

Auteurs

Prof. dr. ir. L.A.M. (Lidwien) Smit [1], Dr. ir. I.M. (Inge) Wouters [1], Drs. E.R. (Esmée) Janssen [1], Dr. ing. D.A.M. (Matthijs) de Winter [1], Dr. ing. A.A.L. (Roberto) Traversari MBA [2], Ir. A.A.J. (Anneloes) de Lange [2], Dr.ir. M.G.L.C. (Marcel) Loomans [3], Dr.ir. T. A.J. (Twan) van Hooff [3], MSc. Lili Xia [3], MSc. Claudio Analisis Ruiz [3], Dr. D.S. (Judy) Veldhuijzen [4] Dr. S.H. (Stefanie) Meeuwis [4]

- 1) Universiteit Utrecht, Utrecht
 2) TNO, Delft
 3) Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven
 4) Universiteit Leiden, Leiden

Clean Air for Everyone (CLAIRE):

Onderzoek naar werking van ventilatie en mobiele luchtreinigers

Het was één van de grote vragen tijdens de COVID-19 pandemie: kun je met de juiste inzet van ventilatie- en/of luchtreinigingssystemen het risico op besmettingen met het SARS-CoV-2 virus (COVID-19) verkleinen? Dit speelde met name in restaurants, sport- en evenementenlocaties, scholen en in instellingen voor langdurige zorg. In de zomer van 2022 startte het CLAIRE project: 'Clean Air for Everyone: aerosolen en overdracht van luchtweginfecties, praktische interventies door ventilatie en luchtreiniging'. CLAIRE is een publiek-private samenwerking die kennishiaten op dit vlak aanpakt. Het project loopt nog tot juli 2026.

Er is een gebrek aan kennis over de daadwerkelijke impact van zowel vaste ventilatiesystemen als mobiele luchtreinigingstechnologieën op de concentratie van in de binnenlucht zwevende infectieuze luchtwegvirussen zoals SARS-CoV-2, Respiratoir Syncytiaal-virus (RSV) en influenza (griep). Hoewel de urgentie rond COVID-19 inmiddels verdwenen is, is het versterken van deze kennisbasis van groot belang voor het geval een nieuw pandemisch virus zich voordoet. De keuze voor eventuele verregaande en maatschappij-ontwikkende maatregelen vereist een wetenschappelijke basis voor het publieke debat. Het is daarom van belang om effectieve ventilatiesystemen en/of de toepassing van luchtreinigingssystemen en -technologieën als eerste verdedigingslinie tegen overdracht van luchtwegvirussen te onderzoeken. Daarnaast kan meer kennis over ventilatie en luchtreiniging bijdragen aan het verbeteren van de algemene

Highlights

- Onderzoek naar de werking van ventilatie en mobiele luchtreinigers ten behoeve van reductie aan blootstelling van virussen en bacteriën
- Prestatiebeoordeling onder praktijkomstandigheden in klaslokalen van basisscholen
- Testen in laboratoriumopstellingen onder verschillende situaties (ruimte, testmethode, positie)
- Ervaringen van gebruikers over het gebruik en acceptatie van mobiele luchtreinigers in de praktijk

luchtkwaliteit in binnenruimtes (denk bijvoorbeeld aan fijnstof en pollen) en het verkleinen van het risico op bekende infectieziekten, zoals griep of andere seizoensgebonden (corona)virusinfecties.

Het CLAIRE project richt zich met name op het in kaart brengen van de effectiviteit van ventilatie en luchtreiniging om blootstelling aan luchtwegvirussen te reduceren onder praktijkomstandigheden bij basisscholen en langdurige zorginstellingen. CLAIRE onderzoekt niet alleen de technische aspecten, maar ook de houding en het gedrag van gebruikers die essentieel zijn voor een effectieve inzet van de interventies. Ook maken we de vertaling naar infectierisico door aanpassing van momenteel beschikbare risicobeoordelingsmodellen die het risico op overdracht van luchtwegvirussen voor verschillende scenario's hebben gekwantificeerd [1]. Antwoorden uit het CLAIRE onderzoek kunnen overheden, volksgezondheidsinstanties, instellingen en gebouwgebruikers in staat stellen weloverwogen



Foto 1: Een onderzoeker plaatst een elektrostatisch doekje hangend vanaf het plafond van een klaslokaal. Het doekje trekt bioaerosolen aan en houdt deze vast. Foto: Universiteit Utrecht.

beslissingen te nemen over de installatie, aanpassing of inzet van vaste ventilatiesystemen, mobiele luchtreinigingstechnologieën of beide.

