

CO₂ als indicator voor Covid-19 risico

Auteur: Marianne Stranger, VITO

Datum: 1/10/2020

Dit advies naar aanleiding van de vraag van AZG of het gebruik van een CO₂-meter in woonzorgcentra of in de wachtkamer van een (dokters)praktijk een zinvolle methode om de luchtverversingsgraad van de ruimte op te volgen.

1. DE AANRIJING VAN CO₂ IN EEN GESLOTEN OMGEVING

CO₂ in het binnenmilieu wordt geproduceerd door de bewoners/gebouwgebruikers als metabooliet bij het uitademen; de uiteindelijke concentratie in de binnenlucht is het resultaat van:

- het totale ventilatievoud van de ruimte,
- de hoeveelheid aanwezige personen,
- de grootte van de ruimte,
- en de achtergrondconcentratie van CO₂ in de buitenlucht.

Het is ook geweten dat in een drukbezette ruimte, zoals een klaslokaal, een drukke wachtzaal of een vergaderzaal, de CO₂-concentratie snel kan oplopen tot een veelvoud van 1000 indien onvoldoende verlucht wordt. Daarnaast is ook geweten dat in dergelijke drukbezette ruimtes, een hoge CO₂-concentratie een goede merker is voor bio-effluenten en pollutanten t.g.v. gebouwgebruik.

Aangezien Covid-19, net als CO₂, deel uitmaakt van uitgedemde lucht, is de opvolging van de CO₂-concentratie in een drukbezette ruimte zoals een klaslokaal, als maat voor risico op Covid-19-besmetting, een geschikte methode om na te gaan of de lucht in die ruimte, voor die specifieke bezetting, voldoende ververscht wordt.

Om een antwoord te bieden op de hier gestelde vraag, of het dan ook zinvol is om CO₂ op te volgen in een niet-drukbezette ruimte zoals een wachtkamer, dient gezocht te worden naar een kwantificatie van de term 'drukbezet'. Deze term heeft niet enkel betrekking op het aantal aanwezige personen, maar ook op het volume van een ruimte en de luchtverversing ervan. Het is dus logischer om bezetting uit te drukken in aantal personen/m³ of aantal personen/m².

De snelheid waarmee mensen CO₂ produceren varieert echter naargelang het dieet, de gezondheid en de leeftijd, maar ook de duur en de intensiteit van de fysieke inspanning die ze leveren. ASTM D6245 noteert zo bijvoorbeeld dat een volwassen persoon van gemiddelde grootte in een kantooromgeving aan het werk, ongeveer 0.0052 L/sec CO₂-uitstoot; voor een kind met een vergelijkbare fysieke inspanning bedraagt dat 0.0029 L/sec CO₂. Persily en de Jonge (2016) publiceerden recent een update / verfijning van deze uitstoot, door de metabolische processen, omgevingstemperatuur en -druk in rekening te brengen bij de calculatie van de emissie van CO₂ bij uitademen. Een overzicht wordt getoond in Tabel 1.

Tabel 1 : CO₂ generatiesnelheid per leeftijd en fysieke inspanning, bij 273K en 101 kPa, uit Persily en de Jonge (2016).

TABLE 4 CO₂ generation rates at 273 K and 101 kPa for ranges of ages and level of physical activity (based on mean body mass in each age group)

