Achtergrond voorstel ventilatierichtlijn evenementen

Datum:	13-7-2021
Projectnummer:	BM20200911
Status:	Definitief versie Juli 2021

Adviseurs:	ir. Tim Beuker dr. ir. Atze Boerstra
Contactinformatie:	tb-bba@binnenmilieu.nl, 088-222 9494

Opdrachtgever:	Fieldlab Evenementen

Inhoud

1 Inleiding 3
1.1 Doel 4
1.2 Scope 4
1.3 Disclaimer 5
1.4 Leeswijzer 5

2 Inschatting ondergrens op basis van bestaande eisen 6

3 De Wells-Riley methode 9
3.1 De Wells-Riley methode 10
3.2 Effect aanname onderlinge afstand 12
3.3 Effect luchtstromingspatronen 12
3.4 Mondkapjes 13
3.5 Luchtfiltratie 14
3.6 Effect van depositie en inactivatie 15
3.7 Correctie t.a.v. aanname aantal geïnfecteerden bij gebruik sneltesten 16

4 Inschatting ondergrens ventilatie op basis van de Wells-Riley methode 17
4.1 Bepaling COVID-19 specifieke inputparameters 17
4.2 Berekening COVID-19 specifieke ventilatie-eisen 24

5 Vergelijking bestaande ventilatie-eisen en resultaten Wells-Riley analyse 25

6 Stroomschema beoordeling COVID-19 aerosol besmettingskans 28

7 Waarborging aan de hand van CO_2-metingen 29
7.1 Achtergrond CO_2-monitoring 29
7.2 Stroomschema CO_2-monitoring 33

Bijlagen 34
Bijlage 1 Toelichting berekening quantaproductie COVID-19 35
Bijlage 2 Indicatieve bepalingsmethode capaciteit natuurlijke ventilatie 38

Bibliografie 41

1 Inleiding

De evenementensector is een brede sector waarin een grote verscheidenheid aan bedrijven valt. Denk bijvoorbeeld aan de bedrijven die sportwedstrijden, theatervoorstellingen of festivals organiseren. Wat de bedrijven binnen de sector samenbrengt is het streven om een grote groep mensen samen te brengen om gezamenlijk een evenement te beleven. Merk op dat restaurants, café's en nachtclubs dus geen onderdeel uit maken van de evenementensector.

Tijdens een pandemie, zoals de coronapandemie in 2020, is één van de basisuitgangspunten het vermijden van sociale contacten. Kort door de bocht kunnen infectieziekten immers alleen worden overgedragen op het moment dat geïnfecteerde personen in de nabijheid van gezonde personen komen. Hoewel het vermijden van sociale contacten een zeer effectieve maatregel is bij de bestrijding van een pandemie, is het ook een maatregel met grote economische gevolgen. Als er geen groepen mensen bijeen gebracht mogen worden, vervalt de mogelijkheid om een evenement te organiseren waarmee een belangrijke inkomstenbron voor de cultuur- en sportsector verdwijnt.

Om de draagkracht voor het beperken van sociale contacten op peil te houden en de sociaal-economische schade te beperken is het belangrijk om te onderzoeken onder welke omstandigheden activiteiten zoals een evenement wél mogelijk zijn. In het kader hiervan heeft de evenementensector het Fieldlab Evenementen gestart. Het Fieldlab Evenementen heeft als ambitie om, binnen de kaders van veiligheid en gezondheid, verschillende elementen te toetsen die inzicht kunnen bieden om te komen tot versoepelingen van de coronamaatregelen. Hiertoe coördineert het Fieldlab verschillende onderzoekstrajecten om tot een integraal pakket van maatregelen te komen.

In het kader hiervan heeft Fieldlab Evenementen bba binnenmilieu gevraagd om een richtlijn op te stellen waarmee beoordeeld kan worden of er bij een evenement voldoende ventilatie is om overdracht van infectieziekten via de lucht over afstanden groter dan 1,5m (zogenaamde aerogene overdracht) te beperken tot een acceptabel risico. Uit eerder onderzoek van bba binnenmilieu blijkt namelijk dat het *gebrek* aan ventilatie een belangrijke rol kan spelen bij aerogene overdracht van SARS-CoV-2 (Boerstra & Beuker, 2020). Het Landelijk Centrum Infectieziekten van het RIVM geeft aan dat ventilatie conform Bouwbesluit of aanvullende richtlijnen (zoals Arbocatalogi en de NOC*NSF eisen) voldoende is om aerogene overdracht van SARS-CoV-2 te voorkomen (RIVM, 2020). Het eerder genoemde onderzoek van bba liet zien dat voldoen aan het Bouwbesluit niet altijd voldoende bescherming biedt. Daarom heeft Fieldlab Evenementen bba binnenmilieu gevraagd om een concept ventilatierichtlijn op te stellen om een basisniveau van veiligheid bij alle evenementen te realiseren als het gaat om de kans op aerogene overdracht van SARS-CoV-2. Merk op dat de evenementensector hiermee meer doet dan strikt noodzakelijk van hun verwacht (geëist) wordt vanuit de Rijksoverheid. De sector neemt hiermee proactief haar verantwoordelijkheid om veilige evenementen te organiseren.

Opgemerkt wordt dat aerogene overdracht niet volledig voorkomen kan worden door te voldoen aan de eisen in deze richtlijn. Het bijeen brengen van groepen mensen brengt nu eenmaal een inherente overdrachtskans met zich mee. Deze richtlijn kan echter wel gebruikt worden om betrouwbaar onderscheid te maken tussen risicovolle en niet risicovolle situaties en zo de weg te openen voor het organiseren van voldoende veilige (risico-arme) evenementen.

Ook geeft deze richtlijn de mogelijkheid om het risico op aerogene overdracht van SARS-CoV-2 tijdens een evenement te vergelijken met andere situaties zoals een huiskamerconcert of sport kijken in een bar. Dit geeft de Rijksoverheid de mogelijkheid om objectieve afweging te maken tussen de werkelijke overdrachtsrisico's van meerdere kleinschalige bijeenkomsten (thuis) of één grootschalig evenement.
Verder wordt benadrukt dat deze richtlijn alleen in gaat op aerogene overdracht via de lucht over afstanden >1,5m. Naast deze overdrachtsroute is er ook overdracht mogelijk via andere routes zoals via contactoppervlakken of via directe druppeloverdracht binnen 1,5m. Dit rapport gaat alleen in op de aerogene overdracht > 1,5m.

De concepteisen van de Ventilatierichtlijn zijn bij pilot evenementen toegepast in combinatie met andere maatregelen zoals de toepassing van toegangstesten. Gebleken is dat de combinatie van toegangstesten en ventilatie conform deze richtlijn bij alle pilot evenementen van fase I voor voldoende veiligheid zorgde (Fieldlab Evenementen, 2021). Er zijn bezoekers besmet geraakt tijdens de evenementen maar dit bleef beperkt tot slechts enkele personen. Dit wijst erop dat de ventilatie-eisen uit deze richtlijn voor een voldoende veilige ventilatiesituatie zorgen.

1.1 Doel

Doel van het project was om:

- Een integrale methode (of combinatie van methodes) te ontwikkelen waarmee beoordeeld kan worden of een evenementenlocatie veilig genoeg is gelet op de ventilatie-situatie en het risico van COVID-19 overdracht via de lucht.
- Het toepassen van de voorgestelde methode op een standaard evenementensituatie & 'vertaling' van e.e.a. naar een 1e voorstel voor een ventilatie richtlijn.

1.2 Scope

De richtlijn is gericht op de ventilatie tijdens evenementen. Onder een evenement wordt hier verstaan het bijeen brengen van een grote groep mensen om incidentele gebeurtenissen bij te wonen zoals een sportwedstrijd, een muziekconcert of een theatervoorstelling. Dit betekent dat de richtlijn van toepassing is op permanente gebouwen maar ook op tijdelijke bouwwerken zoals een festivaltent. De richtlijn is gericht op de ventilatie voor het publiek, artiesten en medewerkers bij een evenement. De richtlijn is niet gericht op bijvoorbeeld de sporters tijdens een sportwedstrijd.

De richtlijn is bedoeld om te *beoordelen* of er bij een (voorgenomen) evenementenlocatie sprake is van voldoende ventilatie om aerogene overdracht (>1,5m) van een bepaalde infectieziekte tot een acceptabel niveau te beperken. De methode uit deze richtlijn kan bijvoorbeeld in het kader van een vergunningaanvraag gebruikt worden om te laten zien dat er voldoende ventilatie is om besmettingen via de aerosolroute te beperken.
Merk op dat deze richtlijn niet bedoeld is als ontwerprichtlijn op componentniveau. Voor het ontwerp van een goed ventilatiesysteem wordt doorverwezen naar bestaande ontwerprichtlijnen.

Deze richtlijn is verder gericht op de kans op aerogene overdracht over afstanden groter dan 1,5m (via aerosolen). Binnen 1,5m rond een geïnfecteerde is de aerosolconcentratie 4-7 keer hoger dan buiten de 1,5m zone en is daarmee de besmettingskans ook 4-7 keer hoger (Liu et al, 2016), nog los van de overdrachtsroute via grote druppels. Voldoende afstand houden en / of het

dragen van mondneusmaskers blijft dus belangrijk, ook als er voldaan wordt aan de ventilatie-eisen uit deze richtlijn.
Daarnaast is deze richtlijn niet gericht op de overdracht via contactoppervlakken en zal bijvoorbeeld goede handhygiëne nog steeds noodzakelijk zijn om overdracht van bepaalde infectieziekten te voorkomen.

1.3 Disclaimer

Aangezien het Corona virus (SARS-CoV-2) een relatief nieuw virus is, is nog niet alles bekend en zeker in relatie tot bijvoorbeeld besmettingskansen en virusoverdracht mechanismes. Dagelijks komt er nieuwe informatie beschikbaar over het virus. Bba binnenmilieu heeft het onderhavige onderzoek zo goed mogelijk, naar eer en geweten, rekening houdend met de laatste stand van de wetenschap, uitgevoerd. Desalniettemin kan het gebeuren dat toekomstig onderzoek tot nieuwe inzichten en conclusies leidt; ook daar waar het gaat om besmettingsrisico's tijdens grootschalige evenementen.

1.4 Leeswijzer

De snelle lezer wordt verwezen naar bba rapport "Voorstel ventilatierichtlijn evenementen" van 8 juli 2021 waarin de beoordelingsmethode voor evenementen wordt samengevat. In dit (het voorliggende) achtergrondrapport wordt toegelicht waar de ventilatierichtlijn op is gebaseerd.

Per hoofdstuk kunt u de volgende achtergrondinformatie vinden:

- In hoofdstuk 2 wordt een overzicht gegeven van relevante Bouwbesluit- en andersoortige ventilatierichtlijnen;
- In hoofdstuk 3 wordt beschreven hoe in het algemeen ventilatie-eisen bepaald kunnen worden om overdracht van infectieziektes via aerosolen te beperken;
- In hoofdstuk 4 worden specifiek voor evenementen tijdens de COVID-19 pandemie ventilatie-eisen afgeleid;
- In hoofdstuk 5 worden de eisen uit hoofdstuk 2 (bestaande eisen) en hoofdstuk 4 (berekening ventilatie-eisen op basis van de Wells-Riley methode) vergeleken en worden de aan te houden ventilatie-eisen gekozen;
- In hoofdstuk 6 wordt aan de hand van een stroomdiagram weergegeven hoe men de ventilatie van een evenementenlocatie kan beoordelen om overdracht van COVID-19 via aerosolen te voorkomen;
- In hoofdstuk 7 wordt beschreven hoe de ventilatiehoeveelheid tijdens een evenement gemonitord kan worden met CO_2-metingen.

2 Inschatting ondergrens op basis van bestaande eisen

Om een beeld te krijgen bij de bestaande ventilatie-eisen wordt hieronder een overzicht gegeven van ventilatie-eisen die relevant zijn (of op termijn kunnen zijn) voor evenementenlocaties in het kader van aerogene overdracht van infectieziektes.

tabel 1. Overzicht ventilatie-eisen voor evenementenlocaties. De genoemde eisen zijn wettelijke eisen of eisen in het kader van de aerogene overdracht van infectieziektes / COVID-19.

	Ventilatie-eis				
	l/s per persoon	l/s per m^2	ventilatievoud	**Betreft**	**Bron**
Wettelijke eisen:					
Bouwbesluit 2020					
• Bijeenkomstfunctie bestaande bouw	≥2,12			Bestaande gebouwen met een bijeenkomstfunctie zoals theaters.	(Rijksoverheid, 2020b)
• Bijeenkomstfunctie nieuwbouw	≥4			Nieuwe gebouwen met een bijeenkomstfunctie.	
• Sportfunctie bestaande bouw	≥3,44			Bestaande gebouwen met een sportfunctie zoals een sporthal.	
• Sportfunctie nieuwbouw	≥6,5			Nieuwe gebouwen met een sportfunctie	
Drank- en Horecabesluit *(per 1 juli 2021 vervallen)*		≥3,8		Bestaande en nieuwe gebouwen met horecafunctie.	(Rijksoverheid, 2020c)
COVID-19 richtlijnen:					
REHVA COVID-19 Guidance	n.t.b., ventilatie-eisen worden naar verwachting in een latere versie meegenomen			Richtlijnen voor COVID-19 beheer van klimaatinstallaties	(REHVA, 2020)
COVID Event Protocol België			6-12	Concept richtlijn voor Belgische COVID-19 veilige evenementen	(Event Flanders, 2020)
Norwegian Institute of Public Health richtlijn ventilatie i.r.t. COVID-19	≥ 7 l/s			Alle gebouwen in Noorwegen	(Folkehelseinstituttet (FOI) - Norwegian Institute of Public Health (NIPH), 2020)
Andere relevante richtlijnen:					
WHO richtlijn voor infectiepreventie in natuurlijk geventileerde ziekenhuizen			6-12	Natuurlijk geventileerde ziekenhuizen	(World Health Organization, 2009)
WHO video standpunt ventilatie & COVID-19			6	Alle ruimten	(World Health Organization, 2020)

Volgens het huidige beleid van het RIVM is er (impliciet) sprake van een acceptabel risico op aerogene overdracht van COVID-19 als een evenementenlocatie aan de eisen van Bouwbesluit 2012 voldoet.

In de LCI richtlijn ten aanzien van ventilatie tijdens COVID-19 stond hierover bijvoorbeeld het volgende (RIVM, 2020b):

2. Adviezen over ventilatie en luchten voor publieke ruimtes, bedrijven en andere organisaties

- Ventileer in ieder geval volgens de eisen van het Bouwbesluit die van toepassing zijn op het gebouw (bestaand of nieuwbouw) en de gebruiksfunctie. Met ventileren wordt zowel het afvoeren van vuile lucht als het aanvoeren van verse buitenlucht bedoeld.

Stel men hanteert die benadering, dan is de vraag natuurlijk: wat zijn goede referentie-eisen op ventilatiegebied daar waar het gaat om evenementen binnen dan wel in tijdelijke bouwwerken, tenten etc.? Om die vraag te beantwoorden kijken we naar de diverse eisen zoals samengevat in tabel 1.

In principe zullen de meeste evenementenlocaties qua Bouwbesluit categorie in de categorie "bijeenkomstfunctie" vallen. Hiervoor gelden aparte eisen voor nieuwbouw (4 l/s per persoon) en bestaande bouw (2,12 l/s per persoon). Houd men er rekening mee dat soms tijdens evenementen sprake is van hoge activiteitenniveaus (denk aan dansen) dan zou je kunnen stellen dat aanvullend ook de Bouwbesluit-eisen t.a.v. sportruimten een belangrijke referentie vormen. Aan de ventilatie in ruimten met een sportfunctie stelt het Bouwbesluit hogere ventilatie-eisen dan aan ruimten met een bijeenkomstfunctie : 6,5 l/s per persoon bij nieuwbouw en 3,44 l/s per persoon bij bestaande bouw.

