



RESULTATEN

Experimenteel onderzoek testfaciliteit

Programmalijn III

DATUM

15 september 2025

AUTEURS

A. de Lange, K. Kompatscher

ORGANISATIE

TNO – TNO 2025 R11868

INHOUD

Samenvatting	3
1 Inleiding	5
1.1 Context P3Venti	5
1.2 Onderzoek Programmalijn III	5
1.3 Onderzoeksvragen	6
1.4 Leeswijzer	6
2 Methode	7
2.1 Onderzoeksaanpak	7
2.2 Deeltjesmetingen	7
2.2.1 Meetprocedure	8
2.2.2 Uitkomstparameters	9
2.3 Vectormetingen	11
2.3.1 Meetprocedure	12
2.3.2 Uitkomstmaten	13
2.4 Testfaciliteit	13
3 Resultaten	16
3.1 Deeltjesmetingen	16
3.1.1 Effect bronlocatie	16
3.1.2 Effect ventilatiedebiet	18
3.1.3 Effect ventilatieopstelling	20
3.1.4 Flowmetingen bij meetopstelling met luchtverdeelslang	24
3.1.5 Effect beweging	26
3.1.6 Locatie van personen/meubels in de ruimte	28
4 Conclusies	31
5 Limitaties	34
6 Referentielijst	36
7 Bijlage A – Plattegronden testfaciliteit	37

SAMENVATTING

Het onderzoeksprogramma P3Venti richt zich op het verbeteren van pandemische paraatheid via ventilatieonderzoek. Programmalijn III onderzoekt specifiek hoe ventilatie bijdraagt aan het beperken van aerogene virusverspreiding in langdurige zorginstellingen. Dit rapport heeft uitsluitend betrekking op de experimenten die zijn uitgevoerd in de gecontroleerde testfaciliteit (large room test facility) ontwikkeld door TU/e en TNO om inzicht te krijgen in de invloed van ventilatieconfiguraties, debieten, bronlocaties en beweging op de verspreiding van deeltjes in deze ruimte. Deze rapportage beschrijft de resultaten van deze metingen en beantwoordt de onderzoeksvragen.

De onderzoeksvragen die in dit rapport beantwoord worden, zijn:

1. *Hoe draagt een ventilatievoorziening bij aan verspreiding van aerosolen door een ruimte? Wordt dit beïnvloed door de ventilatievoorziening of bijvoorbeeld de situatie in de ruimte?*
2. *Hoe effectief draagt ventilatie bij aan het verlagen van de blootstelling aan aerosolen in een ruimte?*

In een nagebouwde zorg- en sportomgeving zijn experimenten uitgevoerd met kunstmatig gegenereerde deeltjes om daarmee het verspreidingsgedrag van virussen in een ruimte te onderzoeken. In de testfaciliteit was het mogelijk om te variëren in configuraties (toevoer/afvoer), debieten (200–600 m³/h), en bronlocaties. Deeltjes werden continu geëmitteerd op ademhoogte en de spreiding werd gemeten met 18 deeltjestellers verdeeld over de ruimte en op drie verschillende hoogtes. Daarnaast is de lichtsnelheid in 3 richtingen gemeten. Uitkomstmaten waren o.a. maximale blootstelling, 100-voudige toename- en hersteltijd, en lokale luchtverversing. Ook werd het effect van beweging (via ventilatoren) en de positie van meubels/personen onderzocht. De meetopstellingen zijn representatief voor langdurige zorg en maatschappelijk urgente sportvoorzieningen.

Ventilatievoorzieningen beïnvloeden de verspreiding van deeltjes aanzienlijk, afhankelijk van de bronlocatie en configuratie. Een bron nabij een afvoer leidt tot lagere concentraties, terwijl nabij een toevoer juist hogere concentraties ontstaan. Het verhogen van het ventilatiedebiet is de meest effectieve maatregel: van 1 naar 2 ACH reduceert de blootstelling met 33%, van 1 naar 3 ACH met 51%. In deze ruimte is geen perfecte menging aanwezig. Luchtverdeelslangen zorgen voor betere menging en snellere verdunning vooral in combinatie met meerdere afvoeren. Dit geldt op de meetpunten voor deze situatie en bijbehorende condities. Hoewel de gemiddelde blootstelling tussen configuraties beperkt verschilt, zijn lokale verschillen groot. Beweging verhoogt de homogeniteit van verspreiding, maar verlengt de hersteltijd. Specifieke 'hoog risico'-locaties zijn moeilijk aan te wijzen, omdat deze sterk afhankelijk zijn van de bronlocatie en luchtstromingspatronen. Deze patronen worden beïnvloed door roosterconfiguratie, debiet en obstakels in de ruimte. In sportvoorzieningen is het

voorkomen van kortsluiting essentieel voor effectieve ventilatie. De resultaten zijn representatief voor mechanisch geventileerde ruimtes; natuurlijke ventilatie is buiten beschouwing gelaten. De gebruikte paraffine-deeltjes geven een indicatie van verdunning en afvoer, maar gedragen zich niet identiek aan virusdeeltjes. De paraffine-deeltjes zijn inert, waardoor luchtvochtigheid geen invloed heeft. Desondanks bieden de bevindingen waardevolle inzichten voor het ontwerp en gebruik van ventilatiesystemen in zorg- en sportomgevingen ter beperking van blootstellingsrisico aan deeltjes.

1 INLEIDING

1.1 Context P3Venti

Het onderzoeksprogramma Pandemische Paraatheid en Ventilatie (P3Venti) is opgezet om onderzoek te doen naar verschillende kennislacunes rondom aerogene verspreiding van virusdeeltjes en andere pathogenen en de rol en effectiviteit van gebouwventilatie als mitigatiemaatregel. P3Venti heeft de vorm van een adaptief consortium waarbij meerdere onderzoekspartijen gecoördineerd door TNO samenwerken in verschillende inhoudelijke programmalijnen.

Het volledige onderzoeksprogramma van P3Venti is opgedeeld in zeven programmalijnen:

- I. Inventarisatie en analyse operationele omstandigheden
- II. CFD-analyse
- III. Experimenteel onderzoek ventilatie en deeltjesgedrag
- IV. Risico's, impact en markt
- V. Kosten en baten
- VI. Ineffectiviteit en dosis-responsrelatie
- VII. Netwerkvorming en kennisborging

Het onderzoek en de resultaten beschreven in deze rapportage valt binnen programmalijn III: Experimenteel onderzoek ventilatie en deeltjesgedrag en heeft uitsluitend betrekking op de experimenten uitgevoerd in de testfaciliteit bij de TU/e.

1.2 Onderzoek Programmalijn III

Programmalijn III richt zich op kennisontwikkeling met betrekking tot de bijdrage van ventilatie aan het voorkomen van besmettingen in de langdurige zorg.

Experimenteel onderzoek is opgedeeld in experimenten in een testfaciliteit en praktijkexperimenten. De testfaciliteit (large room test facility) is door TNO en de TU/e ontwikkeld en bij de TU/e gebouwd¹. Het doel van de praktijkexperimenten was het opzetten en het uitvoeren van experimenteel onderzoek in een praktijksituatie en de in kaart gebrachte karakteristieken van de observatieruimten zijn gebruikt in programmalijn III bij de ontwikkeling van de testfaciliteit. Er werd inzicht verkregen in deeltjesgedrag en blootstelling in een realistische omgeving onder goed controleerbare praktijkcondities.

Voor het ontwerp van deze experimenten is onderzoek gedaan naar verschillende meetmethodes die geschikt zouden kunnen zijn voor de doeleinden van dit onderzoek. Deze experimenten zijn uitgevoerd in een testfaciliteit en in een in-situ situatie, representatief voor het gebouwportfolio van de langdurige zorg in Nederland. Buiten de langdurige zorg wordt ook gekeken naar de maatschappelijk urgente

sportvoorzieningen (MUS). De testfaciliteit is een controleerbare omgeving: een namaaksituatie die de echte situatie zo goed als mogelijk benadert en waar tegelijkertijd verschillende parameters tot in detail kunnen worden aangepast¹. Een in-situ-omgeving impliceert meten op een bestaande locatie in een instelling voor langdurige zorg. Beide varianten hebben voor- en nadelen en kunnen in combinatie een vollediger inzicht geven dan wanneer één van beide wordt onderzocht. In dit rapport worden de resultaten weergegeven van de metingen die zijn uitgevoerd in de testfaciliteit.

1.3 Onderzoeksvragen

In programmalijn III zijn hoofdonderzoeksvragen geformuleerd voor zowel in-situmetingen als metingen die plaatsvinden in de testfaciliteit. Voor de metingen zijn de volgende deelonderzoeksvragen geformuleerd die in deze deelrapportage worden beantwoord:

1. *Hoe draagt een ventilatievoorziening bij aan verspreiding van aerosolen door een ruimte? Wordt dit beïnvloed door de ventilatievoorziening of bijvoorbeeld de situatie in de ruimte?*
2. *Hoe effectief draagt ventilatie bij aan het verlagen van de blootstelling aan aerosolen in een ruimte?*

Met beantwoording van deze onderzoeksvragen wordt getracht beter inzicht te verkrijgen in het effect van ventilatie op het blootstellingsrisico en wordt inzicht verkregen in het gedrag van deeltjes in een ruimte.

Om deze hoofdvragen te beantwoorden zijn de volgende deelvragen samengesteld:

- *Wat is het effect van de bronlocatie op de verspreiding van deeltjes in de ruimte?*
- *Wat is het effect van het ventilatiedebiet op de verspreiding van deeltjes in de ruimte?*
- *Wat is het effect van de ventilatie configuratie/opstelling op de verspreiding van deeltjes in de ruimte?*
- *Zijn er specifieke locaties in de ruimte die geclassificeerd kunnen worden als 'hoog risico' gebieden?*
- *Wat is het effect van beweging en warmtebronnen op de verspreiding van deeltjes in de ruimte?*

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt nader ingegaan op de gehanteerde onderzoeksaanpak en gedetailleerde informatie gegeven per meetmethode. Hoofdstuk 3 geeft een overzicht van de resultaten inclusief de bespreking daarvan. Het laatste hoofdstuk geeft de conclusies weer.

2 METHODE

2.1 Onderzoeksaanpak

Door middel van experimenteel onderzoek in de testfaciliteit is inzicht verkregen in het effect van verschillende factoren op de verspreiding van aerosolen in de ruimte. Veel verschillende elementen zijn onderzocht zoals het effect van de locatie van de ventilatievoorziening in de ruimte, het type ventilatierooster, de locatie van de infectieuze persoon in de ruimte en de aanwezigheid van personen in de ruimte (in de vorm van warmte en beweging). Gedurende deze experimenten is de ruimte niet bezet door mensen. Er wordt geventileerd volgens operationele condities die zijn opgedaan in programmalijn I². De ventilatieopstellingen die zijn onderzocht zijn opstellingen die in de praktijk vaak voorkomen en zijn gebaseerd op resultaten uit PLIV van P3Venti. Een literatuurstudie is uitgevoerd in programmalijn III waarbij is gekeken naar de mogelijke meetmethoden en te gebruiken parameters.³ De resultaten uit deze literatuurstudie vormen de basis voor de gehanteerde meetmethoden. Het experimentele onderzoek is opgebouwd uit meerdere meetmethodes. Voor elke meetopstelling worden de volgende onderdelen uitgevoerd:

- deeltjesmetingen,
- vectormetingen.

2.2 Deeltjesmetingen

Om de verspreiding (verplaatsing en verdeling) van deeltjes (aerosolen) in een ruimte onder verschillende omstandigheden vast te stellen, en de daarbij behorende ventilatie-efficiëntie, zijn op gedefinieerde plaatsen deeltjes geëmitteerd. Deze zijn geëmitteerd op een representatieve ademhoogte van 120 cm vanaf de vloer. De emissie van deeltjes heeft continu plaatsgevonden met een richting en snelheid die representatief zijn voor spreken: horizontaal met een uittredesnelheid van ca. 2 m/s en met een constante volumestroom van 11,2 l/min.^{4,5} De aerosolgenerator (Topas ATM 228) produceert deeltjes met een afmeting van 0,3 µm tot ca. 10 µm. De met de generator gegenereerde deeltjesgrootte komt grotendeels overeen met de categorieën van de deeltjes die vrijkomen bij spreken en normale ademhaling^{6,7}. In totaal zijn er 18 deeltjestellers verspreid door de ruimte opgesteld om de deeltjesconcentratie te meten. Tien particle counters, of deeltjestellers, zijn van het merk Lighthouse (Handheld 3016, Gen F). Deze deeltjestellers hebben een meetbereik van 0,2 µm tot ca. 25 µm. Acht deeltjestellers zijn van het merk GRIMM (Optical Particle Counter 1.109) met een meetbereik van 0,25 – 32 µm, deze deeltjestellers zijn in beheer van de TU/e. Gedurende de metingen zijn de deeltjesconcentraties met een grootte van 0,3, 0,5, 0,7, 1,0, 2,0 en 5,0 µm gemeten. Als meetinterval wordt een interval van 15 s aangehouden. Met de deeltjestellers is op 3 verschillende hoogtes gemeten, op zithoogte (120 cm), op stahoogte (160 cm) en op de hoogte van de afvoer (285 cm). Nabij de afvoer is om de deeltjesproductie te kunnen inschatten.

