

Oproep: maak gebouwen virusbestendig met binnenklimaattechnologie

In 1866 is door Koning Willem III de Drinkwatercommissie in het leven geroepen, in het licht van de cholera-crisis. Deze commissie bestond uit wetenschappers, medici en ondernemers. De commissie publiceerde na 2 jaar een belangrijk rapport met onder meer een plan om alle woningen en publieke gebouwen op termijn op veilige, schone drinkwatersystemen aan te sluiten en tegelijkertijd van goede riolering en effectieve afvoer te voorzien. Dit advies heeft zijn weerslag gevonden in onder andere de Woningwet. Deze succesvolle, publiek-private aanpak heeft de volksgezondheid sterk bevorderd.

Hoewel de cholera-crisis een andere aard heeft dan de coronacrisis, staan we nu wederom voor een maatschappelijke uitdaging. De coronapandemie heeft immers een grote impact op de Nederlandse samenleving. Gelet op het feit dat de verspreiding van het coronavirus grotendeels via druppels in de lucht plaatsvindt [bron: zie het artikel als bijlage: COVID-19 en ventilatie,^{1,2}], moet een gezond binnenklimaat gezien worden als een belangrijke preventiemaatregel om de overdracht van virussen zo veel mogelijk te beperken. Een goede preventieaanpak draagt eraan bij dat scholen, winkels, horeca en kantoren zo veel mogelijk open blijven en de maatschappij blijft functioneren.

Ventilatie is de basis van een gezond binnenklimaat. Het reduceert bovendien de kans op overdracht van het coronavirus via kleine druppels [3]. Gebouwen beschikken niet altijd over voldoende ventilatiecapaciteit om de besmettingskans voldoende te verlagen.. Er zijn veel (bestaande en nieuwe) technologieën die mogelijkheden bieden om het binnenklimaat te verbeteren en daarmee het risico op verspreiding van het coronavirus in openbare gebouwen te verkleinen. Aanvullend op ventilatie kunnen bijvoorbeeld luchtreinigingstechnieken een effectieve manier zijn om concentratie van ziekteverwekkers in de binnenruimte te verlagen en daarmee de besmettingskans van infectieziekten [bron].

Dit vraagt erkenning van de rol van binnenklimaat in de preventieaanpak en in de algemene volksgezondheid. Immers, 60% tot 95% van alle verontreinigende stoffen wordt in een binnenruimte ingeademd. De grote negatieve impact op onze gezondheid blijft vaak buiten beeld. Denk bv. aan (blijvende) luchtwegklachten, astma bij kinderen, productiviteitsverlies, slaapproblemen en hart- en vaatziekten [27]. Alleen met behulp van technologie kunnen we een gezond binnenklimaat realiseren. De Tweede Kamer drong¹ recent al aan om van het binnenklimaat een prioriteit te maken. Er worden echter nog geen concrete stappen gezet. Er zou daarom wederom ingezet moeten worden op publiek-private samenwerking tussen de technologische industrie, de wetenschap en de overheid. Met behulp van de overheid kan de juiste kennis en technologie vanuit de sector op de juiste plek worden toegepast voor een gezond binnenklimaat. Dit draagt bovendien altijd bij aan betere gezondheid, lager ziekteverzuim en betere leerprestaties.

¹ Motie van het lid Wilders over per ommegaande van ventilatie een prioriteit maken
<https://www.tweedekamer.nl/kamerstukken/detail?id=2021Z13735&did=2021D29297>

Binnenklimaat Nederland en FME roepen daarom op om een gezond binnenklimaat en de noodzakelijk rol die technologie daarin heeft onderdeel uit te laten maken van de korte en lange termijn corona aanpak en algehele volksgezondheid. Wat is daarvoor nodig?

Korte termijn

- Inzicht: meten is weten

Het is een mooie ontwikkeling dat Minister Wiersma van het ministerie van Onderwijs, Cultuur en Welzijn scholen uit wil rusten met CO₂-meters in klaslokalen. Het is namelijk van belang om inzicht te geven in de kwaliteit van het binnenklimaat. Binnenklimaat Nederland pleit al langer voor het meten van luchtkwaliteit². Met een CO₂-meting kan een indicatie gegeven worden van de luchtkwaliteit en bijbehorende risico op virusverspreiding. Het Rijk zet in op CO₂-meters in alle klaslokalen, maar wij pleiten nogmaals voor een brede inzet van CO₂-metingen in alle publieke gebouwen. Belangrijk is dat op de goede plek en op representatieve momenten gemeten wordt. Dat kan door de inzet van metingen op representatieve momenten, CO₂-meters en slimme vraaggestuurde technologie.

