



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

**Effect van verschillende
ventilatiehoeveelheden op aerogene
transmissie van SARS-CoV-2**

Risicoschatting op basis van het AirCoV2-model

RIVM-briefrapport 2021-0207
A.A. Bartels et al.



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

**Effect van verschillende
ventilatiehoeveelheden op aerogene
transmissie van SARS-CoV-2**

Risicoschatting op basis van het AirCoV2-model

RIVM-briefrapport 2021-0207
A.A. Bartels et al.

Colofon

© RIVM 2021

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), de titel van de publicatie en het jaar van uitgave.

Het RIVM hecht veel waarde aan toegankelijkheid van haar producten. Op dit moment is het echter nog niet mogelijk om dit document volledig toegankelijk aan te bieden. Als een onderdeel niet toegankelijk is, wordt dit vermeld. Zie ook www.rivm.nl/toegankelijkheid.

DOI 10.21945/RIVM-2021-0207

A.A. Bartels (auteur), RIVM
J.F. Schijven (auteur), RIVM
J.E. Delmaar (auteur), RIVM
E. Duizer (auteur), RIVM

Contact:
Alvin Bartels
Landelijke Coördinatie Infectieziektebestrijding
alvin.bartels@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van Ministerie van VWS in het kader van P19, thema 7, onderdeel C (Binnenmilieu)

Dit is een uitgave van:
**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**
Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven
Nederland
www.rivm.nl

Publiekssamenvatting

Effect van verschillende ventilatie-hoeveelheden op aerogene transmissie van SARS-CoV-2

Risicoschatting op basis van het AirCoV2-model

Het RIVM heeft berekend wat het effect is van verschillende hoeveelheden ventilatie van binnenruimten op 'aerogene transmissie' van het coronavirus SARS-CoV-2. Aerogene transmissie betekent besmettingen met het virus via kleine druppels (aerosolen) die over een grotere afstand dan anderhalve meter en over langere tijd kunnen blijven zweven in de lucht. Ventileren helpt om aerogene transmissie te beperken. Bij ventileren wordt continu verse buitenlucht aan een ruimte toegevoerd waardoor de lucht in een binnenruimte wordt verversd.

Vanwege een goed binnenklimaat moeten alle gebouwen in Nederland, waaronder woningen, aan de minimale ventilatie-eisen van het Bouwbesluit voldoen. Het blijkt dat ventilatie volgens de minimale eisen van het Bouwbesluit 2012 voor bestaande gebouwen de kans op aerogene transmissie flink verkleint in vergelijking met niet-ventileren. Nog meer ventileren maakt de kans nog kleiner, maar het effect daarvan is minder groot. Ventilatie neemt het risico op aerogene transmissie nooit helemaal weg. Ook bij heel veel ventilatie, waarbij de binnenlucht bijvoorbeeld elke 2 minuten helemaal wordt verversd, blijft een kans bestaan dat het virus op deze manier wordt overgedragen.

Het RIVM heeft voor bepaalde publieke binnenruimtes berekend welk effect ventilatie naar verwachting heeft op het aantal mensen dat ziek wordt. Voorbeelden zijn een nachtclub, een kleine en een grote concertzaal, een klaslokaal, een kantoorruimte en een supermarkt. Ventilatie verkleint het verwachte aantal zieken het meest in de nachtclub en beide concertzalen.

Het onderzoek geeft handvatten om beleidskeuzes te maken. Het is niet mogelijk om op basis van de resultaten aan te geven welk risico acceptabel is en wat een optimale hoeveelheid ventilatie is. Hiervoor zijn andere afwegingen nodig tussen aanvaardbare risico's en eisen aan comfort, de kosten van aanschaf en onderhoud, en energiegebruik. Het is een beleidskeuze om te bepalen welk risico na deze afwegingen acceptabel wordt gevonden.

Het gaat in dit onderzoek alleen om het risico op besmetting via aerogene transmissie. Het gaat niet om andere manieren waarop mensen besmet kunnen raken, zoals besmetting binnen anderhalve meter afstand (directe transmissie).

Kernwoorden: aerogene transmissie, Air-CoV-2-model, binnenruimte, ventilatie, Bouwbesluit

Synopsis

How various ventilation rates affect the aerogenic transmission of SARS-CoV-2

A risk assessment using the AirCoV2 model

The National Institute for Public Health and the Environment (RIVM) has calculated how various ventilation rates in indoor spaces affect the 'aerogenic transmission' of the coronavirus SARS-CoV-2. Aerogenic transmission means people getting infected with the virus through very small droplets (aerosols). These droplets can stay floating in the air for a long time and can travel distances greater than one-and-a-half metres. Ventilation helps to reduce aerogenic transmission. Ventilation means that fresh air from outdoors flows continually into a space, renewing the air in an indoor space.

In order to create a good indoor climate all buildings in the Netherlands, including homes, must meet the minimum ventilation requirements of the Building Decree (Bouwbesluit). It turns out that if ventilation is carried out in line with the minimum requirements of the Building Decree 2012 for existing buildings, this strongly reduces the chance of aerogenic transmission when compared to no ventilation. An even higher ventilation rate reduces this chance even more, but in this case the extra benefit is not much greater. However, ventilation never completely removes the risk of aerogenic transmission. Even with very high ventilation, with all the indoor air being completely renewed every two minutes, there is still a chance of the virus being transmitted in this way.

The RIVM has looked at ventilation for selected types of public indoor spaces, calculating the effect that ventilation can be expected to have on the number of people who will become infected. Examples of the spaces they looked at: a nightclub, a small concert hall, a large concert hall, a classroom, an office space and a supermarket. Ventilation reduced the number of expected sick people most strongly in the nightclub and the two concert halls.

This study provides a basis for making policy choices. However, the results cannot be used to say which risks are acceptable and what an optimum ventilation rate is. For this, other factors need to be weighed up: acceptable risks on the one hand and comfort requirements, costs of buying and maintaining equipment, and energy consumption on the other hand. The policy choice means deciding what risk is seen as acceptable after these factors have been weighed up.

This study only considers the risk of infection through aerogenic transmission. It does not consider other ways in which people can become infected, such as infection at a distance of less than one and a half metres (direct transmission).

Keywords: aerogenic transmission, Air CoV-2 model, indoor spaces, ventilation, Bouwbesluit/Building Decree

Inhoudsopgave

Samenvatting – 9

1 Inleiding – 11

- 1.1 Aanleiding – 11
- 1.2 Gehanteerde definities – 11
- 1.3 Kader onderzoek – 12

2 Toelichting AirCoV2-model – 13

- 2.1 Aannames – 13

3 Scenario's – 15

- 3.1 Locaties – 15
- 3.2 Index (aerosolvorming en uitscheiding) – 15
- 3.3 Ventilatiecapaciteit – 16

4 Resultaten – 19

- 4.1 Verwacht aantal ziektegevallen bij verschillende ventilatiehoeveelheden – 19
- 4.2 Omgerekende ventilatie-eenheden – 21

5 Discussie – 23

6 Conclusie – 27

7 Aanbevelingen – 29

Literatuur – 31

Bijlage 1. Definities – 33

Bijlage 2. Berekeningen ventilatiewaarden per locatie – 36

Samenvatting

Ventileren is belangrijk voor een goed binnenklimaat. In Nederland moeten alle gebouwen, waaronder woningen, aan de minimale eisen van het Bouwbesluit voldoen. Ventilatie helpt ook de overdracht van luchtweginfecties, zoals COVID-19, te beperken. Hoeveel ventilatie helpt om de overdracht van het SARS-CoV-2-virus te beperken is niet bekend en hierover lijkt nog geen consensus te zijn bereikt.

Er bestaat internationale consensus dat overdracht van het coronavirus SARS-CoV-2 vooral plaatsvindt dichtbij een besmettelijk persoon (ongeveer tot 1,5 meter). Onder bepaalde omstandigheden kan aerogene transmissie van SARS-CoV-2 een grotere rol spelen, bijvoorbeeld in ruimtes met weinig tot geen ventilatie en waar veel mensen voor een langere tijd bij elkaar zijn. Bij aerogene transmissie gaat het om overdracht van het virus over langere afstand via aerosolen die langdurig in de lucht blijven zweven. Ventileren, waarbij de binnenlucht voortdurend wordt ververs met buitenlucht, is een maatregel om aerogene transmissie te beperken.

In dit briefrapport is met een risicoschattingsmodel ('AirCoV2') berekend wat voor effect verschillende ventilatiehoeveelheden uit regelgeving en richtlijnen hebben op het beperken van het verwachte aantal mensen dat COVID-19 met symptomen krijgt via aerogene transmissie. De kans dat mensen ziek worden is berekend voor scenario's in verschillende soorten binnenruimtes: een nachtclub, een grote en een kleine concertzaal, een theaterzaal, een klaslokaal, een kantoorruimte, een vergaderruimte en een supermarkt.

Uit de berekeningen blijkt dat meer ventileren leidt tot een kleinere kans op het krijgen van COVID-19 via aerogene transmissie. Echter, het effect van ventilatie op het aantal verwachte ziektegevallen is niet lineair. Dit betekent dat ventileren het grootste effect laat zien tussen 'niet ventileren' (0 liter/seconden/persoon; L/s/p) en ventileren volgens de minimale eisen uit het Bouwbesluit 2012 'bestaande bouw' (2 L/s/p). Bij meer ventilatie worden nog minder ziektegevallen verwacht, maar is het effect minder groot. Vooral bij locaties waar veel mensen per m² zijn en enige uren verblijven heeft ventileren het grootste effect op het verwachte aantal ziektegevallen via aerogene transmissie. Dit is in overeenstemming met de internationale consensus over situaties waar aerogene transmissie van SARS-CoV-2 kan plaatsvinden (RIVM, 2021; WHO, 2021a; CDC, 2021). Ook bij een extreem hoge ventilatievoud van 30 maal per uur (elke 2 minuten wordt de lucht in de binnenruimte geheel ververs) is er nog steeds een kans op een symptomatische infectie met SARS-CoV-2 via aerogene transmissie. Ventileren kan het risico op aerogene transmissie dus niet helemaal voorkomen. De grootste vermindering van het aantal verwachte ziektegevallen door ventileren wordt berekend bij respectievelijk de nachtclub en de kleine en grote concertzaal.