Gedurende de metingen zijn er warmtebronnen geplaatst in de ruimte die de gebruikers in de ruimte representeren. Er zijn in totaal zes warmtebronnen in de ruimte geplaatst die allemaal een vermogen van 80 Watt dissiperen (zie Figuur 2-1).



Figuur 2-1. Een meetopstelling in de testfaciliteit inclusief warmtebronnen.

2.2.1 Meetprocedure

Voor de verschillende meetopstellingen is steeds dezelfde meetprocedure aangehouden, elke meting is tweemaal uitgevoerd. De metingen bestaan uit de volgende meetcyclus (Tabel 2-1). Er zijn vier segmenten die een meetcyclus beslaan. Eerst wordt de baseline concentratie vastgesteld. Vervolgens wordt de aerosolgenerator aangezet en wordt er 50 minuten geëmitteerd totdat een steady state fase is bereikt met de deeltjesconcentratie. Een herstelperiode van 15 minuten waarin de bron uitstaat met functionerende ventilatie en als laatste vindt er een spoeling plaats waarbij de ruimte leeggespoeld wordt van vervuilende deeltjes om snel op de baselineconcentratie te komen.

Tabel 2-1. Meetcyclus bestaande uit baseline-, emissie-, en herstelfase.

	Tijd (minuten)																
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
Bepalen baseline concentraties																	
Emissie aerosolen																	
Herstelfase																	
Spoelfase & omstellen voor volgende meetcyclus																	

2.2.2 Uitkomstparameters

Om de onderzoeksvragen te beantwoorden is er een data-analyse uitgevoerd. Vanuit het literatuuronderzoek⁸ is gebleken dat de gevonden uitkomstmaten die worden gebruikt niet volstaan voor het onderzoek zoals dat uitgevoerd wordt in P3Venti. Om de data-analyse uit te voeren zijn de volgende uitkomstmaten gebruikt, Figuur 2-2 geeft deze schematisch weer.

2.2.2.1 t_{delay}

Na de start van de emissie duurt het enige tijd voordat de deeltjesconcentratie bij de meetpunten een toename laat zien. De tijd tussen de start van de emissie en de toename van de deeltjesconcentratie is afhankelijk van de afstand tussen de bron en het meetpunt en de luchtstroming (snelheid en richting). Met andere woorden het pad dat de geëmitteerde deeltjes afleggen voordat ze bij het meetpunt worden gedetecteerd. Deze variabele t_{delay} geeft aan hoe snel een vervuiling zich door een ruimte verspreidt naar een aantal specifieke meetpunten. Deze wordt bepaald als tijd tussen het stoppen van de emissie en het bereiken van de maximale concentratie op het betreffende meetpunt. t_{delay} is berekend door het tijdstip te gebruiken waarop de maximum concentratie na het stoppen van de emissie is bereikt.

2.2.2.2 100-voudige toenametijd

De 100-voudige toename tijd is gedefinieerd als de tijd die nodig is om een aanwezige concentratie met een factor 100 te laten toenemen. Hiervoor worden minimaal zes aaneensluitende meetpunten gebruikt om de maximum concentratietoename te bepalen. Na emissie van deeltjes door een bron vindt er na enige tijd een toename van de deeltjesconcentratie bij de meetpunten plaats. Deze toename kan het karakter hebben van een stapresponsie of een zeer geleidelijke toename. Een stapresponsie-achtige toename (korte 100-voudige toenametijd) geeft aan dat de deeltjesconcentratie als het ware als een front met een relatief scherpe afbakening bij de meetposities aankomt. Een geleidelijk verloop (lange 100-voudige toenametijd) geeft daarentegen juist een rustige (geleidelijke) toename aan. De maximum toename en het tijdstip na starten emissie waarop deze toename plaatsvindt, worden gebruikt om de 100-voudige toenametijd te bepalen.

$$t_{100\text{-voudige toename}} = (t_n - t_{n-1}) \frac{\ln 100}{\ln_{n,\max} (c_n/c_{n-1})} \quad \text{Vergelijking 2.1}$$

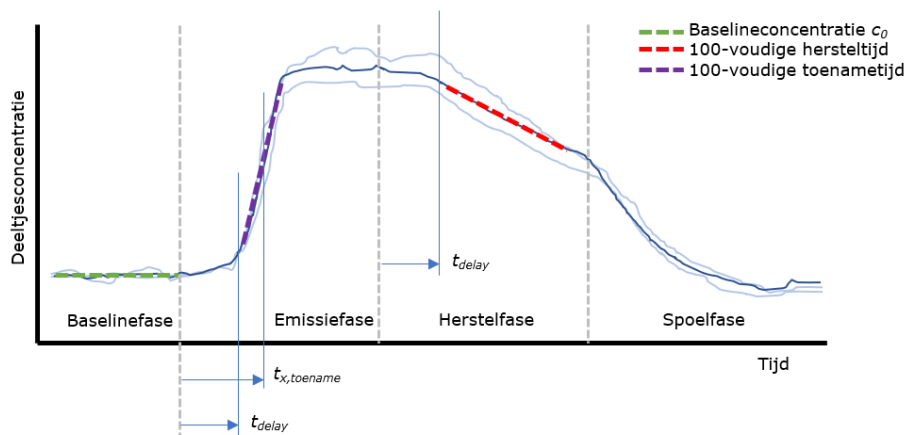
Waarin:

$t_{100\text{-voudige toename}}$ is de 100-voudige toenametijd,

n loopt van 1 tot het laatste tijdstip waarop er nog toename is,
 c_n de concentratie op tijdstip t_n ,
 c_{n-1} de concentratie op tijdstip t_{n-1} .
 Daarbij is $t_{max,toename} = \frac{1}{2}(t_n + t_{n-1})$

2.2.2.3 100-voudige hersteltijd

De 100-voudige hersteltijd is gedefinieerd als de tijd die nodig is voor een deeltjesconcentratie om met een factor 100 af te nemen (gemeten vanaf het einde van de emissieperiode). Deze kan berekend worden door middel van lineaire extrapolatie (bij logaritmische weergave) van de snelheid van de afname van de desbetreffende deeltjesconcentratie, zie de rode gestippelde lijn in Figuur 2-2.



Figuur 2-2. Schematische weergave meetcyclus, typisch verloop deeltjesconcentratie en afgeleide uitkomstparameters.

2.2.2.4 Lokale Air Change per Hour (ACH – aantal luchtverversingen per uur)

Lokale ACH en ventilatiedebieten worden vaak gebruikt als indicator om de ventilatiehoeveelheid in de ruimte aan te geven. Het betreft een calculatie van het aantal keren dat het totale luchtvolume in de ruimte wordt vervangen door verse lucht of gezuiverde lucht. De gemiddelde lokale ACH op de locatie van de deeltjestellers wordt bepaald tijdens de herstelperiode. Deze wordt berekend op basis van de 100-voudige hersteltijd met als basis:

$$C_t = C_0 \times e^{-t \cdot \frac{Q}{V}} \quad \text{Vergelijking 2.2}$$

Waarin:

C_t is de concentratie op tijdstip t ,

C_0 is de aanvangsconcentratie,

Q is de toegevoerde luchthoeveelheid per tijdseenheid,

V is het volume van de ruimte.

Q gedeeld door V is gedefinieerd als de circulatievoud. Bij een bekende 100-voudige hersteltijd t_x op positie x wordt de lokale circulatievoud op positie x dan:

$$CV_x = \frac{Q}{V} = \frac{-\ln\left(\frac{C_{t,x}}{C_{0,x}}\right)}{t_x} = \frac{4,6}{t_x}$$

Vergelijking 2.3

Waarin:

t_x is de 100-voudige hersteltijd op positie x,

CV_x is de circulatievoud op positie x.

2.2.2.5 Maximale lokale blootstelling

De maximale lokale blootstelling is gedefinieerd als de blootstelling aan het einde van de emissieperiode voor elke deeltjesteller locatie. Bij de uitgevoerde metingen bij een steady-state situatie. Deze kan berekend worden door de gemiddelde gestandaardiseerde concentratie van de laatste 3 minuten van de emissieperiode te nemen. Vervolgens wordt de blootstelling gestandaardiseerd om vergelijking tussen verschillende metingen mogelijk te maken.

2.3 Vectormetingen

Om inzicht te krijgen in de aanwezige luchtstromingen in de ruimte, wordt met behulp van akoestische metingen een 3-dimensionaal beeld van de luchtstroming gemaakt. De meetwagen¹ die hiervoor wordt gebruikt (zie Figuur 2-3), meet op meerdere punten gelijktijdig in de ruimte de lichtsnelheid van de luchtstroom in de x-, y- en z-richting. Buiten de vectormetingen worden ook parameters als T, RV en CO₂ gemeten. De meetsensoren hebben een meetbereik en -nauwkeurigheid volgens de leverancier van -10 - 40°C (±0,1 °C) voor T, 0 - 100% (±0,6% bij T = 23 °C) voor RV, en 0 - 32.000 ppm (<±30 ppm + 3% van de gemeten waarde bij 350 ≤ CO₂ ≤ 5.000 ppm).

¹ <http://www.humitemp.com/UK/products/climapole-indoor.html>



Figuur 2-3 - De mobiele meetstructuur met akoestische meetkoppen.

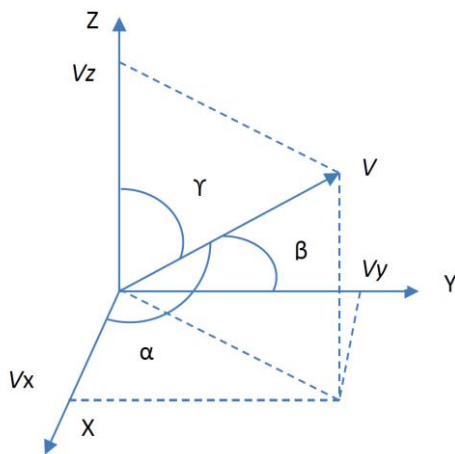
2.3.1 Meetprocedure

Voor alle meetopstellingen is de luchtstroom gemeten op 9 verschillende gridpunten. Minimaal 4 van deze gridpunten bevinden zich op een locatie recht onder de ventilatievoorzieningen in de ruimte (aantal is afhankelijk van de positie van de ventilatievoorziening). De overige punten bevinden zich op gelijke afstand van elkaar tussen de ventilatievoorzieningen van de ruimte. De meetwagen meet per gridpunt op 8 verschillende vooraf bepaalde hoogtes. De belangrijkste hoogte waar wordt gemeten is de zithoogte (120 cm), stahoogte (160 cm) en hoogte nabij het plafond (284 cm).

Per gridpunt wordt gedurende 180 seconden met een meetfrequentie van 1 Hz een meting verricht en vervolgens wordt het gemiddelde over deze 180 seconden bepaald. Na deze metingen wordt de meetwagen naar een volgend gridpunt verplaatst en starten de nieuwe metingen. Hierbij worden mogelijke verstoringen in de luchtstroming door het verplaatsen van de meetkar zoveel mogelijk gereduceerd door de volgende meting niet direct te starten na verplaatsing maar minimaal een minuut te wachten.

2.3.2 Uitkomstmaten

De luchtstromingsvector is de snelheid en de richting van de luchtstroom. Middels onderstaande goniometrische relaties wordt de absolute waarde van de luchtsnelheid bepaald (Figuur 2-4, Vergelijking 2.4).



Figuur 2-4. Schematische weergave van de drie meetrichtingen X, Y en Z en de goniometrische relaties om V te bepalen.

$$|V| = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$$
$$\cos \alpha = \frac{V_x}{|V|}; \cos \beta = \frac{V_y}{|V|}; \cos \gamma = \frac{V_z}{|V|}$$

Vergelijking 2.4

V_x , V_y en V_z , zijn de akoestisch gemeten componenten van de luchtsnelheid (m/s).

Deze data maakt luchtstromen in de ruimte inzichtelijk in 2D en 3D visualisaties. Op elk gemeten punt wordt de vector afgebeeld die de luchtsnelheid en -richting op dat punt uitbeeldt, dit wordt grafisch weergegeven met een pijl. De snelheid kan worden afgelezen aan de lengte van de vectorpijl. In de resultaten van de vectormetingen wordt de gevonden minimale en maximale luchtsnelheid weergegeven en de gevonden mediaan.

2.4 Testfaciliteit

De testfaciliteit heeft een afmeting van 9,9 x 6,7 x 3,0 m³, representatief voor een typische huiskamer of algemene ruimte van een langdurige zorginstelling. De huiskamer is ingericht met 1 eettafel en 8 stoelen, een keukenblok en een zithoek met een bank en salontafel. Dit is bepaald op basis van informatie die is verkregen uit inventarisaties van praktijksituaties in zes zorginstellingen vanuit programmalijnen I en 60 gebouwen in programmalijn IV van het P3Venti programma. Verder is de ruimte voorzien van 6 warmtebronnen die voorzien zijn van 80 Watt lampen, dit is representatief voor 6 personen in de ruimte en de lokale warmtelast die zij genereren.