- Oplossing: benutting binnenklimaat technologie

In onze buurlanden wordt het binnenklimaat als één van de factoren gezien die bepaalt of kapperszaken, scholen of horecagelegenheden veilig zijn voor bezoek. Een voorwaarde hiervoor is dat technologie zo veel mogelijk wordt benut. Dit vraagt zowel (bouw)technische aanpassingen als correct gebruik van bestaande installaties³. Echter, veel binnenruimten die voorzien zijn van een vorm van ventilatie beschikken over onvoldoende ventilatiecapaciteit om de besmettingskans voldoende te verlagen. Dit vergt een aanpassing of vergroting van de ventilatiecapaciteit. Indien het niet mogelijk is het ventilatiesysteem aan te passen, kan ventilatie aangevuld worden met luchtreinigingstechnieken voor het doel van beperken van virusverspreiding. Luchtreiniging kan naast ventilatie een effectieve manier zijn om virusverspreiding te beperken, mits veilig, correct en verantwoord toegepast [bron: Bijlage: COVID-19 en ventilatie]. Het is echter wel essentieel om ventilatie nooit te vervangen door luchtreiniging.

- Bevordering: stimuleringsregeling technologie

Metingen geven inzicht in binnenklimaat en technologie zorgt voor een gezond binnenklimaat en beperking van virusverspreiding. Benut, bevorder en beloon de innovatieve systemen die in de markt beschikbaar zijn, die het binnenklimaat bevorderen én/of virusverspreiding tegengaan. Stel daarvoor een subsidieregeling op voor een selectie van sectoren die tijdens de coronapandemie moesten sluiten. Zoals kapperszaken, winkels en horecagelegenheden. Stimuleer voor deze sectoren de aanschaf van CO₂-meters, vraaggestuurde ventilatie, luchtreiniging en andere innovatieve toepassingen voor het

² In oktober 2021 hebben Binnenklimaat Nederland en TVVL de petitie '*Metten is Weten*' aangeboden aan de leden van de vaste Kamercommissie Volksgezondheid, Welzijn en Sport, waarin zij pleitten voor CO₂-metingen in publieke gebouwen.

<https://www.binnenklimaattechniek.nl/wp-content/uploads/2021/10/Digitaal-Position-paper-Meten-is-weten-Binnenklimaattechniek.pdf>

³ De installatie technologie heeft daar een belangrijke bijdrage in. Bestaande installaties kunnen - met door de markt ontwikkelde praktische tools en handvaten - verbeterend worden zie ook: <https://www.binnenklimaattechniek.nl/>

binnenklimaat. Zorg daarbij wel voor kwaliteitseisen aan de toepassingen die beschikbaar zijn, zodat gelukszoekers die niet aan controle onderhevig zijn, geweerd worden.

- Bewustwording: maatschappelijke voorlichting

Informeer de burger over het belang van een gezond binnenklimaat; bv. door het initiëren van een communicatiecampagne, in samenwerking met de sector en maatschappelijke partijen zoals het consortium Gezond Binnen⁴. Benadruk daarbij ook wat de burger zelf kan doen om het binnenklimaat in hun woning, school, winkel of op kantoor te verbeteren, zónder technische aanpassingen. Zorg dat de informatievoorziening in handen van het Rijk blijft, om desinformatie over gezond binnenklimaat te voorkomen.