Bij het advies van het RIVM is het dus de vraag welke Bouwbesluiteisen men precies voor ogen heeft als voldoende ventilatie om aerogene overdracht van COVID-19 te voorkomen tijdens evenementen die soms meer passief (stil zitten), soms meer actief (dansen, meezingen) van karakter zijn.
Formeel gezien gelden in ruimten bedoeld voor evenementen misschien soms alleen de bijeenkomstruimte eisen uit het Bouwbesluit (officieel zelfs ook nog eens alleen de vangnet-eisen voor bestaande bouw), desalniettemin is het advies hier om als referentie de nieuwbouweis (van 6,5 l/s pp) aan te houden zoals die geldt voor sportruimten. Onder meer omdat zoals gezegd er soms sprake is van een actief evenement waarbij (een deel van de tijd) sprake is van een duidelijk verhoogd metabolisme / dansen). Anderzijds ook omdat de reguliere Bouwbesluiteisen (nog) geen rekening houden met het gegeven dat men bij stemverheffing (denk aan hoge achtergrondgeluidniveaus zoals die bijvoorbeeld bij concerten optreden) of bij meezingen / schreeuwen hogere aerosolconcentraties geproduceerd worden. Vandaar de keuze om de genoemde 6,5 l/s uit het Bouwbesluit voor nu even als basisreferentie te nemen (nog even los van de uitkomsten van de exercities vermeld in het volgende hoofdstuk).

Naast de Bouwbesluiteisen gelden er voor evenementenlocaties waar alcoholhoudende drank geschonken wordt ook de eisen van het Besluit Eisen Inrichtingen Drank- en Horecawet (DHW)[1]. Zoals aangegeven in tabel 1 bedraagt de ventilatie-eis uit het DHW Besluit 3,8 l/s per m^2. Stel dat men uit gaat van een bezetting van 1 persoon per 2 m^2, dan levert dit een ventilatie-eis van 7,6 l/s per persoon op wat ongeveer overeen komt met de nieuwbouweis voor sportfuncties uit het Bouwbesluit. Stel dat we uit gaan van een bezetting van 1 persoon per m^2, dan levert dit een ventilatie-eis van 3,8 l/s per persoon op wat ongeveer overeen komt met de nieuwbouweis voor bijeenkomstfuncties uit Bouwbesluit 2012.

[1] opmerking: deze eisen zijn sinds 1-7-2021 komen te vervallen. Op dit moment gelden alleen de eisen uit het Bouwbesluit.

Voor zowel de eisen uit het Bouwbesluit als de eisen uit het Drank- en Horecabesluit geldt dat de eisen niet expliciet zijn 'ontworpen' om aerogene overdracht van infectieziektes zoals COVID-19 te voorkomen. Wanneer we naar richtlijnen kijken die wel gericht zijn op het voorkomen van aerogene overdracht van infectieziektes (COVID-19), zoals de richtlijnen van de WHO en het Event Protocol uit België, dan wordt voorgesteld om een ventilatievoud van 6-12 te hanteren. Dit komt neer op 6-12 keer per uur verversen van alle lucht in een ruimte. Omgerekend komt dit neer op een ventilatiehoeveelheid van 4-8 l/s per m^2 bij een verdiepingshoogte van 2,4m. Bij ruimten met een normale verdiepingshoogte komt dit dus aardig overeen met de eis van het Drank- en Horecabesluit (3,8 l/s per m^2) en daarmee dus ook met de Bouwbesluiteisen voor nieuwbouw gebouwen met sportfunctie als we uit gaan van een bezetting van maximaal 1 persoon per 2 m^2.

Los van de bestaande eisen in o.a. het Bouwbesluit en de Drank- en Horecawet, internationaal is men bezig om (deels op basis van analyses van COVID-19 uitbraken in ruimten met weinig ventilatie) te definiëren wat een 'veilig' niveau is qua verse luchttoevoer in binnenruimtes. Hier 1 harde waarde voor geven is per definitie lastig (o.a. de duur van sessies doet er toe, het type activiteit, stemgebruik etc.) maar los daarvan zijn er diverse wetenschappers die melden voorzichtig ervan overtuigd te raken dat als je minimaal 5 l/s per persoon toevoert (persoonlijke e-mail Prof. Shelly Miller, University of Colorado), dan wel 10 l/s per persoon (Prof. Yuguo Li, Hongkong University & Prof. Jelle Laverge, Universiteit Gent) dat men dan 'relatief veilig' is. Wel met de opmerking erbij (dit geldt o.a. voor Laverge) dat de waarden met name gelden in wat grotere ruimten (denk aan ruimten groter dan 50 a 100 m^2). In relatief kleinere ruimten zou men beduidende hogere luchthoeveelheden nodig hebben omdat er minder verdunning optreedt en omdat er een aanzienlijke hoeveelheid ventilatie nodig is om de virusdeeltjes van één geïnfecteerd persoon af te voeren.

Puur redenerende vanuit de bestaande wettelijke eisen en richtlijnen en kijkend naar andere kentallen die in omloop zijn, lijkt een uitgangspunt van 6,5 l/s per persoon een goede eerste aanname voor de minimaal benodigde hoeveelheid ventilatie.

3 De Wells-Riley methode

Bij aerogene overdracht van infectieziektes is het zo dat een geïnfecteerd persoon tijdens ademen, praten, schreeuwen, zingen, hoesten en/of niezen infectieuze deeltjes verspreid die vervolgens worden ingeademd door een gezond persoon en daar een infectie veroorzaken. Aan de kant van de 'ontvanger' is het zo dat de kans om besmet te raken samenhangt met de dosis infectieus materiaal die men binnen krijgt. De dosis wordt bij aerogene overdracht bepaald door de concentratie infectieus materiaal in de lucht en de hoeveelheid lucht die een gezond persoon inademt (vooral ingegeven door de tijd dat iemand in die lucht verblijft). De concentratie infectieus materiaal in de lucht wordt bijvoorbeeld beïnvloedt door de mate waarin een geïnfecteerde infectueuze deeltjes produceert ('bronsterkte') en de mate waarin die deeltjes worden afgevoerd via ventilatie of filtratie voordat zij een gezond persoon bereiken.

Om te bepalen hoeveel ventilatie nodig is om aerogene overdracht tot een acceptabel niveau te beperken, bestaan er op hoofdlijnen twee methodes (die op hetzelfde neer komen als alle invoerparameters bekend zijn):

- Dosis-respons modellen
- Wells-Riley model

Dosis-respons modellen zijn de meest nauwkeurige modellen waarbij exact duidelijk is hoeveel infectieuze deeltjes een geïnfecteerde produceert, hoeveel deeltjes een gezond persoon moet ontvangen om besmet te raken en wat het effect van omgevingsvariabelen is op de aerogene overdracht van de deeltjes tussen de twee personen. Om een dosis-respons model op te kunnen stellen moet exact duidelijk zijn wat de invoerparameters bedragen en wat hun onderlinge relatie is. Dit maakt het dosis-respons model weliswaar het meest nauwkeurige model maar zorgt er tegelijk voor dat het model ongeschikt is voor nieuwe ziekteverwekkers. Bij de start van de COVID-19 pandemie was bijvoorbeeld lang onduidelijk hoeveel virus een geïnfecteerd persoon uit stoot en is 8 maanden na de start nog steeds onduidelijk wat de infectieuze dosis bedraagt.

Het Wells-Riley model (Riley et al, 1978) is vanuit een andere gedachte ontwikkeld. Het model is gebaseerd op het idee dat personen onder gelijke omstandigheden worden blootgesteld aan dezelfde concentratie infectieuze deeltjes en dat daar, gemiddeld genomen, hetzelfde aantal mensen besmet raakt. Door de infectieuze dosis uit te drukken als fractie van de hoeveelheid geproduceerd infectieus materiaal door een geïnfecteerde, kan men uitrekenen wat de kans is dat een persoon besmet raakt in een bepaalde situatie *ondanks dat zowel de infectieuze dosis als de uitgestoten hoeveelheid infectieuze deeltjes onbekend zijn*.
Het model kan dus vanaf de eerste cluster in een pandemie worden gebruikt om in te schatten wat de besmettingskansen zijn in verschillende situaties (al zal het dan relatief onbetrouwbaar zijn). Vervolgens kan het model gaandeweg verfijnd worden naar mate er meer gegevens beschikbaar komen over de invloed van bijvoorbeeld ventilatie of de verschillen in bronsterkte tussen geïnfecteerden.

Vanwege de praktische toepasbaarheid van het Wells-Riley model kiezen we ervoor om de bepaling van de benodigde hoeveelheid ventilatie tijdens evenementen te baseren op dit model. Opgemerkt wordt dat de World Health Organization het Wells-Riley model bijvoorbeeld ook gebruikt heeft om de hoeveelheid ventilatie te bepalen die vanuit infectiepreventie nodig is in

natuurlijk geventileerde ziekenhuizen (World Health Organization, 2009). In zijn algemeenheid is het een methode die wereldwijd gebruikt wordt, zie o.a. (Miller et al, 2020); (Li et al, 2020).

3.1 De Wells-Riley methode

De hoeveelheid infectieus materiaal die een gezond persoon binnen moet krijgen voordat iemand besmet raakt, wordt de infectieuze dosis genoemd. Gevoelsmatig zou men wellicht verwachten dat wanneer iemand wordt blootgesteld aan de infectieuze dosis, dat er dan een 100% kans is dat die persoon besmet raakt. Er zijn echter allerlei redenen waarom de besmettingskans in de praktijk lager ligt. Zo bereiken bijvoorbeeld niet alle infectieuze deeltjes de zone in het lichaam waar de verwekker de beste overlevingskans heeft.

In 1955 heeft Wells de theorie gelanceerd dat de kans om besmet te raken na blootstelling aan een infectieuze dosis 'quantal' is (Wells, 1955). Men raakt ofwel geïnfecteerd na blootstelling aan de infectieuze dosis of niet. Als gevolg stelde Wells dat de kans op besmet te raken na blootstelling aan de infectieuze dosis een Poisson verdeling volgt. In formulevorm ziet dit er als volgt uit:

$$P(inf) = 1 - e^{-N_{quantum}} \quad (1)$$

P(inf) =	besmettingskans	[%]
$N_{quantum}$=	aantal infectieuze doses	[qanta]

$N_{quantum}$ is hierbij een dimensieloze maat voor de hoeveelheid infectieuze doses waar een gezond persoon onder bepaalde omstandigheden aan wordt blootgesteld. De term $e^{-Nquantum}$ geeft vervolgens de kans dat een gezond persoon *niet* geïnfecteerd raakt bij blootstelling aan dosis $N_{quantum}$. Bij blootstelling van een gezond persoon aan eenmaal de infectieuze dosis ($N_{quantum}$ = 1) volgt dus een kans van e^{-1} = 36,8% dat de persoon *gezond blijft*. Bij blootstelling aan tweemaal de infectieuze dosis volgt dat de kans dat de persoon gezond blijft e^{-2} = 13,5% is, bij driemaal de infectieuze dosis is dit <1%. Door de inverse van deze waarde te nemen krijgt men de kans dat een gezond persoon *wel geïnfecteerd* raakt: bij blootstelling aan 1 quantum is de kans hierop 1-e^{-1} = 1-36,8% = 63,2%. Eén quantum is dus gelijk aan de dosis waarbij 63% van de aanwezigen besmet raakt (ID_{63}).

In 1978 hebben E.R. Riley, G. Murphy en R.L. Riley de formule van Wells aangepast om een uitbraak van mazelen op een school te onderzoeken (Riley et al, 1978). In de aangepaste formule zijn termen opgenomen om meer in detail de dosis virusdeeltjes te berekenen waaraan scholieren zijn blootgesteld. De aangepaste formule wordt in het kader op de volgende bladzijde weergegeven.

$$P(inf) = 1 - e^{\frac{-I \cdot q \cdot P \cdot t}{Q}} \quad (2)$$

P(inf)	=	besmettingskans	[%]
I	=	aantal geïnfecteerde personen	[-]
q	=	emissie van infectieuze deeltjes van één geinfecteerde	[quanta/uur]
P	=	ademvolume	[m^3/uur]
t	=	blootstellingsduur	[uur]
Q	=	hoeveelheid luchtverversing	[m^3/uur]

De aangepaste formule wordt ook wel de “Wells-Riley-formule” genoemd. Zoals te zien is in het kader wordt de virusconcentratie waaraan gezonde personen worden blootgesteld nu bepaald door het aantal geïnfecteerde personen (I) vermenigvuldigt met de virusproductie van één geïnfecteerd persoon (q), het ademvolume van de gezonde personen (P) en de tijdsduur (t) dat men is blootgesteld aan de geïnfecteerde personen gedeeld door de hoeveelheid ventilatie (Q). Doordat de virusemissie van de geïnfecteerde personen is weergegeven in infectieuze doses (quanta), levert deze berekening op hoeveel ‘infectieuze doses’ de gemiddelde gezonde aanwezige binnenkrijgt. Op basis hiervan wordt in de Wells-Riley formule net als bij de Wells formule (1) berekend hoeveel personen gemiddeld genomen geïnfecteerd raken onder de genoemde omstandigheden.

Om te bepalen hoeveel ventilatie nodig is om een bepaalde besmettingskans te bereiken, kan de formule als volgt worden omgeschreven:

$$Q = \frac{-I \cdot q \cdot P \cdot t}{\ln\left(1 - P_{(inf)}\right)} \quad (3)$$

P(inf)	=	besmettingskans	[%]
I	=	aantal geïnfecteerde personen	[-]
q	=	emissie van infectieuze deeltjes van één geinfecteerde	[quanta/uur]
P	=	ademvolume	[m^3/uur]
t	=	blootstellingsduur	[uur]
Q	=	hoeveelheid luchtverversing	[m^3/uur]

Formule (3) vormt de basis van de Wells-Riley analyse in dit achtergronddocument. In de paragrafen 3.2 en verder worden correctiefactoren aan de formule toegevoegd voor bijvoorbeeld het gebruik van mondkapjes en luchtfiltratie. In hoofdstuk 4 worden voor COVID-19 alle inputparameters bepaalt, enerzijds als basis voor de COVID-19 ventilatie-eisen in hoofdstuk 4 en anderszijds als voorbeeld van hoe de inputparameters afgeleid kunnen worden.

3.2 Effect aanname onderlinge afstand

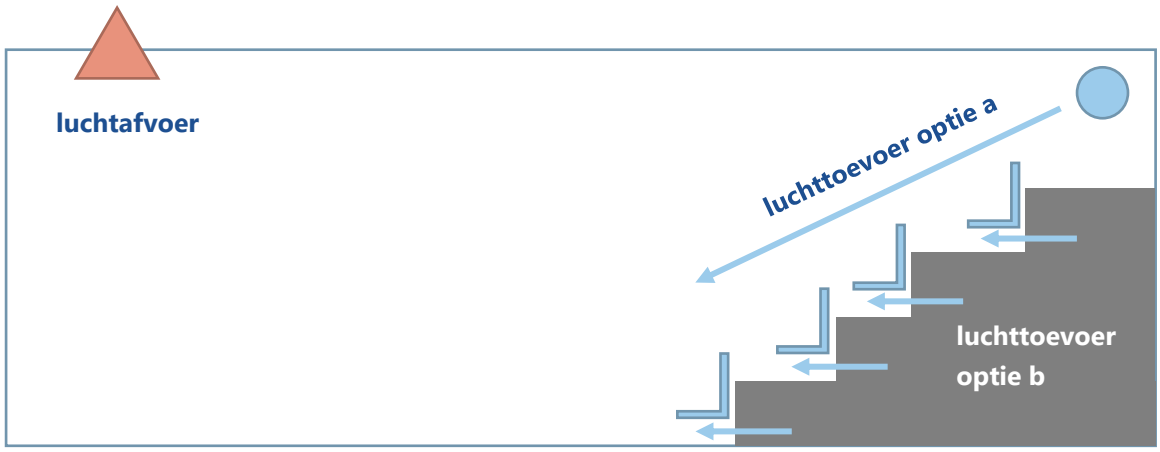
Het is belangrijk om op te merken dat de Wells-Riley formule rekent met de steady state concentratie in de binnenlucht. Dit betekent dat het uitgangspunt is dat de infectieuze deeltjes die vrijkomen in de ruimte zich gelijkmatig verspreiden door een ruimte (volledige menging). Op alle locaties in een ruimte is met andere woorden dezelfde concentratie infectieuze deeltjes.

