

Auteurs M.G.L.C. Loomans¹, A.B. Boerstra², F. Franchimon³, C.J. Wisse⁴

1. Eindhoven University of Technology, Group Building Performance – Focus area IEQ and Health, Eindhoven

2. bba binnenmilieu, Den Haag

3. Franchimon ICM, Berkel en Rodenrijs

4. DWA

Rekenen aan het risico op infecties

In het licht van de COVID-19 pandemie is er de natuurlijke behoefte om meer te weten over het SARS-CoV-2, ook wel corona-virus en hoe het zich ontwikkelt. Het liefst zouden we in de toekomst willen kijken en op basis daarvan anticiperen om gevolgen te beperken. Om de energiebehoefte van een gebouwontwerp te kunnen berekenen wordt al decennia gebruik gemaakt van bouwprestatie simulatiemodellen. Daarmee kunnen we vaak ook iets zeggen over bijvoorbeeld het thermisch comfort, onder andere in het geval van oververhitting. We gebruiken ook de Computational Fluid Dynamics (CFD) techniek om de luchtstroming in ruimtes en rondom gebouwen te analyseren, bijvoorbeeld de ventilatie-efficiëntie. Echter, als het aankomt op ventilatie en gezondheid, dan zien we daar tot nu toe nauwelijks iets over terug. Ventilatie, het debiet/ventilatievoud, zijn normaal gesproken randvoorwaarden en niet onderdeel van de analyse van een ontwerp-oplossing, tenzij het gaat om volledig natuurlijk geventileerde gebouwen. In de praktijk worden die echter nog maar zelden ontworpen en gebouwd. Maar als het gaat om infecties waarbij de luchttransmissie van belang is, is ventilatie juist cruciaal en afhankelijk van bijvoorbeeld het gebruik van een ruimte en het risico dan men wenst te lopen. Bouwbesluit-eisen of eisen zoals weergegeven in het PvE voor Kantoren of Scholen zijn dan niet per se afdoende. Hoe gaan we hiermee om? In dit artikel willen we een korte beschrijving geven van het model dat hiervoor vaak wordt gebruikt, en dat ook is opgenomen in een webtool (eerstehulpbijventilatie.nl) die recent online is gekomen om zelf mee aan de slag te gaan.

Modellering van infectierisico

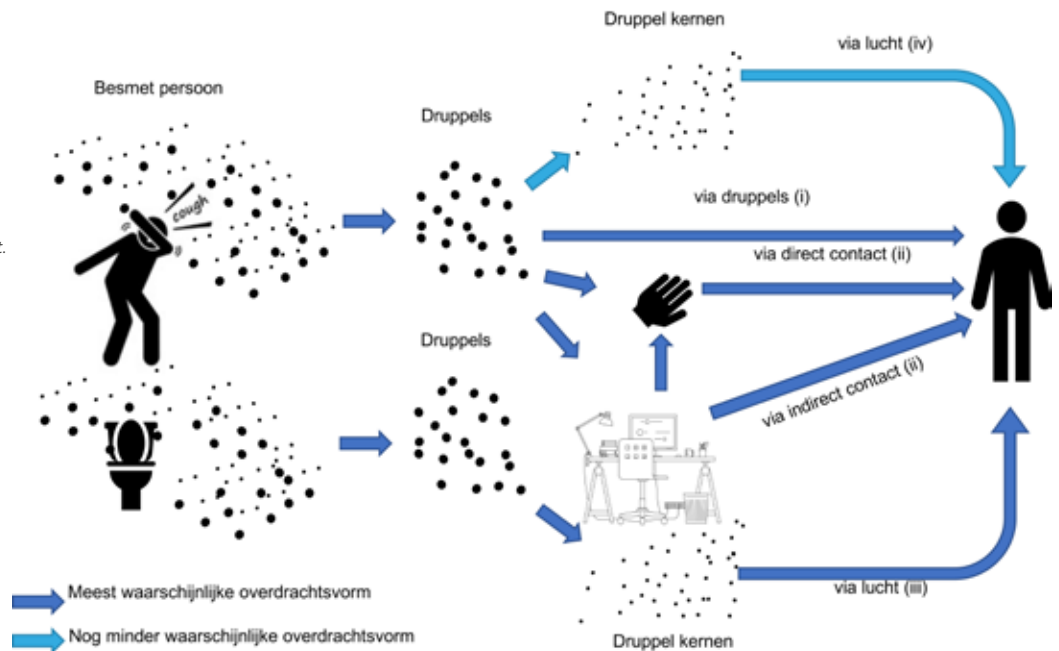
Het proces van transmissie van infectieuze microbiologische verontreiniging (bijv. virussen, bacteriën, schimmels) is niet recht-toe-recht-aan. Het gaat daarbij onder andere over de karakteristieken van het pathogeen (de ziekteverwekker), hoeveel deeltjes worden geproduceerd in een gastheer die mogelijk ziekteverwekkend zijn, hoe goed de ziekteverwekker overleeft of levensvatbaar blijft buiten die gastheer (mens, dier) en hoe goed het immuunsysteem is van degene die de ziekteverwekker