Lange termijn

- Onderzoek en verbetering binnenklimaat bestaande bouw
 1. Maak het probleem inzichtelijk: Onduidelijk is hoeveel huizen, kantoren, utiliteitsgebouwen en scholen momenteel voldoen aan het Bouwbesluit en dus, hoe het staat met het binnenklimaat in Nederland. Stel daarom een onderzoeksagenda op en baseer daarop een langetermijnvisie voor het verbeteren van het binnenklimaat.
 2. Onderzoek het effect van ventilatie en luchtreiniging: Stel aansluitend een onderzoeksagenda op waarbij in pilots gekeken wordt naar (I) in welke mate de combinatie van ventilatie en luchtreiniging de verspreiding van virussen tegengaan en (II) de langetermijneffecten van het binnenklimaat op de gezondheid.
 3. Vertaal de uitkosten naar een innovatieagenda, zoals dat bijvoorbeeld ook gebeurt bij programmalijnen zoals wind op zee[bron] ⁵of op het gebied van energiebesparing. Stel subsidieregelingen op voor innovatieve projecten, (academisch) onderzoek en samenwerking via grote onderzoeksprojecten.

- Prestatie-eisen binnenklimaat

De eisen aan binnenklimaat technologie vanuit het Bouwbesluit hebben voornamelijk betrekking op de inrichting van een gebouw en comfort, niet op gezondheid [bron]. Voor een meer toekomstbestendig gebouwenvoorraad is het daarom van belang om ook prestatie eisen te stellen aan de kwaliteit van het binnenklimaat. Hier zijn nuttige tools voor ontwikkeld, zoals het Programma van Eisen Gezonde Kantoren.⁶De kennis is beschikbaar.

- Gespecialiseerde vakmensen

⁴ Het platform gezond binnen is een functioneel platform vol tips en adviezen over een gezond binnenklimaat, en is een samenwerking van TNO, Longfonds, Heijmans, Philips, ISIAQ, Nationale Nederlanden, VELUX en Binnenklimaat Nederland. Zie ook haar website:

<https://gezondbinnen.nl/>

⁵ <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2019/03/Programmalijn%20Wind%20op%20zee%20%20RD%202019.pdf>

⁶ <https://www.binnenklimaattechniek.nl/kwaliteit/pve-gezonde-kantoren/>

Geef aandacht aan opleiding en omscholing. Het verbeteren van ventilatie kan alleen als er voldoende werknemers zijn met de benodigde kennis en vaardigheden. Binnenklimaat Nederland heeft hier een vakcentrum voor opgezet⁷. Met praktijkgericht onderwijs voor zij- en nieuwinstromers worden mensen tot ventilatiespecialist opgeleid. De middelen zijn voorhanden. Instroom van nieuwinstromers kan worden georganiseerd door een plek in het curriculum van het VMBO.

⁷ <https://www.binnenklimaattechniek.nl/vakcentrum/>

Bijlage: COVID-19 en ventilatie

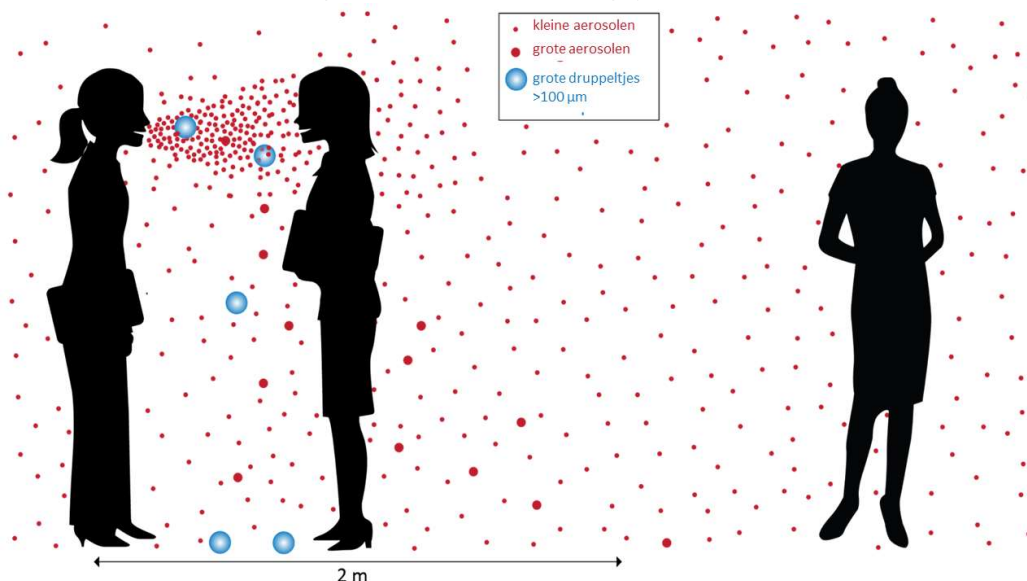
Dit verhaal is voor een gedeelte gebaseerd op een publicatie die eerder is verschenen in TVVL Magazine nr. 6 (december 2021). Referentie: Loomans, M. G. L. C., & Franchimon, F. (2021). De COVID-19 ervaring en ventilatie: wat heeft het ons gebracht? TVVL Magazine, 2021(6), 14-19.