Age (y)	Mean body mass (kg)	BMR (MJ/day)	CO ₂ generation rate (L/s)						
			Level of physical activity (met)						
			1.0	1.2	1.4	1.6	2.0	3.0	4.0
Males									
<1	8.0	1.86	0.0009	0.0011	0.0013	0.0014	0.0018	0.0027	0.0036
1 to <3	12.8	3.05	0.0015	0.0018	0.0021	0.0024	0.0030	0.0044	0.0059
3 to <6	18.8	3.90	0.0019	0.0023	0.0026	0.0030	0.0038	0.0057	0.0075
6 to < 11	31.9	5.14	0.0025	0.0030	0.0035	0.0040	0.0050	0.0075	0.0100
11 to <16	57.6	7.02	0.0034	0.0041	0.0048	0.0054	0.0068	0.0102	0.0136
16 to <21	77.3	7.77	0.0037	0.0045	0.0053	0.0060	0.0075	0.0113	0.0150
21 to < 30	84.9	8.24	0.0039	0.0048	0.0056	0.0064	0.0080	0.0120	0.0160
30 to <40	87.0	7.83	0.0037	0.0046	0.0053	0.0061	0.0076	0.0114	0.0152
40 to <50	90.5	8.00	0.0038	0.0046	0.0054	0.0062	0.0077	0.0116	0.0155
50 to <60	89.5	7.95	0.0038	0.0046	0.0054	0.0062	0.0077	0.0116	0.0154
60 to <70	89.5	6.84	0.0033	0.0040	0.0046	0.0053	0.0066	0.0099	0.0133
70 to <80	83.9	6.57	0.0031	0.0038	0.0045	0.0051	0.0064	0.0095	0.0127
≥80	76.1	6.19	0.0030	0.0036	0.0042	0.0048	0.0060	0.0090	0.0120
Females									
<1	7.7	1.75	0.0008	0.0010	0.0012	0.0014	0.0017	0.0025	0.0034
1 to <3	12.3	2.88	0.0014	0.0017	0.0020	0.0022	0.0028	0.0042	0.0056
3 to <6	18.3	3.59	0.0017	0.0021	0.0024	0.0028	0.0035	0.0052	0.0070
6 to < 11	31.7	4.73	0.0023	0.0027	0.0032	0.0037	0.0046	0.0069	0.0092
11 to < 16	55.9	6.03	0.0029	0.0035	0.0041	0.0047	0.0058	0.0088	0.0117
16 to <21	65.9	6.12	0.0029	0.0036	0.0042	0.0047	0.0059	0.0089	0.0119
21 to < 30	71.9	6.49	0.0031	0.0038	0.0044	0.0050	0.0063	0.0094	0.0126
30 to < 40	74.8	6.08	0.0029	0.0035	0.0041	0.0047	0.0059	0.0088	0.0118
40 to <50	77.1	6.16	0.0029	0.0036	0.0042	0.0048	0.0060	0.0090	0.0119
50 to <60	77.5	6.17	0.0030	0.0036	0.0042	0.0048	0.0060	0.0090	0.0120
60 to <70	76.8	5.67	0.0027	0.0033	0.0038	0.0044	0.0055	0.0082	0.0110
70 to <80	70.8	5.45	0.0026	0.0032	0.0037	0.0042	0.0053	0.0079	0.0106
≥80	64.1	5.19	0.0025	0.0030	0.0035	0.0040	0.0050	0.0075	0.0101

Omdat in een wachtzaal zowel mannen, vrouwen, als kinderen van alle leeftijden aanwezig kunnen zijn, in variabele aantallen, blijft het moeilijk om op basis van deze data een predictie te maken voor 'een gemiddelde wachtkamer'.

2. AANVOER VAN VERSE LUCHT EN HET RISICO BINNENSHUIS VOOR LUCHT-GEDRAGEN TRANSMISSIE VAN VIRUSSEN

Algemeen wordt de Wells-Riley vergelijking gebruikt om het risico binnenshuis in te schatten voor lucht-gedragen transmissie van infectieziekten, zoals bijvoorbeeld tuberculose. De vergelijking veronderstelt steady-state condities en vereist in feite ook een meting van de toevoer van buitenlucht, welke meestal moeilijk te bepalen zijn, en vooral sterk kunnen variëren over de tijd (wanneer tijdelijk een raam geopend wordt, varieert de luchttoevoer sterk). Onderzoekers Rudnick en Milton (2003) hebben een alternatieve vergelijking voorgesteld, die gebaseerd is op het inschatten van de fractie ingeademde lucht die vooraf uitgedemd werd in een ruimte, als merker voor uitgedemde lucht-blootstelling.