Tijdens het onderzoek is het effect van verschillende variabelen getest zoals de ventilatieopstelling (enkel mechanische toe- en afvoer), het ventilatiedebiet, de locatie van de bron en het effect van beweging. Dit resulteert in veel verschillende meetopstellingen. In Tabel 2-2 is een overzicht weergegeven van de meetopstellingen die zijn meegenomen in dit onderzoek voor de langdurige zorg. Voor elke ventilatieopstelling staat genoteerd welke condities zijn gemeten. In Bijlage A, Figuur 7-1 staan de plattegronden van de testfaciliteit voor deze ventilatieopstellingen. Bijvoorbeeld, meetopstelling 2 (3 toevoer & 1 afvoer) is getest voor 2 verschillende ventilatiedebieten (200 m³/h, 1 ACH en 400 m³/h, 2 ACH) en deze zijn beide getest voor 2 verschillende bronlocaties (E1 en E2). 1 ACH, ofwel 200 m³/h is hoger dan wat er in programmalijn III⁹ is vastgesteld tijdens de in-situ metingen maar meer conform de Bbl-richtlijn. In Bijlage A staan de verschillende ventilatieroosters die zijn meegenomen gedurende het onderzoek weergegeven. De luchtverdeelslang (air sock) is op twee wijzen geïnstalleerd. Een keer over de breedte (horizontaal) met 4 afvoeren, en een keer over de lengte (verticaal) van de ruimte met 3 afvoeren. De luchtverdeelslang heeft in de bovenste 10 cm perforaties. In het geval van de verticale installatie zijn de perforaties slechts aan 1 zijde gemaakt, omdat de andere zijde zich nabij de wand bevond. De perforaties zijn op een aantal plaatsen onderbroken.

Tabel 2-2. Overzicht meetopstellingen langdurige zorg.

	Ventilatieopstelling	Ventilatiedebiet (m ³ /h)			Bronlocaties			Warmtebronnen	Beweging
		200	400	600	1	2	3		
Meetopstelling 1	2 toevoer & 2 afvoer	X		X	X			X	
Meetopstelling 2	3 toevoer & 1 afvoer	X	X		X	X		X	
Meetopstelling 3	3 toevoer & 3 afvoer	X	X		X	X		X	
Meetopstelling 4	Luchtverdeelslang (verticaal) & 3 afvoer	X	X	X	X	X	X	X	X
Meetopstelling 5	Luchtverdeelslang (horizontaal) & 4 afvoer	X	X	X	X	X	X	X	X

In Tabel 2-3 is een overzicht weergegeven van de meetopstellingen die zijn meegenomen in dit onderzoek voor de maatschappelijk urgente sportvoorzieningen. Bijlage A, Figuur 7-2 geeft de plattegronden voor deze ventilatieopstellingen weer.

Tabel 2-3. Overzicht meetopstellingen maatschappelijk urgente sportvoorzieningen.

	Ventilatieopstelling	Ventilatiedebiet (m ³ /h)			Bronlocaties			Warmtebronnen	Beweging
		200	400	600	1	2	3		
Meetopstelling 1	3 toevoer & 3 afvoer	X	X		X			X	X
Meetopstelling 2	2 toevoer en overstort (boven)	X		X		X	X	X	
Meetopstelling 3	2 toevoer en overstort (beneden)	X		X		X	X	X	

Meetopstelling 4	2 toevoer incl. plaat en overstort (boven)	X		X		X	X		X	
Meetopstelling 5	2 toevoer incl. plaat en overstort (beneden)	X		X		X	X		X	

Gedurende de metingen voor de MUS had de testfaciliteit een afmeting van ofwel $9,9 \times 6,7 \times 3,0 \text{ m}^3$, representatief voor een medische fitnessruimte of een afmeting en $3,3 \times 6,7 \times 3,0 \text{ m}^3$, representatief voor een kleedkamer van een zwembad. De medische fitness is ingericht met 9 warmtebronnen die voorzien zijn van 80 of 200 Watt lampen, dit is representatief voor 9 personen in de ruimte, respectievelijk in rust (zittend) of gedurende activiteit (fysieke inspanning gelijk aan stevig wandelen). De kleedkamer van het zwembad is ingericht met 12 warmtebronnen die voorzien zijn van 80 Watt lampen, dit is representatief voor 12 volwassenen of 16 kinderen in de ruimte.

Voor elke meetopstelling is het ventilatiedebiet minimaal twee keer gemeten en vergeleken met het gewenste debiet (200, 400 of $600 \text{ m}^3/\text{h}$). Het daadwerkelijk gemeten volumedebiet was kleiner dan 10% afwijking vergeleken met de gewenste waarde. Daarom wordt voor deze metingen de gewenste waarde aangehouden om de vergelijking overzichtelijker te houden.

3 RESULTATEN

3.1 Deeltjesmetingen

In deze paragraaf worden de belangrijkste resultaten weergegeven. Verschillende aspecten zijn onderzocht om uiteindelijk antwoord te kunnen geven op de hoofdonderzoeksvragen (paragraaf 1.3). Deze deelvragen zijn:

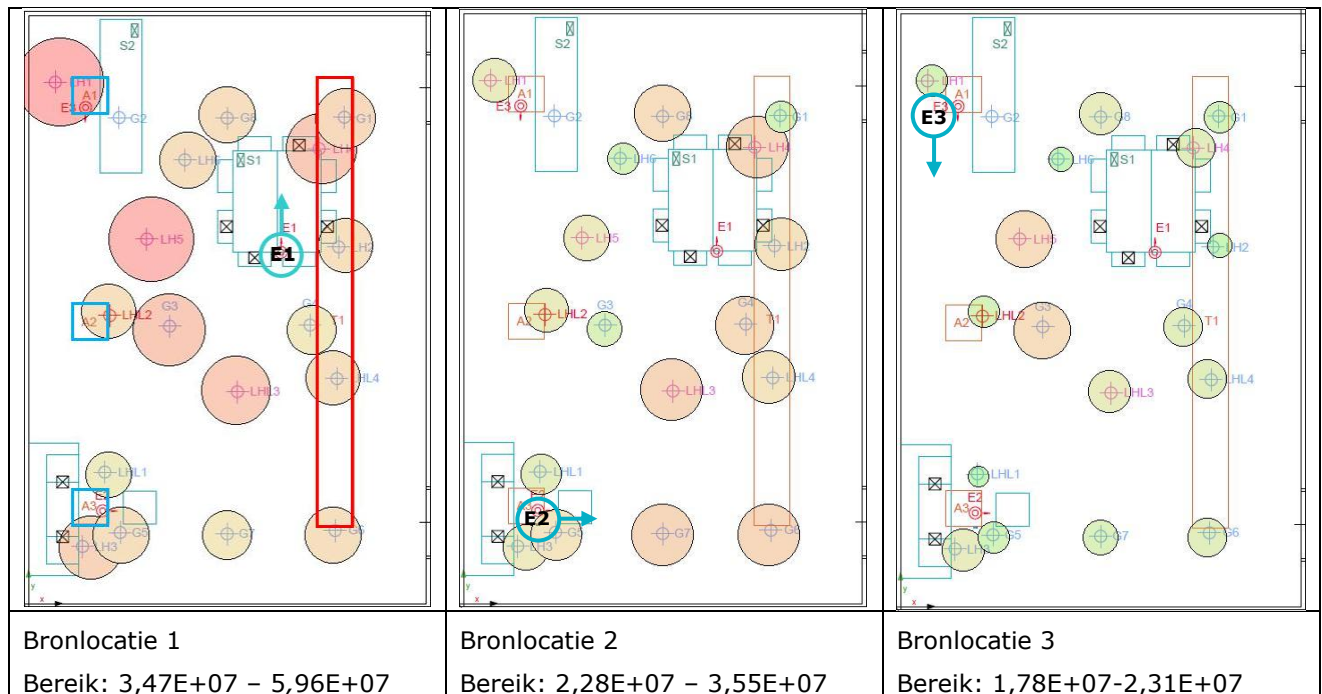
- *Wat is het effect van de bronlocatie op de verspreiding van deeltjes in de ruimte?*
- *Wat is het effect van het ventilatiedebiet op de verspreiding van deeltjes in de ruimte?*
- *Wat is het effect van de ventilatie configuratie/opstelling op de verspreiding van deeltjes in de ruimte?*
- *Zijn er specifieke locaties in de ruimte die geclassificeerd kunnen worden als 'hoog risico' gebieden?*
- *Wat is het effect van beweging en warmtebronnen op de verspreiding van deeltjes in de ruimte?*

Deze vragen zullen worden behandeld voor zowel de langdurige zorg als de maatschappelijk urgente sportvoorzieningen.

3.1.1 Effect bronlocatie

De verschillende opstellingen die zijn onderzocht in de testfaciliteit zijn getest voor drie verschillende bronlocaties. Bronlocatie 1 was gecentreerd in het midden van de ruimte bij de eettafel, bronlocatie 2 was bij de zithoek en bronlocatie 3 bij de keuken (Figuur 3-1). Uit de analyses uit programmalijn I is vastgesteld dat dit de locaties zijn waar veel interacties tussen bewoners en personeel plaatsvindt en de kans groot is dat er een besmet persoon aanwezig is. De beste uitkomstparameter om het effect van de bronlocatie op de deeltjesverspreiding in de ruimte te analyseren is de maximale blootstelling in de ruimte. In Figuur 3-1 is dit gevisualiseerd voor één ventilatieconfiguratie voor bronlocatie 1 (E1), bronlocatie 2 (E2) en bronlocatie 3 (E3).

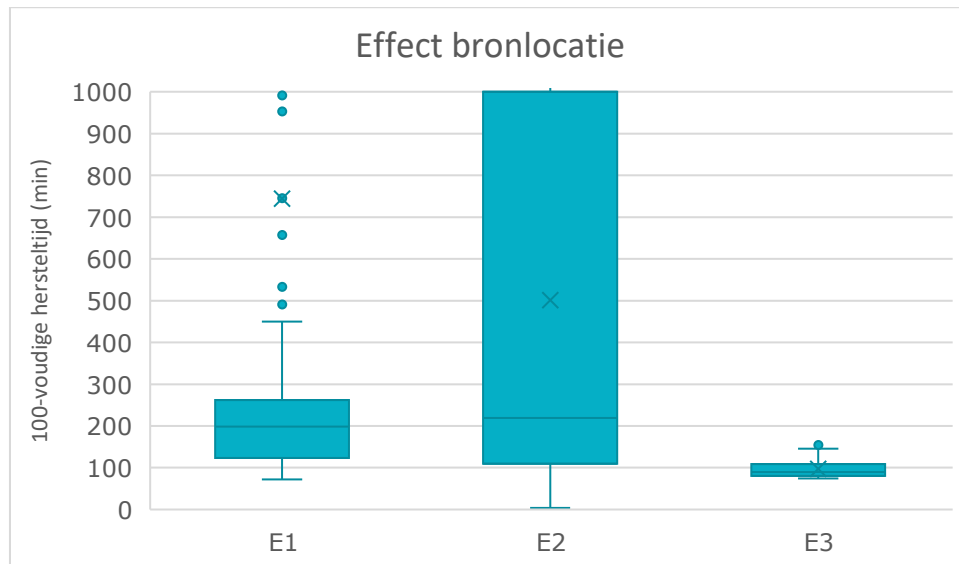
Uit Figuur 3-1 blijkt dat de blootstelling c.q. concentratie het hoogst is voor bronlocatie E1 en het laagst voor bronlocatie E3. De verdeling van de concentratie is dus sterk afhankelijk van de emitterlocatie. Dit wordt veroorzaakt door het niet homogeen zijn van de concentratie in een ruimte. De piekconcentratie bij bronlocatie E1 is gecentreerd in het midden en aan de linkerzijde van de ruimte terwijl de piek bij bronlocatie E2 gecentreerd is onder de toevoer. Er wordt met name op de hoogte van de emissiebron gemeten.



Figuur 3-1. Maximale deeltjesconcentratie op hoogte 1,2 m voor drie verschillende bronlocaties bij de opstelling met luchtverdeleslang (rode rechthoek) en 3 afvoer (blauwe vierkanten) in een langdurige zorgsetting.

De verschillen tussen verschillende bronlocaties zijn ook zichtbaar in de 100-voudige hersteltijden. In onderstaand figuur staan de hersteltijden voor bronlocatie E1, E2 en E3 weergegeven in een boxplot. Hierbij zijn alle metingen met dezelfde bronlocatie samengevoegd. Belangrijk om hierbij te vermelden is dat in totaal 12 meetopstellingen zijn getest met bronlocatie E1 en E2 en met bronlocatie E3 zijn slechts 6 meetopstellingen getest, zie Tabel 2-2.

