaerosolen in realistische omstandigheden is niet geaccepteerd, en het is daarbij ook de vraag of de karakteristieken van normale blootstelling gerepresenteerd worden (Wouters e.a., 2025). Het huidig onderzoek is vernieuwend door de realistische opzet, het gebruik van verschillende technieken om bioaerosolen te bepalen en het tegelijkertijd monitoren van deeltjesconcentraties en omgevingscondities. In een eerdere studie met influenzapatiënten werd bijvoorbeeld geen deeltjesmonitoring toegepast (Bueno de Mesquita e.a., 2020). De deeltjesmonitoring in de huidige studie geeft aanwijzingen voor aanbevelingen in toekomstige studies. Het onderzoek toont het belang van voorkómen van invloeden van buitenaf in de testruimte. In de toekomst zou dit mogelijk voorkomen kunnen worden door een sluis te installeren bij de ingang van de testruimte. Daarnaast zou het contrast in luchtconcentraties van deeltjes en bioaerosolen mogelijk vergroot kunnen worden door meer personen in het onderzoek te betrekken. De vraag is dan wel hoe realistisch een dergelijke gesimuleerde opstelling is qua bezetting van de ruimte vergeleken met een werkelijke situatie in een langdurige zorginstelling.

Conclusies

Het onderzoeken van bioaerosolen onder realistische omstandigheden is bijzonder waardevol, maar uitdagend. Hoewel de aandacht uitging naar een brede groep bacteriën in plaats van specifieke ziekteverwekkers (bacteriën of virussen), bleek het door de lage concentraties lastig om bioaerosolen direct aan te tonen. Toch laten metingen van deeltjesconcentraties wel zien dat ventilatiestrategieën invloed hebben, al was de exacte herkomst van deze deeltjes in de huidige studie niet met zekerheid vast te stellen. Voor toekomstig onderzoek is het aan te raden een sluis te gebruiken om externe invloeden beter te beheersen en daarnaast een groter aantal deelnemers in de studie op te nemen.

DANKWOORD

Grote dank gaat uit naar de deelnemers aan de studie zonder wie het onderzoek niet mogelijk geweest. Wij danken ook TU Eindhoven voor het beschikbaar stellen van de testfaciliteit en meetapparatuur, en de hulp bij opbouw en uitvoer van de metingen, met name Jan van Diepen, Rianne Luimes, Twan van Hooff en Marcel Loomans. Dank aan Monique Tersteeg-Zijdeveld, Ranem Alhaw en Hadassa van Hoorn van de Universiteit Utrecht voor de ondersteuning bij de verwerking en analyse van alle monsters in het laboratorium. Dank ook aan Anne Rittscher-Fogg, Madelief Goosens en Maartje Huitink van de Universiteit Utrecht voor hun bijdragen tijdens de ontwerpfase van het onderzoek.

Dit onderzoek werd gefinancierd door het programma Programma Pandemische Paraatheid door ventilatie (P3Venti).

5 REFERENTIES

Alsved M, Nygren D, Thuresson S, Medstrand P, Fraenkel CJ, Löndahl J. SARS-CoV-2 in Exhaled Aerosol Particles from COVID-19 Cases and Its Association to Household Transmission. *Clin Infect Dis*. 2022 Aug 24;75(1):e50-e56. doi: 10.1093/cid/ciac202.

Bueno de Mesquita PJ, Noakes CJ, Milton DK. Quantitative aerobiologic analysis of an influenza human challenge-transmission trial. *Indoor Air*. 2020 Nov;30(6):1189-1198. doi: 10.1111/ina.12701.

Caporaso JG, Lauber CL, Walters WA, Berg-Lyons D, Lozupone CA, Turnbaugh PJ, Fierer N, Knight R. Global patterns of 16S rRNA diversity at a depth of millions of sequences per sample. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2011 Mar 15;108 Suppl 1(Suppl 1):4516-22. doi: 10.1073/pnas.1000080107.

Chung Y, Kim TS, Min YG, Hong YJ, Park JS, Hwang SM, Song KH, Kim ES, Park KU, Kim HB, Song J, Kim EC. Usefulness of Multiplex Real-Time PCR for Simultaneous Pathogen Detection and Resistance Profiling of Staphylococcal Bacteremia. *Biomed Res Int*. 2016;2016:6913860. doi: 10.1155/2016/6913860.

Coleman KK, Tay DJW, Tan KS, Ong SWX, Than TS, Koh MH, Chin YQ, Nasir H, Mak TM, Chu JJH, Milton DK, Chow VTK, Tambyah PA, Chen M, Tham KW. Viral Load of Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 (SARS-CoV-2) in Respiratory Aerosols Emitted by Patients With Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) While Breathing, Talking, and Singing. *Clin Infect Dis*. 2022 May 30;74(10):1722-1728. doi: 10.1093/cid/ciab691.

Ding E, Bluysen PM, Feasibility of using mobile air cleaners in school classrooms to remove respiratory aerosols. *Environmental & Climate Design conference paper*, 2024

Fakunle AG, Jafta N, Bossers A, Wouters IM, Kersen WV, Naidoo RN, Smit LAM. Childhood lower respiratory tract infections linked to residential airborne bacterial and fungal microbiota. *Environ Res*. 2023 Aug 15;231(Pt 1):116063. doi: 10.1016/j.envres.2023.116063.

Giampaoli S, Berti A, Valeriani F, Gianfranceschi G, Piccolella A, Buggiotti L, Rapone C, Valentini A, Ripani L, Romano Spica V. Molecular identification of vaginal fluid by microbial signature. *Forensic Sci Int Genet*. 2012 Sep;6(5):559-64. doi: 10.1016/j.fsigen.2012.01.005.

Goodwin L, Hayward T, Krishan P, Nolan G, Nundy M, Ostrishko K, Attili A, Cárceles SB, Epelle EI, Gabl R, Pappa EJ, Stajuda M, Zen S, Dozier M, Anderson N, Viola IM, McQuillan R. Which factors influence the extent of indoor transmission of SARS-CoV-2? A rapid evidence review. *J Glob Health*. 2021 Apr 3;11:10002. doi: 10.7189/jogh.11.10002.

De Lange A, Kompatscher K. Resultaten Experimenteel onderzoek testfaciliteit Programmalijn III P3Venti Rapportage,2025, TNO 2025 R11868

Li Y, Leung GM, Tang JW, Yang X, Chao CY, Lin JZ, Lu JW, Nielsen PV, Niu J, Qian H, Sleigh AC, Su HJ, Sundell J, Wong TW, Yuen PL. Role of ventilation in airborne transmission of infectious agents in the built environment - a multidisciplinary systematic review. *Indoor Air*. 2007 Feb;17(1):2-18. doi: 10.1111/j.1600-0668.2006.00445.x.

Linde KJ, Wouters IM, Kluytmans JAJW, Kluytmans-van den Bergh MFQ, Pas SD, GeurtsvanKessel CH, Koopmans MPG, Meier M, Meijer P, Raben CR, Spithoven J, Tersteeg-Zijderveld MHG, Heederik DJJ, Dohmen W; COCON Consortium. Detection of SARS-CoV-2 in Air and on Surfaces in Rooms of Infected Nursing Home Residents. *Ann Work Expo Health*. 2023 Jan 12;67(1):129-140. doi: 10.1093/annweh/wxac056.

Morawska L, Cao J. Airborne transmission of SARS-CoV-2: The world should face the reality. *Environ Int*. 2020 Jun;139:105730. doi: 10.1016/j.envint.2020.105730.