Doelstellingen

CLAIRE heeft als doelstelling ontbrekende kennis te verschaffen over de inzet van ventilatie- en/of luchtreinigingssystemen in klaslokalen in het basisonderwijs en gemeenschappelijke ruimten in zorginstellingen voor ouderen. Deze kennis omvat ventilatieprestaties, luchtreinigingsprestaties, optimalisatie van luchtbemonstering, luchtbemonstering voor de verzameling en kwantificatie van bioaerosolen (aerosolen die ziekteverwekkers en andere biologische agentia bevatten) vóór en tijdens interventies, risicobeoordeling van transmissie bij verschillende interventiescenario's, en de acceptatie en haalbaarheid van deze scenario's.

Aanpak

Experimenteel onderzoek: interventies in de praktijk

Het experimentele onderzoek is georganiseerd rond twee soorten interventies in twee verschillende typen praktijksituaties. We onderzoeken de effectiviteit van ventilatiesystemen en luchtreinigers op locatie, in basisscholen en in beperkte mate in verpleeghuizen. Er zijn scholen en verpleeghuizen gevonden waar geïnvesteerd is in de aanpassing van het ventilatiesysteem. Daar is de ventilatie-effectiviteit gemeten voor én nadat die investeringen zijn gedaan [2]. Een tweede interventie onderzoekt de effectiviteit van mobiele luchtreinigers in scholen in een gerandomiseerd gecontroleerd onderzoek. In samenwerking met de bedrijven in het consortium hebben we luchtreinigers geplaatst in een groot aantal klaslokalen in scholen door heel Nederland. Daar meten we zowel voor als nadat de apparaten zijn geplaatst. In dezelfde scholen meten we tegelijkertijd ook in vergelijkbare 'controlelokalen' zonder luchtreiniger om de effectiviteit van de luchtreiniger te beoordelen. Naast fysische parameters, zoals fijnstof en CO₂ concentratie, hebben we biologische agentia geïdentificeerd die representatief kunnen zijn

voor de virussen waarin we geïnteresseerd zijn (zie Figuur 1). Naast deze praktijktest, worden de luchtreinigers ook in een laboratoriumopstelling getest op hun prestatie.

Kwalitatief en kwantitatief onderzoek naar acceptatie en toepassing van interventies

Om de acceptatie en haalbaarheid van interventies te onderzoeken bij belanghebbenden passen we daarnaast ook vragenlijsten, diepte-interviews, focusgroepgesprekken en creatieve werksessies met verschillende groepen toe. Delen van dit onderzoek herhalen we tijdens het project een paar keer. Dit geeft ons meer inzicht in de dynamiek van acceptatie van innovatieve technologie en de bereidheid deze in te zetten.

Modellen

Om meer inzicht te krijgen in de verspreiding van bioaerosolen in een ruimte passen we ook de Computational Fluid Dynamics (CFD) techniek toe om de luchtstroming en de verspreiding van bioaerosolen numeriek te simuleren. Met behulp van CFD in combinatie met artificial intelligence (AI) genereren we concentratievelden voor een klaslokaal om te beoordelen waar hogere concentraties bioaerosolen te verwachten zijn. De AI techniek staat het toe om oneindig te variëren tussen de randvoorwaarden waarvoor de luchtstroming in het klaslokaal is onderzocht en hiervoor binnen enkele seconden een bijbehorende concentratieverdeling te genereren.

We bouwen daarnaast een risicomodel dat met verschillende scenario's werkt, waarin we alle gegevens over de proefomgevingen en de meetparameters meenemen en verschillende scenario's definiëren voor onder andere besmettingskans en vermoedelijke ernst van besmettingen.