Inleiding

Nu we twee jaar verder zijn in de pandemie die door het SARS-CoV-2 virus is veroorzaakt, is het onderwerp ventilatie stevig op de agenda komen te staan. Dat is een positieve ontwikkeling, hoewel het jammer is dat een pandemie nodig was om het belang van een goede ventilatie, gezondheidstechnisch, maar uiteindelijk ook economisch, voor het voetlicht te krijgen [1,2]. Op papier leek het goed geregeld via het Bouwbesluit, maar de praktijk is duidelijk weerbarstiger. Daarnaast voorziet de huidige regelgeving niet expliciet in een pandemie zoals COVID-19.

De rol van ventilatie – aerosolen versus druppeltjes

Het is belangrijk om in de discussie over de besmettingskans de rol van ventilatie hierin helder te hebben en ook zuiver te voeren. Bij aanvang van de pandemie was de veronderstelling dat deeltjes $>5\ \mu\text{m}$ binnen 1-2 m op de grond vallen. Deze deeltjes worden druppeltjes genoemd. Met aerosolen werden de kleinere druppeltjes ($<5\ \mu\text{m}$) aangeduid. Men ging er enerzijds vanuit dat de druppeltjes het meest gevaarlijk waren, de meeste virusdeeltjes bevatten. Anderzijds werd niet beseft dat ook druppeltjes $>5\ \mu\text{m}$ lang in de lucht kunnen blijven zweven en zeker niet binnen 1,5 m (de afstand die in NL is aangehouden) op de grond vallen [3,4]. Daarnaast werd voorbijgegaan aan het feit dat de concentratie aerosolen dichtbij een persoon groot is en op die manier kan bijdragen in de besmettingskans (zie Figuur 1). Dit onderscheid wordt in het algemeen aangeduid als 'short-range', terwijl op grotere afstand wordt gesproken van 'long-range'. Inmiddels is er genoeg bewijs voor de bijdrage van de aerogene transmissieroute in de besmetting met SARS-CoV-2 [5,6]. Hierbij wordt ook meegenomen dat bij aerogene transmissie de short-range overdracht een belangrijk onderdeel is [7,8].



Figuur 1. Visualisatie van lucht- en directe transmissieroutes van een virus zoals SARS-CoV-2 (Aangepast uit [3];[9]).

Ook studies van het RIVM onderschrijven de mogelijkheid van aerogene transmissie en de rol van ventilatie hierin [10]. Een recente nog niet gepeer-reviewde studie naar de levensvatbaarheid (inactivatie) van het SARS-CoV-2 virus geeft nieuwe inzichten ten aanzien van de tijdsduur waarbinnen inactivatie plaats vindt ten opzichte van eerdere resultaten [11,12]. Echter, ook wanneer men uitgaat van die bevindingen, dan nog kan ventilatie hier een rol spelen, en niet alleen voor de short-range blootstelling.