'ontvangt'. Hieraan gekoppeld zit ook de hoeveelheid virussen, bacteriën en schimmelsporen (dosis) die nodig is om daadwerkelijk ziek te kunnen worden en hoe deze dosis wordt ontvangen (piek of over langere periode). Verschillende pathogenen gedragen zich hierbij anders. Voor sommige is hier inmiddels al best het nodige bekend, voor andere, waaronder het corona-virus is dat duidelijk nog niet het geval. Al doende komt hier gelukkig wel steeds meer kennis over beschikbaar, bijvoorbeeld ten aanzien van de overlevingskans buiten de gastheer [1].

Qua transmissieroute worden er drie hoofdroutes verondersteld in de overdracht van pathogenen die luchtweginfecties kunnen veroorzaken zoals COVID-19 (Figuur 1): de directe route via druppeltjes, de indirecte route via contactoppervlakken en de luchttransmissieroute via aerosolen. Onder de laatste route behoort ook fecaal-orale overdracht. Het onderscheid tussen druppeltjes en aerosolen wordt normaal gesproken op het niveau van de afmeting van het deeltje dat de pathogeen bevat gemaakt. Dit vanuit de veronderstelling dat druppeltjes snel uitvallen (depositie) en aerosolen langer in de lucht blijven zweven. Een (redelijk arbitraire historische) maat hiervoor is 5 micron, hoewel vanuit de wetenschap die zich hiermee bezighoudt deze maat nog wel wordt gehanteerd. Echter, ook grotere deeltjes kunnen langer blijven zweven. De afmeting bepaalt overigens ook hoe ver een deeltje het luchtwegsysteem van de mens binnen kan dringen. Ook hier ligt nog een parameter ten aanzien van de gevoeligheid. De plaats waar een pathogeen het lichaam binnentreedt om de infectie te veroorzaken, de receptor, is voor verschillende infectieziekten verschillend en kan op meerdere plaatsen aanwezig zijn, meer in de bovenste luchtwegen en/of de onderste luchtwegen.

De directe en contactroute zijn belangrijk om te onderkennen in de overdracht van corona-virus, maar voor het binnenmilieu is met name de luchttransmissie route

Figuur 1: Visualisatie van de verschillende transmissieroutes in de overdracht van pathogenen die luchtweginfecties kunnen veroorzaken. De kleur van de pijl geeft een indicatie van het belang van de individuele route voor het corona-virus. Dit is echter nog onderhevig aan voortschrijdend inzicht. (Figuur: Francesco Franchimon)



iets waarop met de aanwezige installaties in gebouwen invloed kan worden uitgeoefend. Door ventilatie en de luchtstroming in een ruimte kan worden voorkomen dat ziekteverwekkers iemand kunnen besmetten, dan wel het risico daarop beperken. Hier zouden we dan ook graag modellen voor hebben om iets te kunnen zeggen over hoe een bepaalde oplossing bijdraagt aan het reduceren van het infectierisico.