Eerste resultaten

Het CLAIRE project is nog in volle gang, maar op verschillende onderdelen kunnen we al resultaten delen.

Interventies op basisscholen: ventilatie

In diverse klaslokalen van basisscholen en huiskamers van langdurige zorginstellingen zijn metingen uitgevoerd om te onderzoeken hoe deeltjes zich verspreiden door de ruimte (zie Figuur 2). Deze metingen zijn uitgevoerd voor en na een interventie waarbij het ventilatiesysteem is vervangen of geüpdatet. De meeste interventies die in dit geval zijn onderzocht, betroffen de vervanging van een natuurlijk door een mechanisch ventilatiesysteem [2]. Om te onderzoeken hoe lucht zich verspreidt in de klaslokalen en huiskamers van langdurige zorginstellingen voor de interventie is eerst op zes verschillende locaties in de ruimte de 100-voudige herstelltijd bepaald. Dit is de benodigde tijd om de concentraties van geëmitteerde deeltjes in de lucht met een factor 100 te verlagen. Uit deze analyse blijkt dat er geen homogene concentratie aan deeltjes in de ruimtes met een natuurlijk ventilatiesysteem ontstaat, en dat het lang duurt (gemiddeld 181 minuten) voordat de concentratie aan deeltjes een factor 100 is gedaald.

Tijdens dit onderzoek is de efficiëntie van het ventilatiesysteem met een uitgebreide methode bepaald die niet eenvoudig in de praktijk toepasbaar is. Als alternatief is voor eigenaren en gebruikers een indicatieve methode ontwikkeld op basis van de CO₂-concentratie in de ruimte. Hiermee kan op een relatief eenvoudige manier de efficiëntie van het ventilatiesysteem worden bepaald. De CO₂-concentratie in één ruimte kan echter enkel onder voorwaarden gebruikt worden als proxy voor de ventilatie-efficiëntie, en niet als absolute waarde.

Foto 2: Opstelling voor de meting van de deeltjesconcentratie op representatieve locaties in een klaslokaal.

Foto: TNO.



Naast de metingen, is een literatuurstudie uitgevoerd naar het effect van de CO₂-concentratie in een ruimte op een aantal aspecten zoals cognitieve prestaties, fysiologische parameters, comfort en beleving, en absentie [3]. Uit de beschouwde literatuur blijkt dat er geen consensus is over een mogelijke relatie tussen CO₂-concentraties en de onderzochte aspecten zoals cognitieve prestaties, fysiologische parameters, beleving en ziekte. De beschouwde studies kennen vaak vele beperkingen, en zijn niet eenduidig in hun conclusies. Dit bevestigt de conclusie dat de CO₂-concentratie enkel gebruikt moet worden als proxy voor de kwaliteit van de ventilatie in de ruimte.

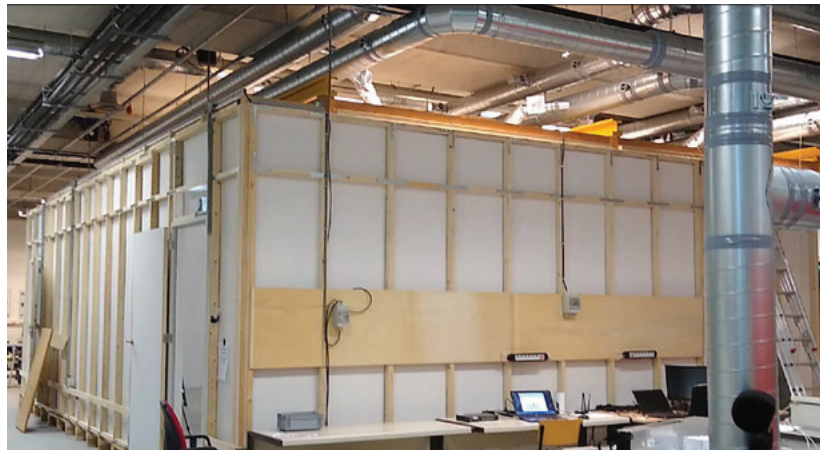


Foto 3: Buitenaanzicht van de test faciliteit bij de TU Eindhoven (~10x7x3m³)