In regelgeving en richtlijnen worden verschillende eenheden gebruikt voor de minimale ventilatiecapaciteit in een ruimte. Om een vergelijking

mogelijk te maken is voor elk scenario de ventilatiehoeveelheid naar dezelfde eenheden omgerekend. Hieruit blijkt dat de ventilatiewaarde uit de Tijdelijke regeling maatregelen (Trm) COVID-19, afkomstig uit de inmiddels vervallen Drank- en horecawet, lager is dan de minimale eisen uit het Bouwbesluit 2012 'bestaande bouw' (de laagste ventilatiehoeveelheid liter/seconden/persoon in dit rapport; 2 L/s/p) voor de nachtclub en beide concertzalen. Voor het theater is de waarde lager dan de minimale ventilatiecapaciteit uit Bouwbesluit 2012 'nieuwbouw' (4 L/s/p). Dit komt doordat de Trm COVID-19 uitgaat van vloeroppervlak en het Bouwbesluit van het maximaal aantal personen in de ruimte. In de gekozen scenario's zijn er veel mensen per vloeroppervlak waardoor de minimale ventilatie-eisen uit het Bouwbesluit vooral in de nachtclub tot een hogere ventilatiehoeveelheid leidt. Het is aan te bevelen te bepalen voor welke horecagelegenheden de Trm COVID-19 lager is dan de geldende eisen uit het Bouwbesluit zodat bekend is wat de hoogste ventilatie-eis is.

In dit briefrapport wordt geen optimale ventilatiewaarde bepaald aan de hand van een acceptabel risico. Welk risico acceptabel is, is namelijk een beleidsafweging. Daarbij worden ook andere aspecten meegenomen, zoals comforteisen, (onderhouds)kosten en klimaatdoelstellingen (in verband met het energiegebruik). Ook is het belangrijk om voorzichtig te zijn bij het vertalen van de berekeningen naar betekenissen voor de praktijk. Het model doet namelijk bepaalde aannames. Zoals de aanwezigheid van een besmet persoon met een bepaalde uitscheiding van het virus, direct ideale menging van aerosolen in de gehele ruimte en continu in de gehele ruimte dezelfde homogene luchtverversing. Hierdoor is een onder- of overschatting van het risico mogelijk. Ook zijn andere transmissieroutes, zoals transmissie binnen 1,5 meter (directe transmissie), niet meegenomen waardoor het niet mogelijk is te bepalen hoe groot de rol is van aerogene transmissie in de totale verspreiding. Deze risicoschatting geeft voor de gekozen scenario's wel inzicht in het effect van verschillende ventilatiehoeveelheden op het verwachte aantal ziektegevallen via aerogene transmissie van SARS-CoV-2.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Het ministerie van VWS heeft het RIVM gevraagd of het 'AirCoV2-model' gebruikt kan worden voor het beantwoorden van de Kamermotie van mw. Agema. In de aangenomen Kamermotie van mw. Agema (nr. 1352, 7 juli 2021) staat het volgende: "verzoekt de regering, te onderzoeken of de huidige ventilatierichtlijnen in het Bouwbesluit voor scholen, horeca, winkels, kantoren, bedrijven et cetera toereikend zijn om verspreiding van het coronavirus tegen te gaan".

Voor het beantwoorden van deze vraag is het noodzakelijk te bepalen wat 'toereikend' is. Er is echter geen norm voor een 'acceptabel risico' op aerogene transmissie van SARS-CoV-2 via aerosolen waaraan men ventilatie volgens het Bouwbesluit zou kunnen toetsen (Morawska et al., 2021; Traversari et al., 2021). In overleg met het ministerie van VWS is daarom besloten om in dit briefrapport alleen inzicht te geven in het effect van verschillende ventilatiehoeveelheden op het beperken van aerogene transmissie van het coronavirus SARS-CoV-2. Hiervoor wordt met behulp van het AirCoV2-model berekend wat het verwachte aantal ziektegevallen is bij gekozen scenario's in ruimtes zoals genoemd in de Kamermotie. Ziektegevallen worden in dit rapport gedefinieerd als symptomatische personen met COVID-19. Het is van belang de resultaten en conclusies juist te interpreteren: de resultaten kunnen niet zonder meer worden vertaald naar andere praktijksituaties. Door de gemaakte aannames is er bovendien een mate van onzekerheid waardoor voorzichtigheid bij het maken van interpretaties en beleidskeuzes noodzakelijk is.

1.2 Gehanteerde definities

In dit rapport wordt onder *aerogene transmissie* verstaan: Indirecte transmissie via zwevende infectieuze virusdeeltjes in aerosolen die over langere afstanden en tijd door de lucht kunnen worden verspreid. Transmissie is ook mogelijk als de bron niet meer in de ruimte aanwezig is of als iemand de gehele tijd op ruime afstand (meerdere meters, andere kant van de ruimte) van een besmettelijke persoon is geweest, in Engelstalige literatuur ook wel 'long-range airborne route' genoemd. Aerogene transmissie kan ook plaatsvinden naar een andere ruimte via een ventilatiesysteem. Voorbeelden van infectieziekten waarbij aerogene transmissie een voorname rol speelt, zijn mazelen, tuberculose en waterpokken.

In sommige wetenschappelijke artikelen wordt ook de term 'aerosoltransmissie' gebruikt. Aerosoltransmissie is echter niet hetzelfde als aerogene transmissie. In dit rapport wordt alleen bovenstaande definitie van aerogene transmissie gehanteerd en niet de term *aerosoltransmissie* die gedefinieerd kan worden als:

Elke vorm van overdracht door infectieuze aerosolen, waarbij ook aerosolen geïncubeerd worden die vanwege de afmeting relatief kort blijven zweven. Alleen grotere druppels >60-100 µm die (vrijwel) direct naar de grond gaan worden uitgesloten. Onder aerosoltransmissie valt

daardoor zowel 'aerogene transmissie' als 'directe transmissie' door nabij contact waarbij infectieuze aerosolen onderdeel zijn van de zogenaamde 'druppelwolk' die onder meer tijdens praten, schreeuwen of zingen uitgescheiden wordt.

In bijlage 1 is een overzicht van alle definities opgenomen. Deze definities zijn afkomstig van [Aerogene transmissie SARS-CoV-2 | LCI richtlijnen \(rivm.nl\)](#), [Ventilatie en COVID-19 | LCI richtlijnen \(rivm.nl\)](#) en [Verslag werkconferentie Ventilatie en COVID-19 | Overige | Gezondheidsraad](#).

1.3 Kader onderzoek

De internationale consensus is dat besmettingen voornamelijk plaatsvinden door directe transmissie: overdracht van SARS-CoV-2 dichtbij een besmettelijk persoon, meestal tot een afstand van ongeveer 1,5 meter (WHO, 2021a; CDC, 2021; RIVM, 2021). Aerogene transmissie kan een grote(re) rol spelen in ruimtes met geen of 'onvoldoende' ventilatie, vooral als grote groepen mensen langdurig in deze ruimte verblijven. Ventilatie in publieke settings, zoals winkels, kantoren en uitgaansgelegenheden, heeft vooral effect op het voorkómen van aerogene transmissie. Het effect van ventilatie op directe transmissie – ook via aerosolen – lijkt door de korte afstand beperkt of afwezig (Liu et al., 2017; Deng et al., 2021).

Het AirCoV2-model wordt gebruikt om in te schatten in hoeverre aerogene transmissie plaatsvindt en hoeveel risicoreductie optreedt door ventileren. In dit briefrapport is echter niet naar andere transmissieroutes, zoals directe transmissie en transmissie via oppervlakken, gekeken. Het is dus niet mogelijk op basis van dit briefrapport te concluderen dat aerogene transmissie in een bepaalde situatie een belangrijke(re) rol heeft ten opzichte van andere routes. Ook wordt er geen uitspraak gedaan over een optimale ventilatiewaarde. Dit is een beleidskeuze waarbij het noodzakelijk is ook andere aspecten mee te wegen, zoals (onderhouds)kosten, comforteisen en klimaatdoelstellingen in verband met het energiegebruik. Ook geven de modelberekeningen alleen een inzicht in het effect van de verschillende ventilatiewaarden in specifieke situaties, waarbij mensen worden blootgesteld aan virus afkomstig van één besmettelijke persoon (index) (zie hoofdstuk 3 'Scenario's'). Voor iedere situatie heeft het RIVM aannames gedaan (zie hoofdstuk 2 'Toelichting AirCoV2-model'). Het is niet mogelijk om de resultaten van een bepaalde setting één-op-één te vertalen naar andere settings omdat de omstandigheden kunnen verschillen. De kans dat een index aanwezig is in de binnenruimte, of dat er meerdere indices aanwezig zijn, wordt niet meegenomen in de berekening. Daarom wordt niets gezegd over de waarschijnlijkheid waarmee het gekozen scenario optreedt.

2 Toelichting AirCoV2-model

Met het AirCoV2-model is het risico op het krijgen van COVID-19 via aerogene transmissie in een bepaalde binnenruimte berekend. Dit theoretische risico is berekend voor in de ruimte aanwezige personen, die gedurende een bepaalde tijd werden blootgesteld aan aerosolen met het SARS-CoV-2-virus die door één besmettelijke persoon via uitademen, praten, hard praten (schreeuwen) en/of zingen werden uitgestoten. Hoesten en niezen werden buiten beschouwing gelaten omdat werd uitgegaan van een a- of presymptomatische index. Het AirCoV2-model werd ontwikkeld door Schijven et al. (2021) en maakt gebruik van literatuurgegevens over hoeveelheden uitgestoten aerosolen. Het AirCoV2-model schat het aantal virusdeeltjes waaraan mensen vervolgens worden blootgesteld (dosis) door inademing van druppels met het virus. Vervolgens wordt het risico om COVID-19 te krijgen geschat op basis van dosis en een dosis-responsmodel. Een nadere toelichting op het AirCov2-model is te lezen in Schijven et al. (2021).

