

Achtergronddocument: Indicator besmettingskansen via aerosolen (v 2.0)

Gebruiksvoorwaarden

- De Rekentool Indicatie Besmettingskansen via Aerosolen is een eenvoudige toepassing voor het maken van een indicatie van de kans op besmetting in binnenruimtes in gebouwen, gebaseerd op het Wells-Riley-model bij gelijktijdig verblijf in een ruimte met één besmettelijk persoon.
- De tool berekent alleen de besmettingskans via aerosolen en gaat ervanuit dat alle andere [basisregels van de rijksoverheid](#) worden opgevolgd.
- Het Wells-Riley model gaat uit van volledige menging van de ventilatielucht.
- De rekentool maakt een schatting van de besmettingskans gebaseerd op de huidige beschikbare informatie. Indien deze informatie verandert, wordt dit verwerkt in een volgende versie. **De huidige versie past een correctie toe voor de besmettelijkere Britse variant.** Voor de uitgangspunten die gehanteerd zijn in de rekentool, het toepassingsgebied en de beperkingen, zie het achtergronddocument horende bij de rekentool.
- De rekentool is door middel van een vergelijking tussen verschillende beschikbare modellen gecontroleerd op gelijkheid van de verkregen resultaten.
- Met name de relatieve uitkomsten zijn van belang; het doel is om een handelingsperspectief te bieden om de kans op besmetting te verkleinen.
- De rekentool kan bijdragen aan het multidisciplinaire gesprek over de invloed en het belang van ruimteventilatie in relatie tot gezondheidskundige aspecten zoals overdracht van pathogenen en het gebruik van binnenruimtes.
- De ontwikkelaars van de rekentool sluiten elke aansprakelijkheid uit voor directe, indirecte, incidentele schade of enige andere schade die zou voortvloeien uit of verband zou houden met het gebruik van de informatie in dit document.
- Stichting ISSO en degenen die aan de samenstelling van deze rekentool hebben meegewerkt, hebben een zo groot mogelijke zorgvuldigheid betracht bij zowel het verzamelen als bij het verwerken en opstellen van de in deze rekentool vervatte gegevens. Toch is niet uit te sluiten dat deze rekentool onvolledig is, of dat zij onjuistheden of onvolkomenheden bevat. Degene die van deze rekentool en de daarin vermelde gegevens gebruik maakt, aanvaardt dan ook daarvoor zelf het risico.
- Gezien de aard van de tool en het onderliggende model is de rekentool niet een gevalideerd kennisproduct door de Raad van Begeleiding van ISSO. De rekentool kan bijdragen aan het multidisciplinaire gesprek over de invloed en het belang van ruimteventilatie in relatie tot gezondheidskundige aspecten zoals overdracht van pathogenen en het gebruik van binnenruimtes.

Inleiding

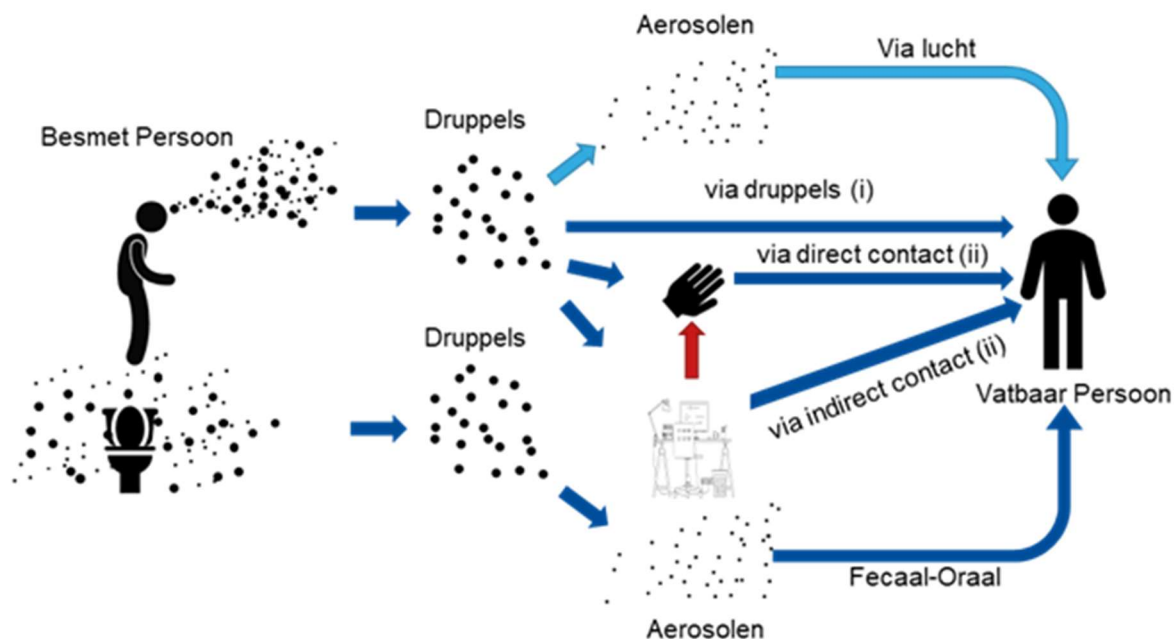
Aangezien mensen in de Westerse wereld 90% van de tijd binnen verblijven [1] moet de mogelijkheid van Corona besmetting door (onvoldoende) luchtverversing zeer serieus genomen worden. Hoewel verschillende wetenschappers en beleidsmakers nog steeds terughoudend zijn over de overdrachtsroute van het coronavirus via de lucht zijn steeds meer wetenschappers en technici ervan overtuigd dat besmetting met het Coronavirus (SARS-CoV-2) ook via zeer kleine druppeltjes (aerosolen) in de lucht kan plaats vinden [2, 3, 4]. Wel spoort het Ministerie van Volksgezondheid, Welzijn en Sport in ieder geval aan om gebouwen te controleren of zij voldoen aan het Bouwbesluit [5]. De vraag is nochtans of dit in alle gevallen wel genoeg is om de besmettingskans binnen voldoende te verminderen voor het huidige coronavirus én andere (toekomstige) virussen maar ook voor preventie van chronische ziekten zoals hart- en vaatziekten, beroerte, longkanker en COPD [6]. De huidige richtlijnen zijn niet opgesteld op basis van deze uitgangspunten, maar meer gerelateerd aan comfort- en productiviteitsaspecten gerelateerd aan de luchtkwaliteit, bijvoorbeeld geur.

Besmettingsroutes

Er worden drie hoofdroutes verondersteld in de overdracht van pathogenen die luchtweginfecties kunnen veroorzaken zoals COVID-19:

- directe route via druppeltjes
- indirecte route via contactoppervlakken
- luchttransmissieroute via aerosolen (waaronder ook de fecaal-orale overdracht).