Niese R, Vermeulen LC, Schipper M, Janse I, Verhoeven F, Boer AJ, Bartels A, Duizer E, de Roda Husman AM, Lokate M. Indoor Spreading and Infectivity of SARS-CoV-2 Detected in Air and on Surfaces After Speaking or Singing of Symptomatic Individuals. *Indoor air*. 2025 1: 4404220.

Piana A, Colucci ME, Valeriani F, Marcolongo A, Sotgiu G, Pasquarella C, Margarucci LM, Petrucca A, Gianfranceschi G, Babudieri S, Vitali P, D'Ermo G, Bizzarro A, De Maio F, Vitali M, Azara A, Romano F, Simmaco M, Romano Spica V. Monitoring COVID-19 Transmission Risks by Quantitative Real-Time PCR Tracing of Droplets in Hospital and Living Environments. *mSphere*. 2021 Jan 6;6(1):e01070-20. doi: 10.1128/mSphere.01070-20.

R Core Team (2023). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Beschikbaar via: <https://www.R-project.org/>

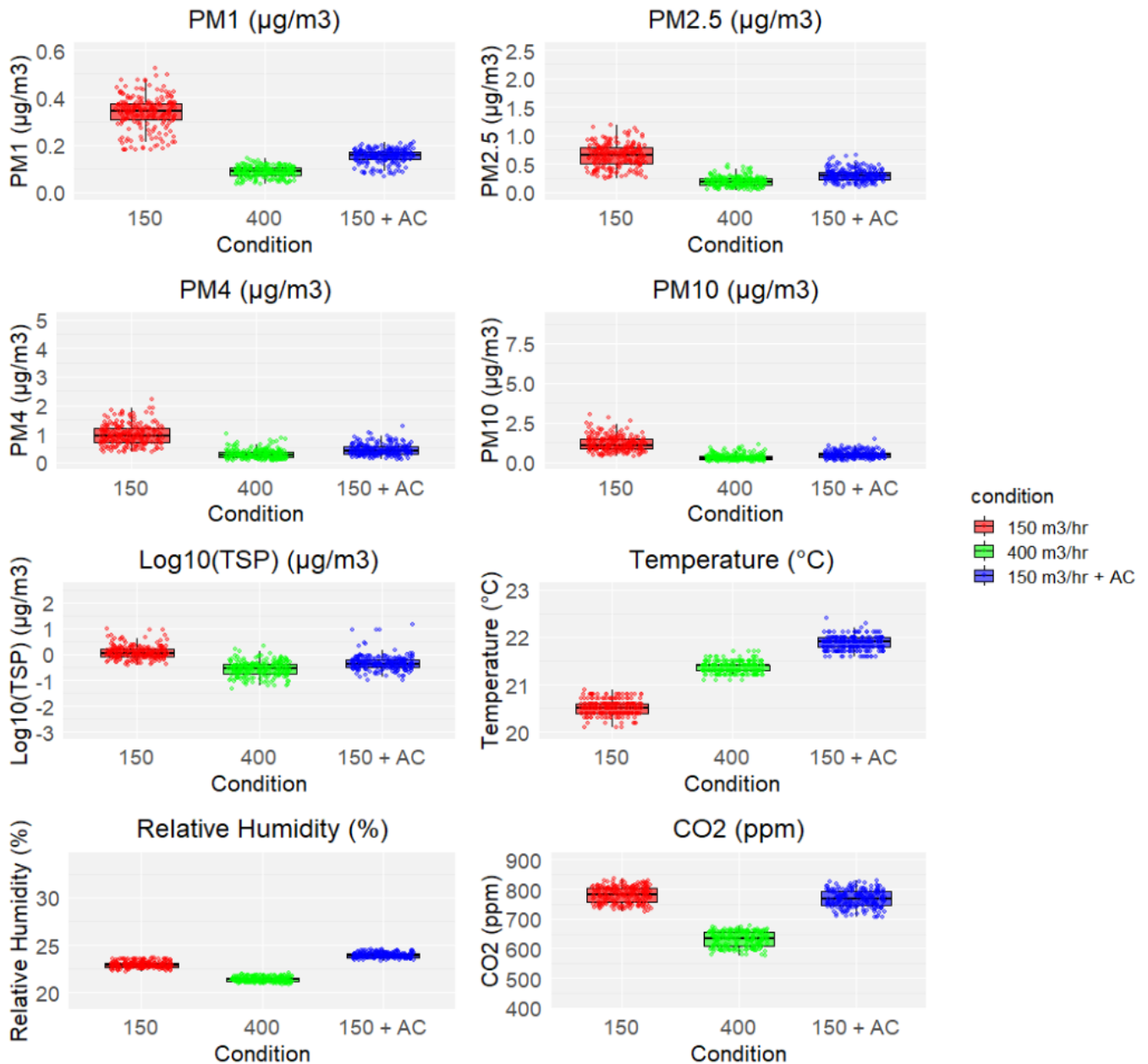
Shahsavari E, Aburto-Medina A, Taha M, Ball AS. A quantitative PCR approach for quantification of functional genes involved in the degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in contaminated soils. *MethodsX*. 2016 Mar 9;3:205-11. doi: 10.1016/j.mex.2016.02.005.

Thuresson S, Fraenkel CJ, Sasinovich S, Soldemyr J, Widell A, Medstrand P, Alsved M, Löndahl J. Airborne Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 (SARS-CoV-2) in Hospitals: Effects of Aerosol-Generating Procedures, HEPA-Filtration Units, Patient Viral Load, and Physical Distance. *Clin Infect Dis*. 2022 Aug 24;75(1):e89-e96. doi: 10.1093/cid/ciac161.

Wouters IM, Rittscher-Fogg A, Smit LAM. Literatuurstudie: Overzicht van methoden om blootstelling aan in de lucht verspreide biologische deeltjes te evalueren in gesimuleerde realistische omgevingen. P3venti rapportage 2025.