Binnen het AirCov2-model gebruikte kwantitatieve microbiologische risicoschatting (QMRA) worden alle stappen (gevarenidentificatie, schatten van blootstelling, gevaren- en risicokarakterisering) expliciet beschouwd en aangegeven. Dit in tegenstelling tot het Wells-Rileymodel, een model dat ook regelmatig gebruikt wordt voor het berekenen van de kans op een besmetting (Traversari et al., 2021). Het Wells Riley-model hanteert een afhankelijkheid van de kans op een besmetting van de toegevoerde luchthoeveelheid gebruikmakend van een zogenaamde 'quanta-variabele'. De quanta-variabele in het Wells-Rileymodel omvat een groot aantal aspecten, zoals onderscheid in transmissieroute en omgevingsfactoren, die niet altijd expliciet worden weergegeven en per situatie sterk kunnen verschillen. Hierdoor is het niet verantwoord om de hoeveelheid quanta uit een specifieke casus in een andere situatie toe te passen. Een QMRA is daarentegen gebaseerd op expliciete schatting van de blootstelling en op een dosisresponsrelatie. De uitkomsten zijn daarmee generieker (Traversari et al., 2021). De Monte Carlo berekeningen met het AirCoV2-model werden in Mathematica (versie 12.2., Wolfram Inc., IL, USA) uitgevoerd.

2.1 Aannames

Het AirCoV2-model doet de volgende aannames:

- Er is één index die virusdeeltjes uitstoot in de ruimte aanwezig.
- De besmettelijke persoon verkeert op dag nul van het krijgen van symptomen, dat is het moment waarbij gemiddeld genomen de virusuitscheiding het hoogst is. De virusconcentratie in de aerosolen is gebaseerd op metingen van het RIVM aan patiëntmateriaal van begin 2020 (Schijven et al., 2021). Het geometrisch gemiddelde van deze virusconcentratie bedraagt 32 miljoen RNA-kopieën per milliliter aerosol. Vergeleken met literatuurgegevens, inclusief die over de deltavariant, is dit een realistische schatting. Hierbij moet tevens gerealiseerd worden dat 95% van de virusconcentratie verspreid is over vijf ordes van

grootte (van ongeveer 10^5 tot 10^{10} virusdeeltjes per ml aerosol). Virusdeeltjes zijn hier gemeten als RNA-kopieën door middel van PCR.

- De infectieuze aerosolen zijn direct volledig gemengd in de lucht in de binnenruimte.
- De ventilatie is in de gehele ruimte hetzelfde (homogeen). Verse lucht wordt toegevoerd en direct volledig gemengd met verontreinigde lucht in de ruimte, inclusief infectieuze aerosolen, en homogeen afgevoerd.
- Het model neemt aan dat de uitgestoten aerosolen zeer snel reduceren tot een derde van de oorspronkelijke diameter ten gevolge van verdamping, hetgeen gebeurt bij een relatieve luchtvochtigheid van minder dan 67%. Deze aerosolen zijn klein genoeg om in de lucht te blijven zweven.
- Het model houdt rekening met inactivatie van het virus, maar over een tijdsbestek van enkele uren is de inactivatie verwaarloosbaar klein.
- De ademhaling van de blootgestelde personen is de gehele verblijfstijd een rustademhaling. In specifieke gevallen, bijvoorbeeld wanneer personen langdurig dansen, kan dit leiden tot een onderschatting van het risico.
- Het model schat een dosis: het aantal ingeademde virusdeeltjes. Daarbij worden de aantallen virus RNA-kopieën omgerekend naar aantallen infectieuze virusdeeltjes.
- Op basis van de geschatte dosis wordt met een dosisresponsrelatie het risico om COVID-19 te verkrijgen berekend. Het verwacht aantal ziektegevallen betreft personen met symptomen.
- Voor zowel de omrekening van RNA-kopieën naar infectieuze virusdeeltjes en de dosisresponsrelatie worden conservatieve waarden toegepast (Schijven et al., 2021). Conservatief wil hier zeggen: uitgaande van een voor de mens ongunstig scenario, dus een relatief hoog risico.
- Voor wat betreft de personen die worden blootgesteld is aangenomen dat 71% beschermd is tegen ziekte door vaccinatie of door een eerder doorgemaakte infectie ([Tweede Kamer Briefing, 18 augustus 2021](#)).

Deze aannames zijn een versimpeling van de vaak complexe omstandigheden in de praktijk. De resultaten in dit rapport kunnen daarom afwijken in praktijksituaties. Voorzichtigheid met de vertaling naar de praktijk is daarom noodzakelijk.

3 Scenario's

3.1 Locaties

In de Kamer motie worden verschillende publieke settings genoemd: "(...) scholen, horeca, winkels, kantoren, bedrijven et cetera." Voor elk van deze settings is voor een bepaalde situatie een berekening gemaakt. De term 'bedrijven' is daarbij breed geïnterpreteerd, aangezien supermarkten, horeca en veel kantoren ook bedrijven zijn. Gezien de internationale consensus dat aerogene transmissie vooral in ruimtes plaatsvindt waar veel mensen bij elkaar komen in een binnenruimte met onvoldoende ventilatie is ervoor gekozen verschillende uitgaansgelegenheden (nachtclub, theater, kleine en grote concertzaal) op te nemen met verschillende afmetingen en veel mensen per vloeroppervlak (m²). De gekozen afmetingen en capaciteit van de ruimte zijn gebaseerd op (online) beschikbare informatie over de verschillende settings. In de berekening is uitgegaan van een volledige bezetting van de ruimte (100% capaciteit). In tabel 1 is de lijst met de doorgerekende settings en afmetingen van de ruimte weergegeven.

Tabel 1 Overzicht afmetingen en capaciteit per locatie

Ruimte	Hoogte (m)	Vloeroppervlak (m ²)	Inhoud (m ³)	Maximum aantal personen	Maximum aantal personen per m ²
Nachtclub/bar	3,5	150,0	525,0	550,0	3,7
Theater	10,0	600,0	6.000,0	725,0	1,2
Grote concertzaal	17,0	2.623,0	44.591,0	5.500,0	2,1
Kleine concertzaal	4,0	105,0	420,0	250,0	2,4
Vergaderruimte	3,0	40,5	121,5	16,0	0,37
Kantoorruimte	3,0	25,2	75,6	4,0	0,12
Klaslokaal (VO)	3,0	54,0	162,0	30,0	0,54
Supermarkt	3,0	1.450,0	4.400,0	290,0	0,2

3.2 Index (aerosolvorming en uitscheiding)

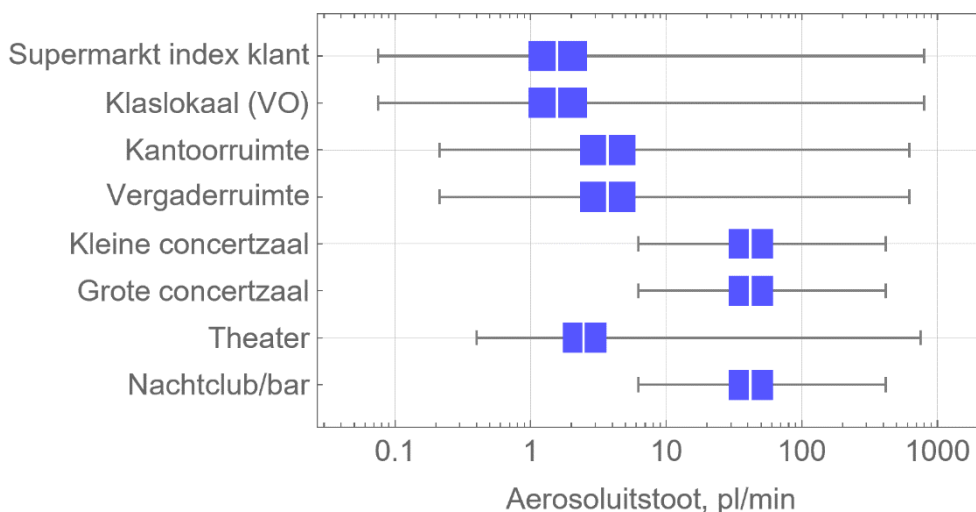
De mate van aerosolvorming is berekend aan de hand van de activiteit van de index (zie tabel 2). Uit literatuur is bekend dat de hoeveelheid aerosolvorming verschilt per activiteit (Schijven et al., 2021; zie figuur 1). Bij rustig ademen produceert iemand minder aerosolen dan bij praten. Zingen zorgt voor de meeste aerosolvorming, gevolgd door schreeuwen.

In de scenario's is gekozen voor verschillende percentages voor deze activiteiten: praten, schreeuwen en zingen. De percentages verschillen per locatie. Rustig ademen vindt plaats op momenten waarop geen van de bovengenoemde activiteiten plaatsvindt (overgebleven percentage), hieronder valt onder meer drankje drinken, luisteren, lezen, typen, rondkijken of -lopen. Uitgangspunt was om tijdens de verblijfstijd in de ruimte een zo realistisch mogelijk scenario te gebruiken. Het was de bedoeling om de gekozen percentages te onderbouwen met informatie

uit de literatuur. Na een korte literatuurstudie en contact met deskundigen (gedragspsychologen en logopedisten) is hierover echter geen recente literatuur gevonden. In de scenario's is het uitgangspunt dat de besmettelijke index en de blootgestelde personen de hele verblijfsduur in de ruimte aanwezig zijn. Activiteiten in aangrenzende ruimtes, bijvoorbeeld garderobe, wc-bezoek of verblijf in de lobby na de voorstelling, zijn niet meegenomen.

Tabel 2 Verblijfsduur en activiteiten van de index per locatie.