Het onderscheid tussen druppeltjes en aerosolen wordt normaal gesproken op het niveau van de afmeting van het deeltje dat de pathogeen bevat gemaakt. De afmeting bepaalt overigens ook hoe ver een deeltje het luchtwegsysteem van de mens binnen kan dringen. Ook hier ligt nog een parameter ten aanzien van de gevoeligheid. De plaats waar een pathogeen het lichaam binnentreedt om de infectie te veroorzaken, de receptor, is voor verschillende infectieziekten verschillend en kan op meerdere plaatsen aanwezig zijn, meer in de bovenste luchtwegen en/of de onderste luchtwegen.



Figuur 1: Visualisatie van de verschillende transmissieroutes in de overdracht van pathogenen die luchtweginfecties kunnen veroorzaken (Bron: Francesco Franchimon ICM)

Het belang van goede ventilatie bij het voorkomen van infectieziektes

De directe en contactroute zijn belangrijk om te onderkennen in de overdracht van COVID-19, maar voor het binnenmilieu is met name de luchttransmissie route iets waarop met de aanwezige installaties in gebouwen invloed kan worden uitgeoefend. Door voldoende ventilatie en het beïnvloeden van de luchtstroming in een ruimte kan worden voorkomen dat ziekteverwekkers iemand kunnen besmetten, dan wel de kans daarop te beperken. Vanuit het oogpunt van COVID-19 is een goede én voldoende ventilatie tenminste een vereiste die je vanuit het voorzorgsbeginsel wil realiseren. Vandaar onder andere ook de adviezen zoals gegevens door de werkgroep (nationaal) en REHVA en ASHRAE (internationaal). Een rekenmodel vormt een aanvulling en ondersteuning hierop en heeft vooral tot doel om een mogelijkheid te bieden om oplossingen te vergelijken voor individuele situaties, niet om absolute waarden voor de besmettingskans in een bepaalde situatie te communiceren. Hiervoor is meer onderzoek benodigd.

Om de energiebehoefte van een gebouwontwerp te kunnen berekenen wordt al decennia gebruik gemaakt van gebouwprestatie simulatiemodellen. Daarmee kunnen we vaak ook iets zeggen over bijvoorbeeld het thermisch comfort, onder andere in het geval van oververhitting. We gebruiken ook de Computational Fluid Dynamics (CFD) techniek om de luchtstroming in ruimtes en rondom gebouwen te analyseren, bijvoorbeeld de ventilatie-effectiviteit. Echter, als het aankomt op ventilatie en gezondheid, dan zien we daar tot nu toe nauwelijks iets over terug.

Om te voorkomen dat een beperking van de luchtverversing uit oogpunt van energiegebruik en besparing op investerings- en onderhoudskosten tot ongezonde binnenlucht leidt, worden er in de

bouwregelgeving minimeisen gesteld aan de hoeveelheid verse luchttoevoer¹. Hierbij zijn ventilatie, het debiet/ventilatievoud, normaal gesproken randvoorwaarden en niet onderdeel van de analyse van een ontwerp-oplossing. Maar als het gaat om infecties waarbij de luchttransmissie van belang is, is ventilatie juist cruciaal en afhankelijk van bijvoorbeeld het gebruik van een ruimte. Gezien de oorsprong van de eisen in het bouwbesluit is het onduidelijk of deze voldoende zijn in alle situaties om een voldoende luchtkwaliteit te realiseren, ook vanuit het oogpunt van luchttransmissie overdracht.

Rekenen aan infectieoverdracht en ventilatie

Het proces van transmissie van infectieuze microbiologische verontreiniging (bijv. virussen, bacteriën, schimmels) is niet recht-toe-recht-aan. Het gaat daarbij onder andere over de karakteristieken van het pathogeen (de ziekteverwekker), hoeveel deeltjes worden geproduceerd in een gastheer die mogelijk ziekteverwekkend zijn, hoe goed de ziekteverwekker overleeft of levensvatbaar blijft buiten die gastheer (mens, dier) en hoe goed het immuunsysteem is van degene die de ziekteverwekker 'ontvangt'. Hieraan gekoppeld zit ook de hoeveelheid virussen, bacteriën en schimmelsporen (dosis) die nodig is om daadwerkelijk ziek te kunnen worden en hoe deze dosis wordt ontvangen (piek of over langere periode). Verschillende pathogenen gedragen zich hierbij anders. Voor sommige is hier inmiddels al best het nodige bekend, voor andere, waaronder het SARS-CoV-2 virus is dat duidelijk nog niet het geval. Al doende komt hier gelukkig wel steeds meer kennis over beschikbaar, bijvoorbeeld ten aanzien van de overlevingskansen buiten de gastheer [7].

In het artikel *Mathematical models for assessing the role of airflow on the risk of airborne infection in hospital wards* [8] worden enkele voorbeelden van modellen genoemd die proberen om de kans op infectie in te schatten. Echter, er is één model dat sinds enkele decennia vooral hiervoor wordt ingezet, de zogenaamde Wells-Riley vergelijking [8]. De belangrijkste parameter in deze vergelijking die input behoeft vanuit het medische veld is de virusproductie in combinatie met de infectieuze dosis voor het betreffende virus, in de vergelijking uitgedrukt in de quanta-productie. Met toenemende informatie over het SARS-CoV-2 virus die beschikbaar komt wordt het steeds beter mogelijk daar inzicht in te krijgen. Tegelijk laat dit ook zien dat er in de praktijk een grote range aan productie-waardes kan optreden [9, 3]. In het Wells-Riley model wordt er onder andere ook vanuit gegaan dat het niet uit maakt of de dosis wordt ontvangen in een piek of verdeeld over de geanalyseerde periode. Andere modellen dan Wells-Riley, of varianten daarop, kunnen de biologische component in meer detail meenemen [10]. In alle varianten van modellen die worden gebruikt om een (relatieve) inschatting te maken van de kans op besmetting heeft uiteindelijk de dosis aan virusdeeltjes (quanta) die wordt ontvangen een directe relatie met deze kans. Beseft moet worden dat ventilatie per definitie nooit de kans naar nul zal kunnen brengen. Dat is feitelijk alleen mogelijk wanneer de bron, de geïnfecteerde persoon, niet in de ruimte komt.

Er zijn momenteel verschillende versies van het Wells-Riley model beschikbaar voor het SARS-CoV-2 virus en de toepassing van Miller et al 2020 [7] laat een voorbeeld daarvan zien. De rekentool is door middel van een vergelijking tussen verschillende beschikbare modellen gevalideerd om te

¹ Meer informatie zie Bijlage 1 (stuk uit TVVL over achtergronden ventilatie-eisen)

controleren dat dezelfde uitkomsten (besmettingskans) worden verkregen met de verschillende tools zoals beschikbaar [11, 12, 13].