Ventilatiehoeveelheid versus ventilatie effectiviteit

Het belang van ventilatie wordt momenteel met name uitgedrukt in indicatoren zoals een minimaal ventilatievoud [h^{-1}], het aantal maal per uur dat het volume van een ruimte wordt doorspoeld met 'schone' lucht. Dit vraagt dus om kennis van het volume van de ruimte. Het ventilatiedebiet [m^3/h], eventueel per persoon waarop het is ontworpen, biedt een wat algemener beeld. Als alternatief wordt ook de concentratie CO_2 gebruikt om iets te zeggen over de hoeveelheid ventilatie. Hierbij wordt de link gelegd tussen het feit dat wij mensen CO_2 produceren [13] en de gemeten CO_2 concentratie zich laat terugrekenen naar een orde grootte ventilatiedebiet [14], en eventueel de besmettingskans [15]. Echter, uitgangspunt hierbij is in het algemeen een (theoretisch) perfect gemengde situatie. In de praktijk is dat min of meer niet te realiseren, dan wel vast te stellen. Dit los van het feit dat de effectiviteit van ventileren op dit moment eigenlijk nog nauwelijks aandacht krijgt, terwijl daar zeker mogelijkheden lijken te liggen [16]. Enerzijds, doordat dit energetisch meer verantwoord is, i.e. met minder lucht kan hetzelfde bereikt worden. Anderzijds, door ook na te denken over lokale oplossingen van ventileren kan niet alleen de effectiviteit worden verhoogd, maar kan ook meer gericht een aanpak ontwikkeld worden die de short-range blootstelling kan beperken [17,18]. Het gebruik van schermen om dit te beïnvloeden in bestaande situaties lijken minder effectief, en afhankelijk van de situatie en het gekozen ventilatie regime [19,20].

Lokaal ventileren en reinigen

De meerwaarde van (lokaal) efficiënter ventileren kan ook gevonden worden in het feit dat vanwege de infectiviteit van de Delta-variant van het SARS-CoV-2 meer ventilatie nodig is om de besmettingskansen te beperken. Voor de besmettelijkere Omikron-variant zullen nog grotere debieten nodig zijn. Om in tijden van een pandemie hierop te kunnen anticiperen kan het gebruik van luchtreinigers als aanvulling op ventilatie een (tijdelijke) oplossing zijn. Luchtreinigingstechnieken kunnen namelijk aerosolen die pathogenen bevatten uit de lucht filteren of pathogenen inactiveren. Dit vervangt niet de ventilatie, die moet altijd aanwezig zijn, maar kan effectief ingezet worden [21–23]. Belangrijk is dat bij toepassing van deze technieken voldaan wordt aan veiligheid en gezondheid voorschriften, zoals grenswaarden voor ozonconcentratie veroorzaakt door de luchtreiniger.

Een net gestart groot onderzoek in 1000 klaslokalen (500 met luchtreiniging, 500 controle) probeert die effectiviteit verder te onderzoeken [24]. Toepassing van decentrale luchtreinigers is iets dat in deze pandemie een vlucht heeft genomen. Gezien het aanbod en de mogelijkheden lijkt de behoefte aanwezig om de inzet van dit type oplossingen wat meer te reguleren en de optimalisatie qua inzet verder te onderzoeken. Gerelateerde vraagstukken raken aan onderwerpen als effectiviteit, verifieerbaarheid en veiligheid. Benadrukt wordt nogmaals dat luchtreinigers ventilatie niet vervangen, maar aanvullend zijn.

Andere strategieën

Los van ventilatie zoals hierboven besproken, moet in de toekomst bij het ontwerp van gebouwen meer rekening gehouden gaan worden met infecties zoals we die nu zien met corona. Dan gaat het om het ontwerp van gebouwen, en bouwkundige en installatietechnische maatregelen die ingezet kunnen worden om de besmettingskans te beperken. Denk hierbij bijvoorbeeld aan routing, inrichting, het toepassen van drukhiërarchie, sensoren die pathogenen kunnen meten etc. De gedachte kan zijn dat een gebouw op een verschillend niveau kan functioneren naar gelang de situatie erom vraagt, van alert zijn op besmetting tot een kritieke situatie.

Ventilatie alleen is niet zaligmakend. De besmettingskans kun je ermee reduceren, maar per definitie nooit tot nul brengen. Aanvullende maatregelen blijven belangrijk, waarvan min of meer vanzelfsprekend de belangrijkste is om geen bron te hebben. In alle gevallen blijft desondanks staan dat een goede ventilatie het vertrekpunt zou moeten zijn. De voordelen van een goede ventilatie zijn niet alleen te vinden in een verlaging van de besmettingskans.