Interventies op basisscholen: luchtreinigers

Voorafgaand aan de plaatsing van luchtreinigers in de klaslokalen zijn alle luchtreinigers in een laboratoriumopstelling getest om de prestatie ervan te bepalen op het gebied van verwijdering van aerosoldeeltjes. Deze prestatie wordt uitgedrukt in de Clean Air Delivery Rate (CADR [m³/h]). Dit is volgens een specifieke standaard uitgevoerd, en kan als een theoretische prestatie worden gezien. Vervolgens zijn de verschillende typen luchtreinigers in alle klaslokalen met ongeveer hetzelfde CADR-niveau toegepast. De hypothese is dat bij de gehanteerde CADR van de luchtreinigers (ongeveer 400 m³/h), en een effectiviteit van 50% daarvan in de praktijk (een klaslokaal geventileerd volgens het PvE Frisse scholen klasse B), een reductie in de concentratie aan fijnstof en bioaerosolen van ongeveer 20% wordt gerealiseerd. Het is dus niet het doel om een bepaalde CADR voor te schrijven voor een klaslokaal. Het gaat erom de effectiviteit in de praktijk aan te tonen.

In de winter van 2023-2024 heeft een eerste ronde van interventies en metingen plaatsgevonden in twaalf scholen. Om aan een voldoende aantal klaslokalen te komen is de studie vervolgd in de winterperiode van 2024-2025 en is het aantal scholen dat betrokken is in de studie uitgebreid naar zesentwintig. In totaal nemen ongeveer 180 klaslokalen deel in deze studie. De gegevensverzameling loopt nog door tot en met april 2025.

Op elke school zijn sets van drie klaslokalen met vergelijkbare gebouwenkenmerken geselecteerd en willekeurig toegewezen aan één van de drie studieregimes: 1) interventie met HEPA-filter luchtreinigers, 2) interventie met luchtreinigers die een alternatieve technologie gebruiken, en 3) geen interventie (controle). De meting van bioaerosolen in de klaslokalen vindt plaats met passieve luchtmonstername (zie Figuur 1). In alle lokalen vinden meerdere herhaalde metingen over tijd plaats: een meting voordat de interventies gestart worden, en driemaal tijdens de interventie. Niveaus van bacteriële markers en virussen in luchtmonsters worden gekwantificeerd door middel van qPCR. In aanvulling hierop worden

in alle klaslokalen ook gedurende de gehele interventieperiode fysische parameters gemeten zoals fijnstof, CO₂, temperatuur en relatieve luchtvochtigheid. Daarnaast wordt op anonieme wijze het verzuim van leerlingen geregistreerd en worden gegevens over luchtwegsymptomen van de leerlingen verkregen via een enquête voor en na de interventie.

In een klein deel van de bioaerosol metingen van de eerste periode is virus gedetecteerd, terwijl de bacteriële markers vaker zijn aangetroffen. Na voltooiing van de gegevensverzameling zal de impact van luchtreinigers op de gemeten concentraties bioaerosolen in de klaslokalen onderzocht worden. Van de fysische meetgegevens uit de eerste periode is een eerste analyse gemaakt die effecten laten zien ten aanzien van de fijnstofconcentratie.

Naast de metingen in de praktijk, is in het laboratorium van de TU Eindhoven ook een unieke onderzoeksruimte gebouwd waarmee luchtreinigers ook onder gecontroleerde omstandigheden kunnen worden getest [4, 5]. Onder andere het effect van de afmetingen van de ruimte, positie van de luchtreiniger in de ruimte en de invloed van het parallel functionerende ventilatiesysteem op de CADR wordt in deze ruimte onderzocht.