BIJLAGE A – OVERZICHTSPLOTS DEELTJESCONCENTRATIES EN OMGEVINGSCONDITIES PER STUDIEDAG

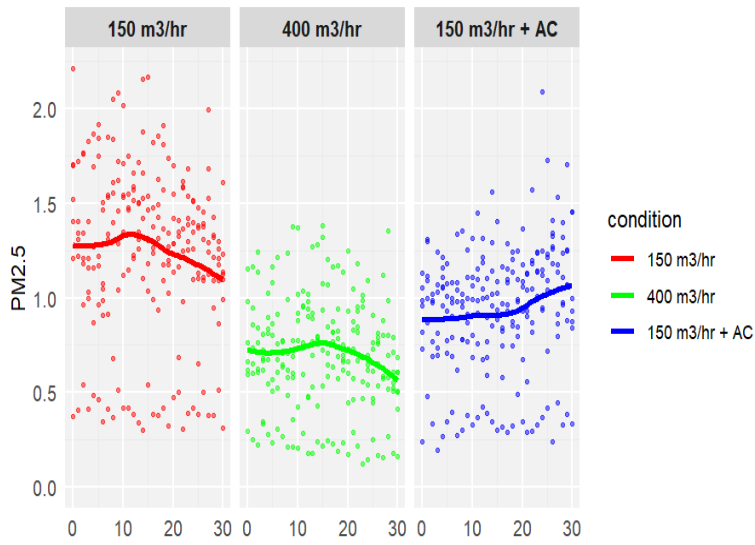
Resultaten – 14 januari 2025



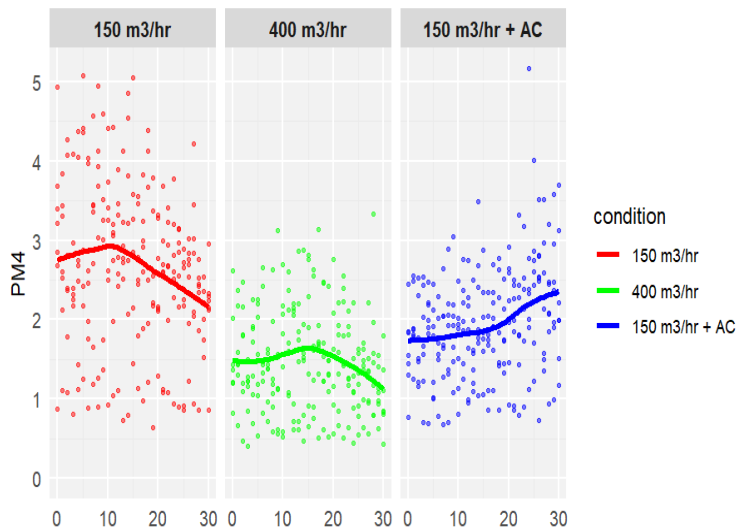
Boxplots

Tijd Trend Plot – PM Concentraties

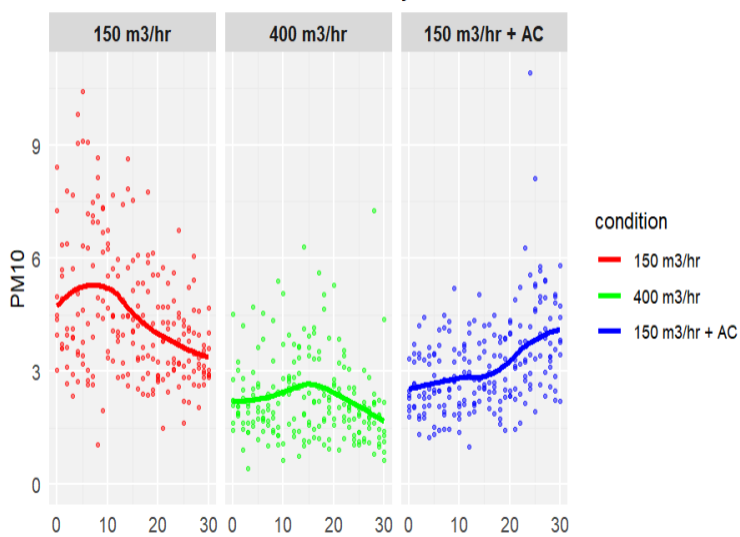
Distribution of PM2.5 Over Time by Condition



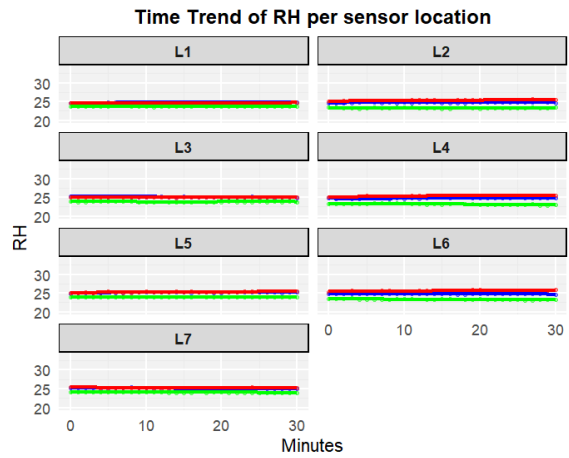
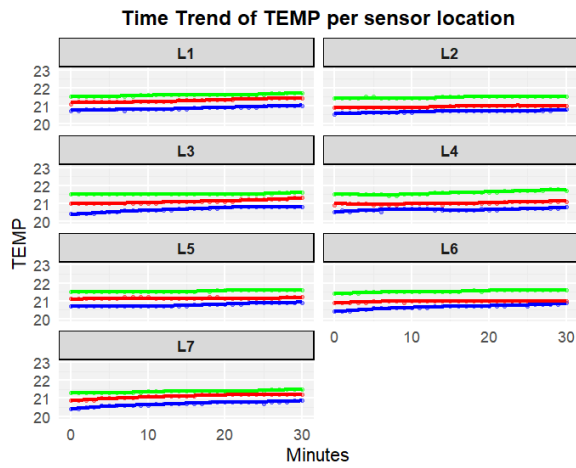
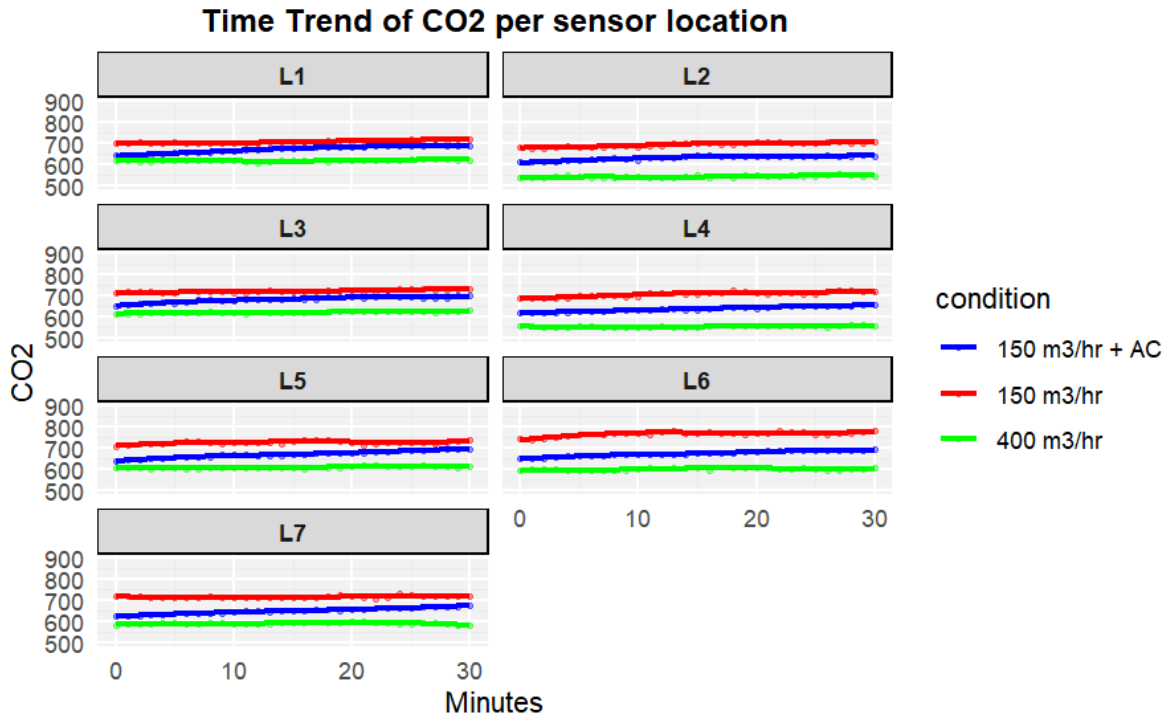
Distribution of PM4 Over Time by Condition