In Figuur 3-2 is te zien dat de spreiding van de 100-voudige hersteltijd het grootst is voor bronlocatie E2 en het kleinst voor bronlocatie E3. Er zijn echter minder metingen uitgevoerd bij bronlocatie E3, als alleen de metingen met elkaar worden vergeleken die voor alle drie de bronlocaties zijn uitgevoerd dan is nog steeds de spreiding in de 100-voudige hersteltijd van bronlocatie E3 het kleinst (74 – 176 min). De spreiding van de 100-voudige hersteltijd van bronlocatie E1 is (72 – 307 min) en de spreiding van bronlocatie E2 is nog steeds het grootst (65 – 463 min). Echter, enkel gebruik maken van de hersteltijd geeft een vertekend beeld. Lange hersteltijden kunnen ontstaan doordat er een hoge deeltjesconcentratie aanwezig is en weinig verdunning of verversing van de lucht op die locatie, maar het kan ook ontstaan door een lage deeltjesconcentratie en weinig verdunning of verversing van de lucht. Daarom is het noodzakelijk deze boxplots samen met de absolute deeltjesconcentratie-figuren te analyseren.

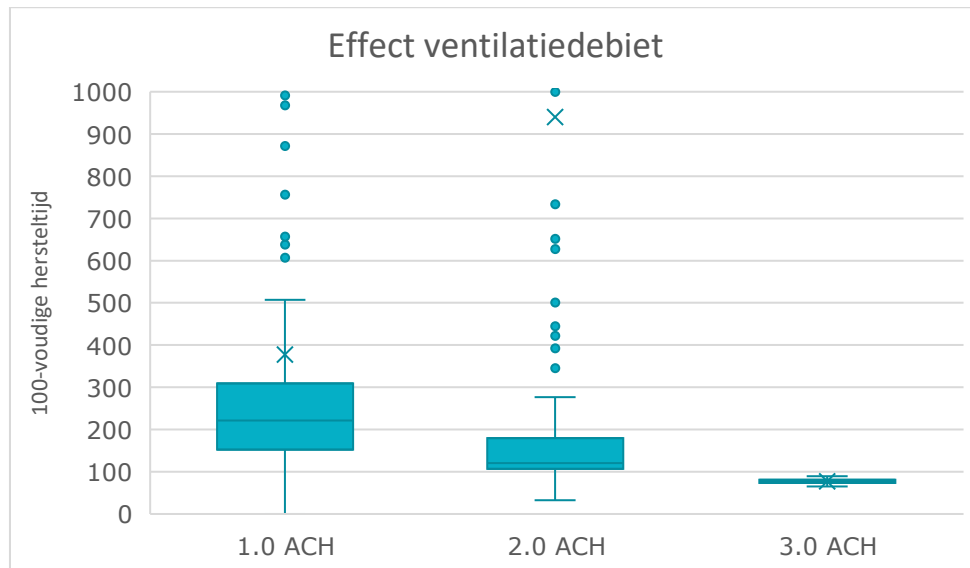


Figuur 3-2. 100-voudige hersteltijd voor drie verschillende bronlocaties bij alle meetopstellingen in een langdurige zorgsetting.

3.1.2 Effect ventilatiedebiet

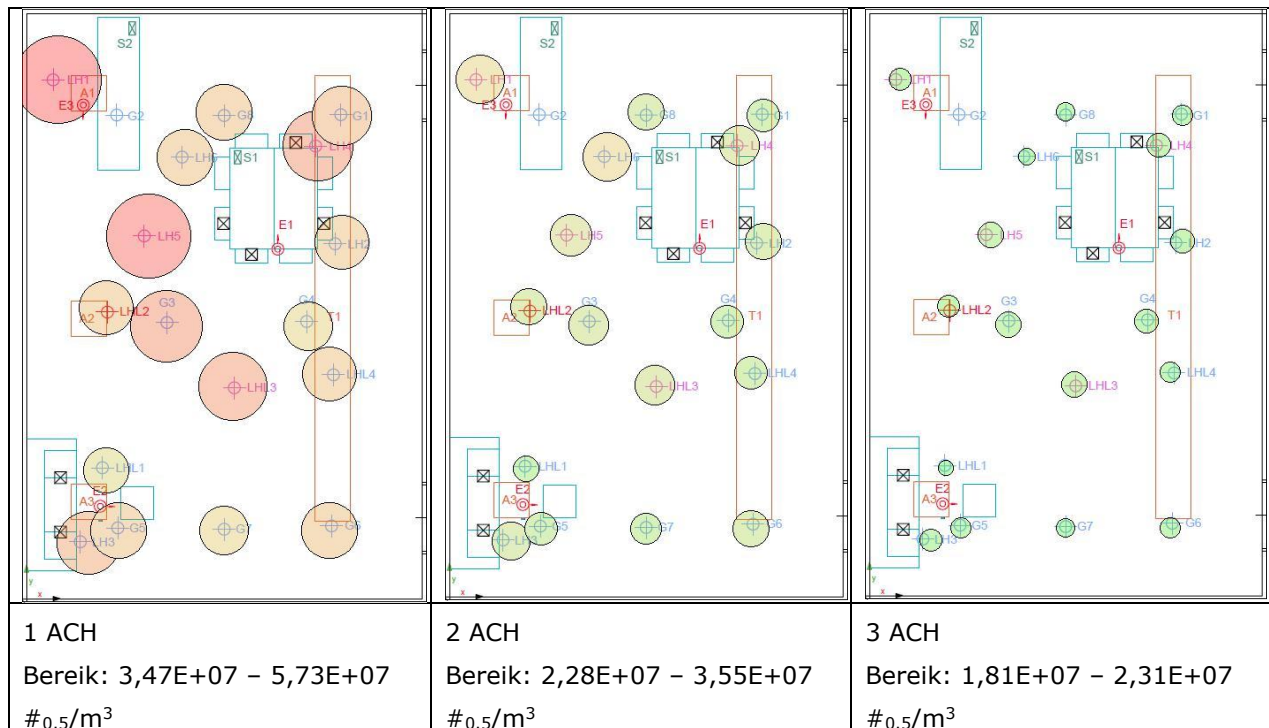
Twee verschillende ventilatiedebieten zijn getest in de verschillende meetopstellingen, 200 m³/h (1 ACH), 400 m³/h (2 ACH). Enkele meetopstellingen zijn ook getest voor ofwel 150 m³/h (0,75 ACH) of 600 m³/h (3 ACH). De 150 m³/h komt voort uit de in-situ metingen die uitgevoerd zijn in deze programmalijn. Een debiet van 600 m³/h komt overeen met het maximale debiet dat de testfaciliteit kan leveren. Een ventilatiedebiet van 150 m³/h kwam overeen met wat er uit de praktijkmetingen was opgehaald, 1 ACH komt overeen met de eis voor nieuwbouw in het besluit bouwwerken leefomgeving (oude Bouwbesluit 2012). Het effect van het ventilatiedebiet is te zien in Figuur 3-3. Hier staat de gemiddelde 100-voudige hersteltijd weergegeven bij de verschillende ventilatiedebieten. Belangrijk hierbij is dat er minder metingen zijn uitgevoerd voor 3 ACH.

In Figuur 3-3, is te zien dat de 100-voudige hersteltijd korter wordt als het ventilatiedebiet wordt verhoogd. Verder wordt de spreiding tussen de verschillende locaties met deeltjestellers kleiner.



Figuur 3-3. 100-voudige hersteltijd voor drie verschillende ventilatiedebieten bij alle meetopstellingen in een langdurige zorgsetting.

De maximale concentratie in de ruimte wordt lager als het ventilatiedebiet hoger is, dit is gevisualiseerd in Figuur 3-4. Het verschil in deeltjesconcentratie tussen 1 ACH en 3 ACH is gemiddeld $2,45\text{E}+07$, dit komt overeen met een gemiddelde reductie van 51% van de deeltjesconcentratie en daarmee de blootstelling in de ruimte. De verspreiding van de deeltjesconcentratie door de ruimte is ook homogener. Voor 1 ACH liggen de deeltjesconcentraties tussen de $3,47\text{E}+07$ – $5,73\text{E}+07$ $\#_{0.5}/\text{m}^3$ (aantal deeltjes van $0,5 \mu\text{m}$ en kleiner per m^3) (verschil: $2,26\text{E}+07$ $\#_{0.5}/\text{m}^3$) en voor 3 ACH liggen de deeltjesconcentraties tussen de $1,81\text{E}+07$ – $2,31\text{E}+07$ $\#_{0.5}/\text{m}^3$ (verschil: $0,5\text{E}+07$ $\#_{0.5}/\text{m}^3$). Het verschil in deeltjesconcentratie tussen 1 ACH en 2 ACH is gemiddeld $1,51\text{E}+07$ $\#_{0.5}/\text{m}^3$, dit komt overeen met een gemiddelde reductie van 33% van de deeltjesconcentratie in de ruimte. Dat er geen lineair verband is met het luchtdebiet wordt vermoedelijk veroorzaakt door de inhomogeniteit.



Figuur 3-4. Maximale deeltjesconcentratie op hoogte 1,2 m bij bronlocatie E1 voor drie verschillende ventilatiedebieten bij meetopstelling luchtverdeelslang en 3 afvoer in een langdurige zorgsetting.

3.1.3 Effect ventilatieopstelling

In totaal zijn er 5 verschillende ventilatieconfiguraties getest in de testfaciliteit. Vier van deze ventilatieconfiguraties zijn getest onder dezelfde omstandigheden, gelijke locatie van de warmtebronnen, meubels en bronlocaties. Hiermee wordt het effect van de ventilatieconfiguratie inzichtelijk gemaakt. In Figuur 3-5 is voor 4 van de 5 ventilatieconfiguraties de maximale blootstelling gevisualiseerd voor een ACH van 1,0 en voor bronlocatie E1.

Uit Figuur 3-5 blijkt dat de lokale blootstelling verschillend is per ventilatieconfiguratie maar het verschil tussen de gemiddelde blootstelling bij de verschillende ventilatieconfiguraties heeft een beperkte spreiding van 3,62E+07 – 4,52E+07 #_{0.5}/m³.

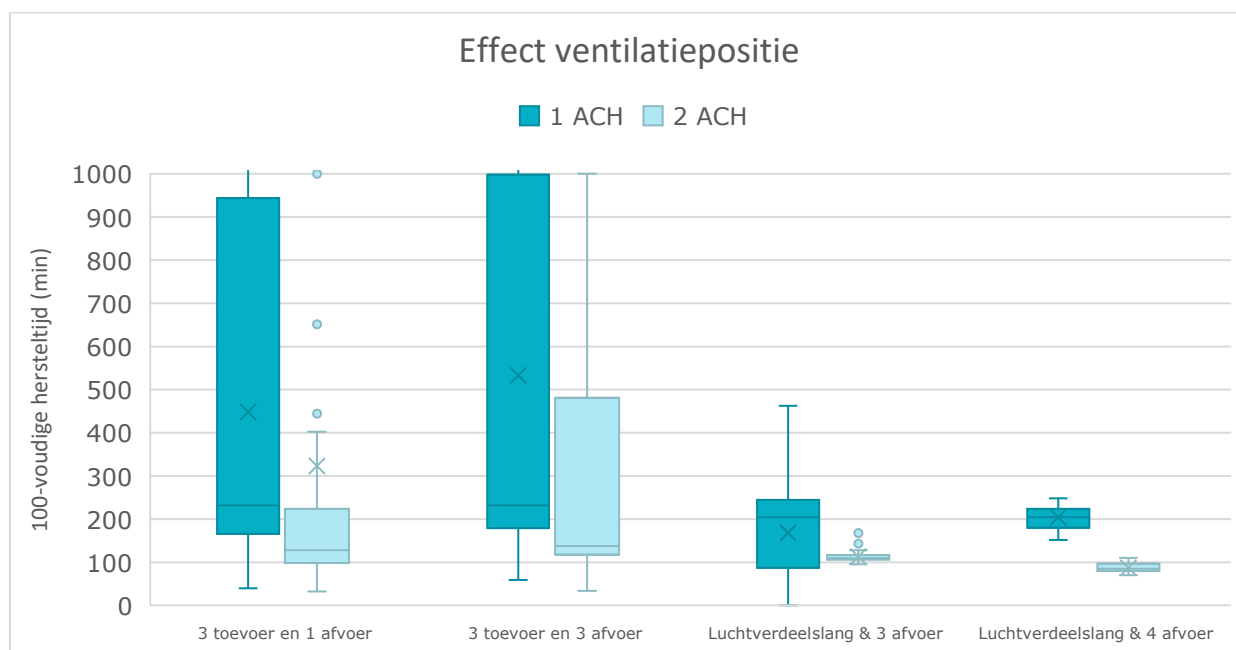


Figuur 3-5. Maximale deeltjesconcentratie op hoogte 1,2 m bij bronlocatie E1 voor vier verschillende ventilatieopstellingen in een langdurige zorgsetting.

Het effect van de ventilatieopstelling op de deeltjesverspreiding en -concentratie in de ruimte is beter zichtbaar als je de 100-voudige hersteltijden van de verschillende ventilatieconfiguraties met elkaar

vergelijkt zoals in Figuur 3-6. Deze zijn voor elke opstelling gemeten voor 1 ACH (200 m³/h) en 2 ACH (400 m³/h).