De Rekentool

De rekentool geeft een indicatie van de besmettingskans op basis van transmissie van het coronavirus (SARS-CoV-2) via aerosolen in relatie tot luchtverversing in een binnenruimte. Extra risico's die ontstaan door alle andere transmissie-routes zijn niet inbegrepen in de berekeningen (zoals bijvoorbeeld de gevolgen als er geen 1,5 meter afstand wordt gehouden en als hygiënevoorschriften niet worden opgevolgd).

De verspreiding van virussen via aerosolen in de lucht is al langere tijd onderwerp van onderzoek. Een bruikbare en veel toegepaste methodiek voor inschatting van besmettingskansen is ontwikkeld door Wells en Riley in respectievelijk de jaren '50 en '70. Het werk van deze onderzoekers is in de loop der jaren doorontwikkeld en staat bekend als de 'Wells-Riley aanpak'. De methode is uitgebreid beschreven in de wetenschappelijke literatuur.

Toepassingsgebied

De Indicator Besmettingskansen via Aerosolen is een eenvoudige toepassing voor het maken van een indicatie van de kans op besmetting in binnenruimtes in gebouwen, gebaseerd op het Wells-Riley-model bij gelijktijdig verblijf in een ruimte met een besmettelijk persoon.

Deze kans wordt in het model bepaald op basis van een aantal parameters, zoals de verspreiding van virusdeeltjes, activiteitsniveau, verblijfsduur, ruimte-afmetingen, ventilatiedebiet, etc. Voor een beschrijving van het onderliggende model, zie het Wells-Riley model.

Aangezien het model in de praktijk gekalibreerd moeten worden op basis van casussen en het een aantal uitgangspunten hanteert die in werkelijke situaties zullen afwijken zijn de uitkomsten vooral relatief en kunnen ze bijdragen aan bewustwording van de invloed van de diverse parameters op de uitkomsten. Dit betekent dat we vooral waarde hechten aan een vergelijking tussen resultaten en minder aan de absolute waarden die worden berekend. Het inschatten van de betreffende parameters in het model is een voortgaand proces.

Gezien de aard van de tool en het onderliggende model is de rekentool niet een gevalideerd kennisproduct van ISSO. De tool zelf is wel gevalideerd door middel van een inter-model validatie, i.e. een vergelijk in uitkomsten tussen andere beschikbare en vergelijkbare modellen. De intentie van de rekentool is om bij te dragen aan het multidisciplinaire gesprek over de invloed en het belang van ruimteventilatie in relatie tot gezondheidkundige aspecten zoals overdracht van pathogenen en het gebruik van binnenruimtes en de oplossingsstrategieën daarbij.

Deze tool is geschikt om een indicatie te geven van de kans (hoog of laag) om via aerosolen besmet te raken met het Coronavirus indien 1 persoon in de ruimte aanwezig is die besmettelijk is in relatie tot de hoeveelheid luchtverversing. De gegeven indicatie kent een ruime marge gezien de onzekerheden in de gehanteerde waarden, met name de zogenaamde quanta-productie. Het doel is om een handelingsperspectief te bieden om de kans op besmetting te verkleinen.

Het gaat hierbij dus uitdrukkelijk om een vergelijking te kunnen maken tussen verschillende situaties (luchtverversing, duur van verblijf, activiteit etc.) en niet om een exacte voorspelling van hoeveel mensen er besmet zullen raken.

Verder wordt de ventilatie getoetst aan het Bouwbesluit en eventuele aanvullende kwaliteitseisen zoals het programma van eisen Gezond Kantoren en Frisse Scholen. De Bouwbesluittoets wordt gedaan aan de hand van het beoogd gebruik (aantal aanwezigen en functie van de ruimte) bij ontwerp (dus vóór de Corona-uitbraak).

De tool kan gebruikt worden door installatietechnici en gebouwbeheerders en -eigenaren. Voor het gebruik van de tool wordt enige basiskennis van ventilatie aangeraden en met name ook het bewustzijn hoe met de uitkomsten omgegaan dient te worden.

Indien de hoeveelheid toegevoerde verse buitenlucht niet bekend is kan dit met deze tool met behulp van CO₂ metingen worden afgeleid.

Randvoorwaarden

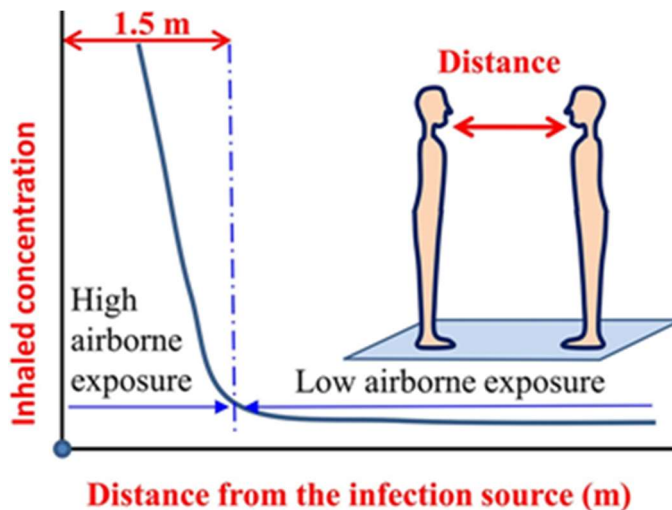
Omdat bij het gebruik van het Wells-Riley model er enkele belangrijke uitgangspunten zijn worden er een aantal randvoorwaarden gesteld zodat het niet mogelijk is de tool toe te passen voor situaties waar dit Wells-Riley model mogelijk minder geschikt is.

- Het aantal aanwezige personen is niet groter dan 100
- Hoe meer personen aanwezig zijn, hoe groter de kans is dat er meer dan 1 besmettelijk persoon aanwezig is, afhankelijk van de besmettingsgraad van de populatie. Deze randvoorwaarde is niet per se een beperking van Wells-Riley maar voorkomt extreme situaties. Voor een vergelijking van situaties maakt het in principe niet uit hoeveel besmettelijk personen aanwezig zijn.