Wells-Riley

In [2] worden enkele voorbeelden van modellen genoemd die proberen om het risico op infectie in te schatten. Echter, er is één model dat sinds enkele decennia vooral hiervoor wordt ingezet, de zogenaamde Wells-Riley vergelijking [2]:

Vergelijking 1:

$$N_c = S(1 - e^{-Iqpt/Q})$$

Hierbij staat N_c [-] voor het aantal nieuw geïnfecteerde cases over de blootstellingstijd t [h], S [-] het aantal mensen dat mogelijk geïnfecteerd kan worden in de te onderzoeken ruimte, I [-] het aantal geïnfecteerde personen in de ruimte, q [quanta/h] het aantal zogenaamde 'quanta' dat in de ruimte wordt geproduceerd door een geïnfecteerd persoon, p [m^3/h] het ademalingsvolume van een persoon die mogelijk geïnfecteerd kan worden en Q [m^3/h] de ventilatie in de ruimte die wordt onderzocht. De term tussen de haakjes geeft daarmee het risico op infectie in een ruimte weer. Hierbij wordt uitgegaan van een constante concentratie aan quanta in de ruimte ten gevolge van de productie van pathogenen (bron) en ventilatie (sink). De exponent in de e-macht geeft het aantal geïnhalerde quanta aan.

In de vergelijking is de term 'quanta' opvallend. Dit is geen gangbare term maar specifiek voor deze vergelijking ontwikkeld. Wells ging er hierbij vanuit dat niet ieder druppeltje dat wordt ingeademd tot een infectie zal leiden. Hij kwam vervolgens tot de definitie van een quantum als het aantal geïnfecteerde druppeltjes (kernen) dat nodig is om 1-1/e van de vatbare populatie in de ruimte te infecteren [2], ofwel een kans van 63% om geïnfecteerd te raken. Dit aantal is dus afhankelijk van, bijvoorbeeld, het type virus. In de praktijk is het bepalen van het aantal quanta voor een bepaalde ziekteverwekker niet eenvoudig. In principe gebeurt dit door uit te gaan van beschikbare informatie/data en dan terug te rekenen wat het aantal quanta is geweest bij een uitbraak op een locatie (bijvoorbeeld een kerk of restaurant). In dat geval kunnen nieuwe cases voor bijvoorbeeld een virusuitbraak worden beoordeeld.

Het gebruik van de Wells-Riley vergelijking gaat uit van een aantal veronderstellingen. Deze worden samengevat door [2,3] en hebben betrekking op onder andere: - de incubatietijd (tijd tussen de besmetting en de eerste symptomen; ofwel een persoon die in de onderzochte situatie wordt geïnfecteerd zal zelf niet bijdragen aan het infectierisico voor de onderzochte situatie; Het corona-virus is iets specialer in de zin dat de incubatietijd ongeveer 5-6 dagen is, maar dat besmettelijkheid al 1-3 dagen voordat symptomen optreden kan plaatsvinden [4]), - het feit dat wordt uitgegaan van een (perfect) gemengde situatie voor wat betreft de concentratie van ziektekiemen in de ruimte, - dat wordt gerekend met de gemiddelde concentratie die gedurende het verblijf wordt ingeademd, - dat er geen rekening wordt gehouden met hoe het verloop van de besmetting plaats vindt, i.e. een piek, of over een langere periode met fluctuaties in concentratie. In [5] wordt als

alternatief voor de gemiddelde concentratie de gemiddelde concentratie afgeleid vanuit een nul-situatie. Dit komt dichterbij een praktijksituatie waarbij een geïnfecteerd persoon een schone ruimte binnenkomt en gedurende een tijd aanwezig is.