3. CO₂ CONCENTRATIE EN HET RISICO BINNENSHUIS VOOR LUCHT-GEDRAGEN TRANSMISSIE VAN VIRUSSEN

3.1 CO₂ BINNENSHUIS EN HER-INADEMING VAN UITGEADEMDE LUCHT

Het model van Rudnick en Milton (2003) wordt getoond in Figuur 1, waarbij de linkse afbeelding illustreert hoe de CO₂-concentratie toeneemt in een kamer in functie van de tijd, wanneer 20 personen aanwezig zijn in een ruimte van 92,5 m³ gedurende 3 periodes van 4h, telkens gescheiden door een interval van 1.5h zonder aanwezigen.

De CO₂-concentratie in de ruimte wordt telkens bepaald bij een ventilatievoud van 0,1/h, 0,3/h, 1/h, en 3/h. Vanaf een ventilatievoud < 1/h, is te zien hoe de concentratie snel toeneemt tot concentraties van 5000 ppm en hoger. Er kan ook opgemerkt worden dat een pauze van 1,5h zonder aanwezigen bij een ventilatievoud < 1/h onvoldoende is om de CO₂-concentratie te doen dalen naar een aanvaardbaar niveau, vergelijkbaar met de buitenconcentratie.

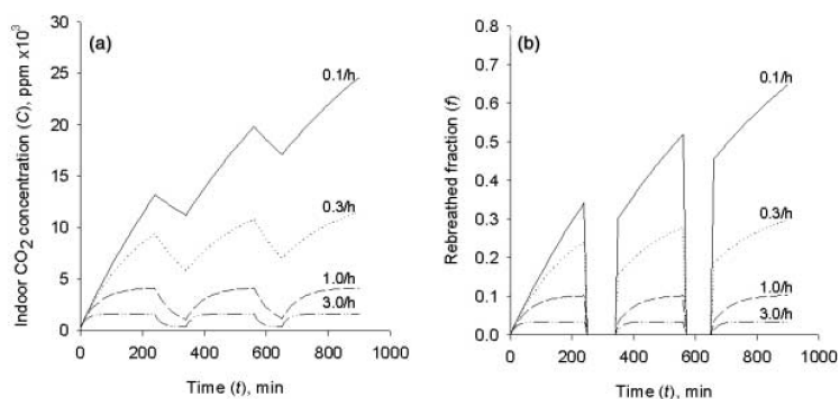


Fig. 1 Estimated CO₂ concentration and rebreathing of air in a 92.5-m³ experimental room during an experimental exposure. (a) CO₂ concentrations are estimated for a 15-h experiment with outdoor air exchange rates of 0.1, 0.3, 1, and 3/h. The estimates are based on 20 occupants in the room for three 4-h intervals separated by two 1.5-h periods during which there were no occupants. (b) The estimated rebreathing of exhaled air by study subjects based on CO₂ estimates assuming no rebreathing during two 1.5-h breaks.

Figuur 1: Geschatte CO₂ concentratie en de 'her-inademing' van lucht, in een 92,5 m³ kamer (Rudnick en Milton, 2003)

De rechtse afbeelding van Figuur 1 toont de schatting van de fractie her-inademing van uitgeademde lucht in de ruimte. De figuur toont hoe die fractie aanzienlijk verhoogt bij een lagere luchtverversing (i.h.b. lager dan 1/h).

Omdat infectieuze deeltjes zich in de kleinere deeltjesfracties bevinden en bijgevolg een langere tijd in suspensie kunnen blijven, kan er, veronderstellend dat er geen luchtzuivering actief is, verondersteld worden dat ze proportioneel zijn met CO₂ in de ruimte (Rudnick en Milton, 2003). Er dient dan wel opgemerkt te worden dat deze benadering een conservatieve benadering is, waarbij het aandeel van infectieuze deeltjes groter dan 1 µm, dat minder lang in suspensie blijft, onderschat wordt.