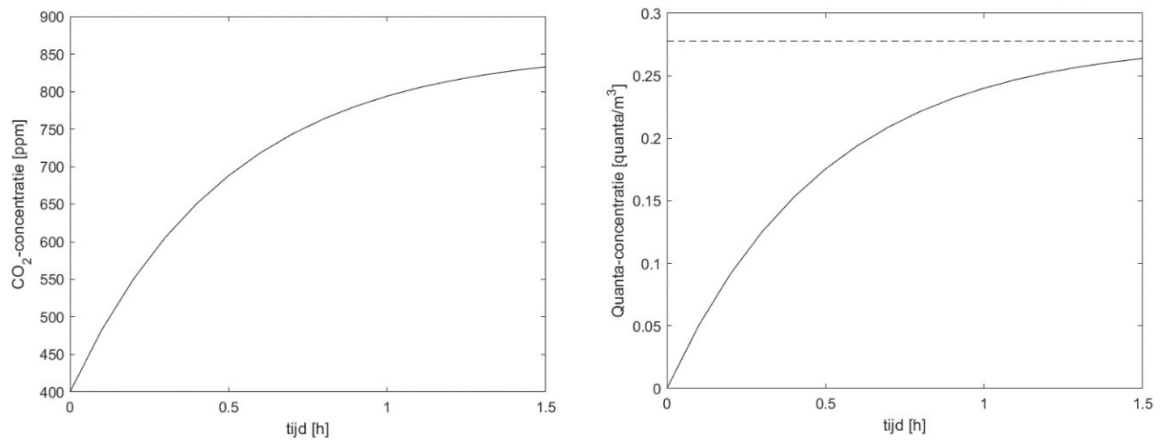
De afmetingen van de ruimte dienen niet groter te zijn dan ca 200 m² en 6 meter hoog. Het Wells-Riley model gaat uit van een gelijke verdeling van de virusconcentratie over de ruimte en dus volledige menging van de ventilatielucht. Bij hoge ruimten en ruimten met een grote vloeroppervlakte kan deze menging niet verondersteld (gegarandeerd) worden en zou bijvoorbeeld een minder goede doorspoeling van de ruimte kunnen ontstaan. Een installatie-adviseur zou in dat geval feitelijk eerst moeten verifiëren of een dergelijke situaties als gemengd mag worden beschouwd.

Bron, dosis en effect

In het algemeen hangt bij blootstelling aan een ziekteverwekker het effect af van de dosis, het aantal virusdeeltjes dat nodig is om iemand te infecteren. Als er zich in een ruimte een besmettelijk persoon (de bron) bevindt verspreidt deze virussen, eventueel door hoesten of niezen, maar óók door alleen te ademen, praten, zingen of schreeuwen. Naast de grotere druppels die binnen 1,5 meter neerslaan worden dan aerosolen uitgestoten die langere tijd in de lucht blijven hangen (zie Figuur 2). Bij weinig ventilatie ontstaat op den duur een hoge steady-state concentratie aan virussen in de lucht, vergelijkbaar met het oplopen van de CO₂ concentratie zoals geproduceerd door een persoon (zie Figuur 3). Hoe meer ventilatie, hoe lager deze steady-state concentratie zal zijn. De totale dosis die een niet besmette persoon binnenkrijgt is weer afhankelijk van die virusconcentratie en de duur dat iemand eraan blootgesteld wordt. Bij verkorting van de duur van het verblijf of verhoging van de hoeveelheid luchtverversing wordt de totale dosis dus lager en wordt de kans dat iemand besmet raakt, ondanks enige blootstelling, kleiner. Bij een gemiddeld (gezond) persoon is het afweersysteem namelijk in staat om enige blootstelling aan te kunnen, maar op het moment dat men langere tijd aan verhoogde concentraties blootgesteld wordt dan neemt de kans op besmetting toe.



Figuur 2: virusconcentratie in de lucht afhankelijk van de afstand tot de bron [10].



Figuur 3: Opbouw van de CO₂ concentratie (links) en de vergelijkbare opbouw van de quanta-concentratie (rechts). Vergelijking 1 maakt gebruik van de limietwaarde (zwarte stippellijn – rechts) [14].

Het Wells-Riley-model

De besmettingskans is afhankelijk van de totaal ingeademde hoeveelheid virusdeeltjes (n [quanta]) bepaald door het ademvolume van de ontvanger, de gemiddelde virusconcentratie gedurende het verblijf en de duur van het verblijf. De gemiddelde virusconcentratie gedurende het verblijf wordt berekend met de variabelen virusuitstoot door de bron, het ventilatievoud (met verse buitenlucht), het ruimtevolumen en de duur van het verblijf. Voor de uitgangspunten gebruikt in deze rekentool, zie verderop in dit document. Aan de ontvangende kant is het ademhalingsvolume van belang.

Besmettingskans volgens de Wells-Riley vergelijking [7]:

$$p = 1 - e^{-n} \quad (1)$$

met:

p	[%]	individuele kans op besmetting via aerosolen
n	[quanta]	hoeveelheid geïnhaleerde virusdeeltjes

1 quantum = het aantal geïnfekteerde druppeltjes (kernen) dat nodig is om 1-1/e van de vatbare populatie in de ruimte te infecteren [8], ofwel een kans van 63% om geïnfecteerd te raken. Dit aantal is dus afhankelijk van, bijvoorbeeld, het type virus.)

Berekening van de hoeveelheid geïnhaleerde virusdeeltjes (n)

$$n = P_v C_{avg} D_v \quad (2)$$

met:

P_v	[m ³ /h]	ademvolume (hoeveelheid geïnhaleerde lucht) per uur door de ontvanger
C_{avg}	[quanta/m ³]	gemiddelde virusconcentratie in de lucht (gedurende het verblijf)
D_v	[h]	duur van het verblijf in uren

De gemiddelde virusconcentratie (C_{avg}) in de lucht (gedurende het verblijf) wordt in dit geval berekend uitgaande van een startsituatie waar er geen virusdeeltjes (quanta) in de ruimte zijn, ofwel vanaf het moment dat een geïnfecteerd persoon in de ruimte komt. In de originele Wells-Riley vergelijking wordt uitgegaan van een steady-state situatie. In de praktijk is dat vaak niet reëel (referentie Miller et al. 2020).

Berekening van de gemiddelde concentratie van virusdeeltjes in de lucht

$$C_{avg} = \frac{q f_{var}}{\lambda V} \left(1 - \frac{1}{\lambda D_v} (1 - e^{-\lambda D_v}) \right) \quad (3)$$

met:

q	[quanta/h]	virusuitstoot (bron)
f_{var}	[-]	correctiefactor voor (toekomstige) virusvarianten (zie ook kadertekst pagina 9)
λ	[1/h]	ventilatievoud (met verse buitenlucht)
V	[m ³]	ruimtevolume

Uitgangspunten

Virusuitstoot

In het artikel van Buonanno, Stabile en Morawska [9] wordt een onderbouwde inschatting gedaan van de hoeveelheid virale druppels (quanta) die door een besmette persoon uitgestoten wordt in de lucht; e.e.a. afgeleid van de virusconcentratie in de luchtwegen van een besmettelijk persoon die via de druppels in de lucht komen, het type ademhaling (ademhalen, spreken, zingen), exhalatie- en inhalatiesnelheid (dm³/s), activiteitsniveau (zitten, staan, (lichte) inspanning). Op basis van gegevens over uitbraken (super spreading events) in het verleden waarbij (waarschijnlijk) met name aerosolen een rol speelden, is de methode om de 'bronsterkte' q [quanta/h] te berekenen gevalideerd. In Tabel 1 wordt de op basis van dit onderzoek voor de rekentool gebruikte quanta productie weergegeven als functie van de inspanning en het type stemgebruik.