Ruimte	Index	Verblijfsduur	Ademen	Praten	Schreeuwen	Zingen
Nachtclub/bar	bezoeker	3,0 uur	40%	10%	30%	20%
Theater (voorstelling)	bezoeker	3,0 uur	85%	10%	5%	0%
Grote concertzaal	bezoeker	3,0 uur	40%	10%	30%	20%
Kleine concertzaal	bezoeker	3,0 uur	40%	10%	30%	20%
Vergaderruimte	werknemer	1,0 uur	70%	30%	0%	0%
Kantoorruimte	werknemer	6,0 uur	70%	30%	0%	0%
Klaslokaal (VO)	leerling	5,0 uur	90%	10%	0%	0%
Supermarkt	klant	0,12 uur	90%	10%	0%	0%



Figuur 1 Boxplot van de aerosoluitstoot (totaal aerosol volume in picoliters per minuut) van de index in elke locatie. Deze is afhankelijk van de verhouding ademen/praten/schreeuwen/zingen in het gekozen scenario. De boxplots geven de mediane waarde aan (witte lijn), het 25- en 75-percentiel (box) en de minimum en maximum waarde (whiskers).

3.3 Ventilatiecapaciteit

De minimale ventilatiecapaciteit is berekend aan de hand van het maximaal aantal personen dat op de locatie aanwezig mag zijn ([Bouwbesluit, 2012](#); artikelen 1.2, 3.29 en 3.38). Bij de berekeningen is het uitgangspunt dat elke locatie voldoet aan de genoemde waarden en dat de gehele tijd de volledige capaciteit in dezelfde ruimte wordt benut. In tabel 3 zijn de volgende ventilatiewaarden uit regelgeving en richtlijnen in de berekening meegenomen:

- Geen ventilatie (0 liter/seconden/per persoon; L/s/p). Dit is niet toegestaan in Nederland voor verblijfsruimtes. Er is voor gekozen om deze waarde mee te nemen om het effect van de ventilatie-eis in het Bouwbesluit 2012 voor 'bestaande bouw' te kunnen duiden.
- [Bouwbesluit 2012 'bestaande bouw'](#). Voor de gekozen locaties variërend tussen 2,12 en 3,44 L/s/p.
- [Bouwbesluit 2012 'niewbouw'](#) (vanaf 2012). Afhankelijk van de locatie variërend tussen 4 en 6,5 L/s/p.
- Verschillende sectorspecifieke (Arbo)richtlijnen. Voor horeca/podia/theater is hiervoor de '[Ventilati Richtlijn voor evenementen](#)' genomen van BBA Binnenmilieu (6,5 L/s/p) en de waarde opgenomen in de '[Tijdelijke regeling maatregelen COVID-19](#)' voor horecalokaliteiten ($3,8 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ per m^2 vloeroppervlakte; voorheen opgenomen in de Drank- en horecawet). Mogelijk vallen niet alle genoemde uitgaansgelegenheden onder 'horecalokaliteiten', maar om te vergelijken is voor alle uitgaansgelegenheden deze waarde meegenomen. Voor scholen is de minimale waarde uit de [Arbocatalogus](#) ($\geq 6 \text{ L/s/p}$) meegenomen en voor kantoren/vergaderruimte de adviezen van het [Arboportaal](#) (8,3 L/s/p).
- [WHO-advies](#) voor alle publieke settings en thuisituaties (10 L/s/p), gericht op het beperken van COVID-19 (WHO, 2021b).
- Tot slot is voor elke situatie ook het effect van een ventilatievoud van 30 per uur (30 ACH) berekend. Dit wordt gezien als een (extreem) hoge ventilatievoud. Voor de meeste locaties is dit niet een realistische ventilatievoud. De waarde is gekozen om inzichtelijk te maken wat een (zeer) hoge ventilatievoud voor effect heeft op het beperken van aerogene transmissie.

Omrekeningen van de verschillende ventilatiewaarden uit de regelgeving en richtlijnen wordt besproken in paragraaf 4.2 van de 'Resultaten' en in bijlage 2.

Tabel 3 Verschillende ventilatiewaarden per locatie.

Ruimte	Geen ventilatie (L/s/p) *	Bouwbesluit bestaan de bouw (L/s/p)	Bouwbesluit nieuwbouw (L/s/p)	(Arbo) richtlijnen (L/s/p)	Eisen horecalokaleiten (Trm COVID-19) (m ³ /s/m ²) **	WHO publieke setting (L/s/p)	'hoge' ventilatievoud/uur (ACH) ***
Nachtclub/bar	0	2,12	4	6,5	$3,8 \times 10^{-3}$	10	30
Theater (voorstelling)	0	2,12	4	6,5	$3,8 \times 10^{-3}$	10	30
Grote concertzaal	0	2,12	4	6,5	$3,8 \times 10^{-3}$	10	30
Kleine concertzaal	0	2,12	4	6,5	$3,8 \times 10^{-3}$	10	30
Vergaderruimte	0	3,44	6,5	8,3	X	10	30
Kantoorruimte	0	3,44	6,5	8,3	X	10	30
Klaslokaal (VO)	0	3,44	8,5	6	X	10	30
Supermarkt	0	2,12	4	X	X	10	30

* Liter per seconden per persoon;

** Kubieke meter per seconden per vierkante meter;

*** 'Air changes per hour' (ventilatievoud per uur).

4 Resultaten

In dit hoofdstuk staan de resultaten van de risicoschatting voor de verschillende scenario's. In paragraaf 4.1 wordt het effect van de verschillende ventilatiewaarden op het aantal ziektegevallen weergegeven (aantal mensen dat naar verwachting ziek wordt door de blootstelling). Dit betreft alleen de verwachte ziektegevallen door aerogene transmissie en niet door andere transmissieroutes zoals directe transmissie (transmissie dichtbij een besmettelijke persoon). In paragraaf 4.2 worden de omrekeningen van de verschillende ventilatie-eenheden besproken. In bijlage 2 staan alle berekeningen per locatie, waarbij ook het gemiddeld risico per persoon wordt weergegeven.

4.1 Verwacht aantal ziektegevallen bij verschillende ventilatiehoeveelheden

Het risico (kans op symptomatische SARS-CoV-2-infectie via aerogene transmissie) is hoger naarmate de verblijfsduur langer is. Bij een langere verblijfsduur wordt er meer lucht ingeademd waardoor er een hogere dosis aan virusdeeltjes kan worden opgenomen. De risico's nemen af als de ventilatie toeneemt, omdat door ventileren de binnenlucht met eventueel aanwezige virusdeeltjes worden verdund (resultierend in een lagere concentratie en lagere ingeademde dosis) door de toevoer van verse buitenlucht. Een lagere dosis leidt tot een kleinere kans op ziekte.

Vermenigvuldiging van het risico met het aantal blootgestelde personen geeft een schatting van het verwachte aantal COVID-19-ziektegevallen. Het aantal ziektegevallen kan een getal kleiner dan 1 zijn (als 1/risico groter is dan het aantal personen; het risico is niet nul). Bijvoorbeeld, bij een verwacht aantal ziektegevallen van 0,1 zijn tien identieke situaties met blootstelling aan het virus nodig voor één verwacht ziektegeval.

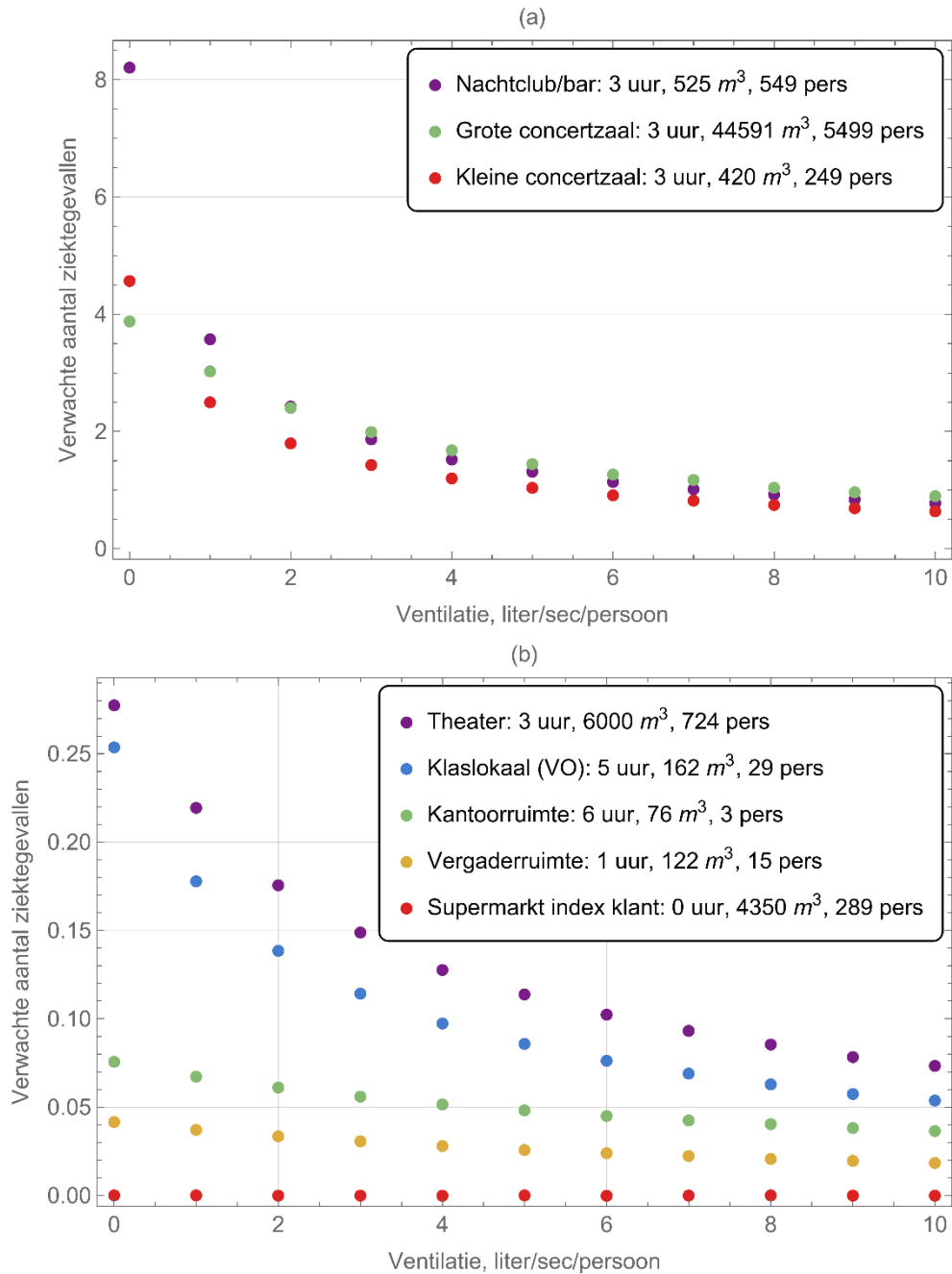
Figuren 2a en 2b tonen het verwachte aantal ziektegevallen door aerogene transmissie per ruimte als functie van ventilatie (liter/seconde/persoon). Het aantal verwachte ziektegevallen is het hoogst in de nachtclub en het laagst in de supermarkt. Naast de verwachting dat het aantal ziektegevallen hoger is naarmate de verblijfsduur langer is, speelt nu ook het aantal blootgestelde personen mee. Hoe meer personen worden blootgesteld, des te meer ziektegevallen er verwacht kunnen worden.