Het Wells-Riley model wordt vaak gebruikt wanneer het gaat om het inschatten van het infectierisico in gebouwen. In het model, zoals in Vergelijking 1 weergegeven, wordt alleen ventilatie ($Q [m^3/h] = \lambda_{ven} \cdot V$; waarbij $\lambda_{ven} [h^{-1}]$ het ventilatievoud en $V [m^3]$ het volume) als mogelijkheid gegeven om het risico met behulp van gebouwtechnische maatregelen te beperken. Echter, hieraan kunnen nog meer zogenaamde 'sink'-termen (λ) worden toegevoegd, zoals inactivatie van het virus (λ_{inact}), depositie (λ_{dep}) en filtratie (λ_{fil}) of de toepassing van UVGI. Deze laten zich, in combinatie met het volume van de ruimte, vergelijkbaar als een ventilatievoud als een eerste orde verlies formuleren. Voor het corona-virus kan bijvoorbeeld een waarde van 0 tot $0.63 h^{-1}$ worden aangehouden voor de inactivatie, of $0.3-1.5 h^{-1}$ voor de depositie [5].

Voorbeelden - Toepassing van Wells-Riley geeft inzicht in het risico op een infectie. Hierbij wordt in het algemeen ervan uitgegaan dat er één geïnfecteerd persoon in de ruimte aanwezig is. Voor de situatie van het koor in Skagit Valley (USA) kan het risico op infectie berekend worden op meer dan 80%. Echter, de parameters zijn gevoelig voor onzekerheden. Met name de productie van quanta is een belangrijke parameter die enkel indirect afgeleid kan worden door de informatie die voor cases beschikbaar komen.

Tabel 1: Voorbeelden van toepassing Wells-Riley voor verschillende situaties. Gehanteerde waarden voor productie quanta en ademhalingsdebiet uit [5,6].

Ruimte		Koor Skagit Valley	Vliegtuig	Kantoor
Volume	m ³	810	480	240
Tijdsduur	h	2.5	2.5	8
Aantal geïnfecteerden	-	1	1	1
Aantal vatbare personen	-	60	299	19
Ademhalingsdebiet	m ³ /h	1,1 (1,0)	0,5	0,5
Productie quanta	quanta/h	970 (450)	10	10
Masker efficiency*	-	0	0 (0,5)	0 (0,5)
Ventilatievoud	h ⁻¹	0.7	20**	2
Overige 'sinks'	h ⁻¹	0,62	-	-
Risico op besmetting	%	83 (53)	0,1 (0,03)	7,5 (1,9)
Aantal personen	-	49,7 (31,5)	0,4 (0,1)	1,4 (0,4)

* Geldt zowel voor geïnfecteerde als vatbare personen.
 ** inclusief gerecirculeerde en gefilterde lucht

In Tabel 1 worden enkele voorbeelden gegeven van het risico op besmetting in verschillende situaties. Het eerste voorbeeld betreft de case van het koor in Skagit Valley in de Verenigde Staten. Dit is een bekend voorbeeld, waarbij een groot deel van

de mensen dat aanwezig was besmet is geraakt [5]. De twee overige voorbeelden betreffen een vliegtuig- en een kantoor situatie. Voor de vliegtuigsituatie wordt ervan uitgegaan dat het recirculatie deel voor 100% wordt gefilterd middels een HEPA-filter. Daarmee wordt verondersteld dat de gerecirculeerde lucht vrij is van virusdeeltjes. Voor de vliegtuig- en kantoor situatie is, ter vergelijking, ook het effect van het gebruik van mondkapjes meegenomen.