Om te bepalen of de aanname van volledige menging ook in de praktijk aangenomen kan worden, heeft Liu et al in 2016 uitgebreid laboratoriumonderzoek uitgevoerd (Liu et al, 2016). Hierbij zijn ademende, thermische mannequins in een klimaatkamer tegenover elkaar gezet en is vervolgens gemeten hoeveel tracergas pop A van pop B in kon ademen. Daarnaast is bekeken wat de concentratie tracergas in de klimaatkamer zelf was en hoe die twee zich tot elkaar verhouden. Met CFD-simulaties is op basis van deze resultaten onderzocht hoe de aerosolconcentratie in de ruimte is. De simulaties laten zien dat de aerosolconcentratie (en daarmee de concentratie infectieuze deeltjes) in een goed geventileerde ruimte vanaf 1 m rond een geïnfecteerd persoon gelijk is aan de concentratie in de rest van de ruimte. Binnen de 1m rond een geïnfecteerd persoon ligt de aerosolconcentratie 4 tot 7 keer hoger dan de gemiddelde ruimteconcentratie (op 0,5m van een persoon). De aanname dat sprake is van ideale menging gaat dus op zolang er wel 1-1,5m gehouden wordt van de bron (in dit geval: de besmette persoon). Wanneer er geen 1-1,5m afstand wordt gehouden, dan moet er dus van worden uitgegaan dat de blootstelling aan aerosolen met infectieuze deeltjes een factor 7 hoger ligt.

3.3 Effect luchtstromingspatronen

Ook op ruimteniveau kunnen er concentratieverschillen optreden als het luchtstromingspatroon niet gelijkmatig verdeeld is in de ruimte en is het de vraag onder welke omstandigheden men uit kan gaan van volledige menging (randvoorwaarde Wells-Riley formule).

Om van volledige menging uit te kunnen gaan is het belangrijk dat de lucht in de gehele ruimte in beweging wordt gebracht. Dit kan bereikt worden door verplaatsing van lucht met een ventilator of luchtinblaaspunt al dan niet in combinatie met het variëren van de luchttemperatuur in de ruimte (warme lucht stijgt op). In figuur 1 wordt een basis ventilatieprincipe getoond waarmee in een evenementenruimte met tribune voldoende doorspoeling kan worden bereikt.



figuur 1. voorbeeld van een standaard ventilatieprincipe voor evenementenruimten waarbij volledige doorspoeling wordt bereikt. De basisoplossing is dat de lucht wordt toegevoerd via inblaasroosters boven het publiek of via inblaasroosters bij de voeten van het publiek. De vervuilde lucht dient te worden afgevoerd via het plafond.

De figuur laat zien dat de (koele) toevoerlucht het beste bij de voeten van publiek of langs de hoofden van de bezoekers kan worden toegevoerd. Op deze manier wordt de uitgeademde lucht van het publiek (met eventuele infectieuze deeltjes) naar het midden van de ruimte geblazen. Vervolgens wordt de vervuilde (warmere) lucht afgevoerd via openingen in het plafond van de ruimte.

Wanneer er wordt afgeweken van het ventilatieprincipe in figuur 1, dan zal de evenementenlocatie zelf moeten beoordelen of de locatie voldoet aan de randvoorwaarde van doorspoeling (al dan niet in samenwerking met een ingeschakelde specialist / installatie-adviseur). Hiervoor zijn meerdere mogelijkheden beschikbaar:

- *Rookproeven*. Met rookproeven kunnen de luchtstromingen in een ruimte zichtbaar worden gemaakt. Op deze manier kan een evenementenlocatie visueel beoordelen of er sprake is van doorspoeling (nergens is 'stilstaande' lucht zichtbaar tijdens de rookproef). Let er hierbij op dat de rookproeven onder voor een evenement representatieve omstandigheden worden uitgevoerd: het klimaatsysteem moet in bedrijf zijn en er moeten voldoende personen aanwezig zijn of de warmte van personen moet met warmtebronnen gesimuleerd worden.
- *CFD-simulaties*. Met CFD-simulaties kunnen de luchtstromingen in de ruimte berekend / gesimuleerd worden. Het voordeel hiervan is dat in detail de verdeling van de concentratie infectieuze deeltjes berekend kan worden, bijvoorbeeld door de local air quality index te berekenen conform de methode uit Rehva Guidebook 2 (REHVA, 2004).

In principe is het mogelijk om in de Wells-Riley formule een correctiefactor op te nemen voor een niet uniforme verdeling van de infectieuze deeltjes over de ruimte. In deze richtlijn wordt dit niet gedaan omdat er, met het oog op beperking van blootstelling aan infectieuze deeltjes, gestreefd moet worden naar een goede doorspoeling van de ruimte.

3.4 Mondkapjes

In de formule hieronder zijn correctiefactoren (m_1 en m_2) toegevoegd voor het effect van mondkapjes op de besmettingskans:

$$Q = \frac{-I \cdot (q \cdot \left(1 - \frac{m_1}{100}\right)) \cdot (P \cdot \left(1 - \frac{m_2}{100}\right)) \cdot t}{\ln\left(1 - P_{(inf)}\right)} \quad (4)$$

P(inf)	=	besmettingskans	[%]
I	=	aantal geïnfecteerde personen	[-]
q	=	emissie van infectieuze deeltjes van één geinfecteerde	[quanta/uur]
P	=	ademvolume	[m^3/uur]
t	=	blootstellingsduur	[uur]
Q	=	hoeveelheid luchtverversing	[m^3/uur]
$d_{1,5m}$	=	aanwezigen houden wel 1,5m afstand (=1) of niet (=7)	[-]
m_1	=	filterefficiëntie mondkapje bij geïnfecteerde	[%]
m_2	=	filterefficiëntie mondkapje bij gezonde personen	[%]

Zoals te zien is in het voorgaande kader wordt de quantaproductie (q) van de geïnfecteerde gecorrigeerd voor het filterende effect van het mondkapje dat de *geïnfecteerden* dragen. Het ademvolume van de gezonde personen (P) wordt gecorrigeerd voor de filterefficiëntie van de mondkapjes die de *gezonde* personen dragen. Merk op dat dit laatste vooral een wiskundige oplossing is die gelezen moet worden als een reductie van de concentratie infectieuze deeltjes die een gezond persoon inademt. Het geeft dus niet aan dat het dragen van een mondkapje de ademhaling beperkt.

De reden dat voor de bron en de ontvanger aparte correctiefactoren zijn toegevoegd heeft ermee te maken dat de filterefficiëntie (van hetzelfde mondkapje) bij de bron en ontvanger verschilt. Bij de bron wordt met een regulier mondkapje al snel een reductie van de uitstoot van infectieuze deeltjes bereikt doordat een groot deel van de ademlucht door het mondkapje gaat. Aan de ontvangerkant is het effect van mondkapjes veel beperkter: daar zoekt de ingeademde lucht de makkelijkste route en dat is vaak langs de rand van het mondkapje. Hierdoor valt de filterefficiëntie van mondkapjes aan de ontvangerkant vaak tegen.

3.5 Luchtfiltratie

Hoewel ventilatie verreweg de meest efficiënte manier is om de concentratie infectieuze deeltjes in de binnenlucht te verminderen, kan luchtfiltratie een alternatieve oplossing zijn. In het kader van deze richtlijn kan luchtfiltratie alleen worden meegerekend als aan de volgende drie eisen wordt voldaan:

- Er wordt gebruik gemaakt van HEPA filters met een filterefficiëntie die tenminste voldoet aan klasse H13 conform NEN-EN 1822 (CEN, 2019) of aan klasse ISO 35 H conform ISO 29463 (ISO, 2017). Wanneer er andere filtertechnieken worden toegepast zoals UV-filtratie of elektrostatische filtratie, dan dient de fabrikant aan te tonen wat de filterefficiëntie voor de te filteren ziekteverwekker is (uitgedrukt in m^3/uur lucht dat volledig vrij is van infectieuze deeltjes).
- Door middel van rookproeven wordt aangetoond dat de te filteren ruimtelucht de luchtfilters bereikt.
- De luchtfilterapparaten produceren geen schadelijke bijproducten zoals ozon dan wel reactieproducten (denk aan aldehyden, ultrafijn stof) die gelinkt kunnen zijn aan ozon productie.

Wanneer aan de bovenstaande voorwaarden voor luchtfiltratie is voldaan, dan mag de hoeveelheid gefilterde lucht (F) als volgt meegenomen worden in de berekening:

$$Q + F = \frac{-I \cdot (q \cdot \left(1 - \frac{m_1}{100}\right)) \cdot (P \cdot (1 - \frac{m_2}{100})) \cdot t}{\ln\left(1 - P_{(inf)}\right)} \quad (5)$$

P(inf) =	besmettingskans	[%]
m_1 =	filterefficiëntie mondkapje bij geïnfecteerde	[%]
m_2 =	filterefficiëntie mondkapje bij gezonde personen	[%]

zie formule 4 voor een beschrijving van de andere parameters

3.6 Effect van depositie en inactivatie

Een deel van de infectieuze deeltjes verdwijnt 'vanzelf' uit de lucht. Als gevolg van de zwaartekracht 'vallen' de deeltjes na verloop van tijd (uren) neer op een oppervlak (depositie). Daarnaast neemt de levensvatbaarheid van de infectieuze deeltjes na verloop van tijd af (inactivatie). Het is mogelijk om de Wells-Riley formule te corrigeren voor depositie en inactivatie-effecten.

In deze richtlijn wordt dit om de volgende redenen niet gedaan:

- Het uitgangspunt is dat de quantaproductie retrospectief wordt bepaald aan de hand van besmettingsclusters, zie paragraaf 2.8. Depositie- en inactivatie-effecten worden impliciet meegenomen in de berekening van de quantaproductie. Er wordt immers gekeken hoeveel personen besmet raken na verblijf bij een geïnfecteerd persoon.
- Wanneer de berekende quantaproductie wordt gebruikt om te berekenen wat de besmettingskans voor een andere situatie is en in beide situaties is sprake van vergelijkbare omstandigheden (verblijfsduur, temperatuur, relatieve vochtigheid etc.), dan kan men er vanuit gaan dat de depositiesnelheid en inactivatiesnelheid in beide situaties vergelijkbaar zijn. Het wel of niet corrigeren van de quantaproductie voor inactivatie en depositie komt dan op hetzelfde neer. Het gebruiken van de correctiefactoren voor depositie en inactivatie heeft pas zin op het moment dat die correctiefactoren gebruikt kunnen worden om *verschillen* in depositie en inactivatie tussen situaties te verklaren / voorspellen. En dit laatste vereist een nauwkeurig inzicht in de mechanismen achter depositie- en inactivatieeffecten, zie het volgende punt.
- Depositie- en inactivatie-effecten zijn afhankelijk van meerdere factoren zoals luchtsnelheid, turbulentie-intensiteit, temperatuur, relatieve luchtvochtigheid en samenstelling van de aerosolen / druppels. De exacte invloed van deze factoren op de depositie- en inactivatiesnelheid is vaak onbekend, zeker bij de start van een pandemie. Daarnaast is de exacte temperatuur / luchtsnelheid etc. tijdens een uitbraak vaak ook onbekend. Dit maakt het zeer complex om nauwkeurig de invloed van depositie- en inactivatie-effecten in te schatten.

Wat bba betreft levert het introduceren van correctiefactoren voor depositie- en inactivatie alleen een schijnnauwkeurigheid op en draagt het dus niet bij aan de voorspellende waarde van de Wells-Riley berekeningen.

Twee opmerkingen:

- Wanneer gebruik gemaakt wordt van quantawaardes uit publicaties van derden, dan moet altijd goed bekeken worden of die waardes berekend zijn met of zonder correctie voor depositie en inactivatie. Voor de berekening in deze richtlijn dienen de quantawaardes gekozen te worden exclusief eventuele correctie voor inactivatie en depositie. Met andere woorden: stel dat een quantaproductie van 200 quanta/uur berekend is waarbij men uit gaat van een inactivatiesnelheid van 50%/uur. Dan betekent het dat in het kader van deze richtlijn met een quantaproductie van 100 quanta/uur gerekend moet worden.
- Wanneer er een vergelijking wordt gemaakt tussen de berekende quantaproductie en de werkelijke virale load van een geïnfecteerde, dan moet uiteraard *wel* gecorrigeerd worden voor depositie- en inactivatiesnelheid. Besef dat de quantaproductie wordt berekend op basis van het aantal infecties en dus op basis van het aantal deeltjes dat de weg van een

geïnfecteerde naar een gezond persoon heeft overleefd (inclusief de inactivatie- en depositie-effecten die onderweg optreden).

3.7 Correctie t.a.v. aanname aantal geïnfecteerden bij gebruik sneltesten

Voor bepaalde ziektes is het mogelijk om aan de hand van sneltesten een betrouwbaar beeld te krijgen of een bezoeker van een evenement geïnfecteerd is of niet. Hierdoor hoeft er niet langer een inschatting gemaakt te worden van de hoeveelheid geïnfecteerden tijdens een evenement maar mag het aantal te verwachten geïnfecteerden gereduceerd worden met de testsensitiviteit. De testsensitiviteit geeft aan welke fractie van het totaal aantal geïnfecteerden een positieve testuitslag krijgt. Een sensitiviteit van 100% wil dus zeggen dat 100% van de geïnfecteerden een positieve testuitslag krijgt en dat de test dus ontzettend nauwkeurig aangeeft of een bezoeker geïnfecteerd is of niet. Merk op dat een sensitiviteit van 100% fout-positieven niet uit sluit: mensen die niet geïnfecteerd zijn maar waarvan de test aangeeft dat ze wel geïnfecteerd zijn. De mate waarin dit gebeurd wordt weergegeven met de specificiteit van de test (hier verder buiten beschouwing gelaten).

Bij sensitiviteit wordt onderscheid gemaakt tussen technische en klinische sensitiviteit. Technische sensitiviteit geeft aan hoe betrouwbaar de test is om in laboratoriumomstandigheden een bepaalde verwekker aan te tonen. De klinische sensitiviteit geeft aan hoe nauwkeurig de test in de praktijksituatie is. Hierbij wordt bijvoorbeeld rekening gehouden met de manier waarop de test wordt afgenomen. In deze richtlijn wordt verwezen naar de klinische sensitiviteit omdat dit de beste indicator is voor de betrouwbaarheid van het weren van geïnfecteerden ‘aan de deur’. Hierbij dient de klinische sensitiviteit wel bepaald te worden voor het daadwerkelijke testbeleid rondom een evenement.

Het aantal geïnfecteerden (I) in formule 2-6 mag als volgt worden gecorrigeerd voor het gebruik van testen ‘aan de deur’:

$$I_{test} = \left\lceil I \cdot \left(1 - \frac{S_{\text{test}}}{100}\right) \right\rceil \quad (7)$$

I_{test} =	verwacht aantal geïnfecteerden na correctie sensitiviteit test (naar boven afgerond op een heel getal)	[-]
I =	verwacht aantal geïnfecteerden zonder testcorrectie	[-]
S_{test} =	klinische sensitiviteit test	[%]

Merk op dat de bovenstaande formule alleen in 0 verwachte geïnfecteerden resulteert als de klinische sensitiviteit van de test 100% is. Als dus met andere woorden alle geïnfecteerden met 100% betrouwbaarheid geweerd kunnen worden bij het evenement. In gevallen waarbij de testsensitiviteit kleiner is dan 100%, moet altijd met tenminste één geïnfecteerde rekening worden gehouden (het aantal geïnfecteerden dient naar boven te worden afgerond op een heel getal). In de praktijk heeft een sneltest zelden een klinische sensitiviteit van 100% (RIVM, 2020c) dus zal er vaak, ook bij gebruik van sneltesten, nog met één of meerdere geïnfecteerden gerekend moeten worden.

4 Inschatting ondergrens ventilatie op basis van de Wells-Riley methode

Om te bepalen hoeveel ventilatie nodig is om de kans op COVID-19 besmettingen via de aerosolroute tot een acceptabel niveau te reduceren, wordt eerst met de Wells-Riley analyse uit hoofdstuk 3 bepaald welke ventilatiehoeveelheden nodig zijn. De gekozen invoerparameters voor deze berekening worden weergegeven in paragraaf 4.1. In paragraaf 4.2 worden de benodigde ventilatiehoeveelheden berekend. In hoofdstuk 5 worden de berekende ventilatiehoeveelheden vergeleken met de bestaande ventilatie-eisen uit hoofdstuk 2.