Meer ventilatie leidt tot lagere aantallen ziektegevallen en dit effect blijkt niet lineair: De afname van het aantal ziektegevallen is minder sterk naarmate de ventilatie hoger is. De afname van het verwachte aantal ziektegevallen is groter van 0 liter/seconde/persoon (L/s/p; geen ventilatie) naar 4 L/s/p dan van 4 L/s/p naar 10 L/s/p. Voor de ruimtes waarin het verwachte aantal ziektegevallen al laag is voor de situatie zonder ventilatie (ventilatie=0), zoals in kantoren, vergaderruimtes en supermarkten, is de risicoreductie van het aantal verwachte ziektegevallen zelfs bij 10 L/s/p (WHO) laag. Er worden in dat geval sowieso weinig personen blootgesteld en tevens is de ventilatie in

volume per tijd laag, want er zijn maar weinig personen aanwezig. De kans op aerogene transmissie blijft echter ook bij 30 ACH voor alle locaties aanwezig (zie bijlage 2).

In het theater is het verwachte aantal ziektegevallen lager dan 1, ondanks dat er veel mensen in de ruimte aanwezig zijn (zie figuur 2b). Dit komt door de grote inhoud van de ruimte ten opzichte van de andere uitgaansgelegenheden en de beperkte aerosolvorming van de index omdat er vooral wordt geluisterd (voornamelijk rustige ademhaling).

Het grootste aantal verwachte ziektegevallen via aerogene transmissie is in de nachtclub, waar mensen dicht bij elkaar staan, gevolgd door de beide concertzalen. Door te ventileren volgens Bouwbesluit 'bestaande bouw' wordt het aantal verwachte ziektegevallen in de nachtclub verlaagd van 8,4 naar 2,4 ziektegevallen. Bij ventileren volgens de waarde uit de ventilatierichtlijn voor evenementen worden gemiddeld 1,1 ziektegevallen verwacht en bij het volgen van het WHO-advies 0,82 ziektegevallen. Bij de laatste situatie is er een ventilatievoud/uur van 38; de binnenlucht wordt steeds in minder dan 2 minuten geheel verversd door buitenlucht. Dit is een extreme luchtverversing.



Figuur 2 Verwachte aantal ziektegevallen per ruimte als functie van ventilatie (liter/seconde/persoon) gesplitst naar ruimtes met meer (a) en minder (b) dan één verwachte ziektegeval. Let op: de y-as voor figuur 2a heeft een andere schaal dan figuur 2b.

4.2 Omgerekende ventilatie-eenheden

In de vorige paragraaf is de ventilatie per liter/seconden/persoon weergegeven. Deze eenheid wordt onder meer gebruikt in het Bouwbesluit en het WHO-advies. De adviezen in het Arboportaal worden echter weergegeven in m^3 per uur per persoon ($\text{m}^3/\text{u/p}$) en in de Tijdelijke regeling maatregelen (Trm) COVID-19 is voor horecalocaliteiten de eenheid m^3/s per m^2 vloeroppervlak (afkomstig uit

de vervallen Drank- en horecawet) opgenomen. Tot slot is er ook nog de ventilatievoud per uur ('air changes per hour'; ACH). Al deze eenheden zijn omgerekend naar L/s/p en vice versa. Hierdoor is een vergelijking tussen de geadviseerde ventilatiewaarden mogelijk. In bijlage 2 worden alle omrekeningen per locatie weergegeven.

Opvallend is de omrekening van de ventilatiewaarde uit de Trm Covid-19. Deze waarde is opgenomen in de tijdelijke regeling omdat de minimale ventilatie-eis in het Bouwbesluit voor horecalokaliteiten lager zou zijn ([Volkskrant, 29 juli 2021](#); [Telegraaf 29 juli 2021](#); [Amendement TK](#)). Echter, voor de nachtclub en concertzalen is dat niet het geval. Uit deze omrekeningen blijkt dat de waarden in de Trm COVID-19 voor de nachtclub en voor de grote en kleine concertzaal lager is dan Bouwbesluit 2012 'bestaande bouw'. Alleen voor theater is de waarde uit de Trm COVID-19 iets hoger dan voor 'bestaande bouw', maar lager dan Bouwbesluit 'nieuwbouw'. Dit komt doordat het bouwbesluit uitgaat van het aantal mensen in de ruimte en niet van het vloeroppervlak. Een deel van de hier beschreven uitgaansgelegenheden wordt mogelijk niet gezien als horecalokaliteit en valt daardoor niet onder de Trm COVID-19. Omdat de hoogste eis geldt (pm ministerie BZK), zal voor horecalokaliteiten waar relatief veel mensen per m² zijn toegestaan (bijvoorbeeld cafés) naar verwachting het Bouwbesluit leidend zijn.

Uit de omrekeningen blijkt verder dat er grote verschillen zijn tussen de gekozen settings als gekeken wordt naar ventilatievoud per uur (ACH). Voor de nachtclub is de ACH 15 als de ventilatie-eis voor Bouwbesluit 'nieuwbouw' wordt aangehouden en ACH 38 als het WHO-advies wordt gevolgd. Dit is hoger dan de extreme ACH van 30. Voor de kantoorruimte is de ACH 1,2 voor Bouwbesluit 'nieuwbouw' en 1,9 als het WHO-advies wordt gevolgd.

5 Discussie

Effect van ventileren op aerogene transmissie

Uit de berekeningen met het AirCoV2-model blijkt dat meer ventileren zorgt voor een lager risico op aerogene transmissie. Echter, het effect van ventileren op het beperken van het aantal verwachte ziektegevallen via aerogene transmissie is niet lineair: het effect van 'geen ventilatie' naar ventileren met 2 L/s/p is het grootst en vermindert naarmate meer wordt geventileerd. Vooral bij locaties waar veel mensen per m² zijn en waar de mensen enige uren verblijven, heeft ventileren het grootste effect op het verwachte aantal ziektegevallen via aerogene transmissie. Dit is in overeenstemming met de internationale consensus over situaties waar aerogene transmissie van SARS-CoV-2 kan plaatsvinden (RIVM, 2021; WHO, 2021a; CDC, 2021). Uit de berekeningen blijkt ook dat ventileren het risico op aerogene transmissie kan beperken maar niet geheel voorkomen.

Voor de kantoor- en vergaderruimte, en vooral bij een besmettelijke klant in de supermarkt, is er een beperkt effect van hogere ventilatienormen (in L/s/p) dan de eisen uit het Bouwbesluit op het verlagen van het verwachte aantal ziektegevallen. Dit komt omdat in een ruimte met weinig personen er sowieso weinig ziektegevallen te verwachten zijn en tevens de ventilatie in L/s/p omgerekend naar aantal luchtverversingen per uur ook laag zal zijn. In het scenario van de supermarkt is het verblijf van de index in de ruimte maar kort (7 minuten), waardoor ook de blootstelling aan infectieuze aerosolen kort is en de kans op aerogene transmissie lager is. Let wel, dit betekent niet dat ventileren niet noodzakelijk is voor deze locaties. In dit onderzoek is alleen gekeken naar het effect van ventilatie op aerogene transmissie van SARS-CoV-2 voor enkele gekozen scenario's. Hiervoor zijn aannames gedaan die mogelijk tot een onderschatting van het risico kunnen leiden. Daarnaast is ventileren ook van belang voor het afvoeren van onder meer vluchtige organische stoffen (VOS), fijnstof en geuren (Gezondheidsraad, 2010).

Ventilatie volgens de Tijdelijke regeling maatregelen COVID-19 versus het Bouwbesluit

De ventilatiewaarde in de Trm COVID-19 voor de nachtclub en beide concertzalen zijn lager dan Bouwbesluit 'bestaande bouw'. Dit komt omdat in de Trm COVID-19 uitgegaan wordt van ventilatie per m² in plaats van ventilatie per persoon. Voor bijvoorbeeld restaurants kan de waarde wel hoger zijn dan Bouwbesluit 'nieuwbouw'. Er kan worden berekend tot hoeveel mensen per m² de Trm COVID-19 hoger is dan het Bouwbesluit. Dit valt echter buiten de scope van dit rapport. Verder blijkt uit de omrekeningen dat het WHO-advies van 10 L/s/p voor publieke settings tot een zeer hoge ventilatiehoeveelheid kan leiden; tot 38 ACH voor de nachtclub. Dit komt neer op een continue verversing van de gehele binnenlucht van de ruimte in minder dan 2 minuten. Ter vergelijking, de WHO adviseert in hetzelfde adviesdocument voor zorginstellingen waar aerosolproducerende handelingen worden uitgevoerd een minimale ventilatievoud/uur van 12 (WHO, 2021b). Let wel, we gaan er in dit rapport van uit dat de gekozen settings voldoen

aan het Bouwbesluit: de minimale ventilatiecapaciteit is afgestemd op het maximaal aantal personen dat in de ruimte mag zijn. Of dit ook overeenkomt met de praktijk is geen onderdeel van de onderzoeksvraag.