Distribution of PM10 Over Time by Condition

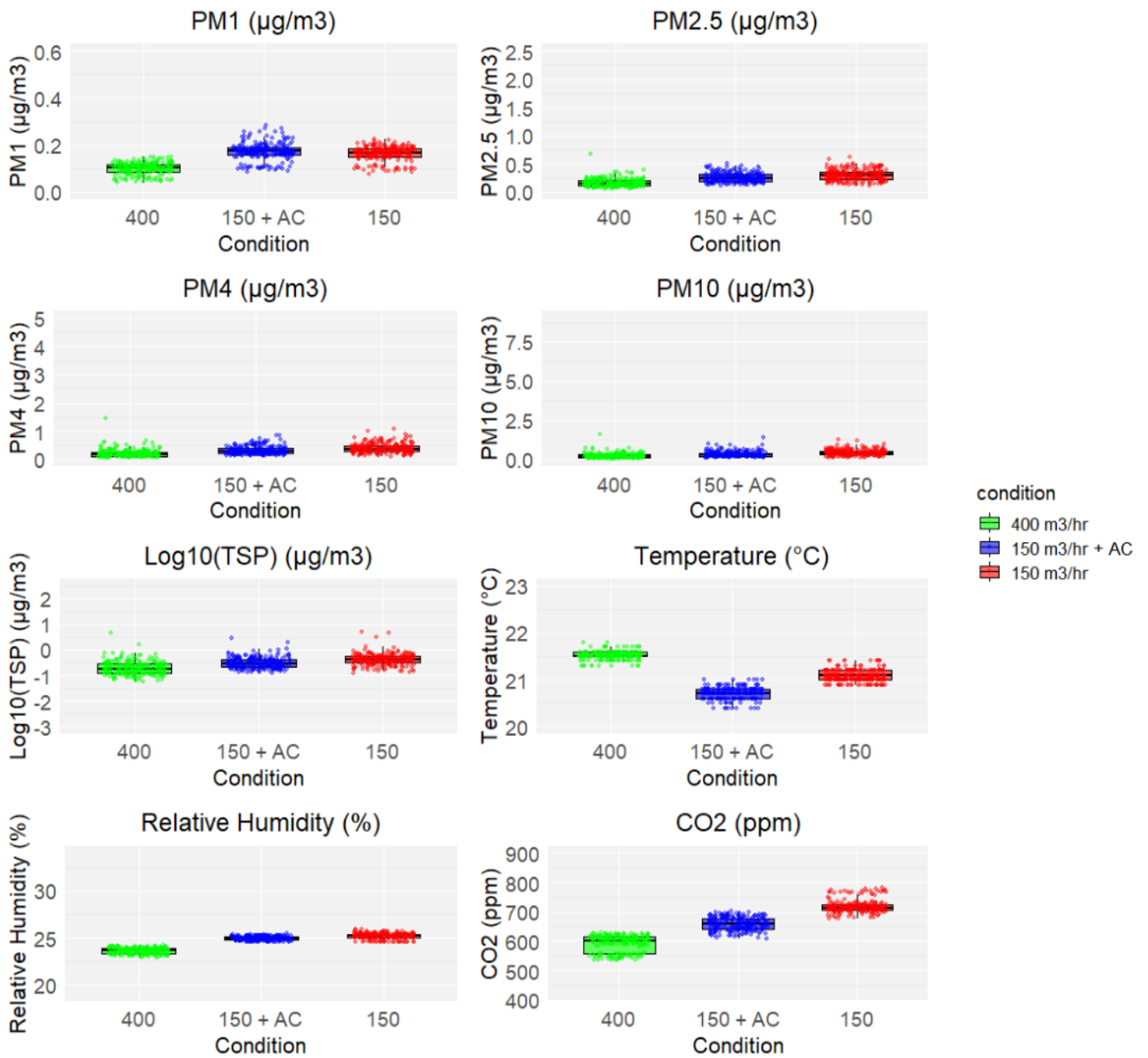


Tijdtrendgrafiek – omgevingsomstandigheden (CO₂, temperatuur, RV)