4.1 Bepaling COVID-19 specifieke inputparameters

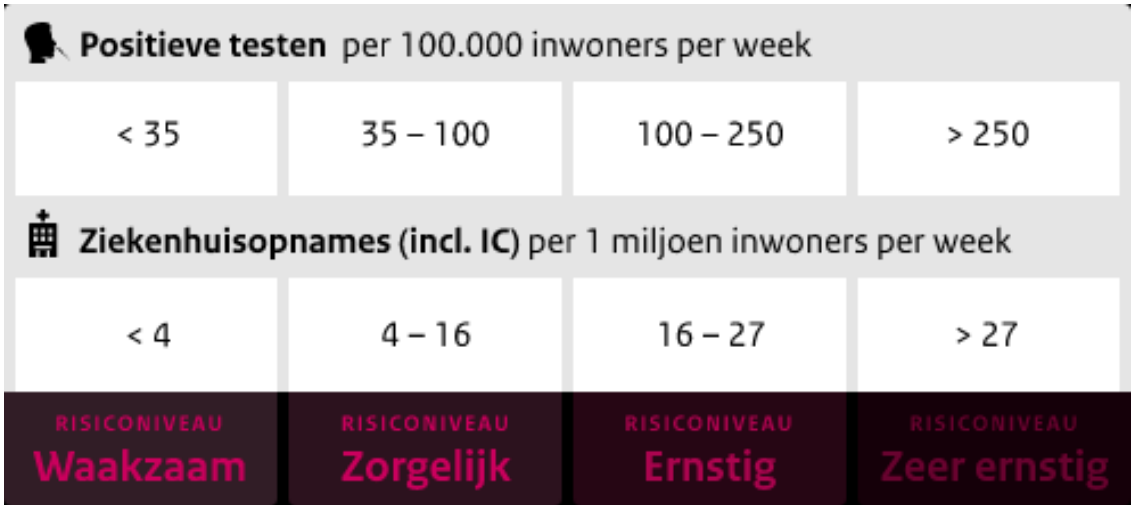
In tabel 2 worden de COVID-19 specifieke inputparameters voor de Wells-Riley berekening samengevat. In paragraaf 4.1.1 t/m 4.1.7 wordt toegelicht hoe deze parameters bepaald zijn.

tabel 2. overzicht inputparameters Wells-Riley berekening ten aanzien van COVID-19.

Parameter		Gehanteerde aannames		Bron
I	Aantal geïnfecteerde personen	**100:100.000**		Gebaseerd op Corona Dashboard Rijksoverheid (Rijksoverheid, 2021). Zie par. 4.1.1.
q	Emissie van infectieuze deeltjes door één geïnfecteerde	Dansen & 100% van de tijd zingen:	**700 quanta/uur**	(Buonanno et al, 2020), (World Health Organization, 2021) zie verder par. 4.1.2.
		Dansen & 25% van de tijd zingen:	**200 quanta/uur**	
		Stil zitten & praten:	**50 quanta / uur**	
P	Ademvolume gezonde personen	Dansen & zingen:	**0,6 m^3/uur**	Zie par. 4.1.3.
		Stil zitten & praten:	**0,5 m^3/uur**	(CARB, 1993), zie par. 4.1.3.
t	Blootstellingsduur	**3 uur**		Keuze vanuit Fieldlab Evenementen, zie verder par. 4.1.4.
m1	Filterefficiëntie mondkapje bij geïnfecteerde	**Mondneusmaskers worden niet gebruikt (0%)**		Zie paragraaf 4.1.5.
m2	Filterefficiëntie mondkapje bij gezonde personen	**Mondneusmaskers worden niet gebruikt (0%)**		
P(inf)	Aerosol besmettingskans	**≤5 %**		Keuze, zie paragraaf 4.1.6 voor onderbouwing.

4.1.1 Uitgangspunt aantal geïnfecteerde personen (I)

Voor het te verwachten aantal geïnfecteerde personen wordt aansluiting gezocht bij de risiconiveaus van het Coronadashboard van de Rijksoverheid (Rijksoverheid, 2021), zie figuur 2. Het dashboard definieert aan de hand van het aantal positieve coronatesten 4 risiconiveaus: Waakzaam, Zorgelijk, Ernstig en Zeer Ernstig. De ventilatie-eisen in deze richtlijn zijn gericht op de bovengrens van risiconiveau zorgelijk: 100 positieve testen per 100.000 inwoners. Bij deze besmettingsgraad kan verwacht worden dat 1:1.000 bezoekers geïnfecteerd is (als er geen gebruik wordt gemaakt van toegangstesten). Bij risiconiveaus Ernstig en Zeer Ernstig zal het aantal geïnfecteerde bezoekers hoger liggen dan 1:1.000 en bieden de ventilatie-eisen onvoldoende bescherming tegen aerogene overdracht. Toegangstesten moeten er dan voor zorgen dat geïnfecteerde bezoekers worden geweerd en het aantal geïnfecteerde bezoekers achter de voordeur lager is dan 1:1.000.



figuur 2. De signaalwaarden per risiconiveau van het Corona Dashboard Rijksoverheid (Rijksoverheid, 2021).

4.1.2 Uitgangspunt emissie infectieuze deeltjes (q)

De quantaproductie (q) is gebaseerd op onderzoek van Buonanno et al (Buonanno et al, 2020). Bij de berekeningen in deze richtlijn worden de P95-waardes uit het onderzoek van Buonanno et al gehanteerd voor de virusemissie:

- Stil zitten en praten: 25 quanta per uur
- Dansen en 25% van de tijd meezingen: 100 quanta per uur
- Dansen en 100% van de tijd meezingen: 340 quanta per uur

Opgemerkt wordt dat Buonnanno et al de quantaproductie op twee manieren heeft berekend:

- *Prospectief vanuit microbiologisch oogpunt*. Hierbij is eerst berekend wat het volume is van druppels / aerosolen die worden uitgeademd bij ademen, praten en zingen. Vervolgens is dit vermenigvuldigd met de virusconcentratie die bij presymtomatische patiënten wordt aangetroffen in de neuskeelholte (10^8 RNA-kopieën per ml met een standaardafwijking van 0,7 log 10 [2]) om de virale emissie te bepalen. Om dit vervolgens uit te kunnen drukken in infectieuze doses (quanta), is een infectiviteitsfactor van 0,025 (standaardafwijking 0,125)

[2] Een recente review laat zien dat de 90e percentielwaarde van de virusconcentratie in de neuskeelholte bij presymptomatische patiënten tussen 10^9 en 10^{10} RNA-kopieën per ml ligt (Chen et al., 2020). Dit betekent dat de door Buonnano et al gebruikte uitgangspunten relatief conservatief zijn.

gebruikt op basis van de infectiviteit van HCoV-229E bij mensen en MHV-1 bij muizen. Met een Monte Carlo analyse is vervolgens onderzocht wat de resulterende quantawaardes zijn bij verschillende aannames voor bijvoorbeeld ademvolume.
- *Retrospectief vanuit epidemiologisch oogpunt*. Hierbij is op basis van 2 uitbraakclusters met de Wells-Riley berekening uit hoofdstuk 2 bekeken wat de verwachte quantaproductie moet zijn geweest als men uit gaat van één geïnfecteerde en kijkt naar het aantal besmette personen. Op basis van het retrospectieve onderzoek concludeert Buonnano et al dat respectievelijk de 92^{e} en 93^{e} percentielwaardes voor de quantaproductie het beste pasten op het besmettingspatroon bij de twee onderzochte clusters. Dit bevestigd dat het uitgangspunt om de P95 waardes in deze richtlijn te gebruiken, een goede aanname is.

In bijlage 1 bij dit rapport wordt in detail toegelicht hoe de quantaproductie door Buonnanno et al is berekend.

De door Buonnanno et al berekende quantawaardes waren gebaseerd op de originele variant van het SARS-CoV-2 virus. In juli 2021 is de delta-variant van het virus aan een opmars bezig in Nederland. Op basis van onderzoek in India schat de WHO in dat deze variant een 97% hogere R-waarde heeft dan het oorspronkelijke SAR-CoV-2 virus (World Health Organization, 2021). Om rekening te houden met de verhoogde besmettelijkheid van de deltavariant zijn de quantawaardes van Buonnano et al verdubbeld. De volgende waardes worden aangehouden in de Ventilatierichtlijn Evenementen:
- Stil zitten en praten: 50 quanta per uur
- Dansen en 25% van de tijd meezingen: 200 quanta per uur
- Dansen en 100% van de tijd meezingen: 700 quanta per uur

4.1.3 Uitgangspunt ademvolume gezond persoon (P)

Het ademvolume is van meerdere factoren afhankelijk zoals het activiteitsniveau, het geslacht en het lichaamsgewicht. Omdat de ventilatie-eisen uit deze richtlijn toepasbaar moeten zijn bij een brede range van bezoekers aan evenementen, wordt hier uitgegaan van de worst-case situatie.

Het ademvolume voor *zittende personen* is gebaseerd op het onderzoek van the Californian Air Resources Board (CARB) uit 1993. In dit onderzoek is bij 160 personen het ademvolume gemeten bij verschillende activiteiten (CARB, 1993). De gemeten waardes worden in tabel 3 weergegeven. Uitgaande van de worst case situatie wordt in deze richtlijn uitgegaan van het gemiddeld ademvolume bij zittende mannen: 8,9 l/min of 0,5 m^3/uur. Dit uitgangspunt komt overeen met het ademvolume dat Buonnano et al in hun onderzoek heeft gehanteerd bij de bepaling van de quantaproductie voor zittende personen (Buonanno et al, 2020).

Het ademvolume voor *dansende personen* laat zich moeilijker bepalen omdat dit sterk afhankelijk is van het activiteitsniveau van de dansende personen. Zo zal een meewiegende bezoeker aan een concert eerder een metabolisme en ademvolume hebben dat te vergelijken is met dat van een stilstaand persoon (11 l/min zie tabel 3). In het Exposure Factors Handbook (EPA, 2011) berekend de Amerikaanse EPA dat het ademvolume van dansende personen ca. 25 l/min (=1,5 m^3/uur) is, zie tabel 4. Hierbij gaat men er vanuit dat het activiteitsniveau bij dansen grofweg 1,5-3 keer het rustmetabolisme is (in METS). Metingen van het ademvolume bij sporters die op

relatief lage snelheid fietsen laat ademvolumes rond de 40 l/min (=2,4 m^3/uur) zien (Cruz et al, 2015).

tabel 3. Gemiddeld ademvolume (V_E in l/min) bij verschillende activiteiten (CARB, 1993).

ACTIVITY		Young Children	Children	Adult Females	Adult Males
Lying		6.19	7.51	7.12	8.93
Sitting		6.48	7.28	7.72	9.30
Standing		6.76	8.49	8.36	10.65
Walking:	1.5 mph	10.25	DNP	DNP	DNP
	1.875 mph	10.53	DNP	DNP	DNP
	2.0 mph	DNP	14.13	DNP	DNP
	2.25 mph	11.68	DNP	DNP	DNP
	2.5 mph	DNP	15.58	20.32	24.13
	3.0 mph	DNP	17.79	24.20	DNP
	3.3 mph	DNP	DNP	DNP	27.90
	4.0 mph	DNP	DNP	DNP	36.53
Running:	3.5 mph	DNP	26.77	DNP	DNP
	4.0 mph	DNP	31.35	46.03*	DNP
	4.5 mph	DNP	37.22	47.86*	57.30
	5.0 mph	DNP	DNP	50.78*	58.45
	6.0 mph	DNP	DNP	DNP	65.66*

Young Children, male and female 3-5.9 yr olds; Children, male and female 6-12.9 yr olds; Adult Females, adolescent, young to middle-aged and older adult females; Adult Males, adolescent, young to middle-aged and older adult males; DNP, group did not perform this protocol or N was too small for appropriate mean comparisons; *, older adults not included in the mean value since they did not perform running protocol at particular speeds.

tabel 4. Inhalatievolume bij verschillende activiteiten volgens het EPA Exposure Factors Handbook (EPA, 2011).

Level of work	L/minute	Representative activities
Light	13	Level walking at 2 mph; washing clothes
Light	19	Level walking at 3 mph; bowling; scrubbing floors
Light	25	Dancing; pushing wheelbarrow with 15-kg load; simple construction; stacking firewood
Moderate	30	Easy cycling; pushing wheelbarrow with 75-kg load; using sledgehammer
Moderate	35	Climbing stairs; playing tennis; digging with spade
Moderate	40	Cycling at 13 mph; walking on snow; digging trenches
Heavy	55	Cross-country skiing; rock climbing; stair climbing
Heavy	63	with load; playing squash or handball; chopping
Very heavy	72	with axe
Very heavy	85	Level running at 10 mph; competitive cycling
Severe	100+	Competitive long distance running; cross-country skiing

[a] Average adult assumed to weigh 70 kg.

Het Compendium of Physical Activities (Ainsworth et al, 2020) verzamelt literatuur wat het activiteitsniveau (metabolisme) van verschillende acitiviteiten laat zien. Voor discodansen en volksdansen geeft het compendium op basis van 6 studies een gemiddeld metabolisme van 7,8 Met. Door de formules van Persily & De Jonge (Persily & De Jonge, 2017) en Holmann (Holmann, 1985) samen te voegen kan op basis van het metabolisme het ademvolume worden berekend met de onderstaande formule. Uitgaande van een basaal metabolisme van 6,94 MJ/dag (Persily &

De Jonge, 2017) en het metabolisme van 7,8 Met voor dansen, komt het te verwachten ademvolume rond de 2,3 m^3/uur.

$$P = 25 \cdot 3{,}6 \cdot \mathrm{BMR} \cdot \mathrm{M} \cdot 0{,}484 \cdot 10^{-3} \qquad (8)$$

P =	ademvolume	[m^3/uur]
BMR =	basaal metabolisme	[MJ/dag]
M =	activiteitsniveau	[Met]

Uitgaande van een luchtdruk van 101 kPa, een luchttemperatuur van 273K en een RQ (respiratory coefficient) van 0,85.

In de conceptversie van de ventilatierichtlijn is op basis van deze uitgangspunten in eerste instantie uitgegaan van een ademvolume van 2 m^3/uur per persoon voor bezoekers van actieve evenementen waar gedanst wordt. Onderzoek tijdens één van de Fieldlab evenementen (in een discotheek) heeft laten zien dat het werkelijke metabolisme van de dansende bezoekers eerder in de buurt van 1,6-1,8 Met lag, een factor 5 lager. In de definitieve versie van de Ventilatierichtlijn Evenementen wordt daarom uitgegaan van een activiteitsniveau van 1,8 Met voor dansende bezoekers. Bij 1,8 Met is het ademvolume volgens formule 8 ≈ 0,6 m^3/uur.

4.1.4 Uitgangspunt blootstellingsduur (t)

Voor de blootstellingsduur (t) wordt uitgegaan van 3 uur. Dit uitgangspunt is in overleg met Fieldlab Evenementen vastgesteld als gangbaar uitgangspunt voor de gemiddelde duur van een evenement.

Merk op dat een evenement dat langer duurt dan 3 uur een *grotere* aerosol besmettingskans met zich mee brengt terwijl er bij een evenement met een verblijfstijd korter dan 3 uur een kleinere besmettingskans is.

4.1.5 Uitgangspunt filterefficiëntie mondneusmaskers (m_1 en m_2)

In de concept Ventilatierichtlijn is in eerste instantie rekening gehouden met het gebruik van mondneusmaskers. Tijdens de Fieldlab Evenementen bleek echter dat veel bezoekers de mondkapjes afzetten, al was het maar omdat het lastig is om te drinken met een mondkapje. In de definitieve Ventilatierichtlijn wordt er daarom vanuit gegaan dat er geen mondneusmaskers worden gedragen. Hieronder wordt toegelicht welke waarde men voor de filterefficiëntie van de mondkapjes aan kan houden als men voor een specifiek evenement toch mondkapjes toe wil passen.

Laboratoriumonderzoek waarbij twee ademende mannequins afwisselend wel en niet een mondneusmasker dragen, wijst uit dat alleen N95 respirators bescherming tegen inademing van (besmette) aerosolen bieden (Patel et al, 2016). Aangezien N95 respirators op dit moment bedoeld zijn voor de medici c.q. het overall advies t.a.v. mondkapjes is om niet-N95 maskers te gebruiken, zijn we er in deze richtlijn verder vanuit gegaan dat het dragen van mondneusmaskers gezonde personen verder niet beschermt als het gaat om het inademen van door anderen uitgestoten (besmette) aerosolen (m2 =0).