Aannames en beperkingen van het onderzoek

In hoeverre een bepaalde ventilatiehoeveelheid 'toereikend' is wordt niet beantwoord met dit rapport (zie ook paragraaf 1.3). Dit is een beleidskeuze waarvoor ook andere aspecten meegewogen moeten worden, zoals (onderhouds)kosten, comforteisen en klimaatdoelstellingen. Ook dient meegewogen te worden dat voor het maken van de berekeningen aannames gedaan zijn die mogelijk tot een onder- of overschatting van het risico kunnen leiden. De aanname dat er directe menging van infectieuze aerosolen is, kan vooral voor grote ruimtes (zoals theater en grote concertzaal) invloed hebben op de resultaten. De aanname dat het virus zich direct na emissie volledig homogeen over de ruimte verspreidt, leidt enerzijds tot een onderschatting van de blootstelling van personen in de directe omgeving van de index, waar de concentraties in werkelijkheid hoger zullen zijn dan het ideaal-gemengde model voorspelt. Studies laten zien dat virusconcentraties in een zone vlak rond de uitscheider tot een factor 10-100 hoger kunnen zijn (sterk afhankelijk van de afstand tot de uitscheider) (Fierce et al., 2021; Cortellessa et al., 2021). Anderzijds zullen blootstelling en risico voor personen op grotere afstand van de index overschat worden.

In het algemeen kan beredeneerd worden dat de aanname van goede menging redelijker is in geval van kleine ruimtes en dat de onnauwkeurigheid van de aanname toeneemt als de ruimte groter wordt. Daarnaast zal de aanname beter zijn in het geval de index en de blootgestelde persoon zich door de ruimte bewegen. Ook kan worden verondersteld dat niet alleen deze beweging tot een betere menging van de lucht leidt, maar ook dat door de beweging de concentratie die de blootgestelde persoon inademt onder deze omstandigheden meer uitmiddelt. Hierdoor zal deze situatie dicht bij de ideaal-gemengde concentratie liggen. De aanname van goede menging van de binnenlucht kan ook leiden tot een optimistischer inschatting van de efficiëntie van de verwijdering van virus door ventilatie, wat dan weer een onderschatting van de gemiddelde blootstelling in een ruimte tot gevolg heeft.

Voor deze berekening is uitgegaan van één presymptomatische index die veel virusdeeltjes uitscheidt. Deze aanname met betrekking tot virusuitscheiding kan worden gezien als een 'nadelig scenario'. De kans dat een dergelijke index in de beschreven ruimtes aanwezig is, hangt af van de epidemiologische situatie op dat moment. Het valt echter buiten de scope van dit onderzoek om de kans dat een dergelijke index aanwezig is te berekenen. Het is ook mogelijk dat in de ruimte twee of meer indices aanwezig zijn. Afhankelijk van de virusuitscheiding van deze personen kan daardoor in die situaties het verwachte aantal ziektegevallen via aerogene transmissie, maar ook via directe transmissie, in de praktijk hoger zijn.

Het was niet mogelijk op basis van literatuur of deskundigen vast te stellen hoeveel mensen op de gekozen locaties gemiddeld praten, schreeuwen of zingen. Er is daarom een inschatting gemaakt wat een realistisch scenario zou kunnen zijn. Het is mogelijk dat in de praktijk een index meer of minder van deze activiteiten uitvoert. Echter, extreme waarden die mogelijk de resultaten sterk kunnen beïnvloeden, zoals 100% zingen gedurende de gehele verblijfstijd, werden als niet realistisch beschouwd. Wel is er mogelijk meer aerosolvorming en ook een grotere kans op transmissie bij personen die door veel bewegen (dansen en springen bij een concert bijvoorbeeld) een snellere ademhaling krijgen. Bijvoorbeeld bij een inspanning met hartslag van 120 kan de ademhaling 45 liter/minuut zijn, dat is 6 keer de rustademhaling van 7,5 liter/min. In dat geval zou een blootgestelde persoon een 6 keer hogere dosis ontvangen dan een persoon in rust (Sajgalik et al., 2021). Echter, het effect van ventileren (vorm van de curve in figuur 2) blijft hetzelfde.

Het AirCoV2-model beschrijft een situatie van alleen een volledige menging van infectieuze aerosolen, waarbij een bepaalde dosisresponsrelatie wordt aangenomen (Schijven et al., 2021). Directe transmissie, maar ook andere transmissieroutes, worden niet meegenomen. Vooral op plekken waar veel mensen dicht bij elkaar staan (nachtclub, concertzaal) kan een index veel mensen binnen 1,5 meter besmetten en is directe transmissie naar verwachting de voornaamste transmissieroute. Vanwege de hogere virusconcentratie nabij de bron is verblijfstijd ook minder van belang. Zeker als de index rondloopt in de ruimte kunnen hierdoor potentieel veel mensen worden geïnfecteerd.

Vertaling naar de praktijk

Door de aannames en de gekozen situaties kunnen de resultaten alleen gebruikt worden om inzicht te krijgen in het effect van ventilatie op het beperken van aerogene transmissie. Uitspraken over de mate waarin aerogene transmissie – al dan niet in relatie tot andere routes – plaatsvindt, kunnen niet worden gedaan. Voor een beter inzicht in de rol van de verschillende transmissieroutes en het effect van ventilatie op het beperken van transmissie van SARS-CoV-2 zou via modellering het infectierisico dichtbij de bron en de verdere verspreiding van de 'druppelwolk', vooral in grotere ruimtes, kunnen worden meegenomen. Hierbij kan ook de invloed van luchtstromen op deze verspreiding worden meegenomen. Dit is niet mogelijk met het AirCoV2-model. Daarnaast kan meer inzicht verkregen worden in het infectierisico in de praktijk door onder gecontroleerde omstandigheden virusdeeltjes te meten in de lucht en te bepalen wat het effect van de verschillende ventilatiehoeveelheden is op de virusconcentratie in de lucht. Tot slot kan via (gecontroleerd) epidemiologisch onderzoek meer inzicht verkregen worden in de effecten van verschillende ventilatiewaarden op het beperken van (aerogene) transmissie.

6 Conclusie

Op basis van het AirCoV2-model met de gedane aannames kan voor de gekozen scenario's het volgende geconcludeerd worden:

- Ventileren kan ziektegevallen via aerogene transmissie beperken maar niet geheel voorkomen.
- De kans op aerogene transmissie is het hoogst in ruimtes zonder ventilatie waar veel mensen per m² bij elkaar zijn. Dit ondersteunt de huidige internationale consensus over situaties waar aerogene transmissie kan plaatsvinden.
- Er is geen lineaire afname van het verwachte aantal ziektegevallen door aerogene transmissie indien de ventilatiewaarde in L/s/p wordt verhoogd. Het grootste effect van ventilatie is tussen 'geen ventilatie' en de minimale eisen uit het Bouwbesluit 2012 'bestaande bouw' (2 L/s/p). Tussen Bouwbesluit en het WHO-advies, en waarden daartussenin, wordt het effect van de ventilatie op het verwachte aantal ziektegevallen steeds minder.
- De ventilatie-eisen zoals opgenomen in de Tijdelijke regeling maatregelen (Trm) COVID-19 kunnen voor horecagelegenheden waar relatief veel mensen per m² mogen verblijven (bijvoorbeeld cafés) lager zijn dan de minimale ventilatie-eisen uit het Bouwbesluit 2012 voor 'bestaande bouw'.

Het is niet mogelijk om op basis van de resultaten uit dit onderzoek aan te geven welk risico acceptabel is en wat een optimale hoeveelheid ventilatie is. Dit vraagt om beleidskeuzes waarbij ook andere afwegingen nodig zijn, zoals over comfort, kosten van aanschaf en onderhoud, en energiegebruik.

7 Aanbevelingen

- Voor horecagelegenheden bepalen wat de hoogste ventilatie-eisen zijn door te berekenen vanaf welk aantal mensen per m² de ventilatie-eisen van het Bouwbesluit hoger zijn dan de Trm COVID-19.
- Uitvoeren van praktijkonderzoek om de resultaten van deze risicoschatting te verifiëren. Bijvoorbeeld door het uitvoeren van luchtmetingen in een gecontroleerde setting, waarmee kan worden bepaald wat het effect is van de verschillende ventilatiehoeveelheden op het aantal virusdeeltjes in de lucht. En mogelijk kan door (gecontroleerd) epidemiologisch onderzoek inzichtelijk worden gemaakt wat het effect is van verschillende ventilatiehoeveelheden op het beperken van (aerogene) transmissie.

Literatuur

Alsved M, Matamis A, Bohlin R, Richter M, Bengtsson PE, Fraenkel CJ, Medstrand P, Löndahl J (2020). Exhaled respiratory particles during singing and talking, *Aerosol Science and Technology*, 54:11, 1245-1248, Doi: 10.1080/02786826.2020.1812502.