Tabel 1: Bronsterkten (95e percentiel waarden) bepaald in Buonanno, Stabile en Morawska [9].

q[quanta/h]	ademen	spreeken	zingen
rust	5,7		
lichte inspanning		7,6	490
zware inspanning	38		

Voor verschillende leeftijdsgroepen wordt de virusuitstoot gecorrigeerd. De correctie is een factor (Tabel 2) gebaseerd op de met leeftijd (en lichaamsgewicht) stijgende CO₂ productie.

Tabel 2: Correctiefactoren voor virusuitstoot afhankelijk van de leeftijdsgroepen.

leeftijdsgroep [j]	correctiefactor [-]
0 tot <4	0,4
4 tot <12	0,6
12 tot <21	0,9
>=21	1,0

NB: In deze versie van de rekentool (v 2.0) wordt een correctie uitgevoerd op de infectieuze dosis voor de Britse variant op basis van de huidige beschikbare informatie. Er zijn meerdere mechanismen die kunnen leiden tot de versnelde verspreiding van de Britse variant en dus tot een hoger reproductiegetal leiden. De volgende mechanismen hebben direct invloed op de besmettingskansen berekend door deze rekentool; samen bepalen ze de waarde van 1 quantum (zie kadertekst op pagina 9)

- Een verhoogde virusuitstoot
- Een verhoogde ontvankelijkheid (minder virusdeeltjes nodig voor een infectiekans).

Een Britse studie naar de verspreiding van deze variant schat dat het reproductiegetal van de Britse variant 43% - 90% hoger is dan de klassieke variant [15]. Bij deze inschatting is er vanuit gegaan dat alle andere factoren dan welke invloed hebben op de infectieuze dosis gelijk blijven (bijvoorbeeld het aantal contactmomenten). Hierin is een significante onzekerheidsfactor. In deze tool is aansluiting gezocht bij het RIVM [16], die het reproductiegetal van de Britse variant 0,42 hoger inschat dan van de klassieke variant.

Bovenstaande kennis is in versie v 2.0 van de rekentool verdisconteert middels een correctiefactor $f_{var,br}$ van 1,4 (140%) in formule 3. Dit is geen letterlijke vertaling, maar betekent dat hetzelfde aantal druppelkernen dat in de klassieke variant nodig is voor 1 quantum (63% besmettingskans), bij de Britse variant 1,4 quantum is (63% besmettingskans * 1,4).

$f_{var,br} = 1,4$ correctiefactor voor de besmettelijkere Britse variant.

Vanwege de onzekerheid in deze getallen benadrukken wij nogmaals dat het doel van de rekentool is om het relatieve effect van ventilatie op besmettingskansen weer te geven en niet om een voorspelling te doen van het aantal personen dat besmet raakt (zie ook de [gebruiksvoorwaarden](#)).

Ademvolume van de ontvanger

Het ademvolume van de ontvanger is afhankelijk van de activiteit en leeftijd van de ontvanger. De gebruikte ademvolumes in deze rekentool zijn gebaseerd op het US EPA Exposure Factors Handbook, hoofdstuk 6 [17] en deze zijn weergegeven in Tabel 3. Aangenomen wordt dat 50% van de aanwezigen vrouw is en 50% man. Verder is voor de samenstelling van de groepen van volwassenen een gelijke verdeling in leeftijd van 21 tot en met 60 jaar aangenomen (leeftijdsgroepen 21-30; 30-40; 40-50 en 50-60).

Tabel 3: gemiddelde ademvolumes naar leeftijd en activiteit [17]

	ademvolume [m ³ /h]			
	crèche (0-4)	PO	VO	volwassene
	0 tot <4	4 tot <12	12 tot <21	>=21
activiteit				
slapen (MET 1)	0,348	0,363	0,435	0,416
rust (MET 1,2)	0,354	0,366	0,441	0,411
lichte inspanning (MET 1,4)	0,860	0,870	0,990	0,975
matige inspanning (MET 4)	1,600	1,680	2,130	2,310
zware inspanning (MET 6)	2,940	3,210	4,290	4,530

Hoeveelheid ventilatie

In deze rekentool is de hoeveelheid ventilatie gedefinieerd als de hoeveelheid **toegevoerde verse buitenlucht** en wordt eventuele luchtrecirculatie (zonder geavanceerde luchtfiltering of -reiniging) buiten beschouwing gelaten. Eventuele filtering en reiniging van de lucht kunnen in een latere versie van de tool toegevoegd worden.

Is de toevoer van verse buitenlucht onbekend, dan is er een mogelijkheid om met CO₂ metingen te bepalen wat de hoeveelheid toegevoerde verse lucht is, indien ook het aantal aanwezige mensen tijdens de metingen en hun gemiddelde activiteit bekend is.

CO₂ productie

Om vanuit de CO₂ metingen de hoeveelheid verse luchttoevoer te kunnen bepalen én te kunnen beoordelen of de ruimte met het beschouwde gebruik voldoet aan de kwaliteitseisen voor normale situaties, moeten er aannames gedaan worden over de gemiddelde CO₂ productie van de aanwezigen. De CO₂ productie is, net als het ademvolume, afhankelijk van het activiteiten niveau en de leeftijd. In deze rekentool is uitgegaan van de gemiddelde CO₂ productie als bepaald in het artikel "Carbon dioxide generation rates for building occupants" [18], weergegeven in Tabel 4. Aangenomen wordt dat 50% van de aanwezigen vrouw is en 50% man. Verder is voor de samenstelling van de groepen van volwassenen een gelijke verdeling in leeftijd van 21 tot en met 60 jaar aangenomen (leeftijdsgroepen 21-30; 30-40; 40-50 en 50-60).