Patel et al laten wel zien dat de virusemissie aan de *bron*kant gereduceerd kan worden met een goed 3 laags chirurgisch masker (type II of IIR), zoals bv. bij apotheek of HEMA te verkrijgen voor minder dan een euro per stuk. Een mondneusmasker wat slecht aansluit houdt bij de bron ongeveer 5-20% van de aerosolen tegen. Een goed aansluitend chirurgisch mondneusmasker houdt ca. 50% van de virusemissie tegen. Bij hoesten wordt volgende de onderzoekers zelfs 100% van de aerosolen afgevangen door het masker. Daar waar het gaat om het blokkeren van aerosolen (en grotere druppels) in de ademzone van besmette personen (bron kant) is de aanname dus dat e.e.a. wel werkt c.q. er een factor 2 lagere virus emissie is als er mondneuskapjes (op de goede manier) gedragen worden.

Mansour en Smaldone geven aan dat in het onderzoek van Patel et al gebruik is gemaakt van harde mannequins en dat dit mogelijk heeft gezorgd voor de slechte aansluiting van de mondneusmaskers op de mannequins (met als gevolg dat de filterefficiëntie slechter lijkt dan het in werkelijkheid is). Zij hebben het onderzoek van Patel et al herhaald maar dan zachte mannequins gebruikt die dus beter lijken op de werkelijke structuur van iemands gezicht (Mansour & Smaldone, 2012). Mansour en Smaldone bevestigen de eerder genoemde bevinding dat alleen een goed aansluitende N95 mondneusmasker enige bescherming biedt aan de drager als het gaat om het voorkomen van inademing van besmette personen die door anderen verspreid zijn (ontvanger kant). Voor de reductie aan de bronkant vinden zij echter een filterefficiëntie van vrijwel 100% voor twee verschillende 3-laagse chirurgische mondneusmaskers. Dit betekent dat de chirurgische mondneusmaskers de virusemissie in theorie met 100% kunnen reduceren.

In deze richtlijn wordt een wat conservatievere aanname gedaan voor de filterefficiëntie van mondneusmaskers bij de bron om rekening te houden slecht afsluitende mondneusmaskers in de praktijk. Uitgegaan is van een 50% reductie van de virusemissie bij de bron (m_2) en 0% reductie aan de kant van de ontvanger (m_1).

4.1.6 Uitgangspunt toelaatbare besmettingskans (P_{inf})

Het doel van de Wells-Riley berekening is om te bepalen bij welke ventilatiehoeveelheid er sprake is van een voldoende lage aerosol besmettingskans in relatie tot COVID-19. Hiervoor zal bepaald moeten worden wat een voldoende lage aerosol besmettingskans (P_{inf}) is om te kunnen spreken van een 'acceptabel risico'.

Op het moment van schrijven bestaan er nationaal of internationaal geen duidelijke grenswaardes voor de aan te houden besmettingskans. Als we een grove indeling maken, dan kunnen we stellen dat de besmettingskans in ieder geval onacceptabel hoog is op het moment dat de besmettingskans 30% of hoger is. Een acceptabele kans zal ergens onder de 10% liggen.

In deze richtlijn is ervoor gekozen om een grenswaarde van maximaal **5%** aan te houden als toelaatbare besmettingskans. Uiteraard kan deze grenswaarde worden bijgesteld in overleg met de Rijksoverheid als een hoger of lager veiligheidsniveau gewenst is.

Ter vergelijking wordt in tabel 5 berekend wat de te verwachten aerosol besmettingskans is als men bij evenementenruimten alleen de eisen uit het Bouwbesluit voor bijeenkomstfuncties zou

hanteren (2,12 l/s per persoon voor bestaande bouw en 4 l/s per persoon voor nieuwbouw). Dit is relevant omdat dat het beschermingsniveau is dat door het RIVM impliciet als acceptabel wordt beschouwd (zie hoofdstuk 2).

Tabel 5 laat zien dat in de concertzalen sprake is van een aerosol besmettingskans van 6-8% (ventilatie conform Bouwbesluit 2012 nieuwbouw bijeenkomstruimten) tot 10-15% (ventilatie conform Bouwbesluit bestaande bouw bijeenkomstruimten) als de eisen van het Bouwbesluit gehanteerd worden en men 1,5m afstand houdt. Dit laat zien dat het uitgangspunt voor de toelaatbare besmettingskans (max. 5%) een hoger veiligheidsniveau nastreeft dan het RIVM nu vereist. Conclusie: voorstel van de eerder genoemde 5% besmettingskans als grenswaarde biedt een hoger niveau van veiligheid dan de huidige Bouwbesluiteisen en vormt daarmee een verantwoord en conservatief uitgangspunt.

tabel 5. Berekende COVID-19 aerosol besmettingskans in concertzalen (dansen & zingen) die voldoen aan de Bouwbesluiteisen en waar men 1,5m afstand houdt.

	Vloeroppervlakte	Hoogte	Aantal bezoekers	Verwacht aantal geïnfecteerden	Quantaproductie per geïnfecteerde	Ventilatie cf. BB 2012 nieuwbouw	Aerosol besmettingskans	Ventilatie cf. BB 2012 bestaand	Aerosol besmettingskans
	[m^2]	[m]	[-]	[-]	[quanta/uur]	[m^3/uur]	[%]	[m^3/uur]	[%]
Grote concertzaal	10.000	8	6.250	6	700	90.000	**8%**	47.700	**15%**
Middelgrote concertzaal	5.000	8	3.125	3	700	45.000	**8%**	23.850	**15%**
Kleine concertzaal	2.500	8	1.562	1	700	22.500	**6%**	11.925	**10%**

4.2 Berekening COVID-19 specifieke ventilatie-eisen

Aan de hand van formule 6 uit paragraaf 4.1.5 kan berekend worden hoeveel ventilatie nodig is om de aerosol besmettingskans voor COVID-19 onder 5% te houden. Als we de inputparameters uit paragraaf 4.1 invullen in formule 6, dan levert dit het overzicht op uit tabel 6.

tabel 6. Benodigde ventilatiehoeveelheid (Q+F) om de COVID-19 aerosol besmettingskans tot een acceptabel niveau (5%) te beperken bij een verblijfsduur van 3 uur. Bij dansen en zingen is uitgegaan van een verhoogde virusproductie van 200 quanta/uur, bij stil zitten is dit slechts 50 quanta/uur.

	risiconiveau 2: zorgelijk ≤100:100.000 positieve testen per week 1 geïnfecteerde per 1.000 bezoekers		
Type evenement:	**Type II / IV: 100% van de tijd meezingen**	**Type II / IV: Dansen en 25% van de tijd meezingen**	**Type I: Stil zitten of staan**
Benodigde ventilatie-hoeveelheid (Q+F):			
per **geïnfecteerd** persoon (= absolute ondergrens ventilatie):	**≥25.000 m^3/uur**	**≥7.500 m^3/uur**	**≥1.500 m^3/uur**
Per bezoeker: (>1.100 bezoekers)	24 m^3/uur	7 m^3/uur	1,4 m^3/uur

De vereiste hoeveelheid luchtverversing is afhankelijk van het aantal **geïnfecteerde personen tijdens een evenement**. Dit is logisch omdat de virusconcentratie in de binnenlucht volgt uit de verhouding tussen de hoeveelheid virusdeeltjes die per tijdseenheid vrij komen en de hoeveelheid virusdeeltjes die in diezelfde tijdseenheid worden afgevoerd via ventilatie of filtratie. Dit is met name relevant voor de kleinere evenementen. Een voorbeeld: stel dat er een evenement is met 100 personen waarbij de bezoekers 25% van de tijd staan te zingen. Dan is daar volgens bovenstaande tabel 24 * 100 = 2.400 m^3/uur ventilatie nodig als we naar de persoonsgebonden eis kijken. Mocht er echter een geïnfecteerd persoon binnen komen, dan is er minimaal 7.500 m^3/uur ventilatie nodig om de aerogene besmettingskans tot een acceptabel niveau te beperken. Door bij kleine evenementen uit te gaan van de persoonsgebonden ventilatie-eis, wordt dus niet het gewenste veiligheidsniveau bereikt. Vandaar dat er naast de persoonsgebonden ventilatie-eis ook een absolute ondergrens voor de minimum hoeveelheid ventilatie geldt. Deze minimum ondergrens houdt er rekening mee dat er altijd tenminste één geïnfecteerd persoon binnen kan komen.

5 Vergelijking bestaande ventilatie-eisen en resultaten Wells-Riley analyse

Om een indruk te krijgen van de verhouding tussen de bestaande eisen uit hoofdstuk 2 en de met de Wells-Riley berekende eisen uit paragraaf 4.2, worden in figuur 3 & 4 alle eisen vergeleken.

Figuur 3 geeft de vergelijking weer voor evenementen tot 1.000 bezoekers, figuur 4 geeft de situatie weer voor evenement vanaf 1.000 bezoekers. Met de rode lijnen wordt de vereiste ventilatiehoeveelheid aangegeven die nodig is om de aerosol besmettingskans onder 5% te houden voor de situatie met dansen en zingen zonder een mondkapje, dansen en zingen met mondkapje en voor de situatie stil zitten. De staven geven de vereiste ventilatiehoeveelheid aan conform de wettelijke eisen. De figuren kunnen als volgt gelezen worden:

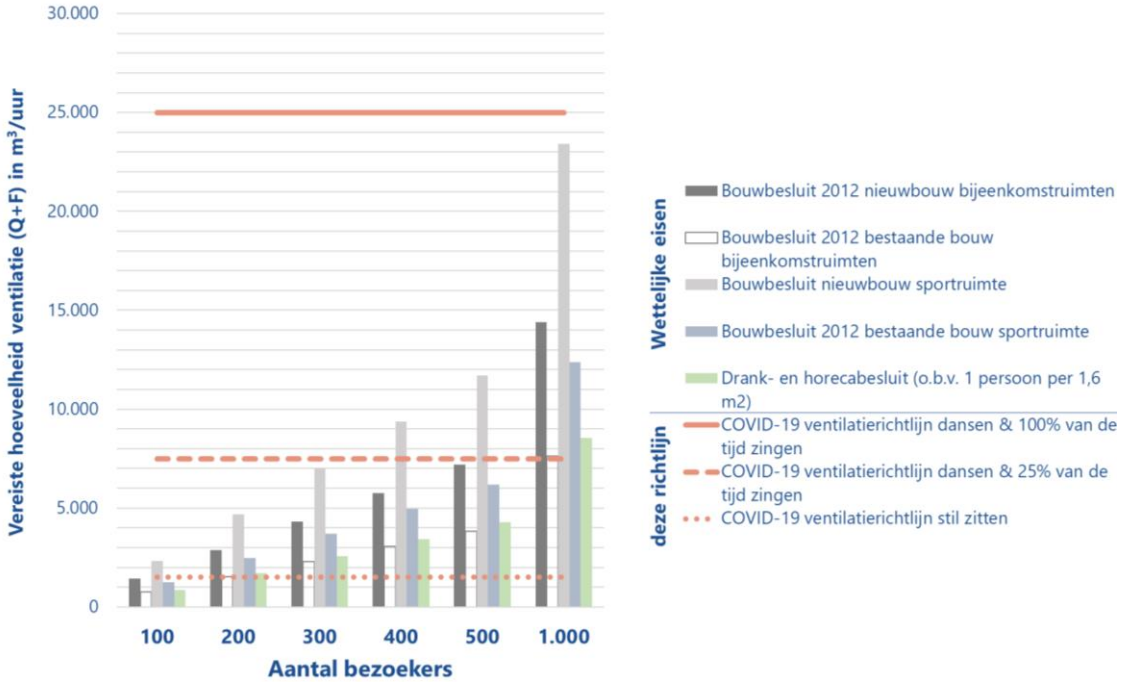
- Wanneer de staven *boven* de rode grenslijnen komen, dan vereist de wet meer ventilatie dan nodig is om de aerosol besmettingskans op 5% te brengen. De wettelijke eisen bieden dan dus voldoende veiligheid.
- Wanneer de staven *onder* de rode grenslijnen komen, dan is extra ventilatie nodig om de aerosol besmettingskans op 5% te brengen. De wettelijke eisen bieden dan onvoldoende veiligheid.

Uit figuur 3 kan worden afgelezen dat voor kleine evenementen (<1.000 personen):

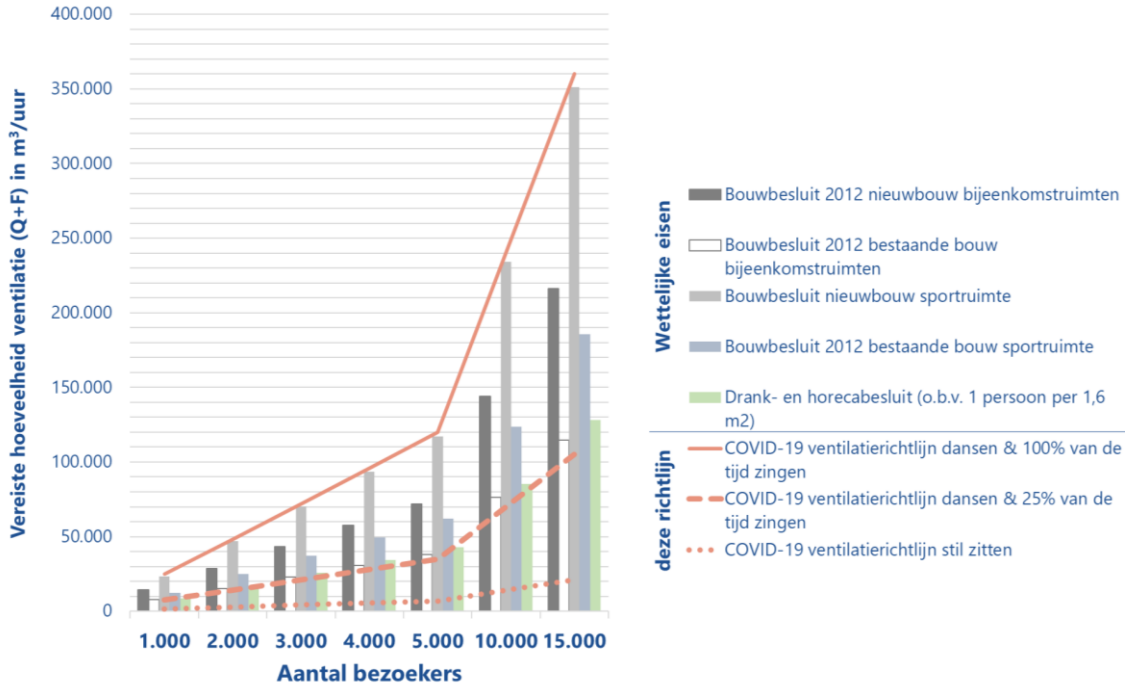
- Bij dansen en 100% van de tijd meezingen *meer* ventilatie nodig is dan de wettelijke eisen om de aerosol besmettingskans onder de 5% te brengen. Vanaf 1.000 personen biedt de Bouwbesluiteis voor nieuwbouw sportruimten (6,5 dm^3/s per persoon) voldoende veiligheid, de andere wettelijke eisen leiden ook bij 1.000 bezoekers nog tot te lage ventilatiehoeveelheden.
- Bij dansen en 25% van de tijd meezingen biedt de Bouwbesluiteis voor nieuwbouw sportruimten (6,5 l/s per persoon) voldoende veiligheid vanaf 300 bezoekers, vanaf 1.000 bezoekers biedt de Bouwbesluiteis voor bijeenkomstruimten ook voldoende veiligheid.
- Bij stil zitten bieden de wettelijke eisen vanaf 200 bezoekers voldoende veiligheid. Onder de 200 bezoekers is meer ventilatie nodig dan wettelijk vereist om de aerosol besmettingskans op een acceptabel niveau te brengen.