Uit dit figuur blijkt dat de spreiding tussen de minimale en maximale 100-voudige hersteltijd het kleinst is bij de ventilatieconfiguratie met een luchtverdeelslang en 4 afvoeren (153 – 248 min). Gezien het lage ventilatiedebiet (1 ACH) zijn dit nog steeds relatief lange hersteltijden. In Figuur 3-6 zijn alle bronlocaties samengevoegd dus er kan ook worden geconcludeerd dat de 100-voudige hersteltijden bij de implementatie van een luchtverdeelslang minder afhankelijk zijn van de bronlocatie.

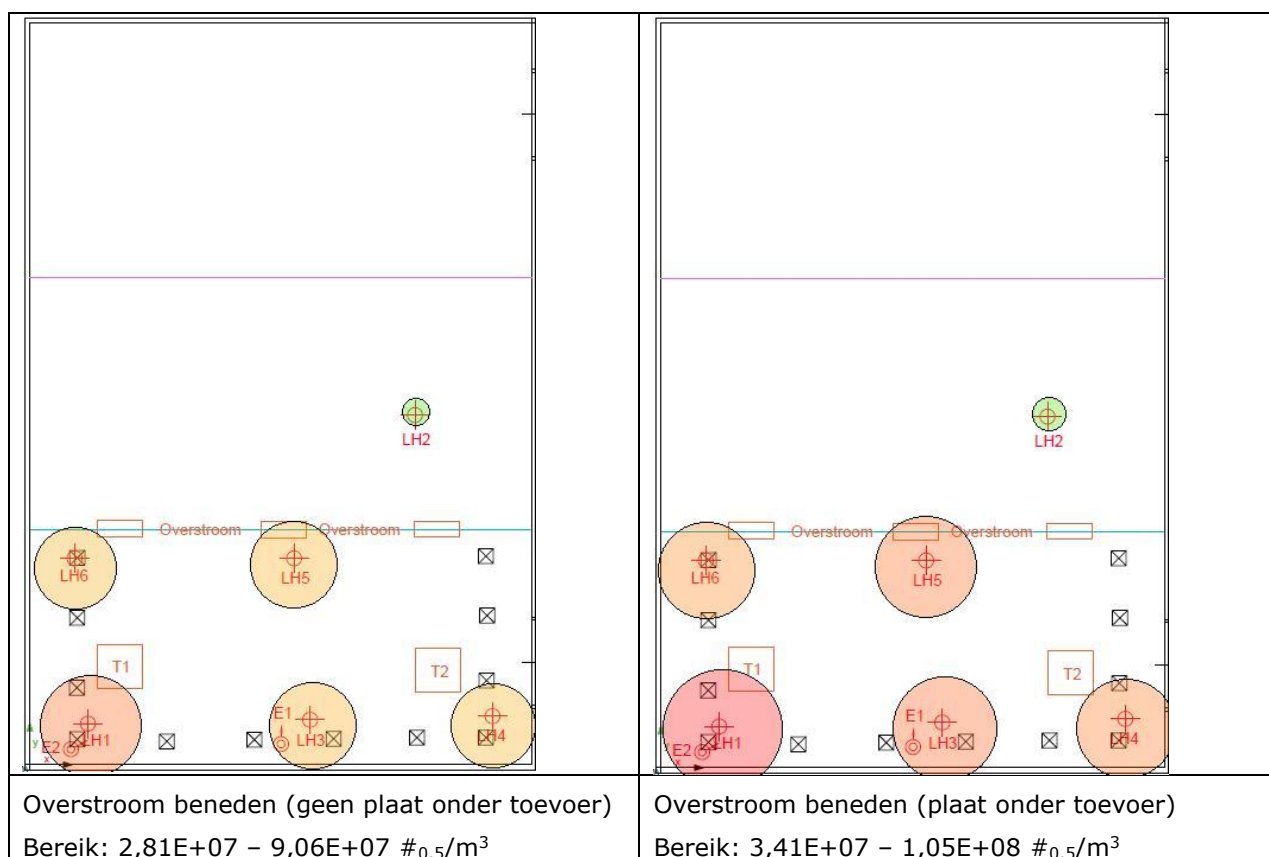


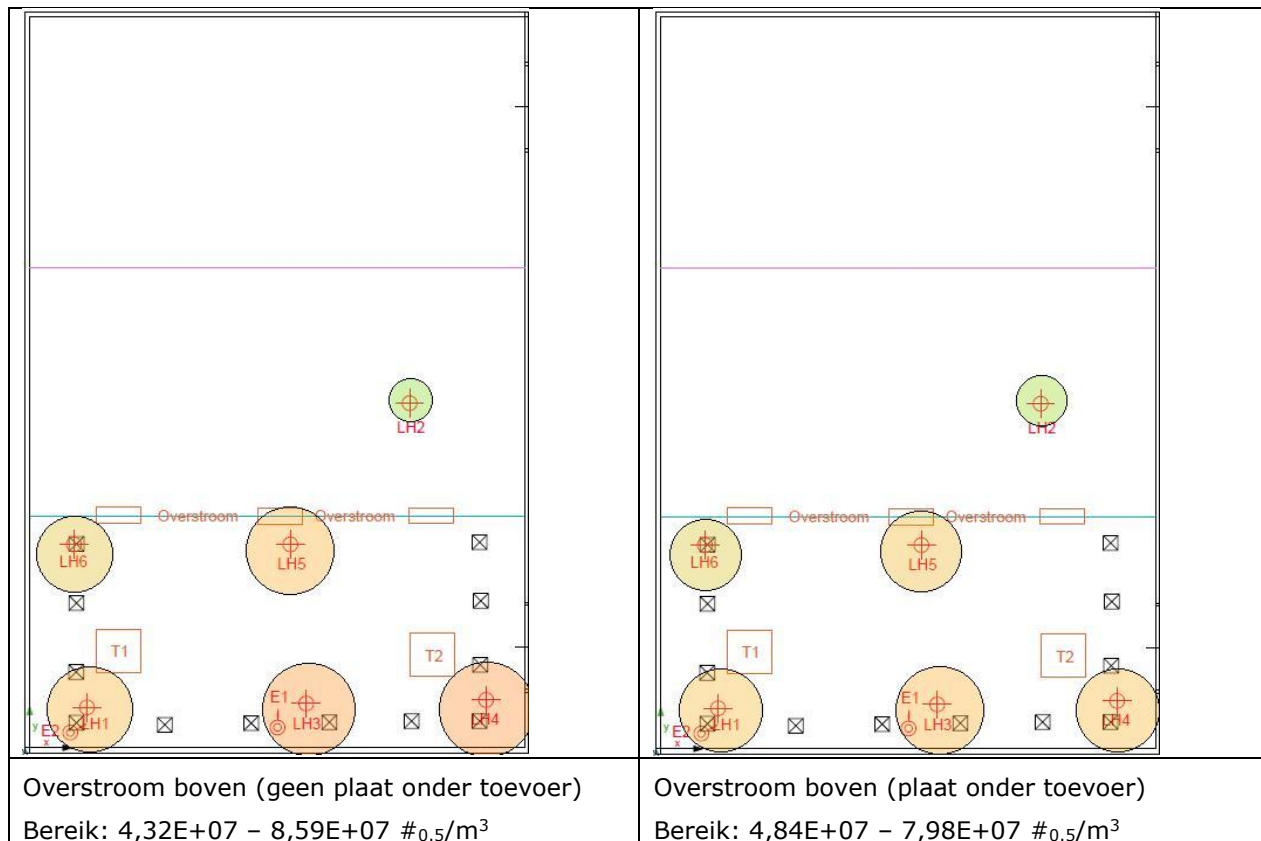
Figuur 3-6. 100-voudige hersteltijd voor vier verschillende ventilatieopstellingen in een langdurige zorgsetting.

Uit Figuur 3-6 is de 100-voudige hersteltijd het kleinst bij het toepassen van een luchtverdeelslang in combinatie met 4 afvoerpunten. Dit staat in contrast met de maximale deeltjesconcentratie uit Figuur 3-5 waar gebieden met een hoge deeltjesconcentratie worden afgebeeld. Voor deze meetopstelling is ook de luchtstroommeting geanalyseerd om te onderzoeken hoe de lucht door de ruimte beweegt en of de luchtsnelheden in de ruimte hoog zijn. Dit zou kunnen resulteren in een hogere risico op tocht in de ruimte. In paragraaf 3.1.4 wordt hier verder op ingegaan.

Het effect van de opstelling op de deeltjesspreiding en -concentratie in de ruimte is ook gemeten voor de (gemeenschappelijke) kleedkamers van zwembaden. De blootstelling voor deze metingen is te zien in Figuur 3-7. Figuur 7-4 in de bijlage bevat foto's voor elke gemeten configuratie die in Figuur 3-7 zijn opgenomen.

Een overstort aan de onderzijde van de wand zorgt voor gemiddeld hogere concentraties in de ruimte dan een overstort aan de bovenzijde van de wand. De combinatie overstort aan de bovenkant en een houten plaat onder de toevoer om de luchtstroom richting mee te geven, zorgt voor de laagste concentratie in de ruimte. De locatie van de overstort en de richting die wordt meegegeven door de plaat onder de toevoer zorgen ervoor dat de ingeblazen lucht mengt met de verontreinigde lucht en deze afvoert naar boven, waardoor het blootstellingsrisico vermindert op de hoogte waarop de deeltjes gemeten zijn in deze situatie.





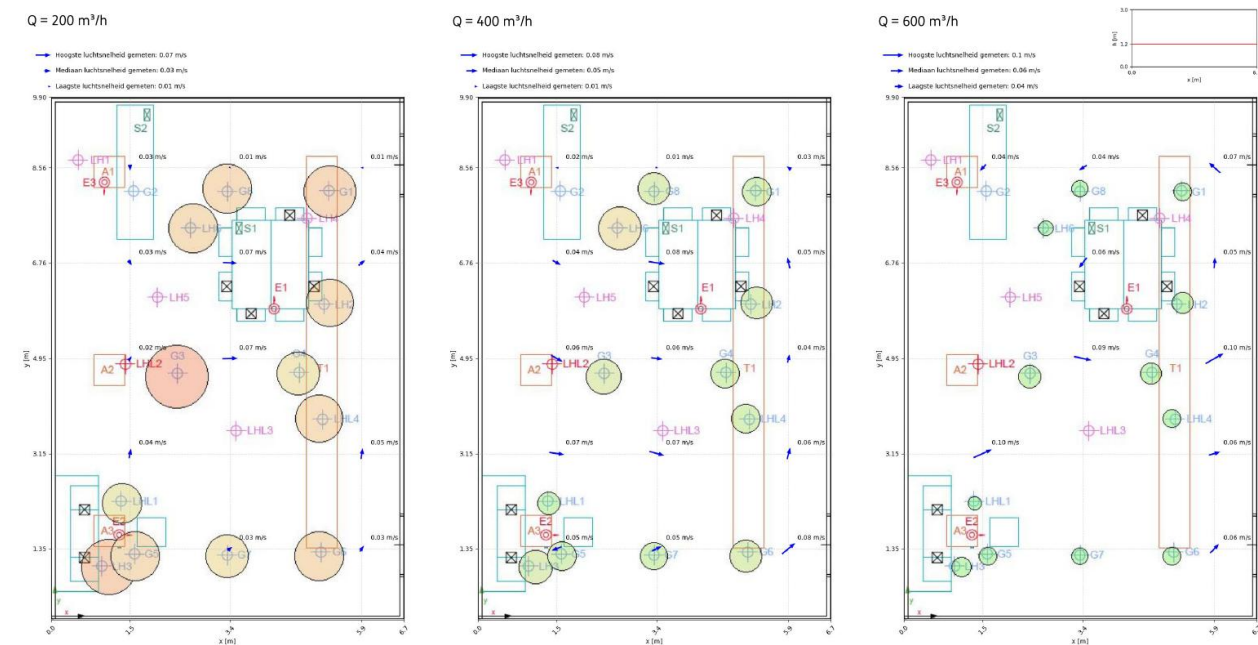
Figuur 3-7. Maximale deeltjesconcentratie op hoogte 1,2 m voor vier verschillende ventilatieopstellingen in een langdurige zorgsetting.

3.1.4 Flowmetingen bij meetopstelling met luchtverdeelslang

Bij de meetopstellingen met luchtverdeelslang wordt er tweezijdig ingeblazen doordat er perforaties in de bovenste 10 centimeter zijn aangebracht. Bij de opstelling met luchtverdeelslang en 4 afvoeren is er meer ruimte voor de worp aan beide zijden. Bij de opstelling met luchtverdeelslang en 3 afvoeren is de luchtverdeelslang langer, maar heeft slechts aan één zijde perforaties, waardoor de uittredesnelheid hoger zal zijn dan bij 3 afvoeren en een gelijk luchtdebiet als er minder oppervlak aan openingen is ten opzichte van de situatie met 4 afvoeren. Er is geen duidelijk stromingspatroon te onderscheiden (zie Figuur 3-8 en Figuur 3-9).