3.2 REPRODUCTIEGETAL VAN EEN VIRUS IN FUNCTIE VAN HET CO₂-GEHALTE

Op basis van deze veronderstellingen, drukten de auteurs het reproductiegetal (dit is het aantal secundaire infecties dat voorkomt uit één enkel geïnfecteerd persoon in een populatie waarvan iedereen gevoelig is voor besmetting) van een virus uit in functie van:

- de CO₂-concentratie in een ruimte,
- de geschatte fractie her-inademing van uitgedemde lucht,
- de 'quanta emission rate'¹ of q-waarde van een virus, dit getal geeft weer hoeveel besmettelijke deeltjes uitgestoten worden van een virus per uur.
- en de bezetting van het lokaal

Deze relatie werd gevisualiseerd door Rudnick en Milton (2003) in Figuur 2 voor 3 verschillende scenario's: voor sterk infectieuze deeltjes zoals mazelen met een hoge q-waarde (570 quanta/h), voor het griepvirus met een gemiddelde q-waarde (100 quanta/h) en voor het rhinovirus met een lage q-waarde (4 quanta/h).

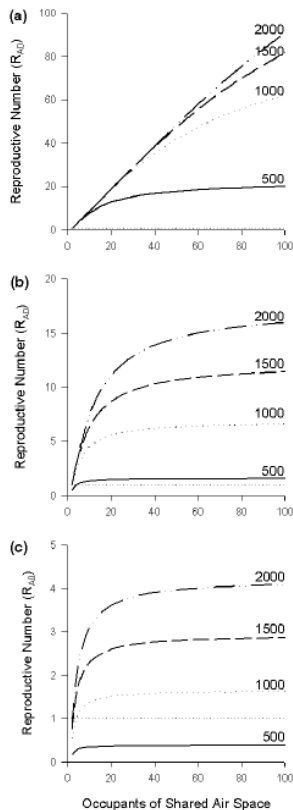


Fig. 2 R_{A0} for (a) measles, (b) influenza, and (c) rhinovirus in a school or office as a function of number of occupants: each curve represents a different mean CO₂ concentration. (a) We assumed $q = 570$ quanta/h, $t = 10$ h, $C_{i0} = 350$ p.p.m., and $C_{s0} = 37,500$ p.p.m. (b) We assumed $q = 100$ quanta/h, $t = 4$ h. (c) We assumed $q = 4$ quanta/h, $t = 24$ h.

Figuur 2 Gemodelleerd reproductiegetal voor (a) mazelen na 10h, (b), griep na 4h, (c) rhinovirus na 24h, in functie van het bezettingsaantal, bij variabele CO₂ concentratie van de binnenruimte, Rudnick en Milton (2003)

Het eerste scenario (scenario A) beschouwt een totale periode van 10h, bestaand uit 2 dagen dat de infectieuze persoon aanwezig is in ruimte (bv. op school). Het tweede scenario (scenario B) beschouwt een aanwezigheid van 4h, en het derde scenario (scenario C) een aanwezigheid van 24h.

Het eerste scenario met het besmettelijkste virus (570 quanta/h) hier beschouwd, toont een reproductiegetal dat bijna lineair stijgt met de lokaal bezetting, bij CO₂ concentraties hoger dan 1000

¹ Een quantum is gedefinieerd als de dosis van lucht-gedragen aerosoldeeltjes die nodig is om infectie te veroorzaken bij 63% infectiegevoelige personen.

ppm. Vanaf 1000 ppm is een lichte afvlakking te zien, en bij 500 ppm in de ruimte is een afvlakking te zien, waarbij het reproductiegetal constant blijft ongeacht de bezetting.