Uit figuur 4 kan worden afgelezen dat bij grote evenementen (>1.000 personen):

- Bij dansen en zingen de Bouwbesluiteis voor nieuwbouw sportruimten (6,5 dm^3/s per persoon) en de eis voor nieuwbouw bijeenkomstruimten (4 dm^3/s per persoon) voldoende veiligheid bieden.
- Bij stil zitten geven alle wettelijke eisen voldoende veiligheid vanaf 1.000 bezoekers.



figuur 3. Vergelijking tussen de ventilatie-eisen uit deze richtlijn en de beschikbare wettelijke eisen uit het Bouwbesluit en het Drank- en Horecabesluit voor evenementen tot 1.000 bezoekers. Merk op dat de benodigde hoeveelheid ventilatie om aerogene overdracht van COVID-19 te voorkomen bij bezoekersaantallen tot 1.000 bezoekers gelijk blijft (horizontale rode lijnen). Dit heeft ermee te maken dat er bij deze lage bezoekersaantallen vanuit wordt gegaan dat tenminste 100:100.000 (=1:1.000) bezoekers geïnfecteerd zijn met een minimum van tenminste één geïnfecteerd persoon. Bij bezoekersaantallen onder 1.000 bezoekers wordt dus uitgegaan van één geïnfecteerd persoon en is de benodigde hoeveelheid ventilatie, die wordt afgestemd op het aantal geïnfecteerde personen, hetzelfde.



figuur 4. Vergelijking tussen de ventilatie-eisen uit deze richtlijn en de beschikbare wettelijke eisen uit het Bouwbesluit en het Drank- en Horecabesluit voor evenementen vanaf 1.000 bezoekers. Merk op dat zowel de horizontale als verticale as een andere schaal hebben dan bij figuur 3.

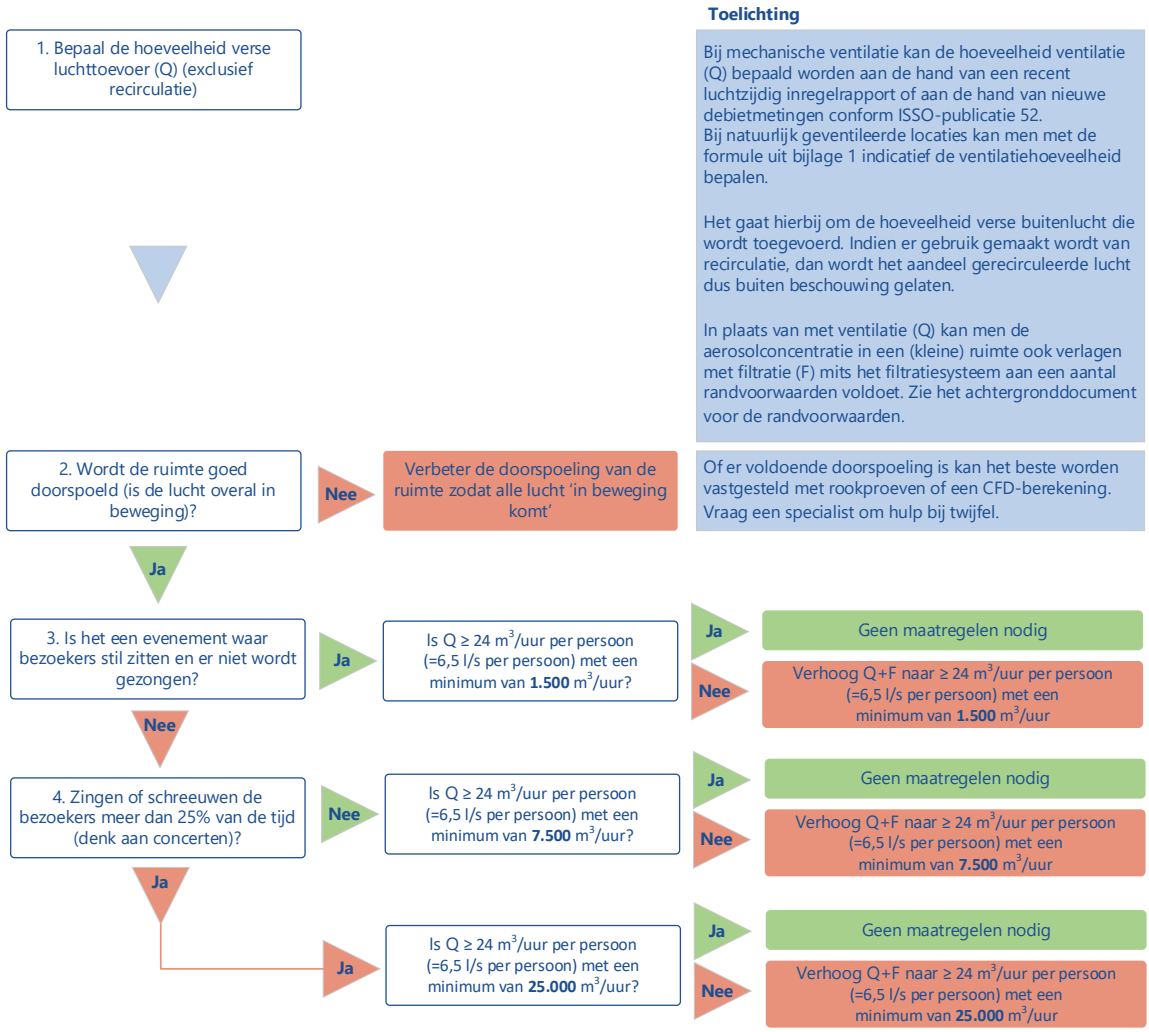
Om met deze COVID-19 ventilatierichtlijn aan te sluiten bij de geldende wettelijke ventilatie-eisen wordt voorgesteld om:

- Voor evenementen waar *gedanst en / of gezongen* wordt, de nieuwbouweisen uit Bouwbesluit 2012 voor sportruimten als basis te nemen (6,5 dm^3/s per persoon ≈ 24 m^3/uur). Bij kleine evenementen (<1.000 bezoekers) is dit onvoldoende en zal een aanvullende vangneteis gesteld moeten worden:
    - minimaal 25.000 m^3/uur als er 100% van de tijd wordt meegezongen.
    - minimaal 7.500 m^3/uur als er 25% van de tijd wordt meegezongen.
- Voor evenementen waar men *stil zit*, bieden alle wettelijke ventilatie-eisen vanaf 200 bezoekers voldoende bescherming. Voor evenementen met minder dan 200 bezoekers is dit onvoldoende en zal een aanvullende vangneteis gesteld moeten worden: minimaal 1.500 m^3/uur.

In hoofdstuk 6 worden de bovenstaande eisen weergegeven in een stroomschema zodat het makkelijk is om te controleren of de COVID-19 aerosol besmettingskans bij een evenementlocatie tot een acceptabel niveau beperkt is.

6 Stroomschema beoordeling COVID-19 aerosol besmettingskans

Om te beoordelen of de COVID-19 aerosol besmettingskans tijdens een evenement op een acceptabel niveau is, kan de vereenvoudigde rekenmethode uit dit hoofdstuk worden gebruikt. Hiervoor dienen de volgende stappen te worden doorlopen:



Flowchart 1: diagram ter bepaling van de minimaal benodigde verse luchttoevoer tijdens een evenement. Randvoorwaarde is dat het aantal geïnfecteerden binnen niet meer is dan 1:1000 (te waarborgen middels toegangstesten).

7 Waarborging aan de hand van CO_2-metingen

Hoofdstuk 6 geeft een minimum ventilatiehoeveelheid die nodig is om de overdracht van COVID-19 via de aerosolroute tot een acceptabel niveau te beperken. In de praktijk kunnen er situaties zijn waarbij de ventilatiehoeveelheid varieert. Bijvoorbeeld omdat de ventilatie afhankelijk is van de wind en aanwezigheid van personen (denk aan natuurlijk geventileerde festivaltenten). Maar ook bij mechanische ventilatie komt het voor dat een luchtbehandelingskast in storing valt zonder dat iemand het in de gaten heeft (met geen ventilatie als gevolg). In dergelijke gevallen is het handig als er een monitoringssysteem is dat continu laat zien of er voldoende ventilatie is om aan de eisen uit hoofdstuk 6 te voldoen.

Eén van de manieren om de ventilatiehoeveelheid continu te monitoren is door de CO_2-concentratie in de ruimte te meten. In dit hoofdstuk wordt uitgelegd hoe men aan de hand van CO_2-metingen kan waarborgen dat er voldoende ventilatie is om aan de eisen van hoofdstuk 6 te voldoen. In paragraaf 7.1 wordt de rekenmethode toegelicht die hieraan ten grondslag ligt. In paragraaf 7.2 wordt toegelicht hoe men in de praktijk met CO_2-metingen kan waarborgen dat aan de ventilatie-eisen uit hoofdstuk 6 wordt voldaan.

7.1 Achtergrond CO_2-monitoring

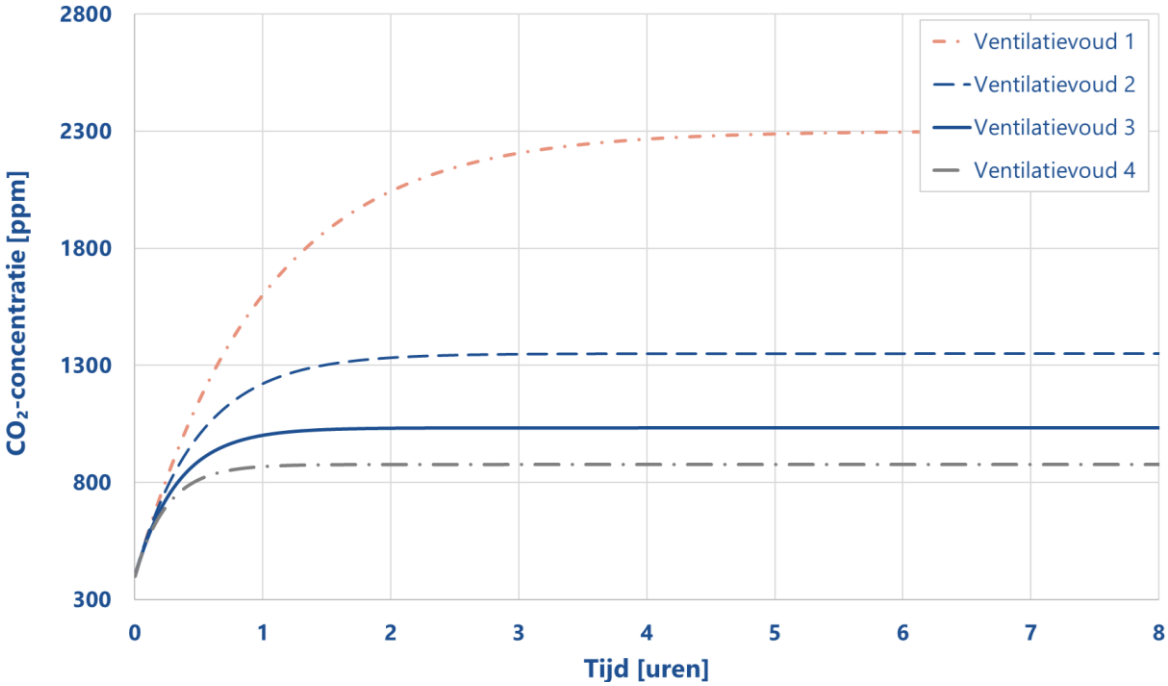
Het idee achter CO_2-monitoring is dat er een verband is tussen de CO_2-concentratie in een ruimte, het aantal aanwezige personen en de ventilatiecapaciteit. Dit werkt als volgt: personen ademen CO_2 uit wat deels wordt afgevoerd via ventilatie. Na verloop van tijd ontstaat een evenwichtsconcentratie (steady state concentratie) waarbij de personen net zoveel CO_2 produceren als er wordt afgevoerd via ventilatie. Hoe meer ventilatie of des te minder personen, hoe lager de evenwichtsconcentratie. Bij weinig ventilatie of een relatief hoge bezetting is er sprake van een hoge evenwichtsconcentratie.
Als men weet hoeveel personen er zijn en men weet hoeveel ventilatie er zou moeten zijn, dan kan berekend worden wat de CO_2-evenwichtsconcentratie zal zijn. Door in de praktijk de CO_2-concentratie te meten kan men vervolgens beoordelen of er voldoende ventilatie is:

- Als de gemeten CO_2-concentratie *boven* de berekende evenwichtsconcentratie ligt, dan is er *onvoldoende* ventilatie voor het aantal aanwezige personen.
- Als de gemeten CO_2-concentratie *onder* de berekende evenwichtsconcentratie ligt, dan is er *voldoende* ventilatie voor het aantal aanwezige personen.

Het is belangrijk om te realiseren dat het even duurt voordat de CO_2-concentratie in een ruimte de evenwichtsconcentratie heeft bereikt. Des te sneller de lucht in een ruimte wordt ververst, des te sneller wordt de evenwichtsconcentratie bereikt. De snelheid waarmee de lucht in een ruimte wordt ververst wordt uitgedrukt in ventilatievoud. Ventilatievoud is het aantal keer per uur dat de lucht in een ruimte wordt ververst (ventilatievoud = ventilatiehoeveelheid / ruimtevolume).

In figuur 5 wordt op basis van het ventilatievoud aangegeven hoe snel de CO_2-evenwichtsconcentratie in een ruimte wordt bereikt. Zoals te zien is in de figuur wordt de CO_2-evenwichtsconcentratie bij ruimten met een ventilatievoud van 2 of hoger grofweg binnen het uur bereikt. Uitgaande van een gemiddelde evenementduur van 3 uur, is de CO_2-evenwichtsconcentratie dus een goede indicator voor de hoeveelheid ventilatie tijdens een evenement.

Bij evenementenlocaties met een ventilatievoud lager dan 2 wordt de CO_2-evenwichts-concentratie pas na 2-3 uur bereikt. Dit betekent dat de CO_2-concentratie het hele evenement onder de evenwichtsconcentratie ligt en de evenwichtsconcentratie dus geen goed indicator is van de hoeveelheid ventilatie. Om in dergelijke situaties op basis van de CO_2-concentratie de ventilatiehoeveelheid te monitoren zou men dus per tijdseenheid moeten berekenen wat de te verwachten CO_2-concentratie op dat moment is (op uur 1 is het maximaal 1500 ppm, op uur 2 maximaal 2000 ppm enz.). Dit maakt de praktische toepassing van CO_2-monitoring bij evenementenlocaties met een ventilatievoud < 2 complex. Omdat de ventilatie-eisen uit hoofdstuk 5 er ook toe leiden dat bij een redelijke persoonsbezetting al een ventilatievoud van 2 of hoger vereist is, wordt de dynamische berekening in deze richtlijn verder buiten beschouwing gelaten.



figuur 5. Relatie tussen het ventilatievoud van een ruimte en het verloop van de CO_2-concentratie in die ruimte. In het voorbeeld is een ruimte gebruikt met een inhoud van 10.000 m^3 en 780 dansende bezoekers (Met = 2).

Bij ruimten met een ventilatievoud van 2 of hoger kan de CO_2-evenwichtsconcentratie als volgt worden berekend (ASHRAE, 2013):

$$C_s = \left(\frac{N}{V_o}\right) * 10^6 + C_o \qquad (7)$$

C_s	=	CO_2-evenwichtsconcentratie in de ruimte	[ppm]
N	=	CO_2-productie per persoon	[l/s per persoon]
V_o	=	verse luchttoevoerhoeveelheid per persoon	[l/s per persoon]
C_o	=	CO_2-concentratie in de buitenlucht	[ppm]

De CO_2-productie per persoon (*N*) is net als het ademvolume (zie paragraaf 4.1.3) afhankelijk van het activiteitsniveau (metabolisme) van de bezoekers, hun leeftijd, hun gewicht en hun geslacht. In tabel 7 wordt ter referentie de CO_2-productie van mannen in de leeftijd tussen 21 en 60 jaar weergegeven bij activiteitsniveaus tussen 1 en 4 Met. Voor stil zitten wordt normaal gesproken een metabolisme van 1,2 Met aangehouden. Dit betekent dat voor stil zitten een CO_2-productie van (0,0046+0,0036)/2 = 0,0041 l/s aangehouden mag worden.

tabel 7. CO_2-productie van mannen en vrouwen in de leeftijd 21 tot 60 jaar bij 273 K en 101 kPa (Persily & De Jonge, 2017).