Tabel 4: gemiddelde CO₂ productie afhankelijk van leeftijd en activiteit [18]

CO ₂ productie [l/s] (bij 0 °C en 1 atm)				
	creche (0-4)	PO	VO	volwassene
activiteit	0 tot <4	4 tot <12	12 tot <21	>=21
slapen (MET 1)	0,001250	0,002100	0,003225	0,003388
rust (MET 1,2)	0,001517	0,002525	0,003925	0,004138
lichte inspanning (MET 1,4)	0,001783	0,002925	0,004600	0,004825
matige inspanning (MET 4)	0,005000	0,008425	0,013050	0,013800
zware inspanning (MET 6)	0,007500	0,012638	0,019575	0,020700

Uitgangspunten gebruik horende bij voor gedefinieerde functies

Het activiteiten niveau en het stemgebruik waarvan uitgegaan wordt bij de berekening berust op aannames van een representatieve situatie per functie. Deze uitgangspunten kunnen in de praktijk variëren en zijn van belangrijke invloed op de besmettingskans. Voor de uitgangspunten bij de voorgedefinieerde situaties zie bijlage 2.

Literatuur

- [1] N. E. Klepeis, W. C. Nelson, W. R. Ott, J. P. Robinson, A. M. Tsang en P. Switzer, „Berkely Lab; Indoor Environment; Energy Technologies Area,” Lawrence Berkeley National Laboratory, 2001. [Online]. Available: <https://indoor.lbl.gov/sites/all/files/lbnl-47713.pdf>.
- [2] L. Morawska en D. Milton, „It is Time to Address Airborne Transmission of COVID-19,” *Clinical Infectious Diseases*, 2020.
- [3] J. F. Schijven, L. C. Vermeulen, A. Swart, A. Meijer, E. Duizer en A. M. de Roda Husman, „Exposure assessment for airborne transmission of SARS-CoV-2 via breathing, speaking, coughing and sneezing,” *medRxiv*, 2020.
- [4] G. Buonanno, L. L. Stabile en L. Morawska, „Estimation of airborne viral emission: Quanta emission rate of SARS-CoV-2 for infection risk assessment,” *Environment International*, nr. 141, 2020.
- [5] *Bouwbesluit 2012, publicatiedatum 1 juli 2019, www.bouwbesluitonline.nl*, (2019).
- [6] WHO, „Noncommunicable diseases and air pollution,” 2019.
- [7] S. Miller, W. Nazaroff, J. Jimenez, A. Boerstra, G. Buonanno, S. Dancer, J. Kurnitski, L. Marr, L. Morawska en C. Noakes, „Transmission of SARS-CoV-2 by inhalation of respiratory aerosol in the Skagit Valley Chorale superspreading event,” *Indoor Air*, 2020.
- [8] C. Noakes en P. Sleight, „Mathematical models for assessing the role of airflow on the risk of airborne infection in hospital wards,” *Journal of the Royal Society Interface*.
- [9] G. Buonanno, L. Morawska en L. Stabile, „Quantitative assessment of the risk of airborne transmission of SARS-CoV-2 infection: prospective and retrospective applications,” *MedRxiv*, p. 32, 2020.
- [10] L. Liu, Y. Li, V. Nielsen, J. Wei en R. Jensen, „Short-range airborne transmission of expiratory droplets between two people,” *Indoor Air*.
- [11] J. L. Jimenez, *2020_COVID-19_Aerosol_Transmission_Estimator*, University of Colorado-Boulder, 2020.
- [12] J. Kurnitski, *REHVA COVID-19 Ventilation Calculator for estimation of ventilation effect on COVID-19 airborne infection*, REHVA COVID-19 Task Force, 2020.
- [13] G. Buonnano, *Airborne Infection Risk Screening Tool*, 2020.
- [14] M. Loomans, A. Boerstra, F. Franchimon en C. Wisse, „Rekenen aan het risico op infecties,” *TVVL Magazine*, 2020.

- [15] N. Davies, S. Abbot, R. Barnard, C. Jarvis, A. Kucharski, J. Munday, C. Pearson en e. al, „Estimated transmissibility and impact of SARS-CoV-2 lineage B.1.1.7 in England,” *Science*, 2021.
- [16] RIVM, *Nieuwe varianten gooien roet in het eten*, 2021.
- [17] U. S. E. P. Agency, „Exposure Factor Handbook; Chapter 6,” 2011.
- [18] A. Persily en L. de Jonge, „Carbon dioxide generation rates for building occupants,” *Indoor Air*, 2017.
- [19] W. de Gids, „Ventilatie, achtergrond van de eisen; TNO rapport EOS-LT DP 2015 WP1.1,” TNO, 2011.
- [20] Y. Li, „Indoor air: A short history of holistic and reductionistic approaches,” 1999.
- [21] J. E. Janssen, „The history of ventilation and temperature control,” *ASHRAE Journal*, vol. 1999, 1999.
- [22] C. “ R. A. T. v. 4. 1. Yaglou, „Ventilation Requirements,” *ASHVE Transactions*, nr. vol 42, 1936.
- [23] Gezondheidsraad, „Advies inzake het binnenhuisklimaat, in het bijzonder een ventilatieminimum, in Nederlandse woningen,” 1984.
- [24] ISSO, „Researchrapport 1: Onderzoek naar minimum verse luchttoevoer,” 1981.
- [25] P. Fanger en B. Berg-Munch, „Ventilation requirements for the control of body odor,” in *BUILDING ENERGY MANAGEMENT, TRANSITIONS IN TECHNOLOGIES AND POLICIES, PROC. SECOND INT. CONGRESS ON BUILDING ENERGY MANAGEMENT*, 1983.
- [26] *Bouwbesluit*, 2012.
- [27] NEN, *NPR-CR 1752:1999; Ventilatie van gebouwen - Ontwerpcriteria voor de binnenomstandigheden*, NEN, 1999.
- [28] ISSO, *Praktijkboek Gezonde Gebouwen; Cahier T1: Luchtkwaliteit woningbouw*, 2002.
- [29] TVVL, *PVE Gezonde kantoren*, 2018.
- [30] RVO, *PVE Frisse scholen*, 2015.
- [31] D. Wyon, „The effects of indoor air quality on performance and productivity,” *Indoor Air*, vol. 2004, nr. Volume 14, supplement 7, pp. 92-101, 2004.

Bijlage 1

gezondheid of comfort

Uit oogpunt van energiegebruik en besparing op investerings- en onderhoudskosten is het zo dat men soms in de verleiding komt om de luchtverversing in gebouwen fors te beperken. Om te voorkomen dat dit tot ongezonde binnenlucht leidt, worden er in de bouwregelgeving minimumeisen gesteld aan de hoeveelheid **verse luchttoevoer**.