Het tweede scenario, met het matig besmettelijke griepvirus (100 quanta/h), dat beschouwd wordt na 4h in de ruimte toont dan wel een afvlakking voor elk beschouwd concentratieniveau, zelfs bij 5000 ppm, maar illustreert duidelijk het lagere reproductiegetal bij lagere CO₂ concentratie, dus grotere luchtverversing. Enkel bij 500 ppm kan een reproductiegetal van 1 aangehouden worden in de ruimte, een reproductiegetal lager dan 5 kan behouden blijven, ongeacht de bezetting, indien de CO₂-concentratie van de ruimte lager dan 1000 ppm blijft.

Het derde scenario, met een weinig besmettelijke rhinovirus (4 quanta/h), illustreert hoe na 24h bij 500 ppm het reproductiegetal lager dan 1 blijft, en hoe bij 1000 ppm dit getal 1 slechts beperkt overschrijdt en constant blijft ongeacht de lokaalbezetting. Een duidelijke toename van het reproductiegetal is te zien vanaf 1500 en 2000 ppm.

Het is belangrijk om op te merken dat zelfs bij een CO₂ concentratie van 500 ppm het reproductiegetal van het meer besmettelijke virus (570 quanta/h) en het matig besmettelijke virus (100 quanta/h) onvermijdelijk hoger blijven dan één; een reden waarom andere beschermingsmiddelen zoals mondklappers mee het risico verder kunnen beperken.

3.3 WAT MET HET SARS-COV-2 VIRUS?

Onderzoek naar de besmettelijkheid van SARS-CoV-2 (Buonanno et al. 2020) toonde aan dat ook voor dit virus hoge quanta emission rates (> 100 quanta/h) gezien worden wanneer bv. een asymptomatisch persoon besmet met SARS-CoV-2 zingt tijdens lichte activiteiten (i.e. traag wandelen). Belangrijk op te merken dat symptomatische, met SARS-CoV-2 besmette personen, die bv. stilzitten een hele lage besmettelijkheid kunnen hebben (< 1 quanta/h).

Het scenario voor het SARS-CoV-2 reproductiegetal zal zich ergens tussen scenario A en scenario B van Figuur 2 bevinden. Een doeltreffende ventilatie, die het CO₂ gehalte ten minste < 1000 ppm houdt, ongeacht de bezetting, is dus erg belangrijk om het risico te beperken voor andere aanwezigen in de ruimte.

4. CO₂ EN SARS-COV-2 IN EEN WACHTKAMER

Maar wat dan in een wachtkamer?

In een wachtkamer is het aantal aanwezigen sterk variabel tijdens de dag, maar ook tussen verschillende praktijken kan het aantal aanwezigen sterk variëren: de ene praktijk organiseert afspraken zodat slechts een beperkt aantal mensen samen in de ruimte aanwezig kan zijn, de andere praktijk werkt met een systeem waarbij mensen hun beurt samen in één ruimte afwachten.

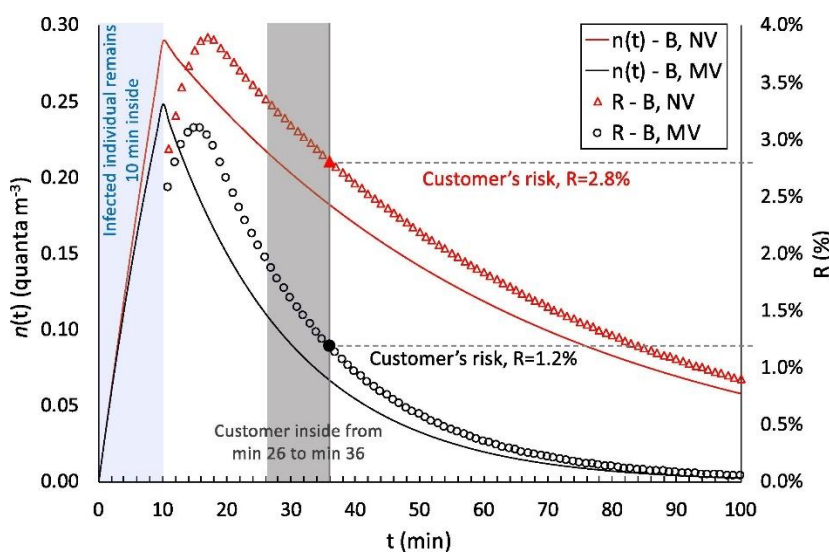
1. In eerste instantie dient het CO₂-gehalte op elk moment minstens lager dan 1000 ppm te zijn: op deze manier kan het reproductiegetal van SARS-CoV-2 (en ook van andere virussen) beperkt worden doordat er voldoende luchtverversing is om de luchtconcentratie, dus ook de kans op besmetting van aanwezigen, te beperken.
2. In tweede instantie is een lage CO₂-concentratie geen garantie voor een risico dat herleid kan worden naar nul. Het is immers geweten dat de meeste SARS-CoV-2 virusdeeltjes zich in de kleinste deeltjesfacties bevinden (< 5 µm), waardoor ze tot 3u na emissie in de lucht aanwezig