Acceptatie en toepassing van interventies

Het onderzoek rondom acceptatie en toepassing van interventies evalueert of stakeholders van basisscholen en ouderenzorginstellingen bereid zijn om ventilatie en luchtreinigingstechnieken te gebruiken. Ook wordt onderzocht welke wensen en zorgen er leven onder deze groepen met betrekking tot de inzet van dergelijke technieken. Hiertoe zijn semigestructureerde interviews afgenomen onder verschillende stakeholdergroepen: beleidsmakers (d.w.z. stakeholders die direct dan wel indirect betrokken zijn bij beslissingen over het gebruik van ventilatie en luchtreinigingssystemen in de gebouwen) en gebruikers (d.w.z. stakeholders die het grootste deel van hun werkzaamheden in de gedeelde ruimtes uitvoeren). Dit onderzoek wordt parallel uitgevoerd

met de interventiestudie, waarbinnen de effecten van mobiele luchtreinigers in klaslokalen worden getoetst.

Een tussentijdse analyse, waarbinnen enkel de interviews met stakeholders voorafgaand aan de interventie initieel zijn opgenomen, laat zien dat het belang en het gunstige effect van ventilatie op de binnenluchtkwaliteit grotendeels door stakeholders worden onderschreven (Figuur 4). Wel zijn de meningen verdeeld over hoe ventilatie en luchtreiniging het best kunnen worden ingezet. In het bijzonder blijkt ziektepreventie bij kwetsbare groepen, zoals individuen met longziekten, een complex thema, waarbij stakeholders twifelen of het haalbaar is om rekening te houden met kwetsbaren. Voor investeringen in nieuwe ventilatie- en luchtreinigingstechnieken zijn een juist investeringsklimaat, goede samenwerkingen tussen de verschillende belangenpartijen en een meerjarenplan met een integrale en duurzame aanpak van binnenluchtkwaliteit noodzakelijk, aldus stakeholders.

Er lijkt een gebrek aan kennis te zijn onder de gebruikers van binnenruimtes over de juiste manier van ventileren en de mogelijkheden en werking van nieuwe ventilatie- en luchtreinigingstechnieken. Vooral het doel en de meerwaarde van luchtreiniging zijn hierbij minder bekend. Daarnaast bestaan randvoorwaarden voor de inzet van luchtreiniging; zo zien stakeholders de mobiele apparatuur bijvoorbeeld liever niet te veel ruimte innemen en zouden zij het geproduceerde geluid graag begrensd zien, om te voorkomen dat de primaire processen worden verstoord. Met betrekking tot haalbaarheid van ventilatie en luchtreiniging voorzien stakeholders dat de financiële haalbaarheid, zowel op de korte (aanschaf) als de lange termijn (onderhoud) een knelpunt kan zijn.

De vastgoedportefeuille is tevens een belangrijk onderwerp; basisscholen en ouderenzorginstellingen zijn veelal in oude gebouwen gehuisvest, waarbinnen een ondermaats binnenklimaat comfort- en gezondheidsklachten kan ontlokken. Dit lijkt de waarde die stakeholders hechten aan het inzetten van nieuwe technologieën te versterken, maar heeft tegelijkertijd een weerslag op de haalbaarheid van de inzet van dergelijke technieken.

CFD-Modellen

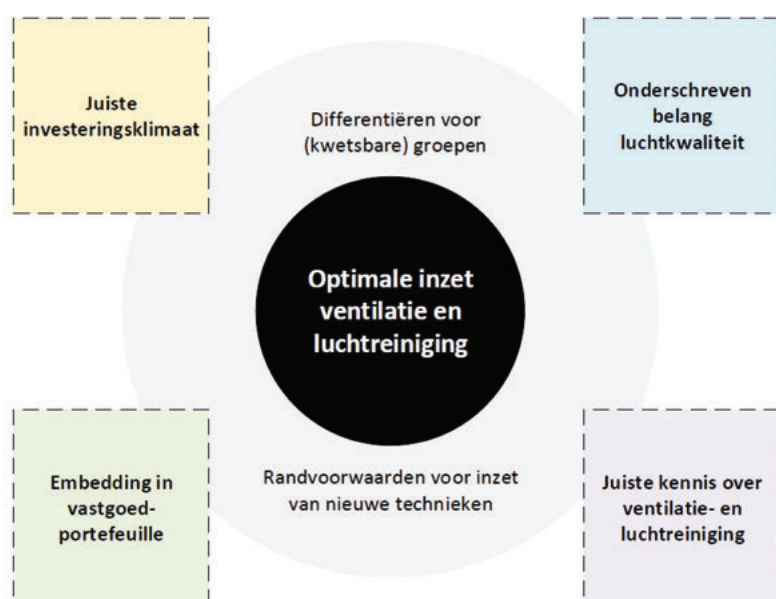
Op het gebied van modelvorming is er een methodiek ontwikkeld, waarbij we AI kunnen inzetten om, gevoed door CFD resultaten, een concentratieverdeling te laten genereren voor randvoorwaarden die niet eerder met behulp van CFD zijn berekend [6]. Het gaat hierbij om een generatieve AI-benadering genaamd "conditional deep convolutional generative adversarial network (cDCGAN)", die ons in staat stelt om snel concentratievelden van verontreinigende stoffen (waaronder bioaerosolen) in binnenomgevingen te voorspellen. Het cDCGAN-model is toegepast op een studie van een generiek klaslokaal met meerdere warmte- en verontreinigingsbronnen en twee verschillende ventilatiesysteemconfiguraties. Het cDCGAN-model voorspelt de resulterende concentraties in een horizontaal vlak ter hoogte van de neus/mond van zittende personen in het klaslokaal voor een reeks ventilatiedebieten en luchttoevoertemperaturen. Het model werd getraind en gevalideerd met behulp van resultaten uit hoogwaardige CFD-simulaties.