De resultaten laten zien dat de kans op besmetting bij het koor inderdaad zeer groot was. Opgelet moet worden dat de productie van het aantal quanta is afgeleid van de beschikbare gegevens van deze case. Deze is door [5] bepaald op 970 quanta/h. Definitieve waarden voor de productie zijn echter nog onderwerp van discussie. Op dit moment worden iets lagere waarden verondersteld [7]: 450 quanta/h voor zingen, 70 quanta/h voor rustig praten en 5 quanta/h voor enkel ademen. Wordt uitgegaan van 450 quanta/h en ook een iets lagere waarde voor het ademhalingsdebiet (1 m³/h) voor de case van Skagit Valley, dan reduceert dit het risico aanzienlijk tot 53%. In het voorbeeld wordt uitgegaan van zingen tijdens de hele periode. In de praktijk zal dat niet het geval zijn en zou je kunnen middelen over een tijdsperiode, zoals is aangenomen voor de vliegtuig- en kantoor situatie (10% praten, 90% stil; naar boven afgeronde waarde). Voor het voorbeeld van het vliegtuig is uitgegaan van volledige (ideale) menging. In de praktijk is er sprake van een vorm van compartimentering van de ventilatie. Wanneer we uitgaan van tien compartimenten, dan is het risico in het compartiment waar een geïnfecteerd persoon zit een factor 10 groter.

Om een indruk te krijgen van de gevoeligheid van enkele parameters wordt verwezen naar figuur 2, waarin het effect van de quanta productie, blootstellingstijd en de som van de 'sink' termen (waaronder het ventilatievoud) op het infectierisico is gevisualiseerd. Duidelijk is onder andere dat de blootstellingstijd een belangrijke parameter is in het risico op infectie. Bij een lange verblijftijd is bijvoorbeeld een hoog ventilatievoud noodzakelijk om het risico enigszins beperkt te houden.

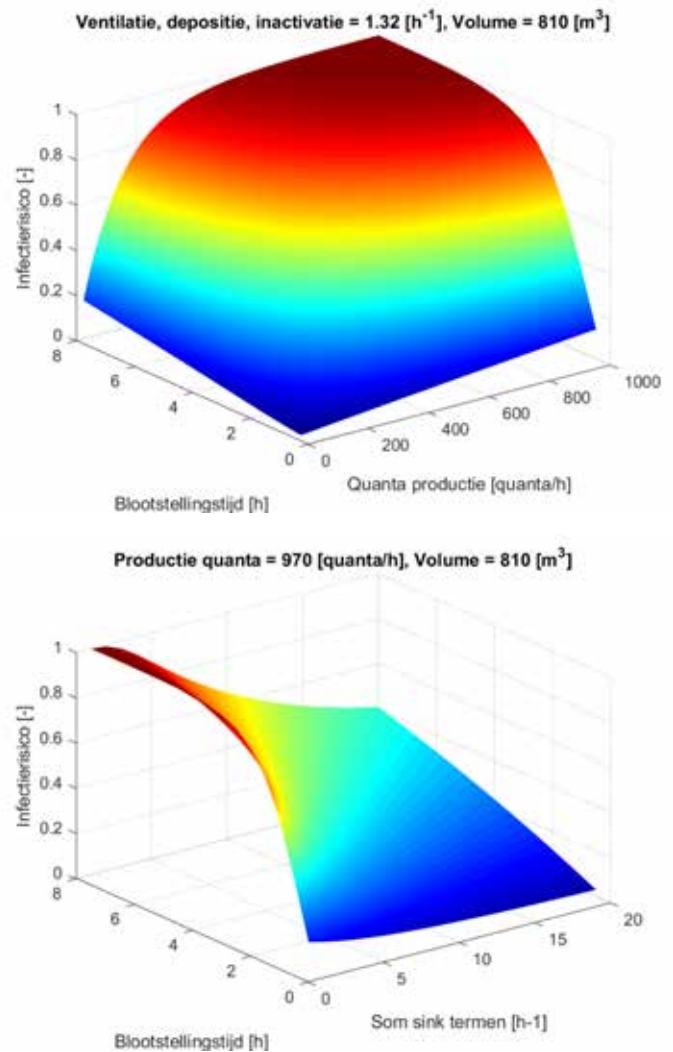
Restricties - Het gebruik van de Wells-Riley vergelijking is een goede manier om inzicht te krijgen in het infectierisico bij een bepaalde situatie en hoe gevoelig een gebouw of installatiegerelateerde maatregel is voor het verminderen van het risico. Echter, er zijn belangrijke opmerkingen te