			CO_2 generation rate (L/s)						
			Level of physical activity (met)						
Age (y)	Mean body mass (kg)	BMR (MJ/day)	1.0	1.2	1.4	1.6	2.0	3.0	4.0
Males									
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
Females									
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

Voor *dansen* is het lastiger om een CO_2-productie te bepalen. Zoals beschreven in paragraaf 4.1.3. zal het metabolisme bij dansen ergens tussen 1,5 en 7,8 Met liggen afhankelijk de intensiteit van de activiteit. Omdat de hier te berekenen CO2-concentraties bedoeld zijn om de hoeveelheid ventilatie te waarborgen, wordt voorgesteld om een conservatieve aanname te gebruiken voor het activiteitsniveau. Voorstel is om hiervoor 2,5-3 Met aan te houden als uitgangspunt.

Persily & De Jonge geven de volgende formule om de CO_2-productie bij hoge metabolismewaardes uit te rekenen (Persily & De Jonge, 2017):

$$N = RQ \cdot BMR \cdot M \cdot 0{,}000569 \quad (8)$$

N	=	CO_2-productie per persoon	[l/s per persoon]
RQ	=	verhouding ingeademde zuurstof en uitgeademde CO_2	[-]
BMR	=	basaal metabolisme	[MJ/dag]
M	=	metabolisme bezoekers	[Met]

Uitgaande van een BMR van 6,94 MJ/dag (gemiddelde mannen en vrouwen), een RQ van 0,85 (Persily & De Jonge, 2017) en metabolismes tussen 2,5 en 3,0 Met levert formule 8 een CO_2-productie van respectievelijk 0,008 l/s (2,5 Met) tot 0,010 l/s (3 Met) op. Deze waarde is in de concept Ventilatierichtlijn aangehouden. Tijdens één van de Fieldlab evenementen bleek het activiteitenniveau van dansende bezoekers in een discotheek lager te zijn: ca. 1,8 Met. In de definitieve Ventilatierichtlijn wordt daarom uitgegaan van een activiteitsniveau van 1,8 Met voor dansende bezoekers. Bij dit activiteitsniveau hebben de bezoekers een CO_2-productie van 0,006 l/s per persoon.

In hoofdstuk 5 is voorgesteld om tenminste 24 m^3/uur ventilatie per persoon (≈6,5 l/s per persoon) aan te houden (bij bezoekersaantallen vanaf ca. 500 personen). In tabel 8 wordt op basis van formule 7 berekend wat de te verwachten CO_2-concentratie is in de verschillende situaties.

tabel 8. Verwachte CO_2-evenwichtsconcentratie op basis van de ventilatie-eisen uit hoofdstuk 5.

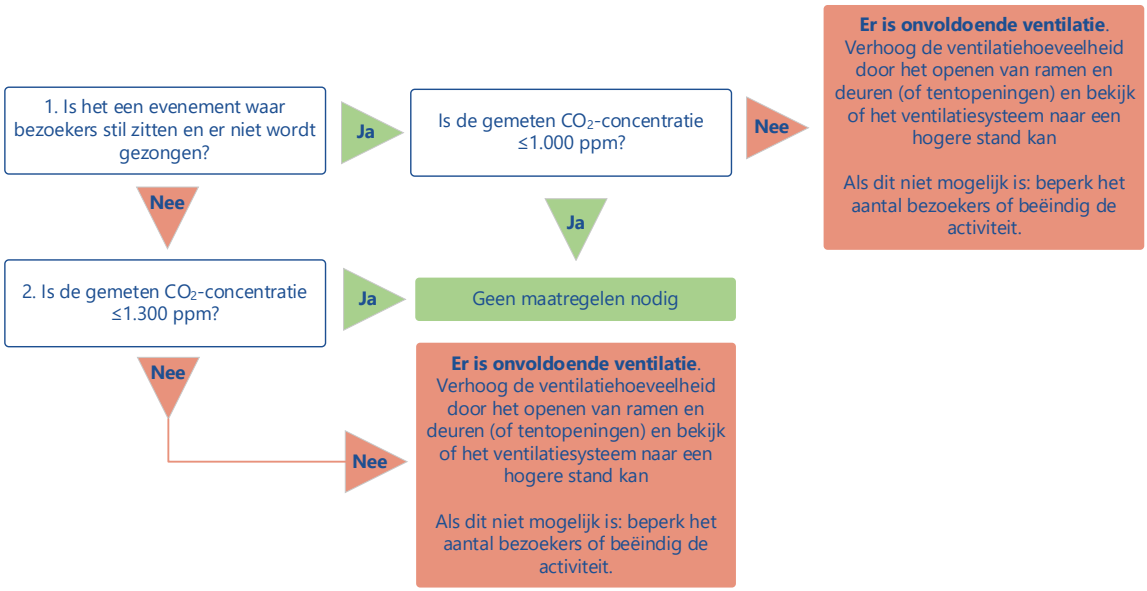
Activiteit bezoekers	CO_2-productie per persoon (*N*) [l/s]	Ventilatie-hoeveelheid per persoon (V_o) [l/s]	Aanname CO_2-concentratie buitenlucht (C_o) [ppm]	Maximale CO_2-evenwichtsconcentratie binnen (C_s) [ppm]
Stil zitten (aanname 1,2 Met)	0,004	6,5	400	1000
Dansen (aanname: 1.8 Met)	0,006	6,5	400	1300

Op basis van tabel 8 kan gesteld worden dat de COVID-19 aerosol besmettingskans acceptabel is als er bij een evenementenlocatie waar men *stil zit* een CO_2-concentratie van (afgerond) maximaal 1.000 ppm is (of: de buitenconcentratie + 600 ppm).
Bij een evenement waar *gezongen en gedanst* wordt, is de COVID-19 aerosol besmettingskans acceptabel als de CO_2-concentratie binnen onder (afgerond) 1.300 ppm ligt (of: de buitenconcentratie + 900 ppm).

Merk op dat de hier beschreven monitoringsmethode er puur op is gericht om te bepalen of de *ventilatie-eisen* uit hoofdstuk 5 worden gehaald. In theorie is het ook mogelijk om op basis van de gemeten CO_2-concentratie te berekenen welke fractie van de binnenlucht bestaat uit uitgeademende lucht en om op basis hiervan realtime te berekenen wat de ontvangen quantadosis per bezoeker is (Peng & Jimenez, 2020) (Rudnick & Milton, 2020). Vanwege het gegeven dat het zingen van bezoekers niet tot uiting komt in de CO_2-concentratie maar wel in de aerosolconcentratie (en dus de besmettingskans), is het onvoldoende om bij evenementen alleen op basis van CO_2-metingen de aerosol besmettingskans te bepalen.

7.2 Stroomschema CO_2-monitoring

Met het onderstaande stroomschema kan in de praktijk, in ruimten met minimaal 1.100 bezoekers, met CO_2-metingen gemonitord worden of er voldaan wordt aan de ventilatie-eisen uit hoofdstuk 5.



Flowchart 2: procedure om op basis van CO_2-duurmetingen te bepalen of er in een ruimte met meer dan 1.100 personen tijdens een evenement wordt voldaan aan de ventilatie-eisen uit Flowchart 1.

Bijlagen

Bijlage 1 Toelichting berekening quantaproductie COVID-19

Zoals beschreven in paragraaf 3.1.2 is de 'virusemissie' (q) gebaseerd op onderzoek van Buonanno et al (Buonanno et al, 2020). Hieronder wordt beschreven welke methode Buonanno et al hiervoor heeft gebruikt en hoe bba daar vervolgens de uitgangspunten voor de virusemissie van af heeft geleid.

Buonanno et al heeft eerst bekeken binnen welke range waardes voor de virusemissie / quantaproductie zouden kunnen liggen op basis van:

- De gemeten druppel- / aerosolproductie van personen bij verschillende activiteiten.
- De gemeten SARS-CoV-2 concentratie in de mond van symptomatische en asymptomatische patiënten.
- Een conversiefactor (de verhouding tussen de hoeveelheid uitgeademd virus en de infectieuze dosis) tussen 0,01 en 0,1 op basis van de bekende conversiefactoren voor HCoV-229E en MHV-1.

Omdat er onzekerheid is rondom de exacte waardes van de bovenstaande invoerparameters heeft Buonanno et al een hele range aan berekeningen uitgevoerd met verschillende uitgangspunten voor de bovenstaande parameters. Volgens de Monte Carlo methode is aan de uitgangspunten voor de invoerparameters een waarschijnlijkheidkans gekoppeld: hoe extremer de uitgangspunten, des te onwaarschijnlijker dat dit in werkelijkheid de juiste uitgangspunten zijn. Dit resulteerde in de uitgangspunten voor de quantaproductie uit tabel B1.1.

Tabel B1.1. Quantaproductie bij verschillende activiteiten (Buonanno et al, 2020)**.**

		Resting, oral breathing	Heavy activity, oral breathing	Light activity, speaking	Light activity, singing (or speaking loudly)
ER_q	5^{th} percentile	2.5×10^{-2}	1.7×10^{-1}	3.4×10^{-1}	2.1×10^{0}
	25^{th} percentile	1.2×10^{-1}	8.1×10^{-1}	1.6×10^{0}	1.0×10^{1}
	50^{th} percentile	3.6×10^{-1}	2.4×10^{0}	4.9×10^{0}	3.1×10^{1}
	75^{th} percentile	1.1×10^{0}	7.2×10^{0}	1.5×10^{1}	9.3×10^{1}
	95^{th} percentile	5.2×10^{0}	3.0×10^{1}	7.1×10^{1}	4.5×10^{2}
	99^{th} percentile	1.6×10^{1}	1.1×10^{2}	2.2×10^{2}	1.4×10^{3}
$\log_{10}(ER_q)$	Average	-4.4×10^{-1}	3.9×10^{-1}	6.9×10^{-1}	1.5×10^{0}
	Stand. dev	7.1×10^{-1}	7.1×10^{-1}	7.1×10^{-1}	7.1×10^{-1}

Ter vergelijking heeft Buonanno et al de berekende quantaproducties vervolgens retrospectief vergeleken met de clusters in Skagit Valley (Miller et al, 2020) en het restaurant in Guangzhou (Li et al, 2020). Voor de koorrepetitie in Skagit Valley kwam men op een quantaproductie van 341 quanta per uur dat overeen kwam met de 92^{e} percentielwaarde bij 'light activity, singing' (zoals gevonden door Buonnano et al). Bij het restaurant in Guangzhou kwam men op een

quantaproductie van 61 quanta per uur wat overeen komt met de 93e percentiel voor "light activity, speaking" (zoals gevonden door Buonnano et al). Dit wijst erop dat de door Buonanno et al berekende quantaproductie realistisch is voor de situatie waarin er geïnfecteerde personen zijn die bovengemiddeld veel virus uitscheiden (zogenaamde super emitters / super spreaders).

Hierbij moet wel opgemerkt worden dat Buonanno et al bij het berekenen van de quantaproductie alle besmettingen toegerekend hebben aan de overdracht via de aerosolroute. Het is niet uit te sluiten dat een deel van de besmettingen (ook deels) via directe druppeloverdracht binnen 1,5m werd veroorzaakt. Hiermee wordt de werkelijke quantaproductie naar verwachting dus overschat. Besloten is om hier in het onderzoek van bba binnenmilieu niet voor te corrigeren om zo een conservatieve aanname te hebben voor de quantaproductie.

Virus in de binnenlucht wordt op 3 manieren 'verwijderd' uit de lucht: via ventilatie, via depositie en via inactivatie. Bij ventilatie wordt lucht met virus uit de ruimte gezogen en vervangen door schone buitenlucht zonder virus. Bij depositie slaan de virusdeeltjes na tijd x neer uit de lucht en daalt de virusconcentratie in de binnenlucht. Met inactivatie wordt bedoeld dat het virus naar verloop van tijd vanzelf afsterft en de virusconcentratie in de binnenlucht op die manier afneemt. Buonanno et al hebben ervoor gekozen om bij het bepalen van de quantaproductie rekening te houden met depositie (k=0,24) en inactivatie (λ=0,63). De door Buonanno et al berekende quantaproductie is dus hoger omdat men (vervolgens) rekening houdt met depositie en afsterven van het virus in de lucht.

In het onderzoek van bba binnenmilieu is ervoor gekozen om de quantaproductie te gebruiken zonder depositie en inactivatie expliciet mee te nemen in de berekening vanwege de onzekerheid van deze factoren. Hiervoor is met de invoerparameters van Buonnano et al een nieuwe berekening gemaakt van de quantawaardes voor de twee clusteruitbraken die Buonnano et al retrospectief hebben onderzocht *zonder de correctie voor depositie en inactivatie mee te nemen*. Door deze correctie gaat de berekende quantaproductie voor de clusteruitbraak in Guanghzhou (zitten en praten) van 61 quanta / uur naar 47 quanta / uur (-23%). Voor de clusteruitbraak bij het koor in Skagit Valley (zingen en zitten) daalt de quantaproductie van 341 quanta/uur naar 220 quanta / uur (-35%). Merk op dat het berekende aantal besmette personen voor en na deze correctie exact hetzelfde is.

De berekende correctiefactoren voor het niet meenemen van depositie en inactivatie is vervolgens ook toegepast op de waardes uit tabel B1.1:

- Gecorrigeerde P95 quantaproductie voor *zingen*: 450 * 77% = 346 quanta / uur
- Gecorrigeerde P95 quantaproductie voor *dansen*: 30 * 77% = 23 quanta / uur
- Gecorrigeerde P95 quantaproductie voor *praten en zitten*: 71 * 65% = 46 quanta / uur

De quantaproductie voor stil zitten (5,2 quanta / uur) is niet gecorrigeerd omdat dit een hele lage waarde is.

Op basis van de op de vorige bladzijde genoemde, gecorrigeerde P95-waardes uit tabel B1.1 worden in dit rapport verder de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- Stil zitten en praten**: 25 quanta per uur.** Dit is gebaseerd op 50% van de tijd praten met 46 quanta / uur (=23 quanta / uur) en 50% van de tijd stil zitten (=2,5 quanta / uur), in totaal ≈ 25 quanta / uur.
- Dansen en 25% van de tijd meezingen: **100 quanta per uur**. Dit is gebaseerd op 25% van de tijd meezingen met 346 quanta / uur (= 86,5 quanta / uur) en 75% van de tijd dansen met 23 quanta / uur (= 17 quanta / uur), in totaal ≈ 100 quanta / uur.
- Dansen en 100% van de tijd meezingen: **340 quanta / uur**

Naar aanleiding van de introductie van de deltavariant van het virus en de toegenomen besmettelijkheid van die variant, is besloten om de quantawaardes te verdubbelen. In dit rapport wordt gerekend met:

- Stil zitten en praten: 50 quanta per uur
- Dansen en 25% van de tijd meezingen: 200 quanta per uur
- Dansen en 100% van de tijd meezingen: 700 quanta per uur

Merk op dat bij het gebruik van deze quantawaardes niet meer gecorrigeerd mag worden voor depositie en inactivatie, dit is al meegenomen in de lagere aannames voor de quantaproductie.

Bijlage 2 Indicatieve bepalingsmethode capaciteit natuurlijke ventilatie

In een mechanisch geventileerde ruimte is het eenvoudig om aan de hand van metingen te bepalen of de eisen uit hoofdstuk 5 gehaald worden. Bij natuurlijk geventileerde gebouwen is het niet mogelijk om aan de hand van debietmetingen de ventilatiehoeveelheid vast te stellen. Om toch een risicobeoordeling mogelijk te maken, wordt in deze bijlage een bepalingsmethode gegeven waarmee de capaciteit van natuurlijke ventilatievoorzieningen indicatief bepaald kan worden. Hiermee wordt het mogelijk om voor natuurlijk geventileerde ruimten zoals stadions en festivaltenten een inschatting te maken van de beschikbare hoeveelheid ventilatie.

Natuurlijke ventilatie is afhankelijk van thermische trek en / of de wind. Hieronder wordt eerst berekend hoeveel te openen dak- & geveloppervlak nodig is als er alleen van thermische trek uitgegaan wordt. Vervolgens wordt berekend hoeveel te openen geveloppervlak nodig is als er alleen ventilatie onder invloed van wind tot stand komt. Vervolgens worden deze twee gecombineerd tot één set eisen.