Arbocatalogus Voortgezet Onderwijs. Programma van Eisen Frisse Scholen 2021. Link: [RVO Frisse Scholen \(arbocatalogus-vo.nl\)](https://www.arbocatalogus-vo.nl)

Arboportaal. Onderwerp Luchtverversing. Link: [Luchtverversing | Arboportaal](#)

BBA Binnenmilieu (2021). Voorstel ventilatierichtlijn evenementen. Richtlijn voor de ventilatie bij evenementen waar er een risico is op overdracht van COVID-19. [Link](#)

Bouwbesluit 2012. [wetten.nl - Regeling - Bouwbesluit 2012 - BWBR0030461 \(overheid.nl\)](#)

CDC (2021). [Scientific Brief: SARS-CoV-2 Transmission | CDC](#)

Cortellessa G, Stabile L, Arpino F, Faleiros DE, van den Bos W, Morawska L, Buonanno G (2021). Close proximity risk assessment for SARS-CoV-2 infection. *Science of The Total Environment*, 794. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.148749

Deng X, Gong G, He X, Shi X, Mo L (2021). Control of exhaled SARS-CoV-2-laden aerosols in the interpersonal breathing microenvironment in a ventilated room with limited space air stability. *Journal of Environmental Sciences*, 108, 175-187. doi:https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.01.025

Fierce L, Robey AJ, Hamilton C (2021). Simulating near-field enhancement in transmission of airborne viruses with a quadrature-based model. *Indoor Air*. 31(6), 1843-1859. doi:10.1111/ina.12900

Gezondheidsraad (2010). Binnenluchtkwaliteit in basisscholen. Rapport 2010/06. [Link](#)

Landelijke Coördinatie Infectieziektebestrijding (2021). Richtlijn COVID-19, bijlage: Aerogene transmissie SARS-CoV-2. Onderbouwing van de rol van aerogene transmissie van SARS-CoV-2 bij mens-tot-mens transmissie. Link: [Aerogene transmissie SARS-CoV-2 | LCI richtlijnen \(rivm.nl\)](#)

Landelijke Coördinatie Infectieziektebestrijding (2021). Richtlijn COVID-19, bijlage: Ventilatie en COVID-19. Link: [Ventilatie en COVID-19 | LCI richtlijnen \(rivm.nl\)](#)

Liu L, Li Y, Nielsen PV, Wei J, Jensen RL (2017). Short-range airborne transmission of expiratory droplets between two people. *Indoor Air*. 27:452-462. doi: 10.1111/ina.12314.

Morawska L, Allen J, Bahnfleth W, Bluysen PM, Boerstra A, Buonanno G, Cao J, Dancer SJ, Floto A, Franchimon F, Greenhalgh T, Haworth C, Hogeling J, Isaxon C, Jimenez JL, Kurnitski J, Li Y, Loomans M, Marks G, Marr LC, Mazzarella L, Melikov AK, Miller S, Milton DK, Nazaroff W, Nielsen PV, Noakes C, Peccia J, Prather K, Querol X, Sekhar C, Seppänen O, Tanabe SI, Tang JW, Tellier R, Tham KW, Wargocki P, Wierzbicka A, Yao M (2021). A paradigm shift to combat indoor respiratory infection. *Science*. 14;372:689-691. doi: 10.1126/science.abg2025.

Sajgalik P, Garzona-Navas A, Csécs I, Askew JW, Lopez-Jimenez F, Niven AS, Johnson BD, Allison TG (2021). Characterization of Aerosol Generation During Various Intensities of Exercise. *Chest*. 160:1377-1387. doi: 10.1016/j.chest.2021.04.041.

Schijven J, Vermeulen LC, Swart A, Meijer A, Duizer E, de Roda Husman AM (2021). Quantitative microbial risk assessment for airborne transmission of SARS-CoV-2 via breathing, speaking, singing, coughing, and sneezing. *Environmental health perspectives*. 129, 047002.

Tijdelijke regeling maatregelen covid-19. Artikel 4.5; Ventilatiennormen horecalokaliteit. Link: wetten.nl - Regeling - Tijdelijke regeling maatregelen covid-19 - BWBR0044416 (overheid.nl)

Traversari AAL, Brouwer A, Vermeulen L, Jacobs P, Maassen W, Schijven J. (2021). Het Wells-Rileymodel bij SARS-CoV-2. Beperkingen en toepassing. *Ned Tijdschr Med Microbiologie*. 29(29), 1.

World Health Organization. (2021a). [Coronavirus disease \(COVID-19\): How is it transmitted? \(who.int\)](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/coronavirus-disease-(covid-19)-how-is-it-transmitted).

World Health Organization (2021b). [Roadmap to improve and ensure good indoor ventilation in the context of COVID-19 \(who.int\)](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/covid-19-roadmap-to-improve-and-ensure-good-indoor-ventilation-in-the-context-of-covid-19).

Bijlage 1. Definities

Aerogene transmissie	Indirecte transmissie via zwevende infectieuze virusdeeltjes in aerosolen die over langere afstanden en tijd door de lucht kunnen worden verspreid. Transmissie is ook mogelijk als de bron niet meer in de ruimte aanwezig is of als iemand de gehele tijd op ruime afstand (meerdere meters, andere kant van de ruimte) van een besmettelijke persoon is geweest, in andere Engelstalige literatuur ook wel 'long-range airborne route' genoemd. Aerogene transmissie kan ook plaatsvinden naar een andere ruimte via een ventilatiesysteem. Voorbeelden van infectieziekten waarbij aerogene transmissie een voorname rol speelt zijn mazelen, tuberculose en waterpokken.
Aerosoltransmissie	Elke vorm van overdracht door infectieuze aerosolen, waarbij ook aerosolen geïncubeerd worden die vanwege de afmeting relatief kort blijven zweven. Alleen grotere druppels >60-100 µm die (vrijwel) direct naar de grond gaan worden uitgesloten. Onder aerosoltransmissie valt daardoor zowel 'aerogene transmissie' als 'directe transmissie' door nabij contact waarbij infectieuze aerosolen onderdeel zijn van de zogenaamde 'druppelwolk' die onder meer tijdens praten, schreeuwen of zingen uitgescheiden wordt.
Aerosolen	Deze kunnen worden gedefinieerd als een suspensie van vaste deeltjes in een gas. In dit rapport zijn aerosolen afkomstig uit de luchtwegen van een besmette persoon, waarbij de content (virusdeeltjes) in staat is een andere persoon te besmetten. Deze aerosolen kunnen langdurig (meerdere uren) blijven zweven in de lucht. Voor de duidelijkheid worden aerosolen waarin voldoende infectieus virus aanwezig is voor het besmetten van een persoon in dit briefrapport 'infectieuze aerosolen' genoemd.
Directe transmissie	Overdracht van ziekteverwekkers vindt plaats door nauw contact tussen de besmettelijke persoon en één of meerdere andere personen. Voorbeelden van directe transmissie zijn direct contact (hand geven, zoenen, omhelzen), seksuele transmissie en druppeltransmissie.
Druppels	Met druppels worden zowel respiratoire druppels als aerosolen bedoeld (ongeacht afmeting). Waar relevant wordt specifiek gesproken over (infectieuze) aerosolen of respiratoire druppels.

Druppeltransmissie ('druppelinfectie')	Directe transmissie van infectieuze virusdeeltjes die zich bevinden in respiratoire druppels en infectieuze aerosolen afkomstig uit de luchtwegen en welke op korte afstand (meestal < 1,5 meter) via de lucht direct van de geïnfecteerde persoon naar één of meerdere andere personen wordt overgedragen. Hieronder valt ook de druppelwolk of 'spray' die wordt gevormd door onder meer niezen, hoesten, praten en zingen. Er wordt verder geen onderscheid gemaakt in druppelafmeting bij directe transmissie zoals in sommige Engelstalige publicaties wel wordt gehanteerd met de term 'short-range airborne route' voor druppels $\leq 10 \mu\text{m}$ of < $60 \mu\text{m}$. Voorbeelden van infectieziekten waarbij de zogenoemde druppeltransmissie een voorname rol speelt zijn kinkhoest, influenza en meningokokken-infectie.
Indirecte transmissie	Overdracht van ziekteverwekkers van de besmettelijke persoon naar andere personen vindt plaats via onder meer voedsel, water, voorwerpen/oppervlakken of zwevende partikels in de lucht (aerosolen), veelal over een langere tijdspanne en/of afstand (aerogene transmissie). De besmettelijke persoon (reservoir/bron) hoeft niet meer aanwezig te zijn in de ruimte voor de overdracht. Voorbeelden van indirecte transmissie zijn transmissie via fomieten (besmette voorwerpen, oppervlakken) en aerogene transmissie.
Respiratoire druppels	Hier worden de grotere druppels onder verstaan afkomstig uit de luchtwegen (WHO 2020) waarin voldoende infectieus virus aanwezig kan zijn om andere personen te besmetten maar die niet langdurig kunnen blijven zweven
Transmissieroute	De wijze van overdracht van een pathogeen of besmetting. Er wordt onderscheid gemaakt in directe en indirecte transmissie. Veel infecties met een indirecte route kunnen ook direct overgedragen worden en omgekeerd.
Ventilatievoud (per uur)	Het aantal keer per uur dat het totale volume van een ruimte vervangen wordt met verse lucht. Als eenheid wordt ook ACH gebruikt: 'air changes per hour'
Ventileren	Het voortdurend verversen van lucht. De buitenlucht vervangt telkens (een deel van) de binnenlucht die vervuild is door bijvoorbeeld vocht, stof en ziekteverwekkers. Ventileren is mogelijk via natuurlijke ventilatie (bijvoorbeeld roosters of kieren) of via mechanische ventilatie (ventilatiesysteem).

Verspreiding	Onder verspreiding wordt de letterlijke verspreiding van virus(deeltjes) in een ruimte verstaan (welke niet altijd tot transmissie hoeft te leiden) of de figuurlijke verspreiding van het virus in een populatie.
Ziektegeval	Symptomatisch persoon met COVID-19. Het dosisresponsmodel is gebaseerd op het verkrijgen van symptomen door coronavirus 229E (Schijven et al., 2021).