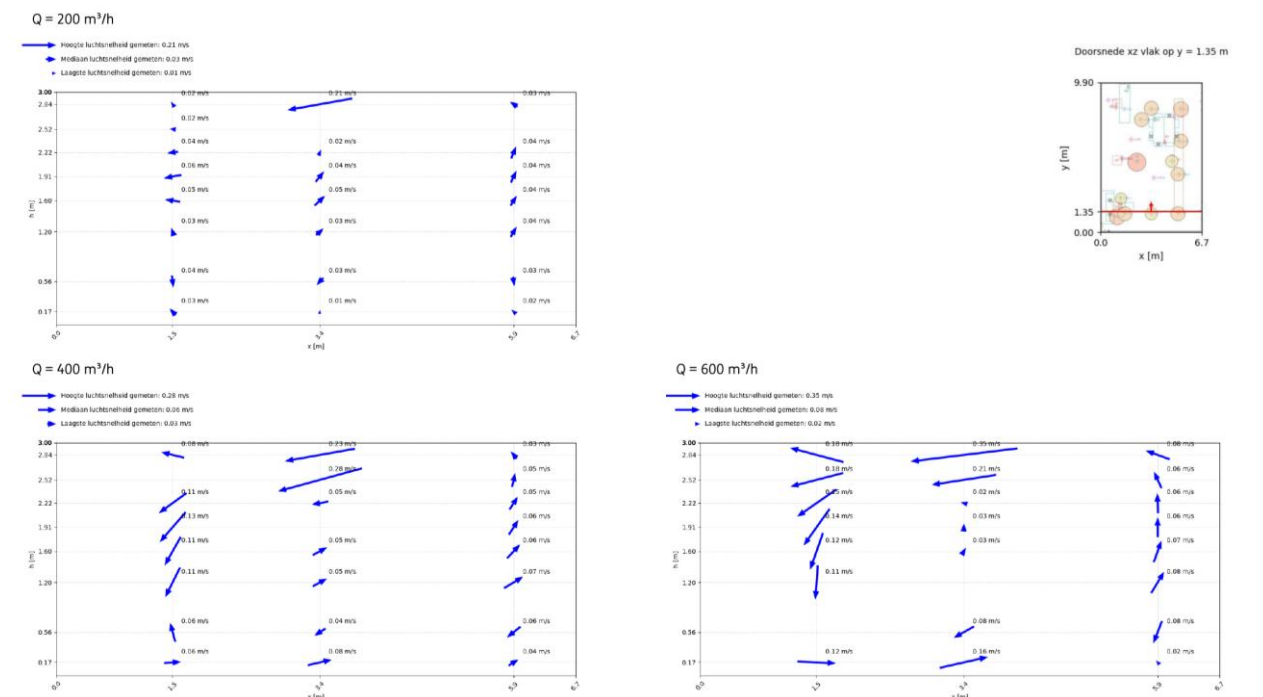
Figuur 3-8. Luchtsnelheidsvectoren op 9 locaties bij de ventilatieconfiguratie luchtverdeelslang met 4 afvoeren op hoogte 1,2 m bij bronlocatie 1.



Figuur 3-9. Luchtsnelheidsvectoren op 9 locaties bij de ventilatieconfiguratie luchtverdeelslang met 3 afvoeren op hoogte 1,2 m bij bronlocatie 1.

De luchtverdeelslang in de ventilatieconfiguratie met 3 afvoeren blaast éézijdig in (vanwege perforaties aan één zijde) met een luchtdebiet van 200 m³/h, 400 m³/h of 600 m³/h.. Door de toename in worp

(Figuur 3-10) treedt er menging op door het ontstaan van een wervel binnen een groter volume van de ruimte. Deze menging zorgt uiteindelijk voor de gemeten afname in concentraties op verschillende punten.



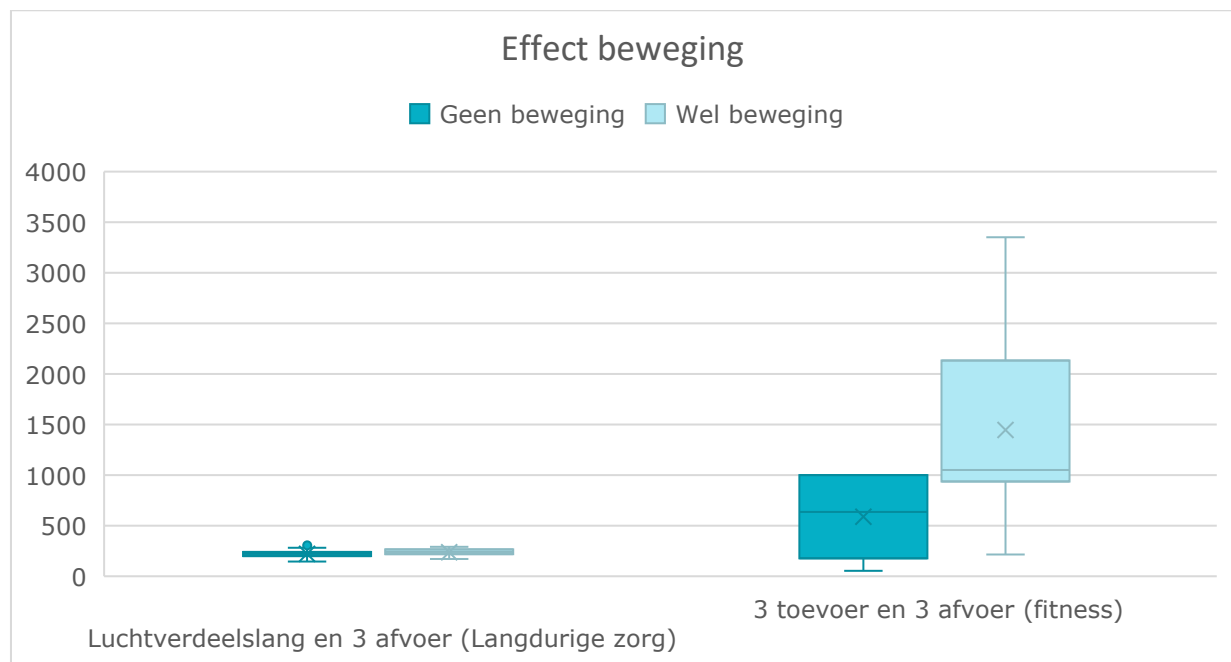
Figuur 3-10. Luchtsnelheidsvectoren op 3 locaties bij de ventilatieconfiguratie luchtverdeelslang met 3 afvoeren op 9 verschillende hoogtes.

Met name de snelheidsverdeling in het verticale vlak toont het stromingspatroon, waarbij ingeblazen lucht via de overstaande wand richting vloerniveau wordt omgeleid en waarna een circulerende stroming ontstaat door inductie van lucht in de worp van de luchtverdeelslang. Bij een hoger luchtdebiet ($= 600 \text{ m}^3/\text{h}$) zien we een hogere gemiddelde en maximale luchtsnelheid nabij de vloer, wat mogelijk kan leiden tot comfort issues i.c.m. een lagere luchttemperatuur van de toevoer, en centraal in de ruimte neemt de luchtsnelheid af en vind menging aan de rand van de jet plaats (inductie). Er zijn echter niet over de volledige lengte perforaties aanwezig in de luchtverdeelslang, waardoor er een asymmetrisch stromingspatroon ontstaat en er dus nog wel lokaal menging optreedt centraal in de ruimte. Deze effecten zijn minder waarneembaar bij een lager luchtdebiet, waarbij $400 \text{ m}^3/\text{h}$ alsnog een voldoende dispersie van de concentratie laat zien zonder een 'verhoogd risico' op comfort issues.

3.1.5 Effect beweging

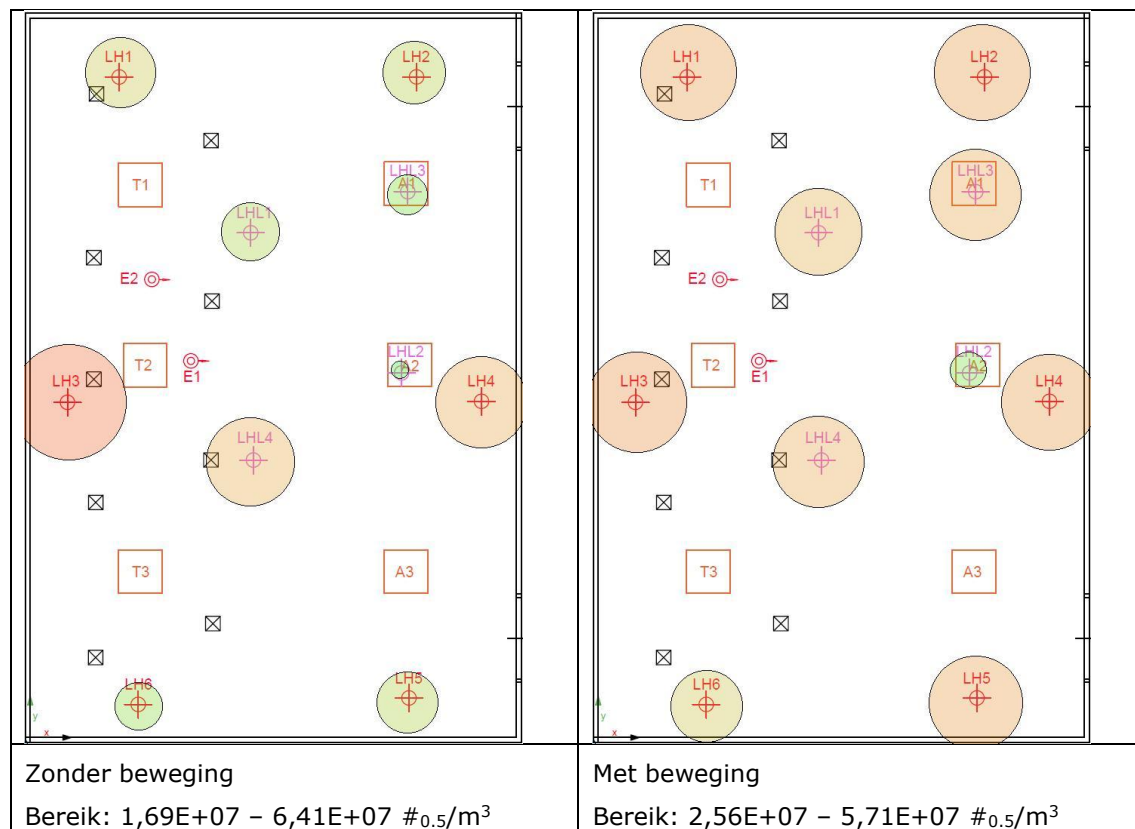
Voor twee verschillende meetopstellingen is er een extra meting uitgevoerd met een ventilator in de ruimte waarmee de aanwezigheid van een bewegend persoon wordt gesimuleerd in de ruimte om te onderzoeken wat het effect is van beweging op de deeltjesconcentratie in de ruimte. Deze ventilator

stond continu aan, en geeft daarom een extreme situatie weer. In Figuur 3-11 zijn de resultaten weergegeven voor deze meting.



Figuur 3-11. 100-voudige hersteltijd voor twee verschillende ventilatieopstellingen in een langdurige zorgsetting en fitness met en zonder beweging in de ruimte.

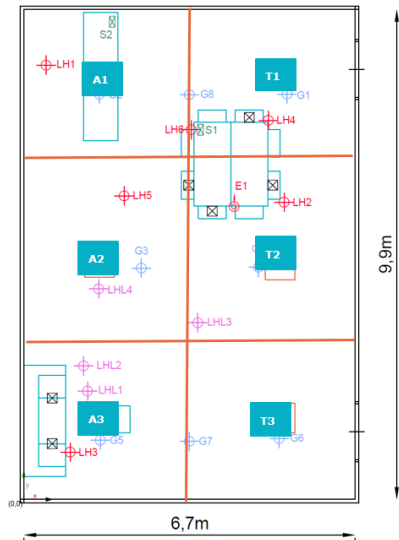
Uit Figuur 3-11 blijkt dat de 100-voudige hersteltijd voor de onderzochte meetpunten gemiddeld langer is als er beweging in de ruimte is. Voor de fitness is de spreiding van de 100-voudige hersteltijd 54,1 – 1.000 min voor de meetopstelling zonder beweging en 216 – 3.351 min voor de meetopstelling met beweging. De blootstelling is -als er ventilatoren aan de ruimte worden toegevoegd- homogener verdeeld, dit is te zien in Figuur 3-12.



Figuur 3-12. Maximale deeltjesconcentratie op hoogte 1,2 m voor een fitness meetopstelling zonder beweging (links) en een fitness meetopstelling met beweging (rechts).