kunnen zijn (van Doremalen et al. 2020). Ook bij een lage bezettingsgraad is daarom een hoog ventilatievoud van groot belang om potentieel infectieuze deeltjes af te voeren naar buiten.

In een wachtkamer kan de opvolging van CO₂ dus waardevol zijn, vooral wanneer meerdere personen in eenzelfde ruimte aanwezig zijn, of wanneer een beperkt aantal personen in een kleine, slecht geventileerde ruimte samenkomen.

5. ANDERE FACTOREN DIE HET RISICO OP LUCHT-GEDRAGEN VIRUSTRANSMISSIE BEPERKEN

Naast het verhogen van het ventilatievoud kan het risico op lucht-gedragen virustransmissie verder ook beperkt worden door de tijd die in de ruimte gespendeerd wordt zo kort mogelijk te houden en het aantal aanwezigen te beperken. Dit is gevolg van de Wells-Riley vergelijking, die gebruikt wordt om het risico binnenshuis in te schatten voor lucht-gedragen transmissie van infectieziekten. Deze vergelijking neemt het ventilatievoud in rekening, maar ook de quanta emission rate van een virus, de hoeveelheid aanwezigen, en de tijd die in een ruimte doorgebracht wordt, om het risico op besmetting uit te drukken. Buonanno et al (2020) publiceerden een model afgebeeld in Figuur 3, waarin het besmettingsrisico voor SARS-CoV-2 van een bezoeker aan een apotheek gevisualiseerd wordt, in functie van het ventilatievoud, en dus ook de quanta concentratie in de lucht, en in functie van de tijd. Het risico (R) wordt uitgedrukt voor een bezoek van 10 minuten.



Figuur 3 Gemodelleerde quanta concentratie in een apotheek, en het infectierisico van een bezoeker bij natuurlijke en mechanische ventilatie, in functie van de tijd.