Inventarisatie en korte termijn acties

De vraag is dan hoe vanuit deze theorie naar de praktijk te komen? Is de ventilatie op orde in een ruimte? Hoe bepaal je dat? Wat kun je doen om een situatie te verbeteren? De overheid is in oktober 2021 een campagne gestart 'Ventileren zo gedaan' [25]. Dit is een invulling door TNO op verzoek van het Ministerie van VWS, uitgevoerd met behoorlijk strenge randvoorwaarden ten aanzien van het uiteindelijke product. Denk hierbij onder andere aan de insteek dat het bouwbesluit als voldoende wordt beschouwd. Op zich een goed initiatief en het zou zeker mooi zijn wanneer we onze gehele bouwvoorraad op tenminste het huidige bouwbesluit niveau kunnen krijgen. Dan zou al heel wat gewonnen zijn wanneer we het over ventilatie in het algemeen hebben. Echter, het is nog niet zo eenvoudig om met de binnen die campagne beschikbare gegevens daadwerkelijk iets te zeggen over het ventilatieniveau. Daarom is door TVVL en Binnenklimaat Nederland al eerder gekeken naar de ontwikkelingen in België en de producten die daar zijn gerealiseerd. In september 2021 is een document beschikbaar gekomen dat min of meer een 'vertaling' is van een van die producten [14]. Het biedt meer uitgebreide handvatten om de ventilatie te bepalen en mogelijkheden om die te verbeteren mocht dat nodig zijn. Ook hier speelt het meten van CO₂ een rol om een indicatie van de ventilatie te krijgen. Het

blijft belangrijk om in het achterhoofd te houden dat de CO₂-concentratie zich niet 1-op-1 laat vergelijken met de verspreiding en concentratie van pathogenen.

Tot slot

COVID-19 heeft ons op een hernieuwde manier naar ventilatie heeft laten kijken. Hernieuwd, omdat ruim honderd jaar geleden ventilatie vooral werd gerelateerd aan infecties en gezondheid [3,26]. In de loop der tijd heeft dat plaats gemaakt voor perceptie (geur) en heeft ook energie/duurzaamheid een positie gekregen in de discussie over het minimale ventilatiedebiet. Het is waar dat in de huidige gebouwvoorraad, zeker waar geen sprake is van warmteterugwinning (type D), extra ventileren tot meer warmteverlies zal leiden dat gecompenseerd zal moeten worden. Echter, dan komen we bij de discussie gezondheid versus energiegebruik. Het vertrekpunt moet liggen bij de gezondheid. De maatschappelijke kosten door dit niet te doen zijn veel te hoog. Dat heeft deze pandemie ons wel geleerd. Maar ook de zorgkosten zullen enorm stijgen in een vergrijzende samenleving als wij de volksgezondheid niet op één zetten bij het ontwikkelen van gebouwen en het beheer daarvan, en in de context van deze tekst specifiek het binnenklimaat (luchtkwaliteit, thermisch comfort). Pas dan is de volgende vraag aan de orde hoe dit op een zo energie-efficiënte manier te doen. Dat is de volgorde. De noodzaak om meer en effectiever te ventileren zou dus eigenlijk iedereen moeten uitnodigen om, voor de korte termijn, met innovatieve ideeën te komen om dat op een energiezuinige wijze te doen. Zeker voor de bestaande gebouwvoorraad die natuurlijk geventileerd wordt of met een mechanische toe- of afvoer is uitgerust (type A-C) is daar zeker nog wat te winnen. Zulke innovaties zullen niet alleen interesse wekken in Nederland...

Referenties

- [1] J. Sundell, H. Levin, W.W. Nazaroff, W.S. Cain, W.J. Fisk, D.T. Grimsrud, F. Gyntelberg, Y. Li, A.K. Persily, A.C. Pickering, J.M. Samet, J.D. Spengler, S.T. Taylor, C.J. Weschler, Ventilation rates and health: multidisciplinary review of the scientific literature, *Indoor Air*. 21 (2011) 191–204. <https://doi.org/10.1111/J.1600-0668.2010.00703.X>.
- [2] W.J. Fisk, The ventilation problem in schools: literature review, *Indoor Air*. 27 (2017) 1039–1051. <https://doi.org/10.1111/ina.12403>.
- [3] J. Jimenez, L. Marr, K. Randall, E.T. Ewing, Z. Tufekci, T. Greenhalgh, D.K. Milton, R. Tellier, J. Tang, Y. Li, L. Morawska, J. Mesiano-Crookston, D. Fisman, O. Hegarty, S. Dancer, P. Bluysen, G. Buonanno, M. Loomans, W. Bahnfleth, M. Yao, C. Sekhar, P. Wargocki, A.K. Melikov, K. Prather, Echoes Through Time: The Historical Origins of the Droplet Dogma and its Role in the Misidentification of Airborne Respiratory Infection Transmission, *SSRN Electron. J.* (2021). <https://doi.org/10.2139/SSRN.3904176>.
- [4] K. Randall, E.T. Ewing, L.C. Marr, J.L. Jimenez, L. Bourouiba, How did we get here: what are droplets and aerosols and how far do they go? A historical perspective on the transmission of respiratory infectious diseases, *Interface Focus*. 11 (2021).