Bijlage 2. Berekeningen ventilatiewaarden per locatie

Nachtclub/bar								
Vloeroppervlak, m ²	150.							
Inhoud, m ³	530.							
Max. aantal blootgestelde personen	550.							
Max. aantal blootgestelde personen/m	3.7							
Max. aantal blootgestelde personen/ 7 m ² (straal 1.5 m)	26.							
Verblijfsduur, uur	3.							
Ademen%/spreken%/schreeuwen%/zingen%	40./10./30./20.							
Ventilatiennorm	None	BB oud	BB nieuw	Branche	Arbo	WHO	High	Overig
Ventilatie, l/s/p	0.	2.1	4.	6.5	-	10.	8.	1.
Ventilatievoud/uur	0.	8.	15.	25.	-	38.	30.	3.9
Gemiddeld risico per persoon	0.015	0.0044	0.0029	0.0021	-	0.0015	0.0018	0.0066
Gemiddeld risico per persoon, %	1.5	0.44	0.29	0.21	-	0.15	0.18	0.66
Risicoreductie, aantal keer	-	3.5	5.3	7.4	-	10.	8.7	0.43
Verwachte aantal ziektegevallen	8.4	2.4	1.6	1.1	-	0.82	0.96	3.6

*Op basis van één besmettelijk persoon op dag 0 van symptomen

**Risico op het verkrijgen van Covid-19 via besmetting door virusdragende aerosolen

*** berekend op 27/10/2021

Theater	
Vloeroppervlak, m ²	600.
Inhoud, m ³	6000.
Max. aantal blootgestelde personen	720.
Max. aantal blootgestelde personen/m	1.2
Max. aantal blootgestelde personen/ 7 m ² (straal 1.5 m)	8.5
Verblijfsduur, uur	3.
Ademen%/spreken%/schreeuwen%/zingen%	85./10./5./0.

Ventilatiennorm	None	BB oud	BB nieuw	Branche	Arbo	WHO	High	Overig
Ventilatie, l/s/p	0.	2.1	4.	6.5	-	10.	69.	3.1
Ventilatievoud/uur	0.	0.92	1.7	2.8	-	4.4	30.	1.4
Gemiddeld risico per persoon	0.00044	0.00026	0.00019	0.00014	-	0.0001	0.000017	0.00022
Gemiddeld risico per persoon, %	0.044	0.026	0.019	0.014	-	0.01	0.0017	0.022
Risicoreductie, aantal keer	-	1.7	2.3	3.1	-	4.3	25.	0.51
Verwachte aantal ziektegevallen	0.32	0.19	0.14	0.1	-	0.075	0.013	0.16

*Op basis van één besmettelijk persoon op dag 0 van symptomen

**Risico op het verkrijgen van Covid-19 via besmetting door virusdragende aerosolen

*** berekend op 27/10/2021

Grote concertzaal	
Vloeroppervlak, m ²	2600.
Inhoud, m ³	45000.
Max. aantal blootgestelde personen	5500.
Max. aantal blootgestelde personen/m	2.1
Max. aantal blootgestelde personen/ 7 m ² (straal 1.5 m)	15.
Verblijfsduur, uur	3.
Ademen%/spreken%/schreeuwen%/zingen%	40./10./30./20.

Ventilatiennorm	None	BB oud	BB nieuw	Branche	Arbo	WHO	High	Overig
Ventilatie, l/s/p	0.	2.1	4.	6.5	-	10.	68.	1.8
Ventilatievoud/uur	0.	0.94	1.8	2.9	-	4.4	30.	0.8
Gemiddeld risico per persoon	0.00071	0.00045	0.00033	0.00024	-	0.00018	0.000034	0.00047
Gemiddeld risico per persoon, %	0.071	0.045	0.033	0.024	-	0.018	0.0034	0.047
Risicoreductie, aantal keer	-	1.6	2.2	3.	-	4.	21.	0.66
Verwachte aantal ziektegevallen	3.9	2.4	1.8	1.3	-	0.98	0.19	2.6

*Op basis van één besmettelijk persoon op dag 0 van symptomen

**Risico op het verkrijgen van Covid-19 via besmetting door virusdragende aerosolen

*** berekend op 27/10/2021

Kleine concertzaal	
Vloeroppervlak, m ²	110.
Inhoud, m ³	420.
Max. aantal blootgestelde personen	250.
Max. aantal blootgestelde personen/m	2.4
Max. aantal blootgestelde personen/ 7 m ² (straal 1.5 m)	17.
Verblijfsduur, uur	3.
Ademen%/spreken%/schreeuwen%/zingen%	40./10./30./20.

Ventilatiennorm	None	BB oud	BB nieuw	Branche	Arbo	WHO	High	Overig
Ventilatie, l/s/p	0.	2.1	4.	6.5	-	10.	14.	1.6
Ventilatievoud/uur	0.	4.5	8.6	14.	-	21.	30.	3.4
Gemiddeld risico per persoon	0.019	0.0072	0.005	0.0036	-	0.0027	0.0021	0.0084
Gemiddeld risico per persoon, %	1.9	0.72	0.5	0.36	-	0.27	0.21	0.84
Risicoreductie, aantal keer	-	2.6	3.8	5.2	-	7.	8.9	0.45
Verwachte aantal ziektegevallen	4.7	1.8	1.2	0.91	-	0.67	0.52	2.1

*Op basis van één besmettelijk persoon op dag 0 van symptomen

**Risico op het verkrijgen van Covid-19 via besmetting door virusdragende aerosolen

*** berekend op 27/10/2021

Vergaderruimte

Vloeroppervlak, m ²	41.
Inhoud, m ³	120.
Max. aantal blootgestelde personen	15.
Max. aantal blootgestelde personen/m	0.37
Max. aantal blootgestelde personen/ 7 m ² (straal 1.5 m)	2.6
Verblijfsduur, uur	1.
Ademen%/spreken%/schreeuwen%/zingen%	70./30./0./0.

Ventilatiennorm	None	BB oud	BB nieuw	Branche	Arbo	WHO	High	Overig
Ventilatie, l/s/p	0.	3.4	6.5	-	8.3	10.	63.	-
Ventilatievoud/uur	0.	1.6	3.1	-	3.9	4.7	30.	-
Gemiddeld risico per persoon	0.0029	0.0021	0.0016	-	0.0015	0.0013	0.00036	-
Gemiddeld risico per persoon, %	0.29	0.21	0.16	-	0.15	0.13	0.036	-
Risicoreductie, aantal keer	-	1.4	1.8	-	1.9	2.2	8.1	-
Verwachte aantal ziektegevallen	0.043	0.031	0.025	-	0.022	0.02	0.0053	-

*Op basis van één besmettelijk persoon op dag 0 van symptomen

**Risico op het verkrijgen van Covid-19 via besmetting door virusdragende aerosolen

*** berekend op 27/10/2021

Kantoorruimte	
Vloeroppervlak, m ²	25.
Inhoud, m ³	76.
Max. aantal blootgestelde personen	3.
Max. aantal blootgestelde personen/m	0.12
Max. aantal blootgestelde personen/ 7 m ² (straal 1.5 m)	0.84
Verblijfsduur, uur	6.
Ademen%/spreken%/schreeuwen%/zingen%	70./30./0./0.

Ventilatiennorm	None	BB oud	BB nieuw	Branche	Arbo	WHO	High	Overig
Ventilatie, l/s/p	0.	3.4	6.5	-	8.3	10.	160.	-
Ventilatievoud/uur	0.	0.66	1.2	-	1.6	1.9	30.	-
Gemiddeld risico per persoon	0.026	0.018	0.015	-	0.013	0.012	0.0023	-
Gemiddeld risico per persoon, %	2.6	1.8	1.5	-	1.3	1.2	0.23	-
Risicoreductie, aantal keer	-	1.4	1.7	-	1.9	2.1	11.	-
Verwachte aantal ziektegevallen	0.077	0.054	0.044	-	0.04	0.037	0.0069	-

*Op basis van één besmettelijk persoon op dag 0 van symptomen

**Risico op het verkrijgen van Covid-19 via besmetting door virusdragende aerosolen

*** berekend op 27/10/2021

Klaslokaal (VO)

Vloeroppervlak, m ²	54.
Inhoud, m ³	160.
Max. aantal blootgestelde personen	29.
Max. aantal blootgestelde personen/m	0.54
Max. aantal blootgestelde personen/ 7 m ² (straal 1.5 m)	3.8
Verblijfsduur, uur	5.
Ademen%/spreken%/schreeuwen%/zingen%	90./10./0./0.

Ventilatiennorm	None	BB oud	BB nieuw	Branche	Arbo	WHO	High	Overig
Ventilatie, l/s/p	0.	3.4	8.5	-	6.	10.	45.	-
Ventilatievoud/uur	0.	2.3	5.7	-	4.	6.7	30.	-
Gemiddeld risico per persoon	0.009	0.0038	0.0022	-	0.0028	0.002	0.00061	-
Gemiddeld risico per persoon, %	0.9	0.38	0.22	-	0.28	0.2	0.061	-
Risicoreductie, aantal keer	-	2.4	4.1	-	3.3	4.6	15.	-
Verwachte aantal ziektegevallen	0.26	0.11	0.064	-	0.08	0.057	0.018	-

*Op basis van één besmettelijk persoon op dag 0 van symptomen

**Risico op het verkrijgen van Covid-19 via besmetting door virusdragende aerosolen

*** berekend op 3/11/2021

Supermarkt index klant

Vloeroppervlak, m ²	1500.
Inhoud, m ³	4400.
Max. aantal blootgestelde personen	290.
Max. aantal blootgestelde personen/m	0.2
Max. aantal blootgestelde personen/ 7 m ² (straal 1.5 m)	1.4
Verblijfsduur, uur	0.12
Ademen%/spreken%/schreeuwen%/zingen%	90./10./0./0.

Ventilatiennorm	None	BB oud	BB nieuw	Branche	Arbo	WHO	High	Overig
Ventilatie, l/s/p	0.	2.1	4.	-	-	10.	130.	-
Ventilatievoud/uur	0.	0.51	0.96	-	-	2.4	30.	-
Gemiddeld risico per persoon	1.6×10^{-6}	1.1×10^{-6}	1.3×10^{-6}	-	-	1.2×10^{-6}	4.9×10^{-7}	-
Gemiddeld risico per persoon, %	0.00016	0.00011	0.00013	-	-	0.00012	0.000049	-
Risicoreductie, aantal keer	-	1.4	1.2	-	-	1.3	3.2	-
Verwachte aantal ziektegevallen	0.00045	0.00032	0.00036	-	-	0.00035	0.00014	-

*Op basis van één besmettelijk persoon op dag 0 van symptomen

**Risico op het verkrijgen van Covid-19 via besmetting door virusdragende aerosolen

*** berekend op 27/10/2021

RIVM

De zorg voor morgen begint vandaag