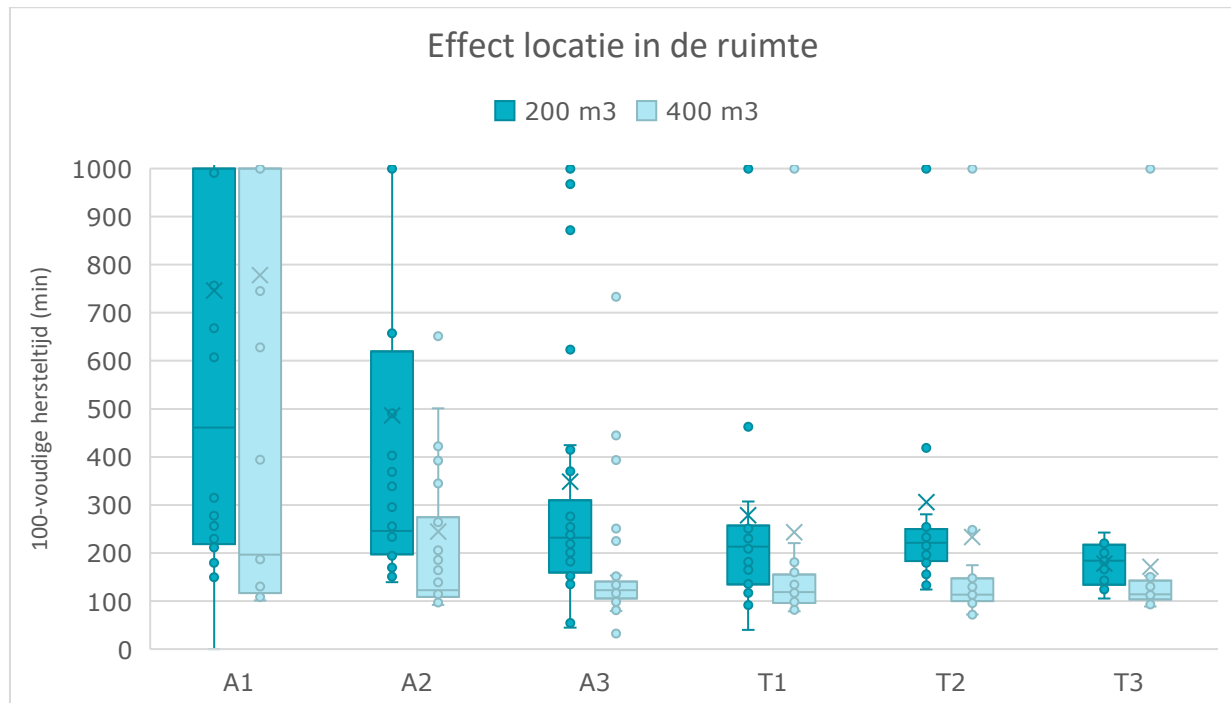
3.1.6 Locatie van personen/meubels in de ruimte

Als laatste is onderzocht of er locaties in de ruimte zijn waar het blootstellingsrisico kleiner is dan op andere locaties. Dit zou kunnen worden betrokken in het ontwerp van de ruimte zodat mensen zich kunnen begeven op locaties in de ruimte waar de blootstelling kleiner is. Om dit te onderzoeken is eerst de 100-voudige hersteltijd geanalyseerd op verschillende locaties in de ruimte. In totaal is de ruimte in 6 vlakken verdeeld en alle deeltjestellers die in die vlakken liggen zijn bij elkaar opgeteld (zie Figuur 3-13). Er zijn 3 vlakken die het dichtst bij de afvoer liggen (A1, A2 & A3) en er zijn 3 vlakken die het dichtst bij de toevoer liggen (T1, T2 & T3).



Figuur 3-13. De testfaciliteit verdeeld in zes verschillende vlakken; dit voorbeeld geldt voor de metingen met luchtverdeelslang.

In Figuur 3-14 staan de 100-voudige hersteltijden weergegeven, alle metingen met 200 m³/h en 400 m³/h met bronlocatie E1 of E2 zijn meegenomen in dit figuur. Uit de figuur blijkt dat de 100-voudige hersteltijd voor de onderzochte configuratie het langst is en de grootste variatie heeft bij afvoer A1 en A2. De 100-voudige hersteltijd is het kortst in het vlak waar zich de toevoer bevindt, dit impliceert dat de deeltjesconcentratie in de omgeving van de toevoer sneller afneemt dan bij de afvoer. Verder neemt de deeltjesconcentratie sneller af aan de kant van afvoer A3 en toevoer T3 vergeleken met de andere locaties in de ruimte.



Figuur 3-14. 100-voudige hersteltijd voor zes verschillende delen van de ruimte in een langdurige zorgsetting voor een ventilatiebiet van 200 m³/h en 400 m³/h.

4 CONCLUSIES

Het doel van dit onderzoek is om antwoord te geven op de volgende onderzoeksvragen:

1. *Hoe draagt een ventilatievoorziening bij aan verspreiding van aerosolen door een ruimte? Wordt dit beïnvloed door de ventilatievoorziening of bijvoorbeeld de situatie in de ruimte?*
2. *Hoe effectief draagt ventilatie bij aan het verlagen van de blootstelling aan aerosolen in een ruimte?*

Om deze vragen te beantwoorden zijn deelvragen opgesteld die in dit hoofdstuk beantwoord worden. Het onderzoek is uitgevoerd door kunstmatige deeltjes (paraffine) te emitteren. Deze deeltjes geven een beeld over het effect op het afvoeren en verdunnen van de deeltjesconcentratie. De geëmitteerde deeltjes van 0,2-10 μm gedragen zich niet volledig als virusdeeltjes. De deelvragen en de antwoorden daarop zijn:

- a. *Wat is het effect van de bronlocatie op de verspreiding van deeltjes in de ruimte?*

De bronlocatie heeft een sterke invloed op de verspreiding van deeltjes in de ruimte. Indien de bronlocatie nabij de afvoer is gepositioneerd, worden voor de onderzochte configuratie van een woonkamer in de langdurige zorg aerosolen sneller afgevoerd en komen daarmee minder in de ruimte terecht. Dit betekent dat de blootstelling aan deeltjes voor mensen in de ruimte lager is bij deze configuraties.

- b. *Wat is het effect van het ventilatiedebiet op de verspreiding van deeltjes in de ruimte?*

Het verhogen van het ventilatiedebiet heeft een positief effect op het verdunnen en afvoeren van aerosolen. Voor de uitgevoerde experimenten geldt dat het verhogen van het ventilatiedebiet van 1 ACH naar 2 ACH een gemiddelde reductie van 33% in de blootstelling laat zien, voor het verhogen van 1 naar 3 ACH volgt een gemiddelde reductie van 51% uit de metingen.

- c. *Wat is het effect van de ventilatieconfiguratie op de verspreiding van deeltjes in de ruimte?*

De onderzochte ventilatieconfiguraties laten grote verschillen zien in lokale blootstelling aan deeltjes. De variatie in de *gemiddelde* blootstelling in de ruimte bij verschillende ventilatieconfiguraties is echter beperkt. Het effect van de ventilatieconfiguratie op het verdunnen en afvoeren is bij het vergelijken van de 100-voudige herstelltijden zichtbaar. Het toepassen van een luchtverdeelslang resulteert in een homogener verdeling van aerosolen door de ruimte met een lagere gemiddelde blootstelling. Deze deeltjesconcentratie wordt vervolgens relatief snel verdund en afgevoerd. Een reductie in 100-voudige herstelltijd van 57% (50 min) is zichtbaar als er van een 3 toevoer 3 afvoer configuratie naar een luchtverdeelslang met 4 afvoer wordt gegaan bij een luchtdebiet van 2 ACH. Voor een luchtdebiet van 1 ACH is deze reductie 14% (28 min).

d. Zijn er specifieke locaties in de ruimte die geclassificeerd kunnen worden als 'hoog risico' gebieden?

Het aanwijzen van gebieden met een hoger risico – gebaseerd op een hogere blootstelling – is lastig op basis van de uitgevoerde experimenten. Dit is sterk afhankelijk van de bronlocatie. In de praktijk kan worden gesteld dat de kans groot is dat een bron zich bij een zitgedeelte in de ruimte bevindt. De 100-voudige hersteltijd is het kortst bij de toevoer. Dit impliceert dat de deeltjesconcentratie in de omgeving van de toevoer sneller afneemt dan bij de afvoer als de bron afwezig is. Als er een luchtafvoer nabij de bron aanwezig is, zal dit een ander beeld geven qua blootstelling dan wanneer de bron zich bij een toevoer bevindt. Het luchtstromingspatroon heeft invloed op de aerosolverbreiding. Dit patroon is afhankelijk van het type ventilatierooster, het luchtdebiet, resulterende werp van het systeem en lokale belemmeringen in de ruimte. Factoren die sterk variëren in de praktijk.

e. Wat is het effect van beweging op de verspreiding van deeltjes in de ruimte?

Beweging in een ruimte (MUS) zorgt voor meer homogene spreiding van de deeltjesconcentratie. Het resulteert echter niet in lagere hersteltijden.

Met de inzichten uit de uitgevoerde metingen kunnen de hoofdvragen als volgt beantwoord worden:

1. Hoe draagt een ventilatievoorziening bij aan verspreiding van aerosolen door een ruimte? Wordt dit beïnvloed door de ventilatievoorziening of bijvoorbeeld de situatie in de ruimte?

Het is sterk afhankelijk van de bronlocatie, de systeemconfiguratie (plaats van toe- en afvoer) en de luchthoeveelheid. In algemene termen kan worden gesteld dat met de onderzochte configuraties bij luchthoeveelheden die in de praktijk worden gerealiseerd, geen sprake is van een homogene blootstelling in een ruimte. Een grotere luchthoeveelheid in de ruimte leidt tot een homogener en lagere blootstelling waardoor de positie van de bron minder van belang is. Ook het toepassen van een luchtverdeelslang als toevoer draagt bij aan een homogener en lagere gemiddelde blootstelling op de meetpunten. Daarnaast blijkt dat een bronlocatie nabij een ventilatieafvoer resulteert in lagere gemiddelde blootstelling dan wanneer een bronlocatie nabij een ventilatietoevoer is gepositioneerd. Met het positioneren van mensen in een ruimte kan hier mogelijk rekening mee worden gehouden.

2. Hoe effectief draagt ventilatie bij aan het verlagen van de blootstelling aan aerosolen in een ruimte?

Het meest effectief is het verhogen van het ventilatiedebiet om de blootstelling aan aerosolen in een ruimte te reduceren. Uit de uitgevoerde metingen blijkt dat het verhogen van het ventilatiedebiet van 1 ACH naar 2 ACH een gemiddelde reductie, op basis van de meetpunten, van 33% in blootstelling oplevert en van 1 naar 3 ACH wordt de blootstelling met gemiddelde 51% gereduceerd. Het toepassen van een luchtverdeelslang reduceert hersteltijden ten opzichte van het niet toepassen van een luchtverdeelslang bij de onderzochte configuraties. De toepassing van een luchtverdeelslang zorgt voor een betere menging in de ruimte en daarmee een homogener verdeling van de deeltjes. Het verschil tussen de slechtste en beste configuratie bedraagt een factor 3 in blootstelling. De slechtste configuratie is de ventilatie

opstelling met 3 toevoerroosters en 3 afvoerroosters. De beste gemeten configuratie is de ventilatieopstelling met één luchtverdeelslang en 4 afvoerroosters. De luchtverdeelslang in combinatie met een hoger ventilatiedebiet zorgt voor een grotere worp van de toegevoerde lucht en betere menging. Dit zorgt uiteindelijk voor een afname in deeltjesconcentraties op verschillende locaties.

Belangrijk voor een effectieve ventilatievoorziening is te voorkómen dat een groot deel van de toegevoerde lucht afgevoerd wordt zonder dat die een groot deel van de ruimte bereikt heeft (kortsluiting). Specifiek voor gemeenschappelijke kleedruimten zoals in een zwembad is kortsluiting een geregeld voorkomende situatie.

5 LIMITATIES

Gedurende het onderzoek zijn er beperkingen vastgesteld aan 1) de gebruikte methode om effectiviteit van de ventilatievoorzieningen te bepalen in een testfaciliteit en 2) de gehanteerde uitkomstparameters.

Voor de testfaciliteit gericht op langdurige zorginstellingen is uitgegaan van een evenredige verdeling van toe- en afvoerpunten door de ruimte. Voor programmalijn II heeft dit geleid tot een regelmatig grid voor een nauwkeurige validatie van de simulaties die uitgevoerd zijn. Dit is echter niet volledige representatief voor een praktijksituatie waardoor de resultaten niet één op één vertaald kunnen worden naar de praktijk.⁹

Tijdens de metingen in de testfaciliteit is gebleken dat de bron (ATM 252) geen constante output van deeltjes leverde. Hierdoor kunnen de absolute concentraties van de verschillende experimenten slechts deels worden vergeleken. Dat heeft echter geen grote impact op de waarde van het onderzoek, want parameters zoals hersteltijd en toenametijd zijn gebaseerd op relatieve concentratieveranderingen onder invloed van ventilatie. Deze parameters ondervinden door de normalisatie vrijwel geen effect van de niet-constante output; de waarden van deze parameters kunnen wel onderling worden vergeleken.

Het vergelijk tussen het gewenste ventilatiedebiet en het daadwerkelijke ventilatiedebiet is voor de configuraties met de luchtverdeelslang gemeten bij de afvoer van de opstelling, en niet zoals bij de overige configuraties, bij de toevoer. Door de goede luchtdichtheid van de faciliteit zijn te toe- en afvoerhoeveelheden nagenoeg gelijk.