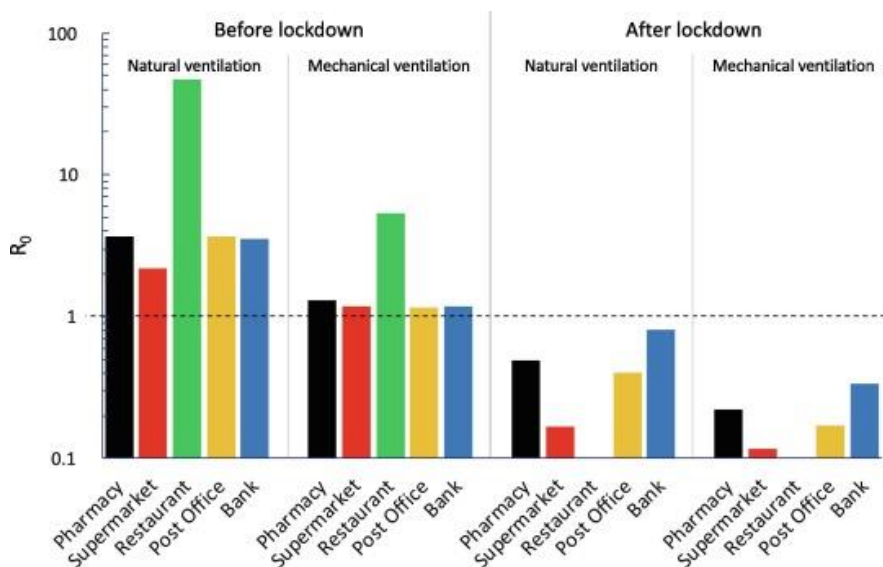
Het eerste scenario (rode lijnen) toont de situatie wanneer een geïnfecteerd persoon in een apotheek met natuurlijke verluchting binnenkomt (tijdstip 0) en er 10 minuten blijft. De besmette persoon gaat opnieuw buiten, maar de uitgestoten virusdeeltjes (uitgedrukt in quanta. m^3) blijven aanwezig: de luchtconcentratie bereikt een piek, en neemt af in functie van het ventilatievoud van de apotheek (rode volle lijn). Op minuut 26 (d.i. 16 minuten nadat de besmette persoon de ruimte verlaten heeft), komt een ander (niet-besmet) persoon binnen en blijft 10 minuten in de ruimte. Het infectierisico van die persoon voor een bezoek van 10 minuten aan de apotheek, wordt dan weergegeven door de rode

Δ -lijn, en bedraagt op dat moment 2.8%. Indien de persoon sneller was binnengekomen, bv. op minuut 20, had hij een besmettingsrisico van bijna 4% gehad.

Het tweede scenario (zwarte lijnen) is hetzelfde als het eerste, dan wel bij een mechanische ventilatie, dus bij een hoger ventilatievoud. Opnieuw zorgt de geïnfecteerde persoon tijdens zijn bezoek aan de apotheek voor de uitstoot van eenzelfde concentratie quanta.m³, die t.g.v. het hogere ventilatievoud een lagere concentratie heeft dan bij natuurlijke ventilatie. Het hogere ventilatievoud zorgt er ook voor dat de concentratie virusdeeltjes in de lucht sterker daalt in functie van de tijd (zwarte volle lijn), waardoor ook het infectierisico voor een bezoeker (zwarte O-lijn) op minuut 26 aanzienlijk lager is dan bij natuurlijke ventilatie; het infectierisico van die persoon bedraagt 1.2%.

Het is belangrijk om op te merken dat de piek van virusdeeltjes in de lucht niet samenvalt met de piek van het infectierisico voor een bezoeker: het hoogste infectierisico voor een bezoeker is er pas een 5-tal minuten na diens vertrek (t.g.v. het verspreiden van het virus in de ruimte en het bereiken van een steady-state). Elke bezoeker aan de apotheek (voor deze gemodelleerde apotheek waren er dagelijks 179 bezoekers) had zo zijn eigen infectierisico, afhankelijk van het tijdstip van binnenkomen in de apotheek na een besmet persoon, en afhankelijk van de tijdspanne die er doorgebracht werd. De 5 apothekers die er werkten werden dagdagelijks blootgesteld aan een besmettingsrisico van een ganse dag, met een variabel aantal besmette personen die in de apotheek kwam.

Buonanno et al (2020) modelleerden voor een vergelijkbaar scenario het reproductiegetal in verschillende publieke ruimtes, voor en na de lockdown in Italië, bij natuurlijke en mechanische ventilatie. Na de lockdown werd beter geventileerd, werd het aantal aanwezigen beperkt door bv buiten aan te schuiven en werd social distancing gerespecteerd (hoewel dit laatste initiatief in feite weinig impact heeft op lucht-gedragen transmissie van virussen, Buonanno et al, 2020). De resultaten worden getoond in Figuur 4.