De eerste Nederlandse ventilatievoorschriften uit 1952 in de Bouwverordening [19] zijn gebaseerd op de relatie tussen ventilatie, CO₂-concentratie en lichaamsgeurtjes. Maar het onderwerp ventilatie staat al veel langer op de agenda. Tijdens de hygiënerevolutie (die startte rond 1850) werd ventilatie vooral als een infectiepreventiemiddel ingezet, gericht op het verbeteren van de volksgezondheid met betrekking tot overdraagbare ziekten en vroegtijdige sterfte [20]. Tuberculose, waterpokken, en cholera veroorzaakten veel sterftegevallen in de 19^{de} eeuw. In relatie tot o.a. deze ziekten hanteerde men indertijd de miasmtheorie; het betrof de theorie dat stankoverlast, bijvoorbeeld rottende materialen en moerassen, de ziekteverwekkers waren. Pasteur (1864) ontdekte dat alleen levende organismen een ziekte konden veroorzaken en niet de stank zelf. Deze theorie wordt ook wel de (ziekte)kiementheorie (Germ Theory) genoemd. Eind 19^e / begin 20^e eeuw werden ventilatievoorschriften vooral opgesteld om juist de overdracht van infectieziekten te beperken. De American Society of Heating and Ventilation Engineers (ASHVE, later ASHRAE) heeft in 1895 een minimumeis van 50 m³/h per persoon overgenomen van Billings en stelde een modelwet voor in 1914 waar ook dit getal in werd opgenomen [21].

Uiteindelijk zijn het de studies van Yaglou [22] geweest uit de jaren '30 waardoor de ventilatie-eisen naar beneden werden bijgesteld tot 25 m³/h per persoon. Het nieuwe uitgangspunt werd hierbij (impliciet) dat vooral geuroverlast moest worden voorkomen; e.e.a. was dus meer gebaseerd op (olfactisch) comfort dan op het voorkomen van overdracht van infectieziekten.

wettelijk minimum

Een rapport van de Gezondheidsraad van begin jaren 80 [23] neemt deze waarde van minimaal 25 m³/h per persoon over ondanks een net iets eerder verschenen ISSO Researchrapport 1 [24]. In dat rapport wordt afgeraden minder dan 35 m³/h per persoon te ventileren bij normale kantooractiviteit om te voorkomen dat het percentage ontevreden door geuroverlast boven de 5% uitkomt. Het ISSO-rapport was deels gebaseerd op onderzoek van TNO waarbij in verschillende kantoorvertrekken onder verschillende omstandigheden (bezetting, ventilatiehoeveelheid, roken en niet roken) enquêtes afgenomen werden over de geurbeleving. In verschillende andere onderzoeken uit die tijd worden vergelijkbare waarden voorgeschreven [25].

Het Bouwbesluit 2012 schrijft voor nieuwbouw een hoeveelheid verse luchttoevoer voor van circa 15 m³/h tot 45 m³/h per persoon afhankelijk van de gebruiksfunctie (Tabel 5). Voor bijvoorbeeld kantoren gaat het om 23 m³/h per persoon, wat 35 % lager is dan wordt aanbevolen in ISSO Researchrapport 1 [24]. Opvallend is dat er weinig onderscheid gemaakt wordt naar activiteitsniveau of metabolisme. Zo gelden bijvoorbeeld voor een ruimte met een sportfunctie dezelfde eisen als voor een kantoorruimte.

Tabel 5: Eisen voor ventilatiecapaciteit voor een aantal gebruiksfuncties anders dan woonfuncties volgens het Bouwbesluit 2012

Functie	Nieuwbouw	Bestaande bouw
	m ³ /h pp	m ³ /h pp
Bijeenkomstfunctie		
a. voor kinderopvang	23,4	12,4
b. andere	14,4	7,6
Kantoorfunctie	23,4	12,4
Gezondheidszorgfunctie		
a. bedgebed	43,2	12,4
b. ander verblijfsgebied	23,4	12,4
Onderwijsfunctie	30,6	12,4
Sportfunctie	23,4	12,4
Winkelfunctie	14,4	7,6
Logiesfunctie	43,2	23
Celfunctie		
a. cel	43,2	23
b. ander verblijfsgebied	23,4	12,4

kwaliteit

Naast de wettelijke minimumeisen, geformuleerd in het Bouwbesluit 2012, [26] worden in de praktijk aanvullende richtlijnen geformuleerd om handvatten te bieden aan opdrachtgevers om een hoogwaardig binnenmilieu te creëren (nieuwbouw en renovatie), beter dan een basisbinnenmilieu met het Bouwbesluit als uitgangspunt. Men kan daarmee een afweging maken tussen kosten, comfort en energiegebruik.

De praktijkrichtlijn NPR-CR 1752 uit 1999 [27] (een CEN Technisch Report ter voorbereiding van de later verschenen EN 15152:2007) definieert 3 kwaliteitsklassen voor binnenlucht en ventilatie (Tabel 6). Hierin is de voorgeschreven ventilatiecapaciteit bij klasse C 30 m³/h pp (dit is de laagste kwaliteitsklasse); dit is iets beter dan het Bouwbesluit niveau (nieuwbouw) voor kantoren (23 m³/h pp). Klasse B is goed (40 m³/h pp) en Klasse A is zeer goed (60 m³/h pp). In [ISSO Praktijkboek gezonde gebouwen T1](#) [28] wordt deze classificering overgenomen en in het PVE Gezonde kantoren [29] worden ook deze 3 ambitieniveaus gedefinieerd. Voor scholen zijn er aanvullende eisen te vinden in het PVE Frisse scholen [30], ook weer met een 3-traps classificering (Tabel 6).

De norm NEN-EN 15152:2007 is inmiddels aangepast en vervangen door de nieuwe norm NEN-EN 16798-1:2019. Hierin worden 4 klassen gehanteerd waarbij de laagste, klasse IV alleen (volgens de norm) voor een beperkte tijd per jaar geaccepteerd dient te worden (Tabel 6).

Tabel 6: Aanvullende eisen kantoren en scholen

Klasse	NPR-CR 1752 (15)	PVE Frisse scholen (17) (omgerekend van dm ³ /s pp)	PVE gezonde Kantoren (16)	NEN-EN 16798-1 (18) (omgerekend van dm ³ /s pp)
A	70 m ³ /h pp	43,2 m ³ /h pp	60 m ³ /h pp	(Klasse I): 72 m ³ /h pp
B	50 m ³ /h pp	30,6 m ³ /h pp	40 m ³ /h pp	(Klasse II): 50,4 m ³ /h pp
C	30 m ³ /h pp	21,6 m ³ /h pp	25 m ³ /h pp	(Klasse III): 28,8 m ³ /h pp
				(Klasse IV): 19,8 m ³ /h pp

gezonde binnenlucht

Dat voldoende luchtverversing belangrijk is voor de volksgezondheid daar is iedereen het over eens. Naast de rol van ventilatie bij het beperken van infectieziekten wordt men ook blootgesteld aan vele andere biologische en chemische agentia die tot een slechte luchtkwaliteit kunnen leiden en daarmee tot chronische ziekten als hart- en vaatziekten, beroerte, longkanker en COPD [6]. In Europa zijn 595.000 sterfgevallen per jaar toe te schrijven aan slechte kwaliteit van de binnenlucht in woningen waarbij een deel van de vervuiling van buiten komt. Fijnstof, ozon, stikstofdioxide en sulfaatdioxide worden hier als de belangrijkste veroorzakers genoemd. De lijst aan biologische en chemische agentia die vaak worden aangetroffen in het binnenmilieu is nog veel groter en dit zorgt voor een additionele ziektelast. Een slechte binnenluchtkwaliteit brengt veel verborgen kosten met zich mee, bijvoorbeeld door verhoging van het ziekteverzuim, verlaging van de prestaties en vermindering van vastgoedwaarde [31].