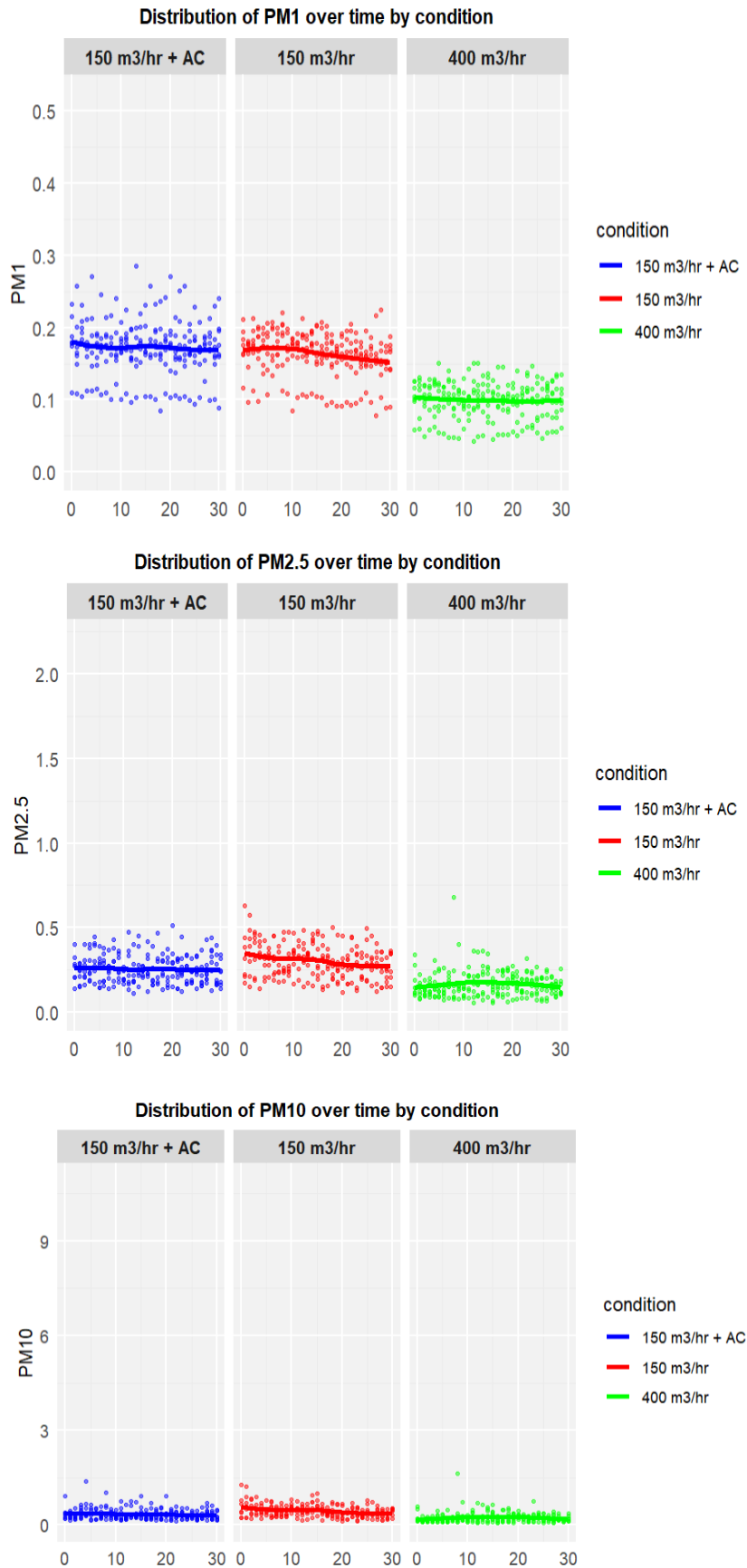


Resultaten – 21 januari 2025

Boxplots

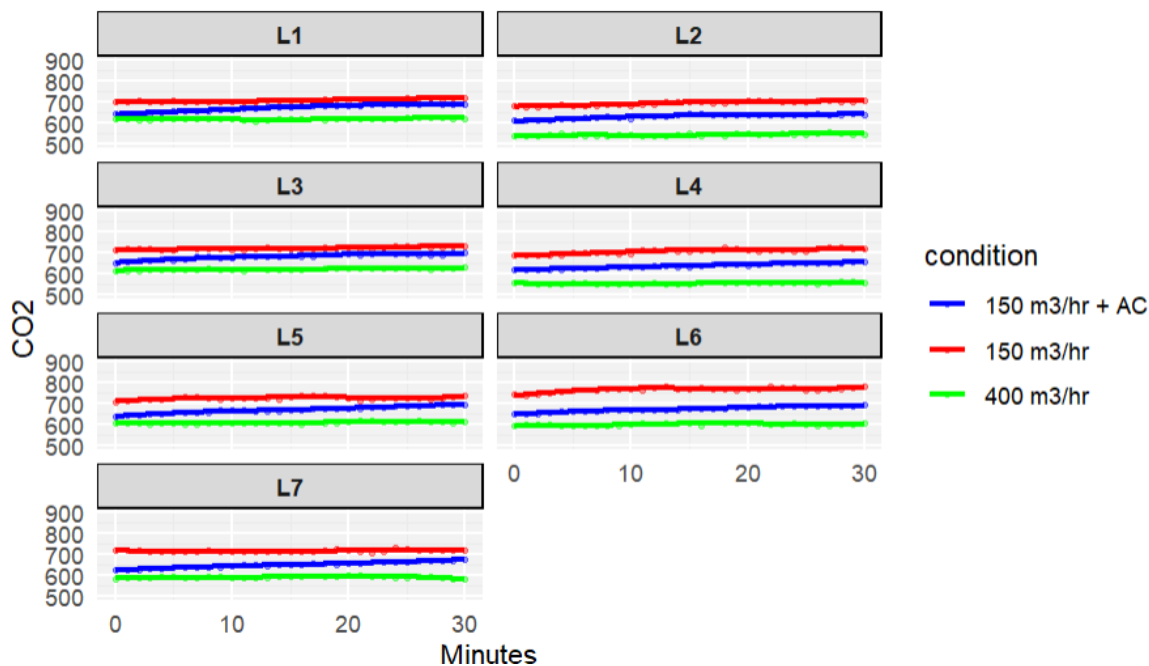


Tijd Trend Plot – PM Concentraties

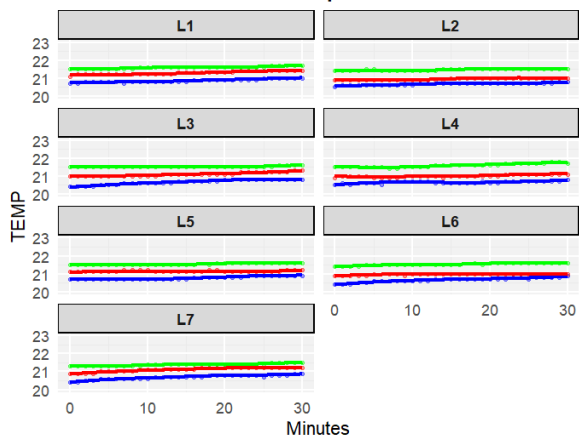