Benodigde gevel- en dakopeningen voor voldoende ventilatie door thermische trek
De natuurlijke ventilatie als gevolg van thermische trek kan berekend worden met de volgende formule (Linden, 1999):

$$Q_{therm} = A \cdot \left(\left(g \cdot \frac{\Delta T}{T} \right) \cdot H \right)^{\frac{1}{2}} \cdot 3600$$

Q_{therm}	=	ventilatiehoeveelheid als gevolg van thermische trek	[m^3/uur]
A	=	oppervlak dakopening (randvoorwaarde: gevelopening is tenminste gelijk aan dakopening)	[m^2]
g	=	zwaartekracht	[m/s^2]
T	=	ruimtetemperatuur op persoonsniveau	[K]
ΔT	=	verschil in temperatuur op persoonsniveau en dakopening	[K]
H	=	hoogte (afstand tussen dakopening en hoofd personen)	[m]

Uitgaande van een temperatuurverschil (ΔT) tussen persoonsniveau en de lucht bij de dakopening van 5K en een ruimtetemperatuur van 20 °C (293K), wordt in tabel B2.1 de ventilatiehoeveelheid per m^2 dakopening gegeven ten opzichte van de hoogte van de ruimte. In de laatste kolom wordt dit vervolgens omgerekend naar de benodigde oppervlakte dakopening en gevelopening om aan de ventilatie-eisen van hoofdstuk 5 te voldoen.

Tabel B2.1. Indicatieve ventilatiecapaciteit van 1 m² dakopening (incl. 1 m² gevelopening) als gevolg van thermische trek bij een temperatuurverschil van 5K en een ruimtetemperatuur van 293K. In de laatste kolom wordt berekend hoeveel m² dakopening en gevelopening per persoon nodig is om te voldoen aan de ventilatie-eisen uit hoofdstuk 5 (24 m³/uur per persoon met een minimum van 12.000 m³/uur).

Hoogte ruimte (H) [m]	Ventilatiecapaciteit van 1 m² dakopening [m³/uur]	Benodigd oppervlak gevel- en dakopening per persoon [m²]
3 meter	2.500	0,009 m² per persoon met een minimum van 4,7 m²
5 meter	3.300	0,007 m² per persoon met een minimum van 3,6 m²
10 meter	4.700	0,005 m² per persoon met een minimum van 2,6 m²

Benodigde gevelopeningen voor voldoende ventilatie bij wind

De natuurlijke ventilatie als gevolg van wind bij openingen aan twee zijdes van een ruimte kan berekend worden met de volgende formule (World Health Organization, 2009):

$$Q_{wind} = 0{,}65 \cdot A \cdot u \cdot 3600$$

Q_{wind}	=	ventilatiehoeveelheid als gevolg van wind	[m³/uur]
A	=	oppervlak kleinste gevelopening (randvoorwaarde: gevelopeningen aan beide zijdes van de ruimte)	[m²]
u	=	windsnelheid	[m/s]

Op basis van het Fieldlab evenement in Biddinghuizen, waarbij de luchtsnelheid in de tentopening is gemeten en vergeleken met de windsnelheid op 10m hoogte, is gebleken dat de formule van de WHO de werkelijke hoeveelheid natuurlijke ventilatie overschat. Op de twee evenementendagen lag de luchtsnelheid in de tentopening op ca. 30% van de windsnelheid op 10m hoogte. In de formule hieronder wordt rekening gehouden met deze praktijkverhouding:

$$Q_{wind} = 0{,}30 \cdot A \cdot u \cdot 3600$$

Q_{wind}	=	ventilatiehoeveelheid als gevolg van wind	[m³/uur]
A	=	oppervlak kleinste gevelopening (randvoorwaarde: gevelopeningen aan beide zijdes van de ruimte)	[m²]
u	=	windsnelheid	[m/s]

Volgens NEN 1087, de norm die wordt gebruikt om te bepalen of aan de wettelijke eisen voor spuiventilatie wordt voldaan, ligt de windsnelheid in Nederland tenminste 85% van de tijd boven 2 m/s. In tabel B2.2 wordt op basis van een windsnelheid van 2 m/s de ventilatiehoeveelheid per m² gevelopening gegeven (uitgaande van gevelopeningen aan twee zijdes van de ruimte). In de laatste kolom wordt dit vervolgens omgerekend naar de benodigde oppervlakte dakopening en gevelopening om aan de ventilatie-eisen van hoofdstuk 5 te voldoen.

Tabel B2.1. Indicatieve ventilatiecapaciteit van 1 m^2 gevelopening (beide zijdes van de ruimte) bij een windsnelheid van 2 m/s. In de laatste kolom wordt berekend hoeveel m^2 gevelopening per persoon nodig is om te voldoen aan de ventilatie-eisen uit hoofdstuk 5 (24 m^3/uur per persoon met een minimum van 25.000 m^3/uur).

Ventilatiecapaciteit van 1 m^2 gevelopening (aan beide zijdes van de ruimte) [m^3/uur]	Benodigd oppervlak gevelopening per persoon (aan beide zijdes van de ruimte) [m^2]
2.200	0,01 m^2 gevelopening per persoon met een minimum van 11 m^2

Pragmatische eisen voor benodigde gevel- en dakopening

Wanneer we de benodigde gevelopening bij wind en bij thermische trek vergelijken, dan zien we dat we grofweg kunnen stellen dat er tenminste 0,01 m^2 gevelopening per persoon aan beide zijdes van de ruimte moet zijn en / of aan één zijde van de ruimte én in het dak.

Bibliografie

Ainsworth et al. (2020, Oktober 31). *Compendium of Physical Activity - Category Dancing*. Opgehaald van https://sites.google.com/site/compendiumofphysicalactivities/home: https://sites.google.com/site/compendiumofphysicalactivities/Activity-Categories/dancing

ARBOPodium. (sd). *arbopodium.nl*. Opgehaald van ARBOpodium: https://www.arbopodium.nl/

ASHRAE. (2013). *ANSI / ASHRAE Standard 62.1 - 2013 - Ventilation for Acceptable Indoor AIr Quality.* Atlanta: ANSI / ASHRAE.

Boerstra & Beuker. (2020). *Onderzoek risico COVID-19 aerosol overdracht - AFAS Live Ziggo Dome_DEFv2.* den haag: bba binnenmilieu.

Buonanno et al. (2020, Juni 2). *Quantitative assessment of the risk of airborne transmission of SARS-CoV-2 infection: prospective and retrospective applications.* Opgehaald van https://www.medrxiv.org: https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.06.01.20118984v1

CARB. (1993). *https://ww2.arb.ca.gov.* Opgehaald van Measurement of Breathing Rate and Volume in Routinely Daily Performed Activities: https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/classic//research/apr/past/a033-205.pdf

CEN. (2019). *NEN-EN 1822:2019-1 Luchtfilters met een hoog rendement (EPA, HEPA en ULPA) - Deel 1: Classificatie, beproevingsmethoden, merken.*

Chen et al. (2020, October 15). *Heterogeneity in transmissibility and shedding SARS-CoV-2 via droplets and aerosols*. Opgehaald van https://www.medrxiv.org/: https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.10.13.20212233v1

Cruz et al. (2015). Estimating the Inhaled Dose of Pollutants during Indoor Physical Activity. *The Science of the Total Environment*, 111-118.

Doremalen et al. (2020). Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1. *The New England Journal of Medicine*, 1-3.

EPA. (2011). *Exposure Factors Handbook - Chapter 6 - Inhalation Volumes.* Opgehaald van https://www.epa.gov: https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/efh-chapter06.pdf

Event Flanders. (2020). *Covid event protocol.* Event Flanders.

Fears et al. (2020, April 18). *Comparative dynamic aerosol efficiencies of three emergent coronaviruses and the unusual persistence of SARS-CoV-2 in aerosol suspensions.* Opgehaald van https://www.ncbi.nlm.nih.gov/: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7217084/

Fieldlab Evenementen. (2021, Juli 11). *Fieldlab Evenementen - Resultaten fase 1*. Opgehaald van https://fieldlabevenementen.nl/: https://fieldlabevenementen.nl/resultaten-fase-1/

Folkehelseinstituttet (FOI) - Norwegian Institute of Public Health (NIPH). (2020, Oktober 27). *Inneklima og risiko for smitte av covid-19 - Råd om ventilasjon.* Opgehaald van www.fhi.no: https://www.fhi.no/contentassets/1af4c6e655014a738055c79b72396de8/inneklima-og-risiko-for-smitte-av-covid-19---rad-om-ventilasjon_27102020.pdf

Günther et al. (2020, Juli 23). *Investigation of a superspreading event preceding the largest meat processing plant-related SARS-Coronavirus 2 outbreak in Germany.* Opgehaald van https://papers.ssrn.com: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3654517

Holmann. (1985). *Zentrale Themen der Sportmedizin.* Berlijn: Springer Verlag.

IOW. (2012). *Meetrapportage lucht- en waterzijdig inregelen klimaatinstallatie Ziggo Dome te Amsterdam.*

ISO. (2017). *ISO 29463-1: 2017 - High efficiency filters en filter media voor de verwijdering van stofdeeltjes uit lucht - Deel 1: Classificatie, prestatie, beproeving en markering.*

Kay. (2020, Augustus 11). *COVID-19 Superspreader Events*. Opgehaald van https://docs.google.com/: https://docs.google.com/spreadsheets/d/1nAWy94mS14sJBtSCBgh6GLCWKP_JvAaz0yanvq4kmzs/edit#gid=1025534428

Leclerc et al. (2020, Mei - Juni). *What settings have been linked to SARS-CoV-2 transmission clusters?* Opgehaald van https://wellcomeopenresearch.org: https://wellcomeopenresearch.org/articles/5-83/v2

Leung et al. (2020). Respiratory virus shedding in exhaled breath and efficacy of masks. *Nature Medicine*, 676-680.

Li et al. (2020, April 22). *Aerosol transmission of SARS-CoV-2 - Evidence for probable aerosol transmission in a poorly ventilated restaurant.* Opgehaald van https://www.medrxiv.org: https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.04.16.20067728v1

Linden. (1999). The Fluid Mechanics of Natural Ventilation. *The Annual Review of Fluid Mechanics*, 201-238.

Liu et al. (2016). Short-range airborne transmission of expiratory droplets between two people. *Indoor Air*, 452-462.

Mansour & Smaldone. (2012). Respiratory source control versus receiver protection: impact of facemask fit. *Journal of Aerosol Medicine and Pulmonary Drug Delivery*, 131-137.

Miller et al. (2020, Juni 18). *Preprint server*. Opgehaald van https://www.medrxiv.org: https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.06.15.20132027v2

Morawska. (2006). Droplet fate in indoor environments, or can we prevent the spread of infection? *Indoor Air*, 335-347.

Nicas et al. (2005). Toward understanding the risk of secondary airborne infection: emission of respirable pathogens. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 143-154.

Patel et al. (2016). Respiratory source control using a surgical mask: an in vitro study. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 569-576.

Peng & Jimenez. (2020, September 10). *Exhaled CO2 as COVID-19 infection risk proxy for different indoor environments and activities.* Opgehaald van https://www.medrxiv.org/: https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.09.09.20191676v1.full.pdf

Persily & De Jonge. (2017). Carbon Dioxide Generation Rates for Building Occupants. *Indoor AIr*, 868-879.

Qian et al. (2020, April 7). *Indoor transmission of SARS-CoV-2 (pre-print).* Opgehaald van https://www.medrxiv.org/: https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.04.04.20053058v1.full.pdf

REHVA. (2004). *Rehva Guidebook 2 - Ventilation Effectiveness.* Brussel, België: REHVA.

REHVA. (2020, Augustus 3). *REHVA COVID-19 Guidance.* Opgehaald van https://www.rehva.eu/: https://www.rehva.eu/activities/covid-19-guidance/rehva-covid-19-guidance

REHVA. (2020). *REHVA COVID-19 Guidance document V3*. Opgehaald van www.rehva.eu: https://www.rehva.eu/fileadmin/user_upload/REHVA_COVID-19_guidance_document_V3_03082020.pdf

Rijksoverheid. (2020a, November 4). *Risiconiveaus en maatregelen COVID-19*. Opgehaald van www.rijksoverheid.nl:

https://www.rijksoverheid.nl/documenten/publicaties/2020/10/13/risiconiveaus-en-maatregelen-covid-19

Rijksoverheid. (2020b, Oktober 30). *Bouwbesluit 2012.* Opgehaald van https://wetten.overheid.nl/: https://wetten.overheid.nl/BWBR0030461/2020-10-01

Rijksoverheid. (2020c, Oktober 30). *Besluit eisen inrichtingen Drank- en Horecawet.* Opgehaald van https://wetten.overheid.nl/: https://wetten.overheid.nl/BWBR0011700/2016-07-01

Rijksoverheid. (2021, Juli 7). *Corona Dashboard Rijksoverheid*. Opgehaald van https://coronadashboard.rijksoverheid.nl/over-risiconiveaus: https://coronadashboard.rijksoverheid.nl/over-risiconiveaus

Rijksoverheid.nl. (2020, Juli 1). *Nederlandse maatregelen tegen het coronavirus*. Opgehaald van www.Rijksoverheid.nl: https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/coronavirus-covid-19/nederlandse-maatregelen-tegen-het-coronavirus/openbaar-en-dagelijks-leven

Rijksoverheid.nl. (2020, Augustus 8). *www.rijksoverheid.nl*. Opgehaald van Het coronavirus en ventilatie in gebouwen: https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/coronavirus-covid-19/openbaar-en-dagelijks-leven/ventilatie-in-gebouwen

Riley. (1982). Indoor airborne infection. *Environmental International*, 317-320.

Riley et al. (1978). Airborne spread of measles in a suburban elementary school. *American Journal of Epidemiology*, 421-432.

RIVM. (2020, augustus 21). *LCI richtlijn ventilatie en COVID-19*. Opgehaald van https://lci.rivm.nl/: https://lci.rivm.nl/ventilatie-en-covid-19

RIVM. (2020a, Juni 30). *Aerogene verspreiding SARS-CoV-2 en ventilatiesystemen onderbouwing*. Opgehaald van lci.rivm.nl: https://lci.rivm.nl/aerogene-verspreiding-sars-cov-2-en-ventilatiesystemen-onderbouwing

RIVM. (2020a, 07 23). *Verspreiding COVID-19*. Opgehaald van www.rivm.nl: https://www.rivm.nl/coronavirus-covid-19/verspreiding

RIVM. (2020b, Augustus 21). *Ventilatie en COVID-19 - bijlage bij LCI-richtlijn COVID-19*. Opgehaald van lci.rivm.nl: https://lci.rivm.nl/ventilatie-en-covid-19

RIVM. (2020c, November 23). *Status validatie SARS-CoV-2 antigeen sneltesten.* Opgehaald van https://www.rivm.nl: https://www.rivm.nl/documenten/status-validatie-sars-cov-2-antigeen-sneltesten

Rudnick & Milton. (2020). Risk of Indoor Airborne Infection Transmission Estimated from Carbon Dioxide Concentration. *Indoor Air*, 237-245.

Santarpia et al. (2020, Juni 3). *Aerosol and surface transmission potential of SARS-CoV-2.* Opgehaald van https://www.medrxiv.org: https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.03.23.20039446v3

Smitsair. (2017). *Meetrapport AFAS Live Amsterdam.*

Smitsair. (2019). *Meetrapport Ziggo Dome Amsterdam.*

Swinkels. (2020, Augustus 11). *COVID-19 Superspreading Events*. Opgehaald van https://docs.google.com/: https://docs.google.com/spreadsheets/d/1c9jwMyT1lw2P0d6SDTno6nHLGMtpheO9xJyGHgdBoco/edit#gid=206521141

Wei, J., & Li, Y. (2016). Airborne spread of infectious agents in the indoor environment. *American Journal of Infection Control*, 102-108.

Wells. (1955). *Airborne Contagion and Air Hygiene.* Cambridge MA: Cambridge University Press.

World Health Organization. (2009). *Natural ventilation for infection control in health-care settings.* Genève, Zwitserland: World Health Organization.

World Health Organization. (2020, Oktober 30). *Science in 5 - Episode #10 - Ventilation & COVID-19*. Opgehaald van https://www.who.int: https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/media-resources/science-in-5/episode-10---ventilation-covid-19

World Health Organization. (2021, Juli 6). *Weekly epidemiological updat on COVID-19 - 6 July 2021*. Opgehaald van https://www.who.int/: https://www.who.int/publications/m/item/weekly-epidemiological-update-on-covid-19---6-july-2021