Figuur 4 Reproductiegetal berekend voor verschillende blootstellingsscenario's (natuurlijke en mechanische ventilatie, voor en na lockdown, in verschillende micro-omgevingen (rekening houdend met 142 quanta/h en een populatie die lichte beweging doet of gewoon staat)

De figuur illustreert hoe voor de lockdown het reproductiegetal > 1 bleek voor elk blootstellingsscenario, wanneer de ventilatie enkel bepaald werd door de luchtdichtheid van een gebouw (natuurlijke ventilatie, gesimuleerd als een luchtverversing van 0,2/h). Het hoogste reproductiegetal (47,3) werd bepaald voor een bezoek aan een restaurant met natuurlijke ventilatie,

dit hoge getal is gevolg van het groot aantal aanwezigen (80 klanten en 4 personeelsleden), in combinatie met de lange blootstellingstijd (1h30 in deze simulatie). Bij verbeteren van de ventilatie verbetert het reproductiegetal (5.35), maar blijft hoger dan 1 o.a. omwille van de tijd die er doorgebracht wordt en het aantal aanwezigen. Vergelijkbare situaties worden berekend voor andere binnenmilieus met drukke bezetting en lange blootstellingstijd, zoals scholen, zwembaden, sportzalen, die omwille van deze redenen in vele landen gesloten werden door de overheid om virustransmissie te beperken.

Ook bij mechanische ventilatie werd in de meeste gemodelleerde micro-omgevingen een reproductiegetal > 1 bepaald.

6. CONCLUSIE EN AANBEVELING

Specifiek voor wachtkamers is het belangrijk om de CO₂-concentratie in de ruimte op elk moment zo laag mogelijk te houden, minstens lager dan 1000 ppm. Het is dus zinvol om CO₂ te meten in wachtkamers. Op deze manier zorgt de luchtverversing ervoor dat de concentratie aan potentieel infectieuze deeltjes daalt, en daalt bijgevolg ook het infectierisico voor aanwezigen. Echter, het is niet zo dat bij een laag CO₂-gehalte in de ruimte geen infectierisico voor SARS-CoV-2 bestaat. Het kan immers zijn dat het aantal aanwezigen laag is, zodat de aanrijking van CO₂ beperkt is. Maar kan er wel emissie van infectieuze deeltjes zijn, zonder dat de CO₂-concentratie in de ruimte > 1000 ppm wordt. Daarom is het noodzakelijk om sowieso te blijven verluchten en ventileren, zelfs wanneer weinig aanwezigen zijn, zowel voor, tijdens als na hun bezoek.

Risicobeperking op lucht-gedragen transmissie van Covid-19 gebeurt dus in eerste plaats door voldoende te ventileren en verluchten. Vervolgens hebben zowel het aantal aanwezigen, en de tijd die in een ruimte doorgebracht wordt, een sterk bepalende impact op het besmettingsrisico van aanwezigen.

7. REFERENTIES

Persily, A., de Jonge L. Carbon dioxide generation rates for building occupants Indoor Air. 2017; 27:868–879.

Rudnick N., Milton D.K. Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration. Indoor Air 2003; 13: 237–245

Ma J., Qi X., Chen H., Li X., Zhang Z., Wang H., Sun L., Zhang L., Guo L., Morawska L., Grinshpun S.A., Biswas P., Flagan R.C., Yao M. Exhaled breath is a significant source of SARS-CoV-2 emission. <https://doi.org/10.1101/2020.05.31.20115154>

Buonanno G., Stabile L., Morawska L., Estimation of airborne viral emission: Quanta emission rate of SARS-CoV-2 for infection risk assessment. Environment International 141, August 2020, 105794

van Doremalen N., Bushmaker T., Morris D.H., Holbrook M.G., Gamble A., Williamson B.N., Tamin A., Harcourt J.L., Thornburg N.J., Gerber S.I., Lloyd-Smith J.O., de Wit E., Munster V.J. Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS-CoV-1. N. Engl. J. Med. (2020)