De resultaten tonen aan dat het cDCGAN-model binnen enkele seconden voorspellingen kan genereren, met een vrij goede nauwkeurigheid van de voorspelde concentratieniveaus; dat wil zeggen het gemiddelde absolute foutpercentage varieert tussen de

13% en 15% in vergelijking met de CFD-simulaties.

Ondanks enkele beperkingen bij het voorspellen van kleinschalige stromingskenmerken, is de nauwkeurigheid goed te noemen.

Deze methodologie is aanpasbaar aan een groot aantal binnen- en buitenomgevingen en kan worden uitgebreid om andere stromingsvariabelen te voorspellen en extra parameters op te nemen. Dit maakt het ontwikkelde model een veelbelovend hulpmiddel voor toepassingen waarbij snelheid en efficiëntie vereist zijn bij het analyseren van een groot aantal stromings- en verspreidingsscenario's.



Figuur 1: Opgehaalde thema's rondom acceptatie en toepassing van interventies vanuit interviews met stakeholders.

Risicomodel

Het risico op een infectie is een complex samenspel van factoren. Allereerst vereist het de aanwezigheid van een infectieus persoon in de ruimte, wat afhangt van de incidentie van de ziekteverwekker. Afhankelijk van de specifieke ziekteverwekker en het verloop van de infectie, zal de geïnfecteerde persoon een hogere of lagere concentratie ziekteverwekkers uitademen. Dit wordt gemeten als bijvoorbeeld het aantal virusdeeltjes per milliliter slijm. Deze bioaerosolen hangen korter of langer in de lucht. Dit is ook de fase waarin ventilatie en luchtreinigers op het proces kunnen ingrijpen. Andere mensen (de blootgestelden) ademen de lucht met bioaerosolen namelijk in, waarmee ze gedurende de tijd een toenemende hoeveelheid ziekteverwekkers binnenkrijgen.

De kans om van die hoeveelheid ziekteverwekkers (de 'dosis') een infectie op te lopen, is een eigenschap van de betreffende ziekteverwekker die wordt beschreven met een ziekteverwekker-specifieke kansverdeling, de dosis-respons relatie. Hierin moet ook worden opgenomen dat de status van het immuunsysteem (bijv. gevaccineerd of hersteld van een eerdere infectie) bij de blootgestelden een rol speelt in de dosis-respons relatie.

Binnen CLAIRE worden de concentraties ziekteverwekkers in de lucht zowel experimenteel als in computersimulaties vastgesteld voor specifieke scenario's, waarmee het risico op een besmetting kan worden berekend. De besmettingsrisico's in een klaslokaal met een gegeven scenario en ziekteverwekker kunnen worden uitgerekend met en zonder ingreep in de ventilatie, waarmee een relatieve effectiviteit kan worden bepaald. Echter, doordat de dosis-respons relatie niet lineair is, zal de effectiviteit van ventilatie ook wisselend zijn per gekozen scenario.