maken bij het gebruik van Wells-Riley. Op de eerste plaats gaat Wells-Riley alleen in op de luchttransmissieroute. Dat betekent, min of meer, dat enkel naar de aerosolen gekeken wordt en niet naar de druppeltjes. Het risico van de directe route wordt dus niet behandeld met het model van Wells-Riley. Voor het bepalen van de quanta bij een bepaalde uitbraak die zich voor heeft gedaan kan dit mogelijk leiden tot een overschatting van de quanta als andere routes niet uitgesloten zijn. Voor het coronavirus wordt de directe route vooralsnog als een belangrijk route gezien. Hoewel aerosolen ook een rol spelen in deze (short-range) overdrachtsroute is de rol van ventilatie hierin, zonder specifieke maatregelen, duidelijk beperkter. Desalniettemin kan met het Wells-Riley model in ieder geval het risico via de luchttransmissie worden geverifieerd en geminimaliseerd. Daarnaast is de veronderstelling van perfecte menging een belangrijk uitgangspunt. Voor (relatief) kleine ruimtes, of ruimtes met een beperkte hoogte en een redelijke ventilatie (ventilatievoud tenminste 1 h^{-1} orde grootte), zal dit uitgangspunt een redelijk goede benadering zijn. Voor grote ruimtes zoals monumentale kerken is dit niet per se het geval. Hier zal een afweging gemaakt moeten worden door bijvoorbeeld een deel van het volume mee te nemen in de analyse of een bepaalde ventilatie-effectiviteit te veronderstellen.

Alternatieven - Om in een ruimte iets te kunnen zeggen over de verspreiding van virusdeeltjes zal de luchtstroming in de ruimte moeten worden gemodelleerd. Dit kan met behulp van Computational Fluid Dynamics (CFD). Hoewel deze techniek inzicht geeft hoe deeltjes zich in een ruimte verspreiden, en in theorie de blootstelling aan quanta bepaald zou kunnen worden, is deze techniek vele malen complexer dan het Wells-Riley model. Voor het bepalen van het infectierisico wordt dan ook daaraan de voorkeur gegeven. Echter, om het effect van een ventilatie-oplossing en varianten daarop te onderzoeken, of van bijvoorbeeld een zogenaamd kuchscherp, zou CFD ingezet kunnen worden. Ten behoeve van de validatie zouden die simulaties moeten samengaan met metingen.

Eerste hulp bij ventilatie (webtool)

Omdat iedere situatie anders is en daarmee het infectierisico, is een webtool ontwikkeld waarmee men zelf het risico kan inschatten (eerstehulpbijventilatie.nl). De webtool is in eerste instantie ontwikkeld vanuit het perspectief van een kerkgebouw, met aandacht voor het zingen tijdens een kerkdienst. Doorontwikkeling naar