Bijlage 2: uitgangspunten per voorgedefinieerde situatie

functie	ruimte	gebruiksfunctie Bouwbesluit	Bouwbesluit nieuwbouw eis ventilatie [dm ³ /s pp]	Bouwbesluit bestaande bouw eis ventilatie [dm ³ /s pp]	PVE- eisen	beschouwde leeftijdscategorie	stemgebruik aandeel ademen	stemgebruik aandeel spreken	stemgebruik aandeel zingen	gemiddelde virusuitstoot per uur q[quanta/h]	gemiddelde activiteiten niveau	gemiddeld ademvolume [l/h]	gemiddelde CO ₂ productie
kantoor	kantoorcel	Kantoor	6,5	3,44	K	>=21	0,9	0,1	0	13	rust	0,411	0,0041375
	kantoortuin	Kantoor	6,5	3,44	K	>=21	0,9	0,1	0	13	rust	0,411	0,0041375
	vergaderzaal (matig intensief praten)	Bijeenkomst overig	4	2,12	K	>=21	0,7	0,3	0	27	rust	0,411	0,0041375
	vergaderzaal (intensief praten)	Bijeenkomst overig	4	2,12	K	>=21	0,5	0,5	0	41	rust	0,411	0,0041375
school	klaslokaal PO (matig praten)	Onderwijs	8,5	3,44	S	4 tot <12	0,9	0,1	0	8	rust	0,366	0,002525
	klaslokaal PO (intensiever praten)	Onderwijs	8,5	3,44	S	4 tot <12	0,7	0,3	0	16	rust	0,366	0,002525
	klaslokaal VO (matig praten)	Onderwijs	8,5	3,44	S	12 tot <21	0,9	0,1	0	12	rust	0,441	0,003925
	klaslokaal VO (intensiever praten)	Onderwijs	8,5	3,44	S	12 tot <21	0,7	0,3	0	25	rust	0,441	0,003925
	personeelskamer (school)	Bijeenkomst overig	4	2,12	K	>=21	0,7	0,3	0	27	rust	0,411	0,0041375
publiek	vergaderzaal (matig intensief praten)	Bijeenkomst overig	4	2,12	K	>=21	0,7	0,3	0	27	lichte inspanning	0,975	0,004825
	vergaderzaal (intensief praten)	Bijeenkomst overig	4	2,12	K	>=21	0,5	0,5	0	41	lichte inspanning	0,975	0,004825
	congreszaal	Bijeenkomst overig	4	2,12	-	>=21	0,7	0,3	0	27	lichte inspanning	0,975	0,004825
	religieus	Bijeenkomst overig	4	2,12	-	>=21	0,6	0,2	0	117	lichte inspanning	0,975	0,004825
	zangrepetitie	Bijeenkomst overig	4	2,12	-	>=21	0,5	0,25	0,2	144	lichte inspanning	0,975	0,004825
horeca	cafe	Bijeenkomst overig	4	2,12	-	>=21	0,5	0,25	0,2	144	lichte inspanning	0,975	0,004825
	restaurant	Bijeenkomst overig	4	2,12	-	>=21	0,7	0,3	0	27	lichte inspanning	0,975	0,004825
	personeelskamer (horeca)	Bijeenkomst overig	4	2,12	-	>=21	0,7	0,3	0	27	rust	0,411	0,0041375
	overige ruimte (horeca)	Bijeenkomst overig	4	2,12	-	>=21	0,7	0,3	0	27	rust	0,411	0,0041375
verpleeghuis	gemeenschappelijke woonkamer	Gezondheidszorg overig	6,5	3,44	-	>=21	0,7	0,3	0	27	rust	0,411	0,0041375
	individuele wooneenheid	Woonfunctie	5,8	4,5	-	>=21	0,9	0,1	0	13	rust	0,411	0,0041375
	personeelskamer (verpleeghuis)	Bijeenkomst overig	4	2,12	-	>=21	0,7	0,3	0	27	rust	0,411	0,0041375
sport	sportzaal (fitness)	Sportfunctie	6,5	3,44	-	>=21	0,85	0,15	0	44	zware inspanning	4,53	0,0207
	sportzaal (groepsles)	Sportfunctie	6,5	3,44	-	>=21	0,35	0,15	0	270	zware inspanning	4,53	0,0207
	personeelskamer (sport)	Bijeenkomst overig	4	2,12	-	>=21	0,7	0,3	0	27	rust	0,411	0,0041375
	kantine	Bijeenkomst overig	4	2,12	-	>=21	0,7	0,3	0	27	rust	0,411	0,0041375
	overige ruimte (sport)	Bijeenkomst overig	4	2,12	-	>=21	0,7	0,3	0	27	rust	0,411	0,0041375
gevangenis	cel	Celfunctie - cel	12	6,4	-	>=21	0,9	0,1	0	13	rust	0,411	0,0041375
	personeelskamer (gevangenis)	Bijeenkomst overig	4	2,12	-	>=21	0,7	0,3	0,5	27	rust	0,411	0,0041375
	kantine	Celfunctie - overig	6,5	3,44	-	>=21	0,7	0,3	0	27	rust	0,411	0,0041375
	overige ruimte (gevangenis)	Celfunctie - overig	6,5	3,44	-	>=21	0,7	0,3	0	27	rust	0,411	0,0041375
winkel	winkelruimte	Winkelfunctie (winkelend publiek)	4	2,12	-	>=21	0,9	0,1	0	13	rust	0,411	0,0041375
	personeelskamer (winkel)	Bijeenkomst overig	4	2,12	-	>=21	0,7	0,3	0	27	rust	0,411	0,0041375
	overige ruimte (winkel)	Bijeenkomst overig	4	2,12	-	>=21	0,7	0,3	0	27	rust	0,411	0,0041375