Tijd Trend Plot – Omgevingsvariabelen

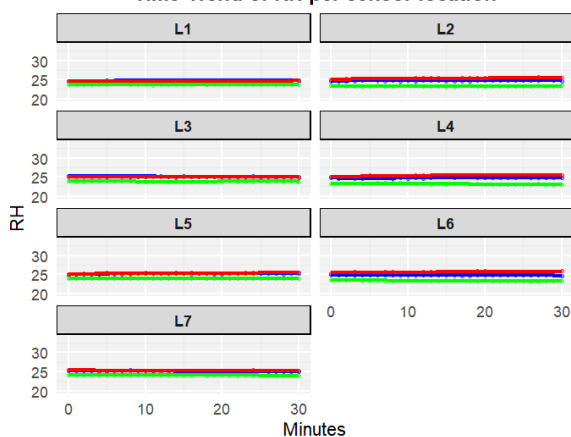
Time Trend of CO2 per sensor location



Time Trend of TEMP per sensor location

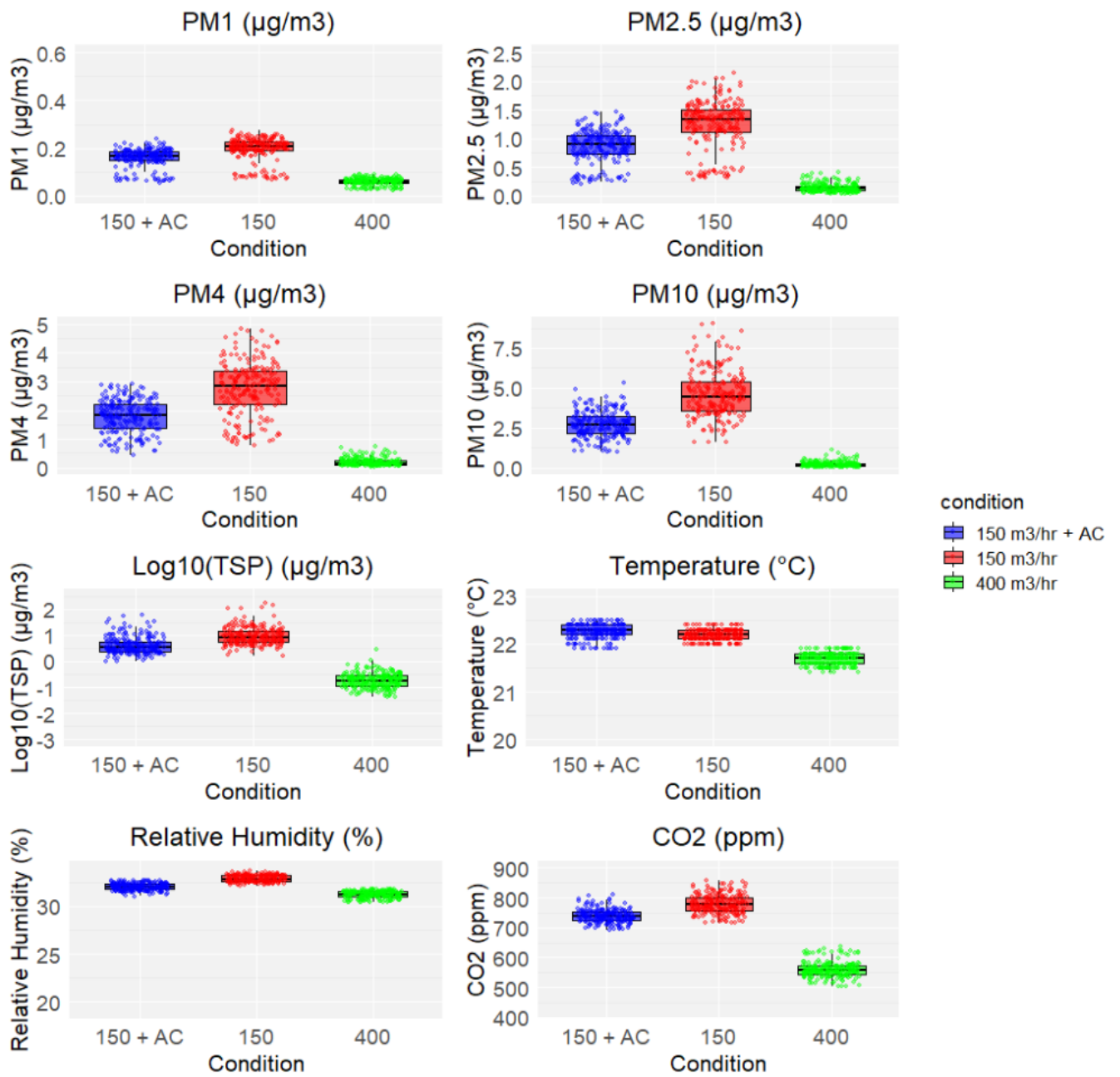


Time Trend of RH per sensor location