Bij de evaluatie aan de hand van enkel de 100-voudige hersteltijd zijn lange hersteltijden geconstateerd. Dit kan een vertekend beeld geven, want weinig verandering in de deeltjesconcentratie (trage afname, lange hersteltijd) kan zowel bij een hoge als bij een lage deeltjesconcentratie optreden. In beide gevallen zal dit zich voordoen op locaties in de ruimte waar weinig tot geen verdunning en afvoer plaatsvindt. Bij een hoge concentratie blijft het blootstellingsrisico hoog, bij een lage concentratie zal het blootstellingsrisico lager zijn. Bij lage concentraties zal ook meespelen dat er wel aan de hand van de lange 100-voudige toenametijd gezien kan worden dat dit om lage deeltjesconcentraties gaat aangezien deze langer zal zijn bij hoge deeltjesconcentraties.

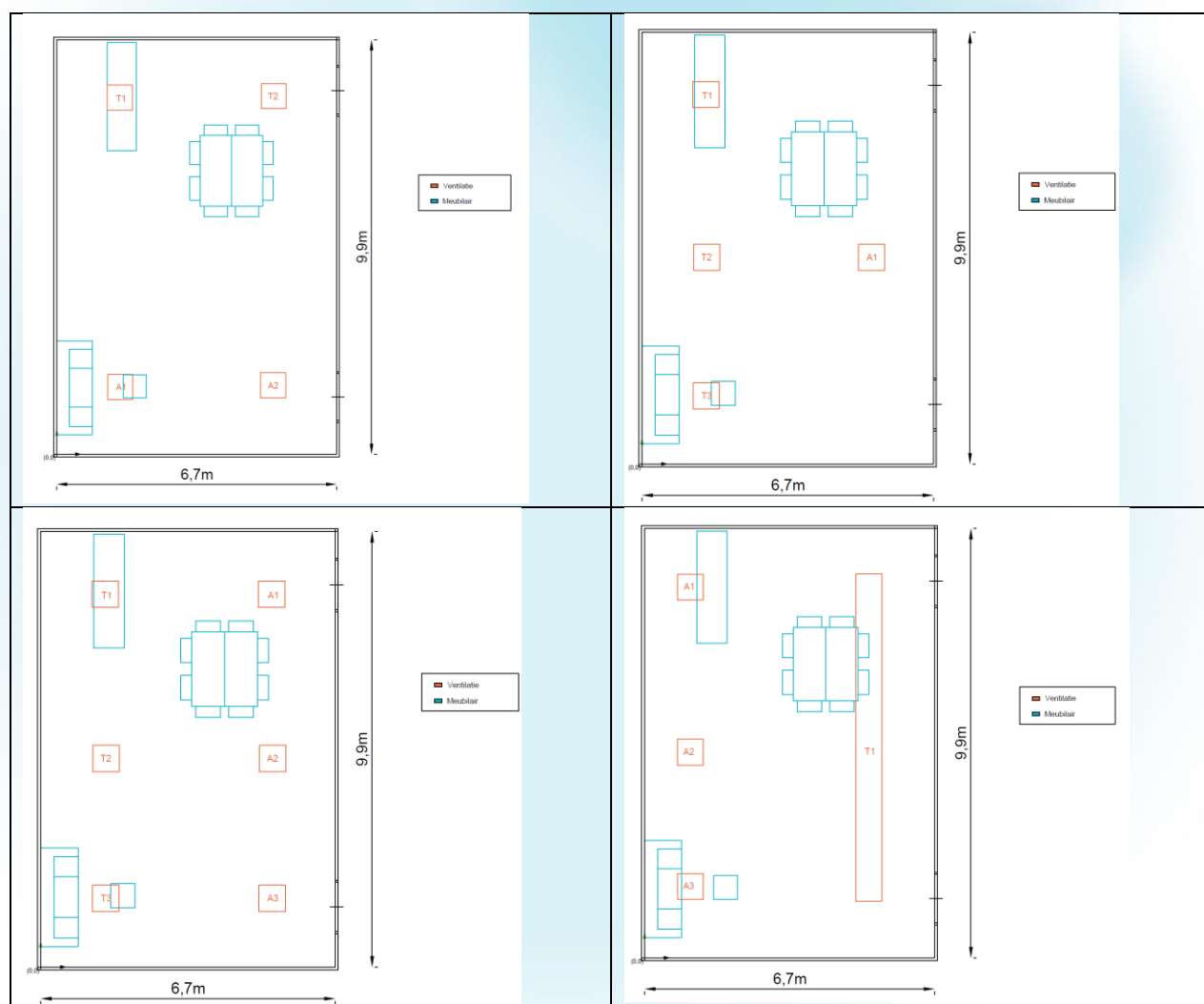
Voor de maatschappelijk urgente sportvoorzieningen geldt dat er vaak split-unit systemen (airco) aanwezig zijn in een ruimte om ruimtelucht af te koelen.¹⁰ Deze hebben veel invloed op het luchtstromingspatroon in een ruimte. Deze systemen zijn lastig te modelleren in een CFD-model zonder meetgegevens. Experimenteel testen in een testfaciliteit biedt mogelijkheden. In dit onderzoek is de toevoeging van een airco niet onderzocht.

Maatschappelijke urgente sportvoorzieningen maken veel gebruik van natuurlijke ventilatie. Het openen van een raam is in de testfaciliteit moeilijk te realiseren. Voor dit onderzoek is gekozen om dit buiten beschouwing te laten en enkel op mechanische ventilatie te focussen. De resultaten gelden daarom voor ruimtes die gebruik maken van mechanische ventilatie, wetende dat er een groot aandeel MUS gebruik maken van natuurlijke ventilatie.

6 REFERENTIELIJST

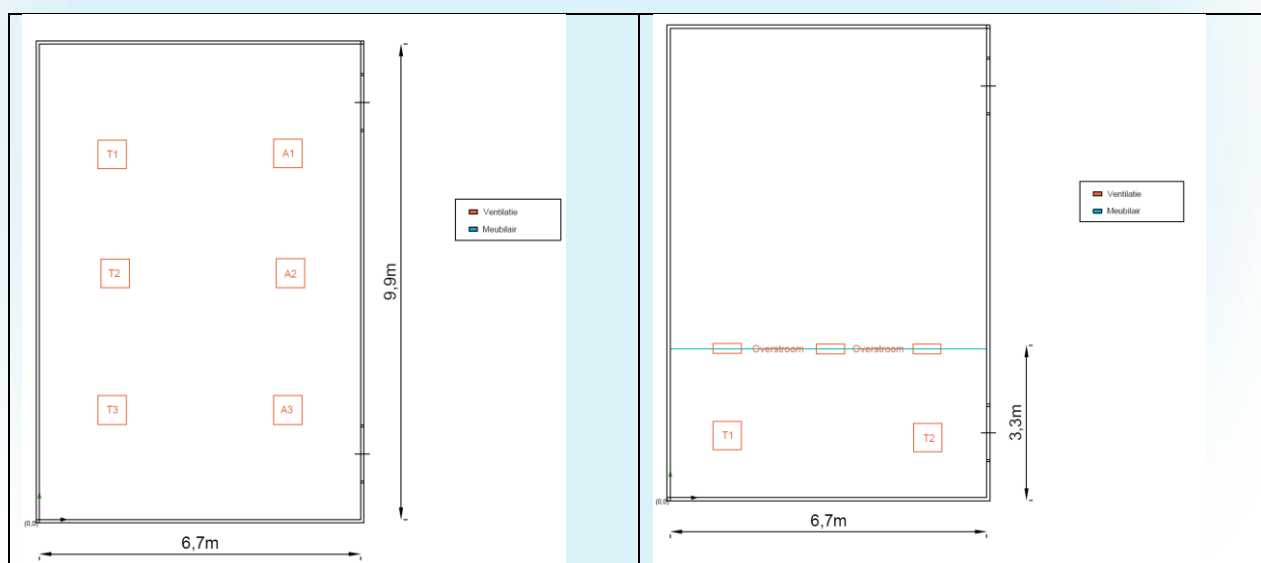
1. Egter Van Wissekerke N, Kompatscher K. BLOOTSTELLING LANGDURIGE ZORG Samenvattend rapport resultaten Programmalijn I.
2. Bufacchi A, Lejeune N. TNO 2023 R11189 Literatuurstudie experimenten langdurige zorg, onderbouwing methodologie. Published online 2023.
3. Ai A, Hashimoto K, Melikov AK. Influence 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
4. 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
5. Asadi S, Wexler AS, Cappa CD, Barreda S, Bouvier NM, Ristenpart WD. Effect of voicing and articulation manner on aerosol particle emission during human speech. *PLoS One*. 2020;15(1):1-15. doi:10.1371/journal.pone.0227699
6. 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). doi:10.1038/s41598-019-38808-z
7. Bufacchi A, Lejeune N. *R11189 Experimenten Langdurige Zorg - Onderbouwing Methodologie*.; 2023.
8. TNO. *Rapportage Programmalijn III- Resultaten Experimenteel Onderzoek in-Situ*.; 2024.
9. Weersink AMS, Salemink GAM, Struck C. *Rapportage Programmalijn V- Technische En Gebruiksinventarisatie Ventilatiesystemen in Bestaande Gebouwen Voor Langdurige Zorg , Op Basis van Een Taxonomie En Vragenlijst*.; 2024. https://p3venti.nl/assets/rapportages/p3venti_rapportage_saxion_inventarisatie-gezondheidszorggebouwen.pdf

7 BIJLAGE A – PLATTEGRONDEN TESTFACILITEIT

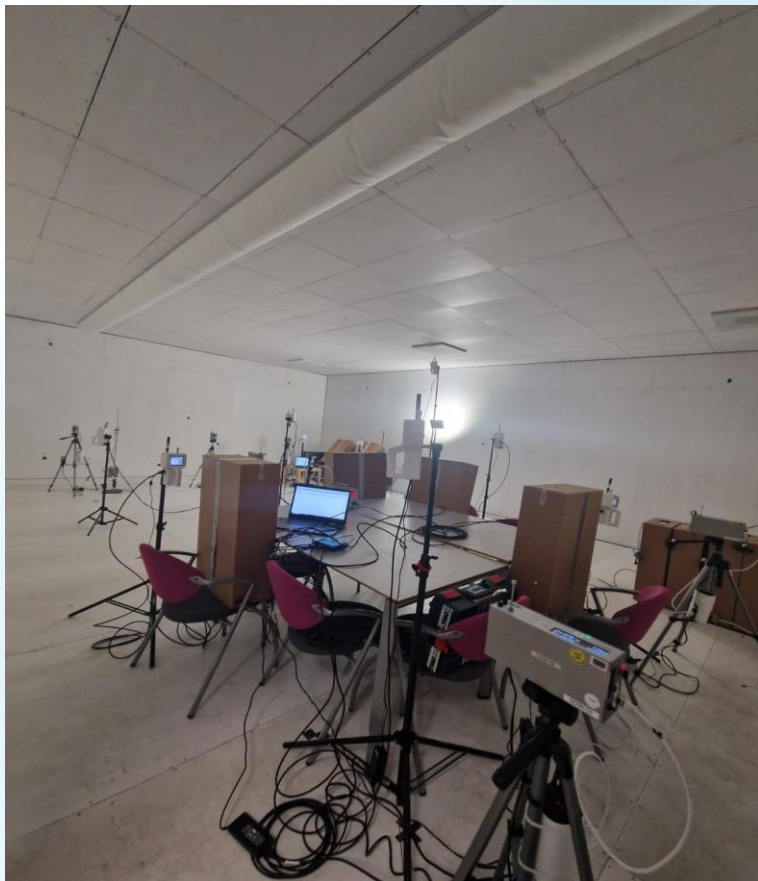




Figuur 7-1. Plattegrond testfaciliteit met verschillende ventilatieconfiguraties per meetopstelling voor de langdurige zorg.



Figuur 7-2. Plattegrond testfaciliteit met verschillende ventilatieconfiguraties per meetopstelling voor de maatschappelijk urgente sportvoorzieningen.

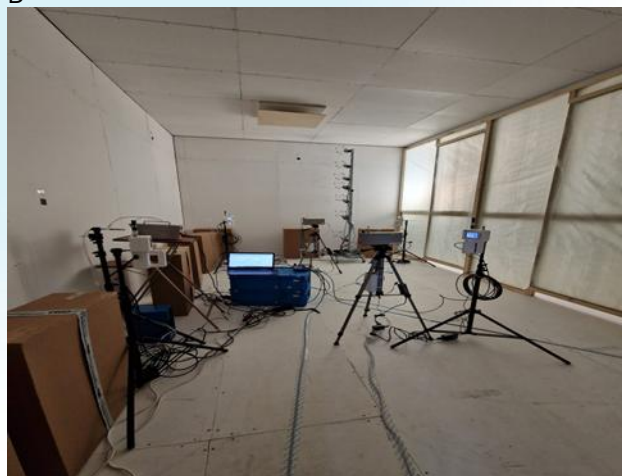


Figuur 7-3. Ventilatieconfiguratie met luchtverdeelslang.

A



B



C



D



Figuur 7-4. Ventilatieconfiguratie MUS, zwembadkleedkamers met overstort onder (A, B), en overstort bovenzijde (C, D). Er is een plaat onder de toevoer geplaatst (B, D) om de luchtstroom een richting mee te geven.