<https://doi.org/10.1098/RSFS.2021.0049>.

- [5] T. Greenhalgh, J.L. Jimenez, K.A. Prather, Z. Tufekci, D. Fisman, R. Schooley, Ten scientific reasons in support of airborne transmission of SARS-CoV-2, *Lancet*. 397 (2021) 1603–1605. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)00869-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)00869-2).
- [6] Z. Peng, A.L.P. Rojas, E. Kropff, W. Bahnfleth, G. Buonanno, S.J. Dancer, J. Kurnitski, Y. Li, M.G.L.C. Loomans, L.C. Marr, L. Morawska, W. Nazaroff, C. Noakes, X. Querol, C. Sekhar, R. Tellier, T. Greenhalgh, L. Bourouiba, A. Boerstra, J.W. Tang, S.L. Miller, J.L. Jimenez, Practical Indicators for Risk of Airborne Transmission in Shared Indoor Environments and Their Application to COVID-19 Outbreaks, *Environ. Sci. Technol.* (2022) acs.est.1c06531. <https://doi.org/10.1021/ACS.EST.1C06531>.
- [7] W. Chen, N. Zhang, J. Wei, H.L. Yen, Y. Li, Short-range airborne route dominates exposure of respiratory infection during close contact, *Build. Environ.* 176 (2020) 106859. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106859>.
- [8] J. Wagner, T.L. Sparks, S. Miller, W. Chen, J.M. Macher, J.M. Waldman, Modeling the impacts of physical distancing and other exposure determinants on aerosol transmission, *J. Occup. Environ. Hyg.* 18 (2021) 495–509. https://doi.org/10.1080/15459624.2021.1963445/SUPPL_FILE/UOE_H_A_1963445_SM9322.PDF.
- [9] M.G.L.C. Loomans, F. Franchimon, De COVID-19 ervaren en ventilatie: wat heeft het ons gebracht?, *TVVL Mag.* 2021 (2021) 14–19. <https://research.tue.nl/en/publications/de-covid-19-ervaren-en-ventilatie-wat-heeft-het-ons-gebracht> (accessed January 31, 2022).
- [10] J. Schijven, L.C. Vermeulen, A. Swart, A. Meijer, E. Duizer, A.M. de Roda Husman, Quantitative Microbial Risk Assessment for Airborne Transmission of SARS-CoV-2 via Breathing, Speaking, Singing, Coughing, and Sneezing, *Environ. Health Perspect.* 129 (2021) 47002. <https://doi.org/10.1289/EHP7886>.
- [11] H.P. Oswin, A.E. Haddrell, M. Otero-Fernandez, J.F.S. Mann, T.A. Cogan, T. Hilditch, J. Tian, D. Hardy, D.J. Hill, A. Finn, A.D. Davidson, J.P. Reid, J. Reid, A. Davidson, A. Haddrell, The Dynamics of SARS-CoV-2 Infectivity with Changes in Aerosol Microenvironment, *MedRxiv.* (2022) 2022.01.08.22268944. <https://doi.org/10.1101/2022.01.08.22268944>.
- [12] N. Van Doremalen, T. Bushmaker, D.H. Morris, M.G. Holbrook, A. Gamble, B.N. Williamson, A. Tamin, J.L. Harcourt, N.J. Thornburg, S.I. Gerber, J.O. Lloyd-Smith, E. De Wit, V.J. Munster, Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1, *N. Engl. J. Med.* 382 (2020) 1564–1567. <https://doi.org/10.1056/NEJMc2004973>.
- [13] P. A. de J. L., Carbon dioxide generation rates for building occupants, *Indoor Air.* 27 (2017) 868–879. <https://doi.org/10.1111/INA.12383>.
- [14] M. Loomans, Ventilatie in relatie tot COVID-19 en een goede binnenluchtkwaliteit, Maarssen, 2021. https://www.binnenklimaattechniek.nl/document/rapport-covid-19-in-relatie-tot-ventilatie-en-binnenluchtkwaliteit_binnenklimaattechniek-pdf/.