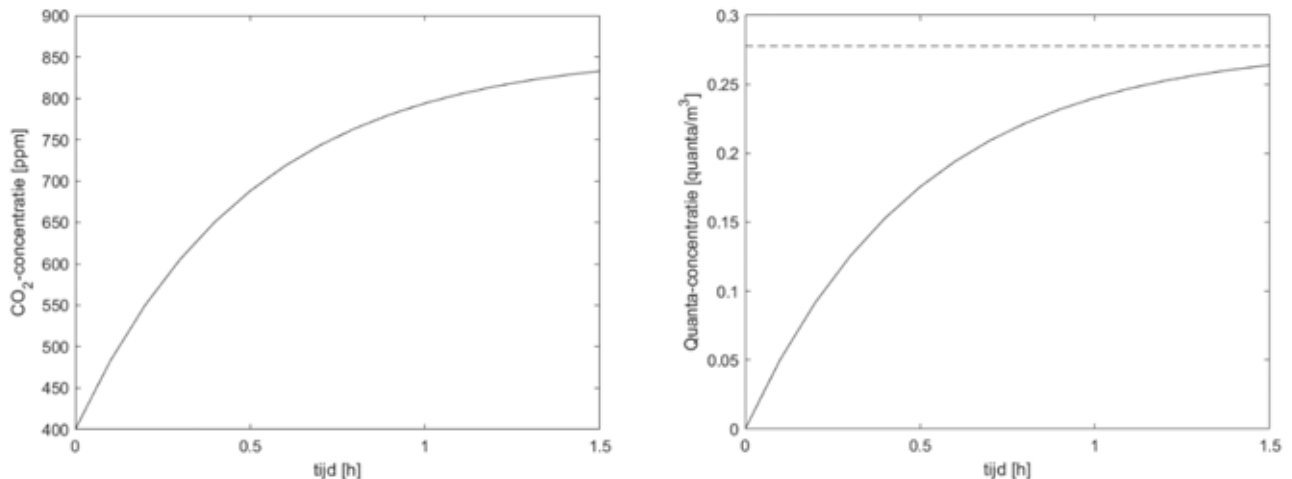


Figuur 2: Gevoeligheid infectierisico als functie van de emissie van quanta en blootstellingstijd [boven] en de som van de 'sink' termen (met name ventilatievoud) en blootstellingstijd [onder]; model [5].

een meer generieke tool staat op het programma (zeer waarschijnlijk is de eerste versie van de generieke tool reeds beschikbaar ten tijde van de publicatie van dit artikel).

Met de eerste-hulp-bij-ventilatie tool is het bijvoorbeeld mogelijk om het besmettingsrisico te bepalen op basis van het opgegeven aantal personen. Ook wordt de R_0 waarde berekend, ofwel hoeveel mensen door één geïnfecteerd persoon potentieel worden geïnfecteerd in een bepaalde situatie. In principe wil je die waarde < 1 houden. De gebruiker kan dat voor zichzelf vergelijken met het weergegeven infectierisico/besmettingsrisico.

De webtool is gebaseerd op het model zoals beschreven door [5]. Dit veronderstelt een startsituatie waarbij er geen verontreiniging aanwezig is in de ruimte en is een meer uitgebreide versie van Vergelijking 1. Vergelijking 1 gaat uit van een constante concentratie van de 'quanta' in de ruimte. De meer uitgebreide variant beschrijft de opbouw van de



Figuur 3: Opbouw van de CO₂ concentratie [links] en de vergelijkbare opbouw van de quanta-concentratie [rechts]. Vergelijking 1 maakt gebruik van de limietwaarde (zwarte stippellijn - rechts).

concentratie gedurende de tijd, net zoals de reeds bekende modellen dat doen die de CO₂-concentratie beschrijven in de ruimte (zie figuur 3 links). Figuur 3 (rechts) laat de parallele opbouw van de quanta-concentratie zien. De variant uit Vergelijking 1 geeft per definitie hogere risico's, met name bij lage ventilatievouden, kortdurende verblijfstijden en grote ruimtevolumes. Gebruik van de volledige versie zoals beschreven in [5] is van belang vanuit het perspectief van het gebruik (bijvoorbeeld kerkdiensten in grote monumentale kerkgebouwen).