Dankwoord

Het samenwerkingsproject CLAIRE (LSHM22032) is medegefinancierd met PPS-toeslag die door Health~Holland, Topsector Life Sciences & Health, beschikbaar is gesteld ter stimulering van publiek-private samenwerkingen. Wij danken daarnaast de partners in het project voor hun belangrijke bijdragen in het realiseren van het project. Dat geldt ook voor de ondersteuning die we vanuit de verschillende laboratoria krijgen.

Samenwerking

Het interdisciplinaire CLAIRE consortium wordt gevormd door vier Nederlandse kennisinstituten (Universiteit Utrecht, TNO, Technische Universiteit Eindhoven en Universiteit Leiden), twaalf innovatieve MKB-bedrijven die zich specialiseren in de ontwikkeling, installatie en onderhoud van hoogwaardige technologieën voor beheersing en verbetering van de luchtkwaliteit, en brancheverenigingen ActiZ, Binnenklimaat Nederland en de Stichting Binnenklimaattechniek. De bedrijven stellen apparatuur beschikbaar voor onderzoek, leveren menskracht om die apparatuur te installeren, geven feedback op de aanpak en tussenresultaten van het onderzoek en helpen bij de verspreiding van informatie over de projectresultaten.

CLAIRE werkt nauw samen met complementaire onderzoeksprogramma's zoals P3Venti en MIST [7]. Het experimenteel onderzoek in CLAIRE doen we vooral in basisscholen. Door intensieve samenwerking en gegevensuitwisseling met het onderzoeksprogramma P3Venti zorgen we dat we ook voor de verpleeghuizen voldoende onderzoeksdata beschikbaar hebben om goed onderbouwde uitspraken te doen. Wij zijn de deelnemende scholen en verpleeghuizen uiteraard erkentelijk voor hun bereidheid om aan CLAIRE mee te werken.

Het project CLAIRE loopt nog tot juli 2026. Tot die tijd zal een belangrijk deel van de activiteiten zich onder andere richten op het analyseren van de grote hoeveelheid aan meetdata die we verkregen hebben in de basisscholen. In het voorjaar van 2026 staat een eindsymposium van het project gepland waarin de resultaten van CLAIRE meer in detail zullen worden gedeeld. Meer informatie hierover zal te vinden zijn op de website van het CLAIRE project: claireproject.nl.

Referenties

1. Schijven, J., Vermeulen, L.C., Swart, A., et al. Quantitative microbial risk assessment for airborne transmission of SARS-CoV-2 via breathing, speaking, singing, coughing, and sneezing. *Environmental Health Perspectives* 129: 47002 (2021).
2. De Lange, A., Traversari R. Deliverable Work package 2 Results Experiments in-situ WP 2, experiments phase 1. TNO 2024 R10059 (2024).
3. De Lange, A., Traversari, R., Kompatscher, K., Egter van Wissekerke, N. Literatuurstudie effect van CO₂ op cognitieve prestaties, fysiologische parameters, comfort en beleving, en absentie. TNO 2024 R11626-REV1 (2025).
4. Kang, L., Qin, P., Diepens, J., van Hooff, T., Loomans, M. G. L. C. CFD-aided ventilation design for a large experimental chamber to study aerosol dispersion and removal. 1-8. In: *Proceedings RoomVent 2024*, Stockholm, Sweden (2024).
5. Xia, L., Diepens, J., Loomans, M. G. L. C., van Hooff, T. Testing and comparing of portable air cleaners for indoor aerosol particle removal in laboratory environments. 1-7. In: *Proceedings RoomVent 2024*, Stockholm, Sweden (2024).
6. Alanis Ruiz, C., Loomans, M. van Hooff, T. A Deep Convolutional Generative Adversarial Network (DCGAN) for the fast estimation of pollutant dispersion fields in indoor environments. *Building and Environment*, 276: 112856 (2025).
7. Loomans, M.G.L.C., van Hooff, T.A.J., Traversari, A.A.L. Onderzoeken naar ventilatie in het kader van infectiepreventie. *TVVL magazine* 3: 18-21 (2023).