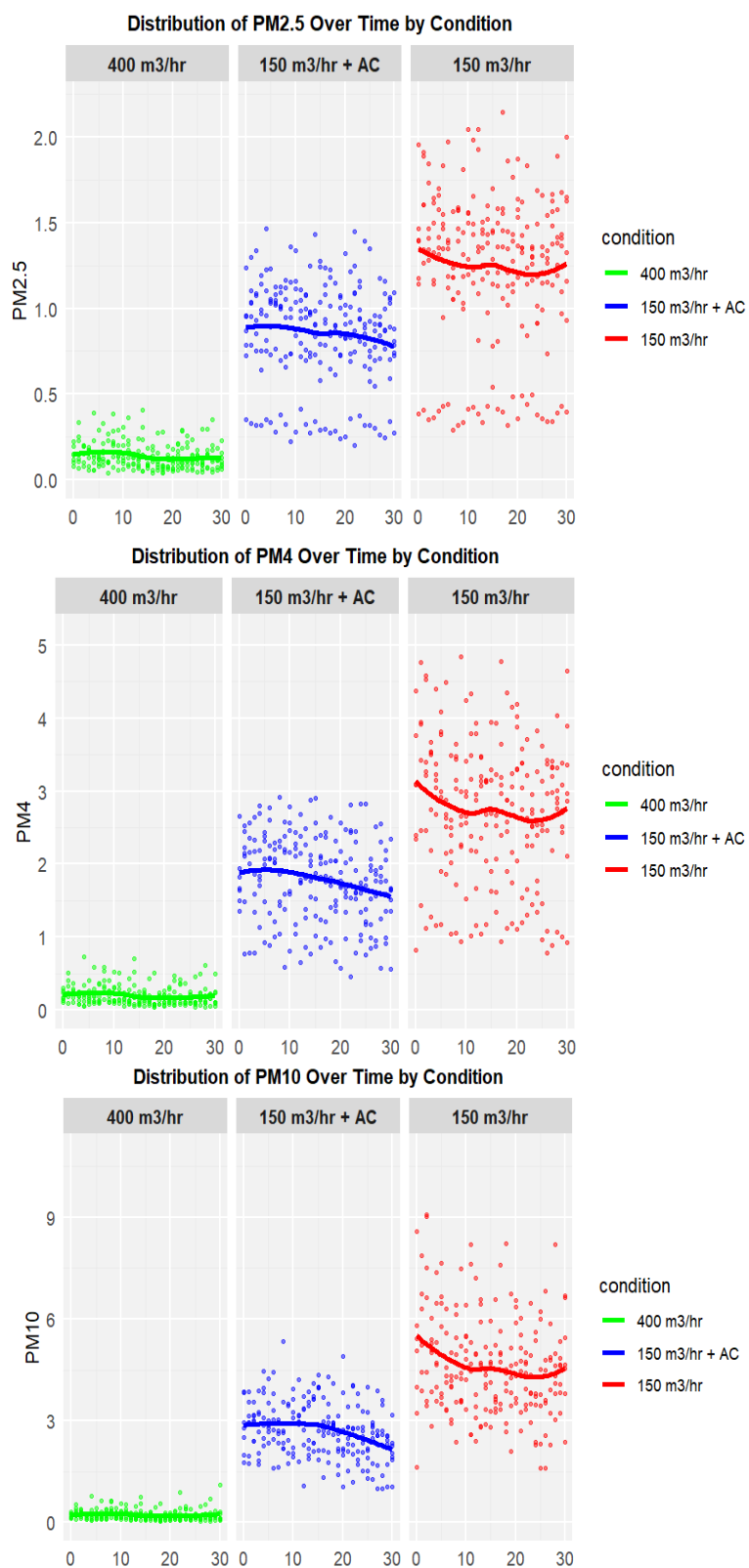


Resultaten – 28 januari 2025

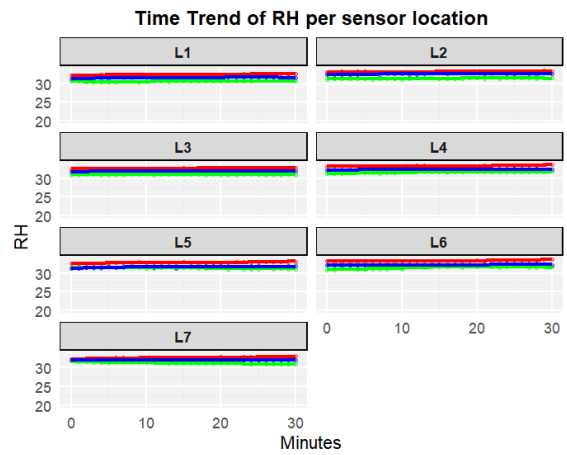
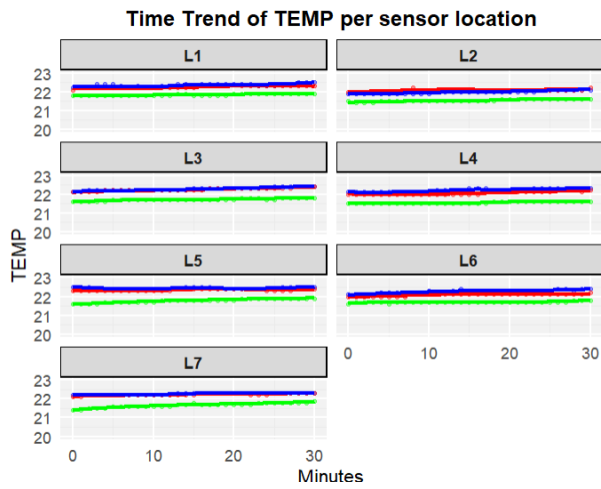
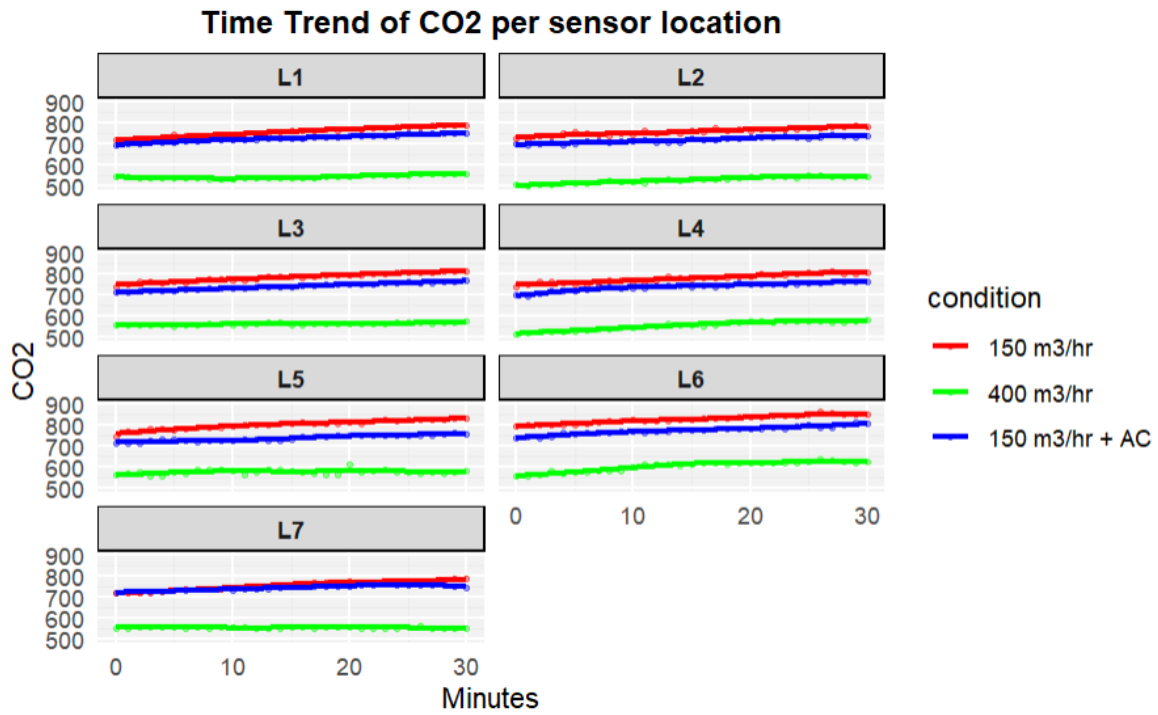
Boxplots