- [15] S.N. Rudnick, D.K. Milton, Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration, *Indoor Air*. 13 (2003) 237–245. <https://doi.org/10.1034/J.1600-0668.2003.00189.X>.
- [16] W. Su, B. Yang, A. Melikov, C. Liang, Y. Lu, F. Wang, A. Li, Z. Lin, X. Li, G. Cao, R. Kosonen, Infection probability under different air distribution patterns, *Build. Environ.* 207 (2022) 108555. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2021.108555>.
- [17] A.K. Melikov, COVID-19: Reduction of airborne transmission needs paradigm shift in ventilation, *Build. Environ.* 186 (2020) 107336. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2020.107336>.
- [18] W. Liu, L. Liu, C. Xu, L. Fu, Y. Wang, P. V. Nielsen, C. Zhang, Exploring the potentials of personalized ventilation in mitigating airborne infection risk for two closely ranged occupants with different risk assessment models, *Energy Build.* 253 (2021) 111531. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2021.111531>.
- [19] TNO, TNO 2020 R11252 - Laboratoriumonderzoek naar effect van verschillende opstellingen, ventilatiesystemen en ventilatiehoeveelheden op de blootstelling van aerosolen in een horecagelegenheid, Delft, 2020. <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2020/10/02/laboratoriumonderzoek-naar-effect-van-verschillende-opstellingen-ventilatiesystemen-en-ventilatiehoeveelheden-op-de-blootstelling-van-aerosolen-in-een-horecagelegenheid>.
- [20] C. Zhang, P. V. Nielsen, L. Liu, E.T. Sigmer, S.G. Mikkelsen, R.L. Jensen, The source control effect of personal protection equipment and physical barrier on short-range airborne transmission, *Build. Environ.* 211 (2022) 108751. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2022.108751>.
- [21] B. Zhao, Y. Liu, C. Chen, Air purifiers: A supplementary measure to remove airborne SARS-CoV-2, *Build. Environ.* 177 (2020) 106918. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106918>.
- [22] B. Blocken, T. van Druenen, A. Ricci, L. Kang, T. van Hooff, P. Qin, L. Xia, C.A. Ruiz, J.H. Arts, J.F.L. Diepens, G.A. Maas, S.G. Gillmeier, S.B. Vos, A.C. Brombacher, Ventilation and air cleaning to limit aerosol particle concentrations in a gym during the COVID-19 pandemic, *Build. Environ.* 193 (2021) 107659. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2021.107659>.
- [23] P.M. Bluyssen, M. Ortiz, D. Zhang, The effect of a mobile HEPA filter system on ‘infectious’ aerosols, sound and air velocity in the SenseLab, *Build. Environ.* 188 (2021) 107475. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2020.107475>.
- [24] Eindhoven University of Technology, Corona-onderzoek TU Eindhoven naar luchtzuivering in scholen in Nederland van start, Website. (2022). <https://www.tue.nl/nieuws-en-evenementen/nieuwsoverzicht/28-01-2022-corona-onderzoek-tu-eindhoven-naar-luchtzuivering-in-scholen-in-nederland-van-start/> (accessed January 31, 2022).
- [25] TNO, Ministerie van VWS, Ventileren zo gedaan, Website. (2021). <https://www.ventilerenzogedaan.nl/> (accessed January 26, 2022).
- [26] J.E. Janssen, The History of Ventilation and Temperature Control The History of Ventilation and Temperature Control About the Author, *ASHRAE J.* September (1999) 47–52.

https://www.ashrae.org/file_library/about/mission_and_vision/ashrae_and_industry_history/the-history-of-ventilation-and-temperature-control.pdf (accessed January 26, 2022).

- [27] Air Infiltration and Ventilation Centre, Technical note AIVC 68, Residential ventilation and health (2016) p. 16 https://www.aivc.org/sites/default/files/TN68_Heath%26Ventilation.pdf