In het model zijn keuzes gemaakt voor de productie van quanta en voor het ademhalingsvolume. Wat quanta betreft zijn de volgende waardes gehanteerd: 450 q/h voor zingen, 10 q/h voor luisteren tijdens de kerkdienst. Wat ademhalingsdebieten betreft: 1,0 m³/h voor zingen en 0,5 m³/h voor luisteren. De 'sinks' zijn niet meegenomen. Voor de gebruiker is ook een 'verkeerslicht' toegevoegd, dit om de infectierisico's te kunnen duiden. Tot en met 1%: groen; vanaf 1% tot en met 5%: oranje; boven de 5%: rood. Dit is natuurlijk een keuze en betekent niet dat bij een risico kleiner dan 1% niemand ziek kan worden. De webtool berekent tevens het maximaal aantal personen dat aanwezig mag zijn zodat een maximumconcentratie van 800 ppm niet overschreden wordt ('klasse A ventileren'). Ook bij

dit aantal personen wordt een R0-waarde gegeven. Op die manier krijgt de gebruiker een referentie-beeld bij het aantal personen dat ingevoerd wordt. Het aantal personen dat gebruik kan maken van een ruimte wordt gerelateerd aan het 1,5 m-protocol. De webtool laat onder andere zien dat meer ventileren het risico kan verlagen, maar ook dat blootstellingstijd een belangrijke parameter is. Voor de volledigheid, kennis omtrent het virus ontwikkelt zich nog continue. Dit betreft bijvoorbeeld de hoeveelheid quanta en de bijdrage van de luchttransmissie route in het infectierisico. De hier gepresenteerde informatie moet in dat licht worden gezien, en als een aanvulling op de gangbare maatregelen om het risico te beperken.

Tot slot

Het modelleren van het infectierisico kent een plotselinge hernieuwde aandacht. Tot op dit moment wordt dit risico nog niet in echt in het ontwerp van gebouwinstallaties meegenomen. De huidige ervaringen drukken ons nogmaals op het feit dat ventilatie verder gaat dan perceptie en een niet te hoog CO₂ niveau als benadering voor de concentratie van alle andere, in het algemeen, chemische stoffen die zich in de lucht kunnen bevinden. Het onderkennen van de biologische component biedt de kans om ventilatie in gebouwen in een breder kader te zetten. Het gebruik van het Wells-Riley model maakt het mogelijk om dat meer gekwantificeerd te doen. Ondanks de beperkingen van het model kan in ieder geval het effect van varianten worden vergeleken. In dat licht krijgt ook de toepassing van andere technieken in het verlagen van het risico een beter vergelijk.

Referenties

1. 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>.
2. C.J. Noakes, P.A. Sleight, Mathematical models for assessing the role of airflow on the risk of airborne infection in hospital wards, *J. R. Soc. Interface.* 6 (2009). <https://doi.org/10.1098/rsif.2009.0305>. focus.
3. 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>.
4. World Health Organization, Coronavirus disease 2019 (COVID-19) - Situation Report-73 HIGH-LIGHTS, (2020) 13. <https://doi.org/10.3201/eid2606.200239>.
5. S. Miller, W. Nazaroff, J.L. Jimenez, A. Boerstra, G. Buonanno, S. Dancer, J. Kurnitski, L.C. Marr, L. Morawska, C. Noakes, Transmission of SARS-CoV-2 by inhalation of respiratory aerosol in the Skagit Valley Chorale superspreading event, *Indoor Air (Not Peer Rev. Yet)*. (2020).
6. G. Buonanno, L. Morawska, L. Stabile, Quantitative assessment of the risk of airborne transmission of SARS-CoV-2 infection: prospective and retrospective applications, *MedRxiv.* (2020) 2020.06.01.20118984. <https://doi.org/10.1101/2020.06.01.20118984>.
7. G. Buonanno, L. Stabile, L. Morawska, Estimation of airborne viral emission: Quanta emission rate of SARS-CoV-2 for infection risk assessment, *Environ. Int.* 141 (2020) 105794. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105794>.