Tijd Trend Plot – PM Concentraties

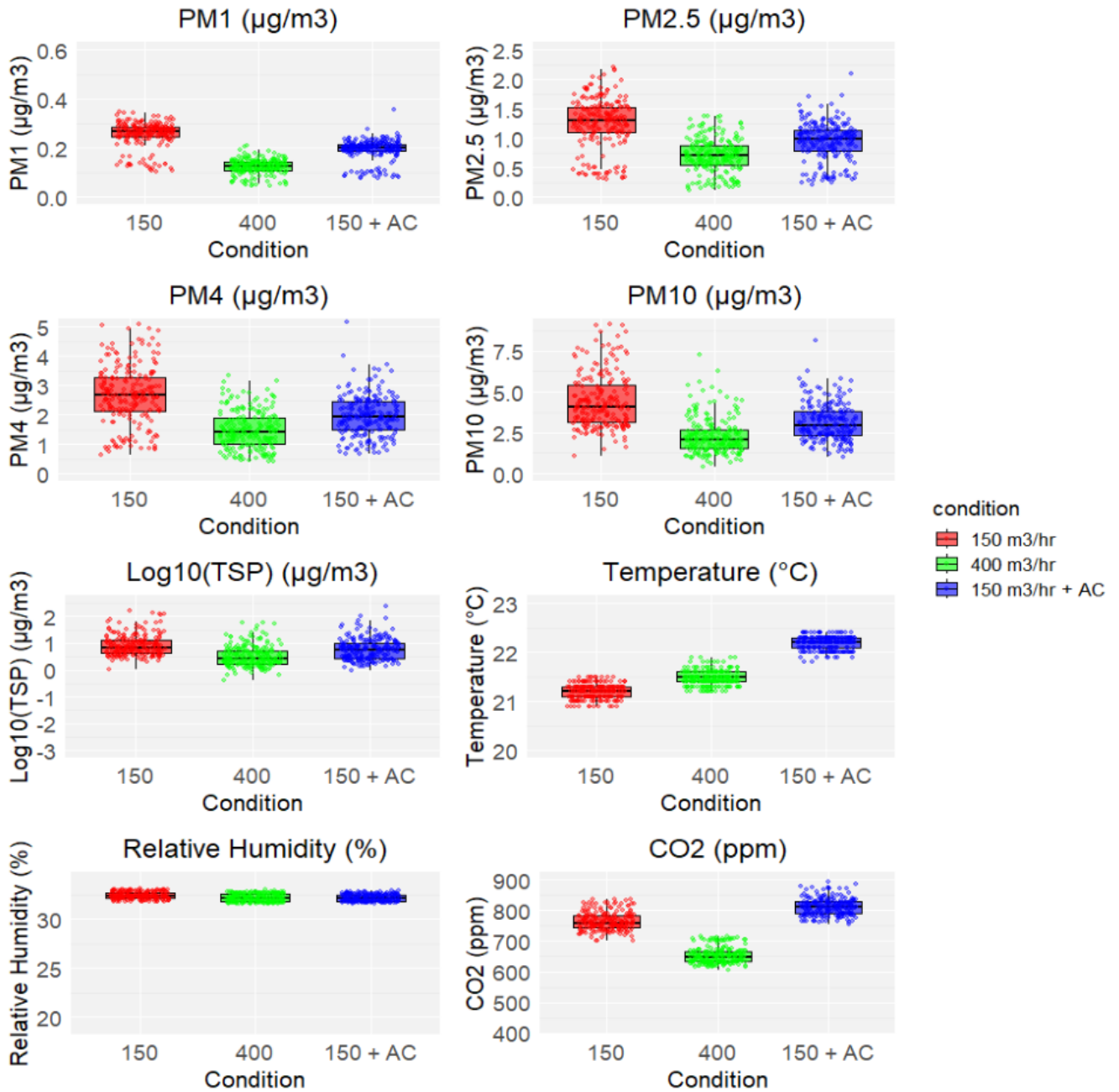


Tijd Trend Plot – Omgevingsvariabelen

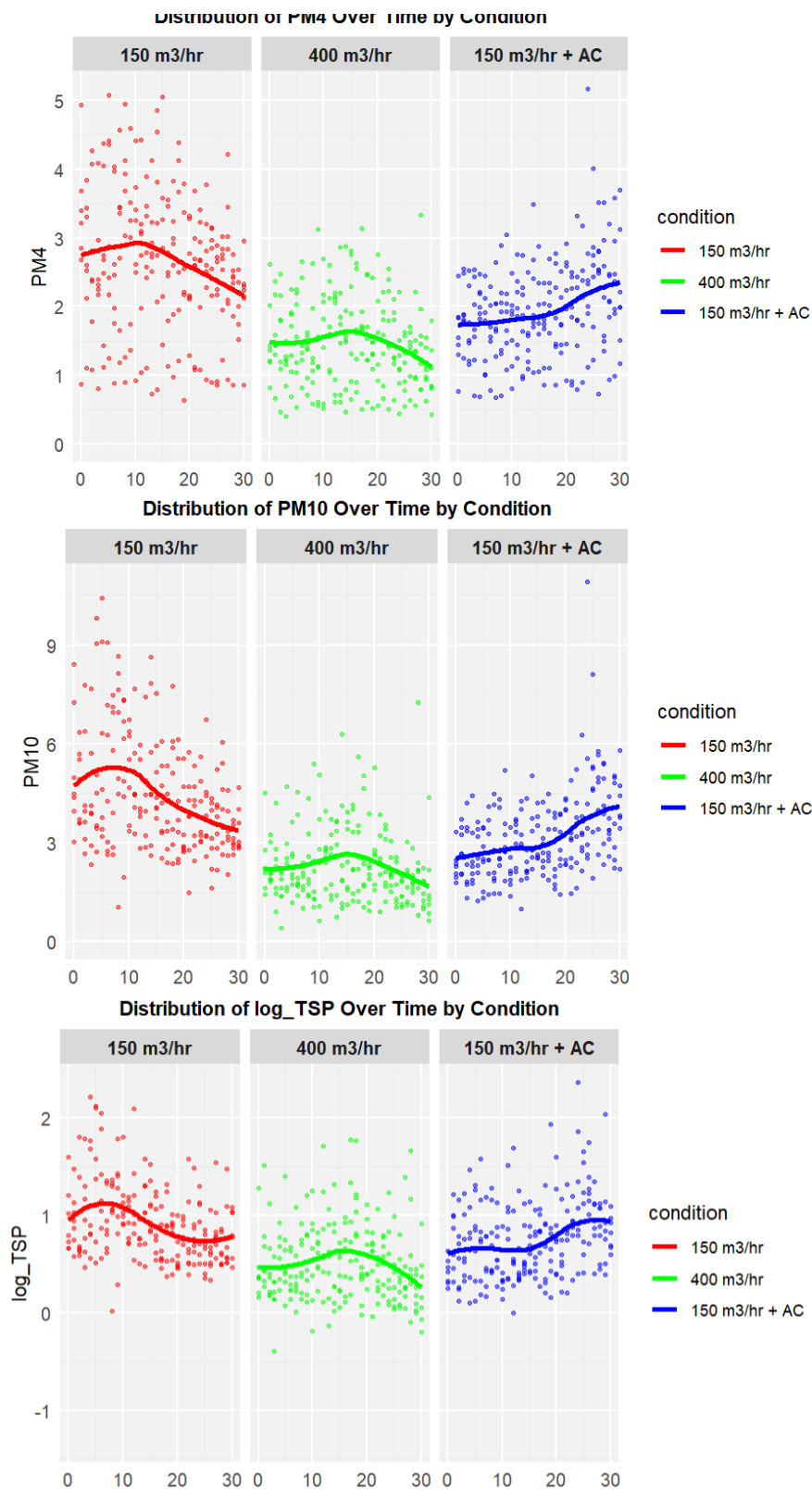


Resultaten – 5 februari 2025

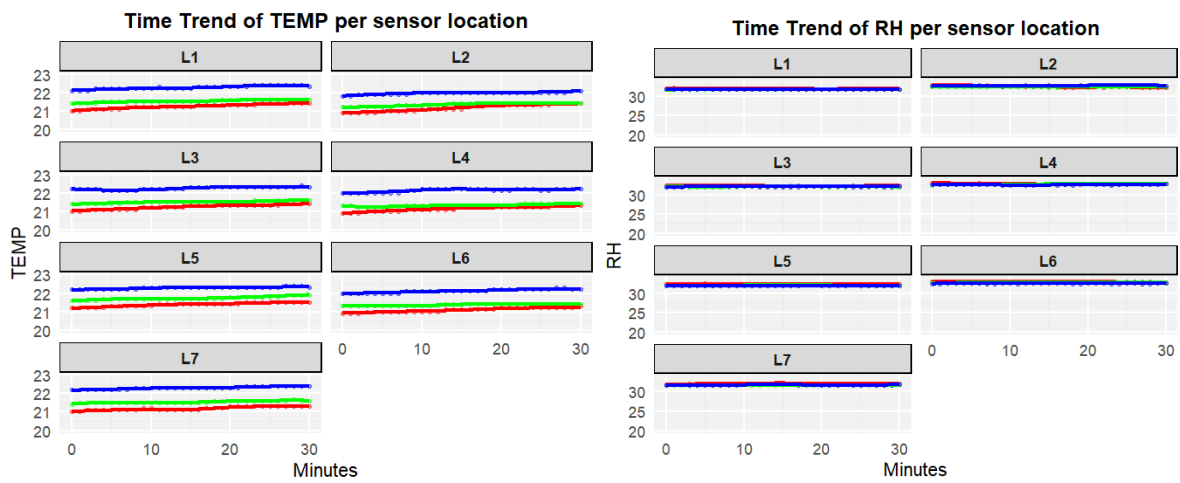
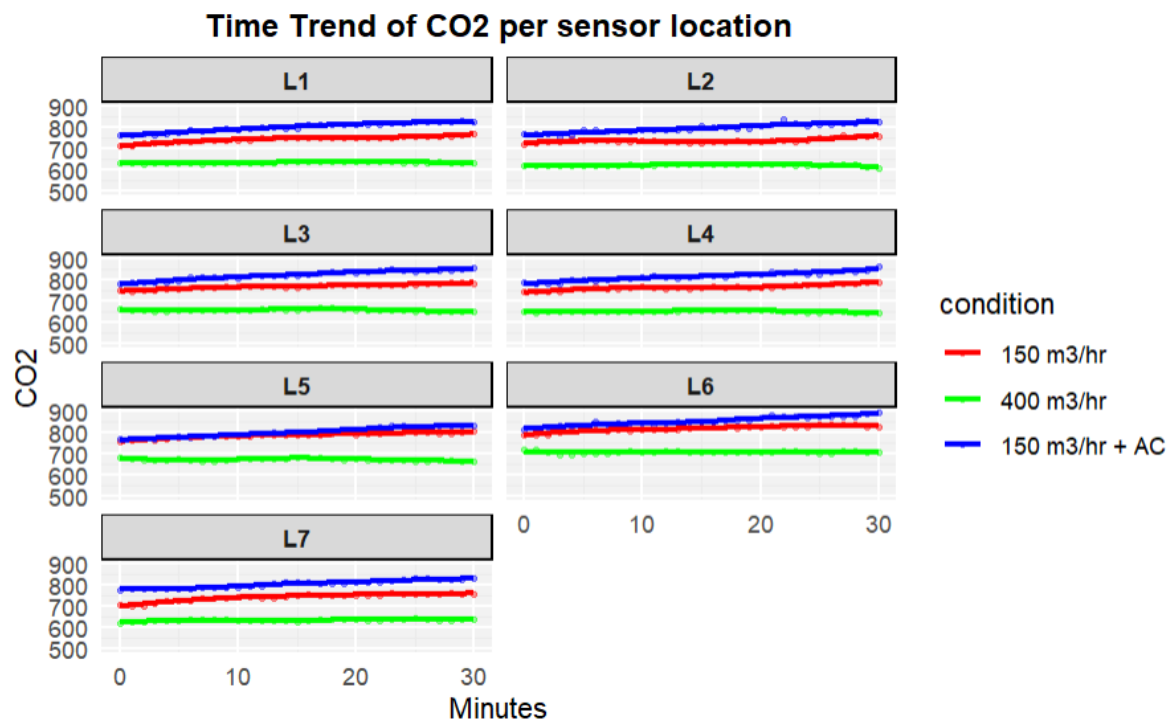
Boxplots



Tijd Trend Plot – PM Concentraties



Tijd Trend Plot – Omgevingsvariabelen



BIJLAGE B – GELUIDSNIVEAUS PER STUDIEDAG EN VENTILATIECONDITIE

